



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



# ANÁLISIS DE LOS FACTORES GEOLÓGICOS Y MINERALÓGICOS QUE CONDICIONARON EL EVENTO DE REACTIVIDAD EN FASE 7 DEL RAJO ESPERANZA, MINA CENTINELA.

Memoria para optar al Título de Geólogo

**Tomás Ernesto Cancino Rodríguez**

**Profesor Patrocinante:** Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado.

**Profesional Guía:** Sr. Héctor Aníbal Villalobos Kirmayr.

**Profesores Comisión:** Dra. Javiera Paz Gerding González.

MSc. Abraham Elías González Martínez.

Concepción, 2023

# ÍNDICE

Página

## RESUMEN

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. Objetivos</b> .....	2
1.1.1. Objetivo general .....	2
1.1.2. Objetivos específicos .....	2
<b>1.2. Ubicación y accesos</b> .....	2
<b>1.3. Trabajos anteriores</b> .....	2
<b>1.4. Agradecimientos</b> .....	4
<b>2. MARCO GEOLÓGICO</b> .....	5
<b>2.1. Franja Eoceno medio – Oligoceno temprano</b> .....	5
<b>2.2. Sistema de Fallas de Domeyko</b> .....	7
<b>2.3. Distrito Minero Centinela</b> .....	7
<b>2.4. Depósito Esperanza</b> .....	10
2.4.1. Estructuras mayores .....	11
2.4.2. Litologías del yacimiento .....	12
2.4.2.1. Estratos Las Lomas (Triásico Superior – Jurásico Inferior) .....	12
2.4.2.2. Grupo Caracoles (Bajociano – Kimmeridgiano) .....	12
2.4.2.3. Formación Quebrada Mala (Cretácico Superior) .....	13
2.4.2.4. Intrusivos hipabisales .....	13
2.4.3. Alteraciones hidrotermales .....	14
2.4.4. Mineralización del yacimiento .....	15
<b>3. MARCO TEÓRICO: MACIZOS ROCOS REACTIVOS CON EXPLOSIVOS EN BASE A NITRATO DE AMONIO</b> .....	17
<b>3.1. Explosivos en base a nitrato de amonio</b> .....	17
<b>3.2. Rocas reactivas</b> .....	18
<b>3.3. Reacción de rocas sulfuradas con nitrato de amonio</b> .....	18
<b>3.4. Factores que inciden en la reactividad de macizos rocosos</b> .....	21
<b>3.5. Manejo de macizos rocosos potencialmente reactivos</b> .....	22
3.5.1. Zonificación preliminar .....	22
3.5.2. Muestreo para análisis de la reactividad .....	23
3.5.3. Análisis de reactividad en laboratorio .....	24
3.5.4. Medidas operacionales .....	24
3.5.4.1. Medición de temperatura en pozos .....	24
3.5.4.2. Utilización de explosivos especiales .....	25
3.5.4.3. Consideraciones en el carguío y disparo .....	25

<b>4. METODOLOGÍA DE TRABAJO</b> .....	26
<b>4.1. Etapa de gabinete I</b> .....	26
<b>4.2. Etapa de laboratorio</b> .....	26
<b>4.2.1. Ensayos de reactividad y <i>sleep time</i></b> .....	26
4.2.1.1. Ensayo de reactividad .....	26
4.2.1.2. Ensayo <i>sleep time</i> .....	29
<b>4.2.2. Análisis mineralógicos</b> .....	30
4.2.2.1. Microscopía óptica .....	31
4.2.2.2. Fluorescencia de rayos X (FRX) .....	31
4.2.2.3. Difracción de rayos X (DRX) .....	31
4.2.2.4. Análisis QEMSCAN® .....	33
<b>4.3. Etapa de gabinete II</b> .....	35
<b>5. ANTECEDENTES DE REACTIVIDAD EN RAJO ESPERANZA</b> .....	36
<b>5.1. Antecedentes generales</b> .....	36
<b>5.2. Reactividad en Fase 6 y Fase 8</b> .....	37
5.2.1. Ensayos de reactividad .....	37
5.2.2. Ensayos de <i>sleep time</i> .....	38
5.2.3. Análisis y recomendaciones emitidas .....	39
<b>5.3. Reactividad en Fase 8 Banco 1816</b> .....	40
5.3.1. Ensayos de reactividad .....	42
5.3.2. Ensayos de <i>sleep time</i> .....	43
<b>6. EVENTO DE REACTIVIDAD EN FASE 7</b> .....	44
<b>6.1. Descripción del evento</b> .....	44
<b>6.2. Geología del sector del evento de reactividad</b> .....	45
<b>6.3. Muestreo en el sector del evento</b> .....	47
<b>7. RESULTADOS DE REACTIVIDAD Y MINERALOGÍA DE LAS MUESTRAS DE FASE 7</b> .....	48
<b>7.1. Análisis de reactividad</b> .....	48
7.1.1. Ensayos de reactividad .....	48
7.1.2. Ensayos de <i>sleep time</i> .....	49
<b>7.2. Análisis mineralógicos</b> .....	50
7.2.1. Microscopía óptica .....	51
7.2.2. Fluorescencia de rayos X .....	54
7.2.3. Difracción de rayos X .....	55
7.2.4. Análisis QEMSCAN® .....	57
7.2.4.1. Cuantificación de la mineralogía modal .....	57
7.2.4.2. Tamaño promedio de las fases .....	58
7.2.4.3. Asociación mineral .....	58
7.2.4.4. Grado de liberación de la pirita .....	59

<b>8. DISCUSIÓN</b> .....	64
<b>8.1. Antecedentes de reactividad en Fase 6 y Fase 8</b> .....	64
<b>8.2. Evento de reactividad en Fase 7</b> .....	64
<b>8.2.1. Ensayos de reactividad y <i>sleep time</i></b> .....	65
<b>8.2.2. Análisis mineralógicos</b> .....	65
8.2.2.1. Microscopía óptica .....	65
8.2.2.2. Fluorescencia de rayos X .....	67
8.2.2.3. Difracción de rayos X .....	68
8.2.2.4. Análisis QEMSCAN® .....	70
<b>8.3. Utilidad de las técnicas analíticas</b> .....	72
<b>9. CONCLUSIONES</b> .....	73
<b>10. REFERENCIAS</b> .....	74
<b>ANEXOS</b> .....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. 1. Mapa de ubicación y accesos .....	3
2. 1. Franja Eoceno medio – Oligoceno temprano .....	6
2. 2. Geología del Distrito Minero Centinela .....	8
2. 3. Geología del depósito Esperanza y la zona circundante .....	11
2. 4. Sección estructural esquemática del depósito Esperanza .....	12
2. 5. Perfil esquemático de la geología del depósito Esperanza .....	13
2. 6. Perfil esquemático de las alteraciones hidrotermales del depósito Esperanza .....	15
2. 7. Secuencia paragenética del depósito Esperanza .....	16
3. 1. Etapas de la reacción entre los sulfuros y el nitrato de amonio .....	19
3. 2. Esquema de un pozo de tronadura y su <i>cutting</i> de perforación .....	23
3. 3. Esquema de extracción de muestras desde el <i>cutting</i> de perforación .....	24
4. 1. Montaje para el ensayo de reactividad .....	27
4. 2. Termograma típico de una reacción auto sostenida .....	28
4. 3. Termograma típico de una reacción no auto sostenida .....	28
4. 4. Criterio de criticidad según el parámetro de intensidad de reacción .....	29
4. 5. Criterio de criticidad según los resultados del ensayo <i>sleep time</i> .....	30
4. 6. Difracción de rayos X por un sólido cristalino .....	32
4. 7. Lista secundaria condensada utilizada en este trabajo .....	34
4. 8. Grado de liberación/oclusión de una fase mineral .....	35
5. 1. Rajo Esperanza actual y rajo final proyectado .....	36
5. 2. Fase 6, Fase 8 y pozos de tronadura muestreados .....	37
5. 3. Fase 8 Banco 1816 .....	41

5. 4. Detalle de zona de muestreo 2 y pozos de tronadura .....	42
6. 1. Localización del evento de reactividad en Fase 7 .....	44
6. 2. Detalle malla de tronadura 708 .....	45
6. 3. Modelos de bloques Fase 7 Banco 2152 .....	46
6. 4. Modelos de bloques mineralización Fase 7 Banco 2152 .....	46
6. 5. Muestreo de la zona del evento de reactividad en Fase 7 .....	47
7. 1. Ensayo de reactividad muestra 510-410 .....	48
7. 2. Muestras reaccionadas en el ensayo de <i>sleep time</i> con el producto Pirex®50 .....	50
7. 3. Fotomicrografía briqueta pulida de la muestra 510 .....	51
7. 4. Fotomicrografías de la mineralización metálica en la muestra 510-410(1) .....	53
7. 5. Fotomicrografía muestra 3504 .....	54
7. 6. Asociación mineral (transiciones) de la muestra 407 .....	59
7. 7. Grado de liberación de la pirita según su porcentaje en peso en cada muestra .....	61
7. 8. Grado de liberación de la pirita según porcentaje normalizado al total de pirita .....	63
8. 1. Composición química promedio representativa de rocas ígneas .....	67

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
5. 1. Resultados de ensayos de reactividad en muestras de Fase 6 y Fase 8 .....	38
5. 2. Resultados de ensayos de <i>sleep time</i> para las muestras de Fase 6 y Fase 8 .....	39
5. 3. Resultados de reactividad y <i>sleep time</i> contrastados con información geológica para cada muestra .....	39
5. 4. Resultados de ensayos de reactividad para las muestras de Fase 8 Banco 1816 .....	43
5. 5. Resultados de ensayos de <i>sleep time</i> para las muestras de Fase 8 Banco 1816 .....	43
7. 1. Resultados de los ensayos de reactividad para las muestras del evento en Fase 7 .....	49
7. 2. Resultados de los ensayos de <i>sleep time</i> para las muestras del evento en Fase 7 .....	50
7. 3. Mineralogía primaria mediante microscopía óptica .....	51
7. 4. Mineralogía de alteración mediante microscopía óptica .....	52
7. 5. Mineralización metálica mediante análisis de microscopía óptica .....	52
7. 6. Concentraciones elementales mediante análisis por fluorescencia de rayos X .....	55
7. 7. Resultados de la semicuantificación automática por análisis de difracción de rayos X .	56
7. 8. Composición de las muestras mediante análisis QEMSCAN® .....	57
7. 9. Tamaño promedio de las fases medidas mediante QEMSCAN® .....	58
7. 10. Grado de la liberación de la pirita según su porcentaje en peso en cada muestra .....	60
7. 11. Grado de liberación de la pirita según porcentaje normalizado al total de pirita por muestra .....	62

## RESUMEN

En minería a cielo abierto, la tronadura es una operación fundamental que implica la detonación controlada de pozos de tronadura cargados con productos explosivos. En estos pozos, y bajo ciertas condiciones fisicoquímicas, el contacto directo de los explosivos con el macizo rocoso puede provocar reacciones espontáneas y exotérmicas, fenómeno conocido como rocas reactivas. Este trabajo se centra en el estudio de un evento de rocas reactivas ocurrido en el rajo Esperanza en la Región de Antofagasta, donde este tipo de reacciones provocaron emisiones gaseosas y la detonación no controlada de un pozo de tronadura.

El yacimiento Esperanza es un depósito tipo pórfido de cobre y oro perteneciente a la franja Eoceno medio – Oligoceno temprano, que se relaciona al Sistema de Fallas de Domeyko y que contiene mineralización hipógena de sulfuros además de minerales formados por procesos de alteración supérgena.

Las rocas reactivas son aquellas capaces de reaccionar con nitrato de amonio, que es el componente principal de la mayor parte de los explosivos utilizados en la minería. La reactividad de las rocas se atribuye principalmente a la presencia de minerales de hierro, en especial de sulfuros como la pirita. No obstante, para abordar este problema se debe considerar a la totalidad del macizo rocoso con sus condiciones geológicas particulares, para incorporar un mayor número de factores al momento de establecer una zonificación de la reactividad para tomar medidas preventivas.

En este trabajo, se revisan estudios previos de reactividad en el rajo y se analizan las muestras obtenidas en el sector del evento mediante ensayos de reactividad y *sleep time* para caracterizar su comportamiento reactivo. Además, se llevan a cabo análisis mineralógicos que incluyen microscopía óptica, fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X y QEMSCAN®.

Los estudios previos en el rajo evidencian la capacidad de estas rocas de reaccionar con nitrato de amonio, aunque las condiciones sean diferentes en los distintos sectores. Además, a partir de los ensayos de reactividad y *sleep time*, se determina que las muestras del sector del evento desarrollan reacciones exotérmicas en tiempos acotados al estar en contacto con nitrato de amonio.

De los análisis mineralógicos, se determina que hay altas concentraciones de pirita, uno de los principales minerales asociados a fenómenos de reactividad. Además de la pirita, el hierro se encuentra formando una variedad de sulfuros, óxidos, oxihidróxidos y sulfatos, que podrían tener un rol importante en el comportamiento reactivo de estas muestras.

Entre los minerales de hierro identificados, destaca la szomolnokita, un sulfato que se forma a partir de la oxidación de pirita en ambientes áridos, y que es altamente soluble en presencia de humedad, liberando hierro al sistema. La combinación de pirita y szomolnokita puede ser una asociación mineralógica crítica que controla la reactividad del sector donde ocurrió el evento.

Previo al evento de reactividad, no se realizaba un mapeo exhaustivo de estos minerales, especialmente en las zonas de bajo interés económico. Los resultados de este trabajo ponen en evidencia la importancia del mapeo de pirita y szomolnokita para lograr una zonificación de la reactividad del rajo Esperanza.

## 1. INTRODUCCIÓN

La tronadura es una de las operaciones fundamentales en minería, y su adecuada planificación y ejecución son esenciales para reducir costos, minimizar impactos ambientales y prevenir accidentes (Abbaspour y otros, 2018).

En minería a cielo abierto, una tronadura implica típicamente la detonación controlada de una malla de tronadura, que es un polígono donde se agrupa una serie de filas de pozos perforados y cargados con productos explosivos.

Los explosivos son materiales capaces de liberar grandes cantidades de energía súbitamente, provocando aumentos de presión y temperatura, y una onda de choque que produce la fragmentación de la roca. La mayor parte de los explosivos utilizados en la industria minera son en base a nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), que se mezcla con combustibles y diversas sustancias para modificar sus propiedades (Zhang, 2016).

El diseño de una malla de tronadura incluye, entre otras cosas, establecer los tipos de explosivos a utilizar, además de la distribución y dimensiones de los pozos de tronadura, con el propósito de lograr la fragmentación de la roca a una granulometría adecuada para su carguío y transporte, y controlar la energía transmitida al resto del macizo rocoso para mantener la estabilidad de los taludes a medida que avanza el desarrollo del rajo (Zhang, 2016).

Al cargar un pozo de tronadura con un producto explosivo, su contacto directo con la roca puede provocar, bajo ciertas condiciones fisicoquímicas, la ocurrencia de reacciones no deseadas entre el nitrato de amonio y el macizo rocoso. Estas reacciones pueden causar desde la emisión de gases tóxicos y contaminantes, hasta explosiones prematuras no controladas de la carga explosiva, poniendo en riesgo el desarrollo de la actividad minera (AEISG, 2020).

Este fenómeno es conocido como rocas reactivas o *reactive ground*, y su estudio es de gran importancia para el correcto desarrollo de los procesos de tronadura.

Este trabajo se centra en el estudio de un evento de rocas reactivas ocurrido durante la explotación de Fase 7 en el depósito Esperanza, donde la incompatibilidad química entre el producto explosivo y el macizo rocoso provocó emisiones gaseosas y la detonación prematura y no controlada de un pozo de tronadura.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo general**

- Determinar los potenciales factores involucrados en el evento de reactividad ocurrido en Fase 7 del rajo Esperanza.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Analizar las variables que controlan la reactividad en los distintos sectores del rajo Esperanza.
- Caracterizar la mineralogía y comportamiento reactivo del material muestreado en el sector del evento de reactividad.
- Identificar los factores mineralógicos y geológicos que podrían condicionar el comportamiento reactivo de este sector del rajo.

## **1.2. Ubicación y accesos**

El área de estudio se encuentra dentro del Distrito Minero Centinela, ubicado en el flanco occidental de la Cordillera de Domeyko en la Región de Antofagasta, aproximadamente a 160 km al NE de la ciudad de Antofagasta, 60 km al SO de Calama y 30 km al SE de Sierra Gorda (Fig. 1.1).

En específico, el área corresponde al rajo Esperanza, ubicado en  $69^{\circ}03'O$ ,  $22^{\circ}58'S$ , al cual se accede mediante los caminos internos de Minera Centinela.

El acceso a las instalaciones de esta minera se realiza a través de la ruta B-229 desde Sierra Gorda, hasta donde se puede llegar mediante la ruta 25 desde Calama o tomando la ruta 5 desde Antofagasta y accediendo a la ruta 25 en la salida correspondiente.

## **1.3. Trabajos anteriores**

Las primeras publicaciones científicas relevantes sobre el fenómeno de reactividad se remontan a las investigaciones de Lukaszewski (1968) y Forshey y otros (1968), que surgen a raíz de distintos eventos de reactividad ocurridos entre 1963 y 1967 en minas de Australia y Estados Unidos. En estos trabajos, se evalúa la interacción entre explosivos en base a nitrato de amonio y muestras de sulfuros, determinando que ciertos compuestos como la urea o el carbonato de calcio pueden inhibir la reactividad.

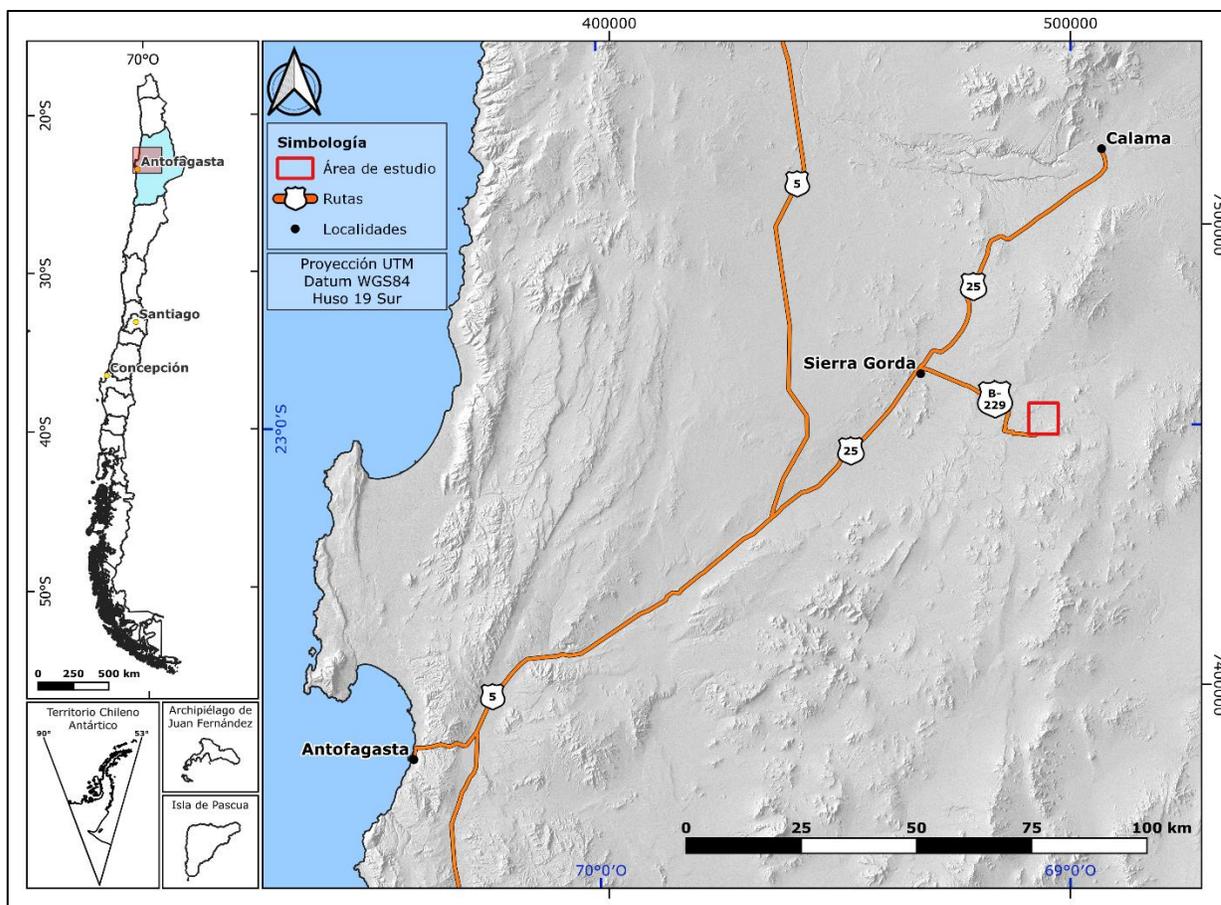


Figura 1.1: Mapa de ubicación y accesos.

Incluyendo el trabajo de Forshey y otros (1968), las publicaciones de la *United States Bureau of Mines* durante las décadas del 60 y 70 se centran principalmente en el estudio de la reactividad mediante diferentes tipos de ensayos de laboratorio, con el propósito de determinar compuestos inhibidores aplicables en la fabricación de explosivos. En particular, el trabajo de Miron y otros (1979) describe detalladamente un método de laboratorio para analizar la reactividad, el cual ha sido adaptado por Enaex para desarrollar el “ensayo de reactividad”, que se describe en capítulos posteriores.

Entre los trabajos más relevantes, se encuentra el de Rumball (1991), quien mediante el estudio de la interacción entre el nitrato de amonio y los sulfuros de la Formación *Mt McRae* en Australia, propone que las reacciones se pueden dividir en cuatro etapas.

Estudios posteriores como los de Briggs y Kelso (2001) y Karabanov y Sivtsov (2022), generalizan el mecanismo propuesto por Rumball (1991), reduciendo las fases a tres etapas básicas (inducción, intermedia e ignición), caracterizadas por reacciones químicas específicas.

Además de los ya mencionados, múltiples investigaciones analizan los mecanismos de reacción y los factores que influyen en la reactividad de un macizo rocoso, definiendo medidas para la prevención y control de este fenómeno. Entre ellos, destacan los estudios de Botha (2014), Priyananda y otros (2015) y Djerdjev y otros (2018). No obstante, uno de los documentos más ampliamente utilizados para fines preventivos es el publicado por el AEISG (*Australasian Explosives Industry Safety Group Inc.*), denominado *Code of Practice Elevated Temperature and Reactive Ground* (2020), el cual en su reciente quinta edición aborda métodos para la evaluación de la potencial reactividad, protocolos de muestreo, ensayos de laboratorio y medidas preventivas para la tronadura en sitios potencialmente reactivos, entre otros temas.

En el caso del rajo Esperanza, si bien la geología y la génesis del yacimiento son temas tratados ampliamente en la literatura científica, el estudio específico de la reactividad en el depósito ha sido llevado a cabo exclusivamente por Enaex, y los resultados de estos estudios se abordan en detalle en capítulos posteriores.

#### **1.4. Agradecimientos**

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas de Enaex con las que tuve la oportunidad de interactuar durante estos meses. Especialmente, agradezco a Héctor Villalobos y María Virginia Ramírez, por confiar en mí para abordar este tema de memoria y por su orientación y apoyo durante este período.

Además, quiero agradecer a todos los profesores y funcionarios de la Universidad de Concepción que contribuyeron a mi formación, en particular a la profesora Fernanda Álvarez, por aceptar ser mi profesora patrocinante, por su gentileza para responder a mis múltiples consultas y por su constante ayuda durante este período.

También agradezco mucho a los profesores de la comisión evaluadora por sus acertadas observaciones para mejorar este trabajo, especialmente a la profesora Javiera Gerding, quien además fue de gran ayuda en la interpretación de los análisis mineralógicos.

Por último, quiero agradecer a mis amigos y a mi familia por su constante apoyo y cariño. Agradezco profundamente a mis padres y a mi hermano por estar siempre conmigo y por ser como son.

## **2. MARCO GEOLÓGICO**

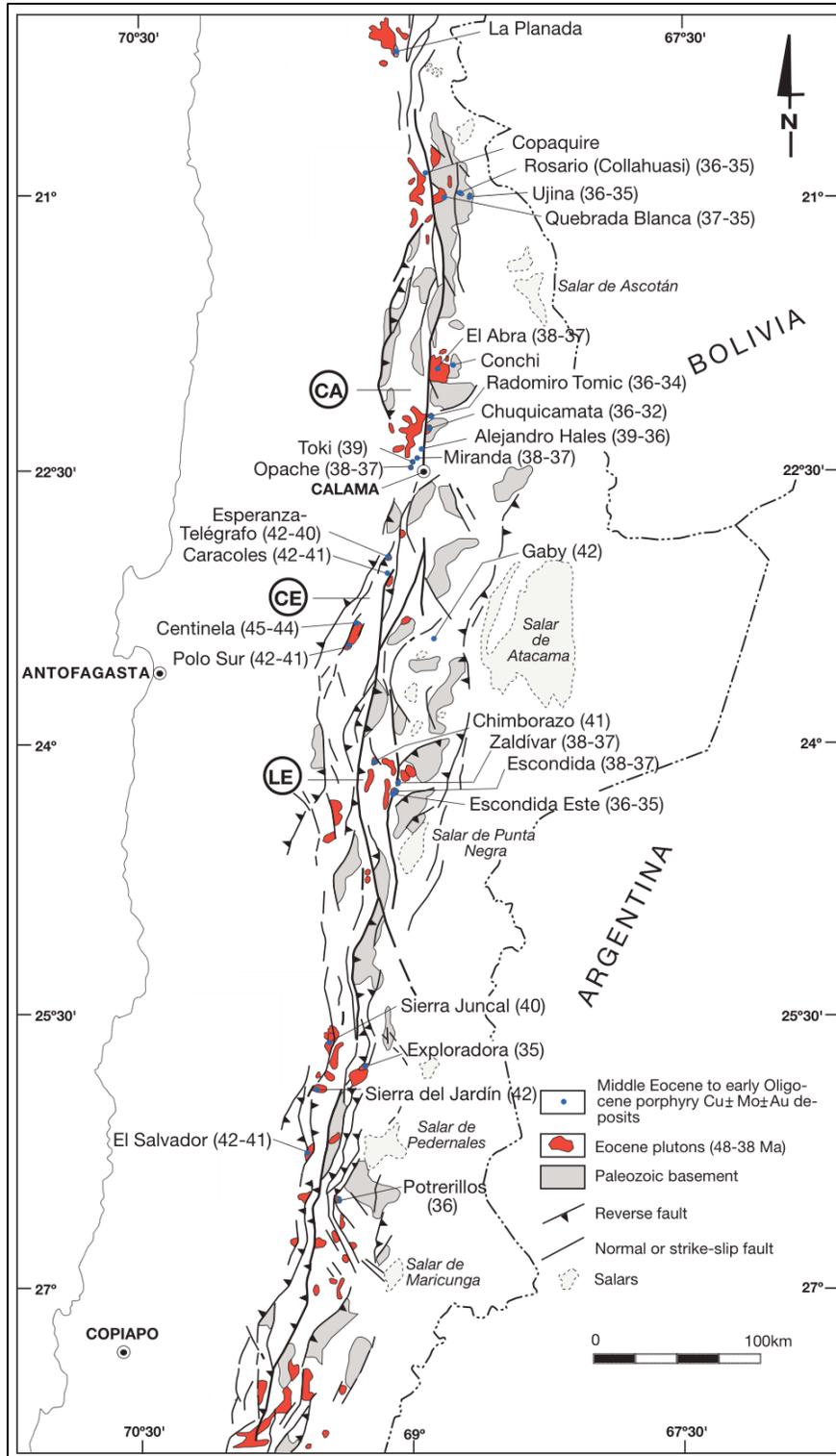
### **2.1. Franja Eoceno medio – Oligoceno temprano**

En el flanco occidental de los Andes centrales, abarcando el sur de Perú y el norte y centro de Chile, se ubica la provincia metalogénica de los Andes, ampliamente reconocida por su abundante mineralización de cobre, especialmente en depósitos de tipo pórfido cuprífero (Maksaev y Zentilli, 1988; Sillitoe y Perelló, 2005).

Estos depósitos se hallan distribuidos en extensas franjas metalogénicas, dispuestas en paralelo al margen continental y a la fosa Perú-Chile. Cada una de estas franjas se desarrolló durante una época metalogénica distinta, y representan períodos acotados de mineralización en la evolución geológica del margen andino durante los cuales se dieron las condiciones necesarias para el emplazamiento de este tipo de depósitos, los que fueron interrumpidos por largos intervalos de tiempo en los que su formación estuvo ausente (Maksaev y Zentilli, 1988; Sillitoe, 1988; Mpodozis y Cornejo, 2012).

En los Andes chilenos, una de las franjas de mayor relevancia es la correspondiente al Eoceno medio – Oligoceno temprano (43 – 31 Ma). Los depósitos que forman parte de esta franja fueron emplazados de manera contemporánea al evento de deformación conocido como Fase Tectónica Incaica, la que se asocia con el alzamiento de la actual Cordillera de Domeyko (Precordillera del norte de Chile) y la activación del Sistema de Fallas de Domeyko. En la Cordillera de Domeyko, a lo largo de este sistema de fallas, se ubica la mayoría de los depósitos de esta franja (Maksaev y Zentilli 1988; Amilibia y otros, 2008; Mpodozis y Cornejo; 2012).

La franja Eoceno medio – Oligoceno temprano alberga algunos de los mayores depósitos de cobre a nivel global, especialmente en la Región de Antofagasta, en la que destacan los distritos mineros Chuquicamata, Centinela y Escondida (Maksaev y Zentilli, 1988; Hervé y otros, 2012; Mpodozis y Cornejo, 2012; García y otros, 2017; Fig. 2.1). En el Distrito Minero Centinela, se ubica el depósito Esperanza, objeto de estudio en este trabajo de memoria.



**Figura 2.1: Franja Eoceno medio – Oligoceno temprano.** Se muestran las principales trazas del Sistema de Fallas de Domeyko y algunos depósitos pertenecientes a esta franja y sus edades (en paréntesis, Ma). Además, se muestra la ubicación de los principales distritos mineros de la Región de Antofagasta (CA = Chuquicamata – El Abra; CE = Centinela y LE = La Escondida). Modificado de Mpodozis y Cornejo (2012).

## 2.2. Sistema de Fallas de Domeyko

El Sistema de Fallas de Domeyko (SFD) es una zona de deformación regional de más de 1.000 km de largo y entre 40 a 60 km de ancho que se extiende por la cordillera de Domeyko en el norte de Chile (Maksaev y Zentilli, 1988; Mpodozis y Cornejo, 2012). Las fallas tienen una orientación general de N5°E y generalmente son verticales a subverticales (Maksaev y Zentilli, 1988).

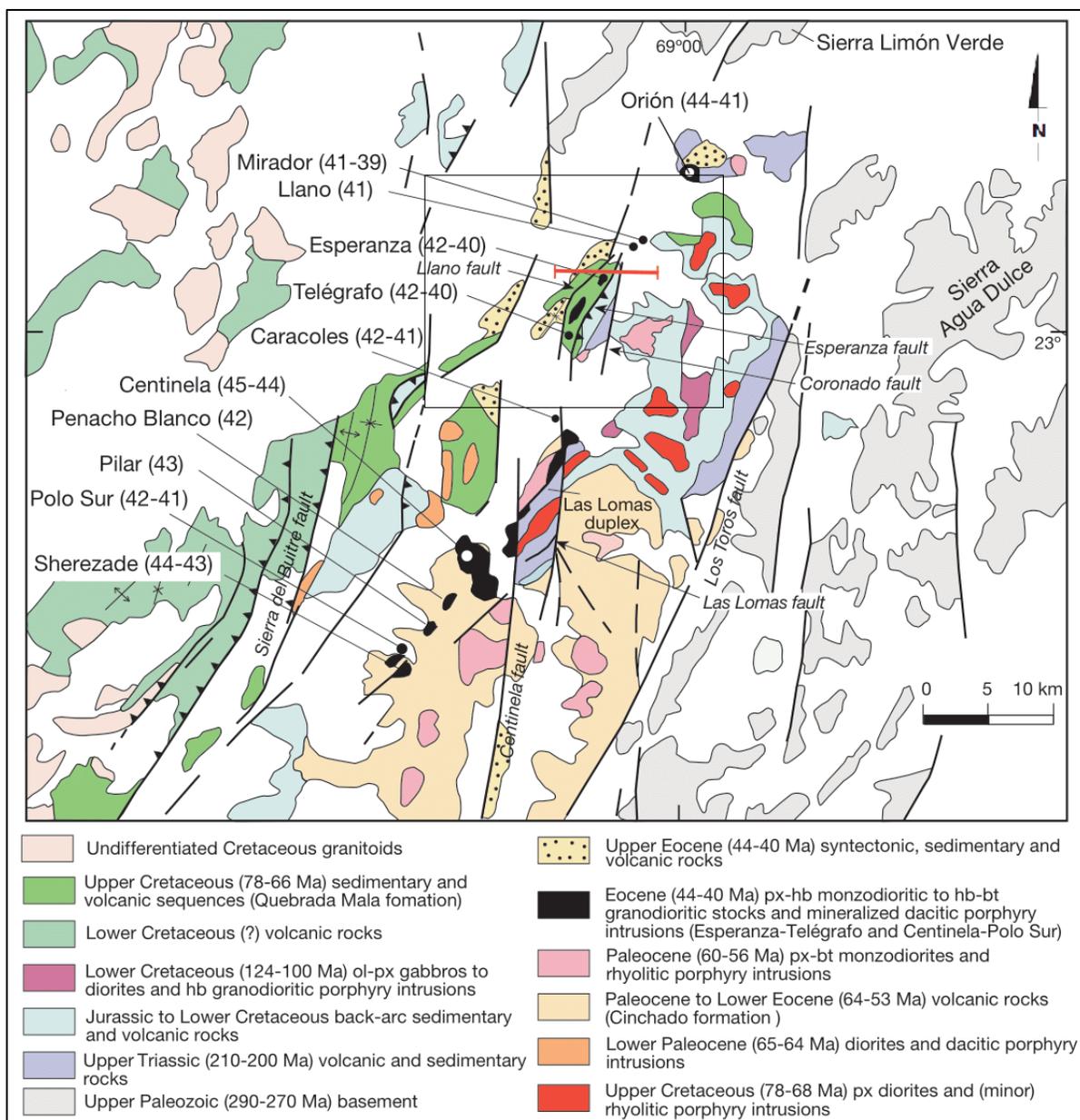
Este sistema de fallas se compone de un complejo arreglo de estructuras que incluye fallas normales, fallas de rumbo y fallas inversas y pliegues de piel gruesa y delgada, cuyo principal período de actividad habría ocurrido entre el Eoceno medio al Oligoceno temprano (45 – 33 Ma), durante la Fase Incaica, provocando un importante episodio de exhumación de la Cordillera de Domeyko y el emplazamiento de sistemas de pórfidos de Cu y Cu-Mo en el norte de Chile (Maksaev y Zentilli, 1988; Mpodozis y Cornejo, 2012).

En el Distrito Minero Centinela, estas fallas controlan la distribución de los sistemas tipo pórfido y presentan evidencias de actividad previa, sincrónica y posterior a la mineralización (Muhr y Perelló, 2009).

Entre las fallas mayores del distrito se encuentran Atravesado, Centinela, Telégrafo, Las Lomas, Esperanza y Colorado, que configuran una zona de deformación de entre 3 a 5 km de ancho de dirección NS a NNE, donde las fallas mayores limitan bloques estructurales de rocas mesozoicas y cenozoicas que son separados por extensas cubiertas de gravas aluviales (Mpodozis y otros, 2009; Marquardt y otros, 2012; Riquelme y otros, 2018).

## 2.3 Distrito Minero Centinela

El Distrito Minero Centinela (DMC), se encuentra en la Región de Antofagasta, aproximadamente a 60 km al SSO de la ciudad de Calama, en el borde occidental de la Cordillera de Domeyko. En este distrito, aflora una gran variedad de rocas intrusivas, volcánicas, metamórficas y sedimentarias, con edades desde el Paleozoico Superior hasta el Cenozoico (Riquelme y otros, 2018; Fernández, 2019; Fig. 2.2), las que albergan numerosos yacimientos de tipo pórfido cuprífero del Eoceno medio - tardío (45 - 39 Ma), incluyendo los depósitos Mirador, Llano, Esperanza, Esperanza Sur, Caracoles, Centinela, Penacho Blanco, Polo Sur y Sherezade. Además de los depósitos de Cu-exótico El Tesoro Central y El Tesoro NE (Mpodozis y Cornejo, 2012; Fernández, 2019; Kojima y otros, 2021).



**Figura 2.2: Geología del Distrito Minero Centinela.** Se muestra la distribución de los depósitos tipo pórfido de cobre del distrito y su edad en Ma. El recuadro negro indica la ubicación de la figura 2.3 y la línea roja de dirección EO indica la ubicación del perfil de la figura 2.4. Modificado de Mpodozis y Cornejo (2012).

Las rocas más antiguas del sector se encuentran en la Cordillera de Domeyko, en la zona oriental del distrito, donde aflora el basamento Paleozoico compuesto por rocas plutónicas y volcánicas con metamorfismo de bajo grado, con edades desde el Carbonífero tardío al Pérmico temprano, que evidencian el magmatismo a lo largo del borde suroccidental de Gondwana en este período (Mpodozis y Cornejo, 2012; Maksae y otros 2014).

Durante el Triásico Superior, asociada al desarrollo de cuencas de rift en las etapas tempranas de la separación de Gondwana, se deposita en la zona una serie de rocas volcánicas y sedimentarias, denominada Estratos Las Lomas (Marinovic y García, 1999; Amilibia y otros, 2008; Maksaev y otros, 2014; Riquelme y otros, 2018).

Con el comienzo del ciclo andino en el Jurásico temprano, se reanuda la subducción en el margen occidental de Gondwana, y se desarrolla el Arco de La Negra (Charrier y otros, 2007), durante este período, en una cuenca de trasarco donde se ubica actualmente el distrito Centinela, se deposita el Grupo Caracoles, conformado por rocas marinas fosilíferas y evaporitas del Jurásico (Marinovic y García, 1999; Mpodozis y Cornejo, 2012; Riquelme y otros, 2018).

En el Cretácico temprano, y pese a que el frente magmático se ubicaba en la actual Cordillera de la Costa, en el sector del DMC, se registra actividad magmática representada por algunos gabros y cuarzo-dioritas que intruyen a las rocas del Grupo Caracoles (Mpodozis y Cornejo, 2012).

Durante el Cretácico tardío al Paleógeno, el arco magmático migra hacia el este, hasta ubicarse en la actual Cordillera de Domeyko, lo que provoca la inversión tectónica de la cuenca de trasarco y la deformación y exhumación de las unidades previamente mencionadas (Amilibia y otros, 2008; Mpodozis y otros, 2005 en Sanchez, 2017). Sobre estas unidades, y en discordancia, yace la Formación Quebrada Mala, una secuencia volcánica del Cretácico Superior que incluye principalmente lavas andesíticas, además de brechas y rocas sedimentarias (Marinovic y García, 1999 en Riquelme y otros, 2018; Mpodozis y otros, 1993 en Kojima y otros, 2021). También durante el Cretácico Superior, se produce la intrusión de un grupo de pórfidos de composición diorítica a riolítica, que, en conjunto con las rocas de la Formación Quebrada Mala, evidencian la actividad del arco magmático en esta zona (Mpodozis y Cornejo, 2012).

Durante el Paleoceno temprano y el Eoceno temprano continua el volcanismo en este sector, produciéndose la depositación de la Formación Cinchado, una sucesión volcánica que incluye lavas de composición basáltica a andesítica, además de ignimbritas y domos de composición riolítica. También en este período, se produce el emplazamiento de un diverso grupo de intrusivos epizonales y pórfidos, los cuales no están asociados a mineralización (Mpodozis y Cornejo, 2012).

Como ya se ha mencionado, en el Eoceno medio – Oligoceno temprano se produce la Fase Tectónica Incaica, durante la cual ocurre el emplazamiento de los sistemas de pórfidos mineralizados del distrito. El magmatismo incaico asociado a mineralización en esta zona tiene

lugar en el Eoceno, entre los 45 y 39 Ma, contemporáneo a la actividad del Sistema de Falla de Domeyko, cuyas fallas controlan la distribución de los sistemas mineralizados del distrito. Los intrusivos asociados a esta mineralización corresponden principalmente a diques hipabisales granodioríticos de hornblenda y biotita, además de varios stocks y lacolitos de composición diorítica, los que generalmente son estériles (Muhr y Perelló, 2009; Mpodozis y Cornejo, 2012; Riquelme y otros, 2018; Sanchez, 2017).

La erosión y denudación de la Cordillera de Domeyko en respuesta al alzamiento producido por la Fase Incaica provoca que desde el Eoceno medio hasta el Mioceno medio, se acumule una secuencia de ~800 m de potencia de depósitos continentales compuestos principalmente por gravas (conglomerados y brechas) aluviales, con intercalaciones de areniscas, limos y, de manera ocasional, calizas arenosas, paleosuelos carbonáticos y yesíferos y niveles volcánicos (Oerter y otros, 2016; Riquelme y otros, 2018; Fernández, 2019).

Este relleno sedimentario se puede dividir en cuatro unidades principales: Gravas Esperanza (Eoceno medio – tardío), Gravas Atravesado (Eoceno tardío – Oligoceno), Gravas Tesoro (Oligoceno – Mioceno temprano) y Gravas Arrieros (Mioceno temprano – Mioceno medio) (Riquelme y otros, 2018 en Pizarro y otros, 2019).

Sobre todas estas unidades, se disponen gravas poco consolidadas que constituyen los abanicos aluviales post-Mioceno medio, que configuran el paisaje superficial actual (Riquelme, 2018).

## **2.4. Depósito Esperanza**

Esperanza es un depósito tipo pórfido de cobre y oro ubicado en el extremo NE del corredor de pórfidos del Distrito Minero Centinela (Fig. 2.2), aproximadamente 60 km al SSO de la ciudad de Calama, a una altitud de 2.300 m s.n.m. (Perelló y otros, 2004; Bisso y otros, 2009).

El depósito se encuentra emplazado en una secuencia estratificada de rocas mesozoicas de rumbo NE – SO, con inclinación entre 30° y 50° al oeste, la que se compone, de base a techo, por rocas volcánicas del Triásico Superior (Estratos Las Lomas), rocas sedimentarias marinas del Jurásico (Grupo Caracoles), y rocas volcánicas y piroclásticas del Cretácico Superior (Formación Quebrada Mala) (Bisso y otros, 2009; Marquardt y otros, 2012; Mpodozis y Cornejo, 2012; Fig. 2.3). La mineralización del yacimiento está asociada a un grupo de intrusivos hipabisales que se emplaza en esta secuencia (Mpodozis y Cornejo, 2012; Kojima y otros, 2021).

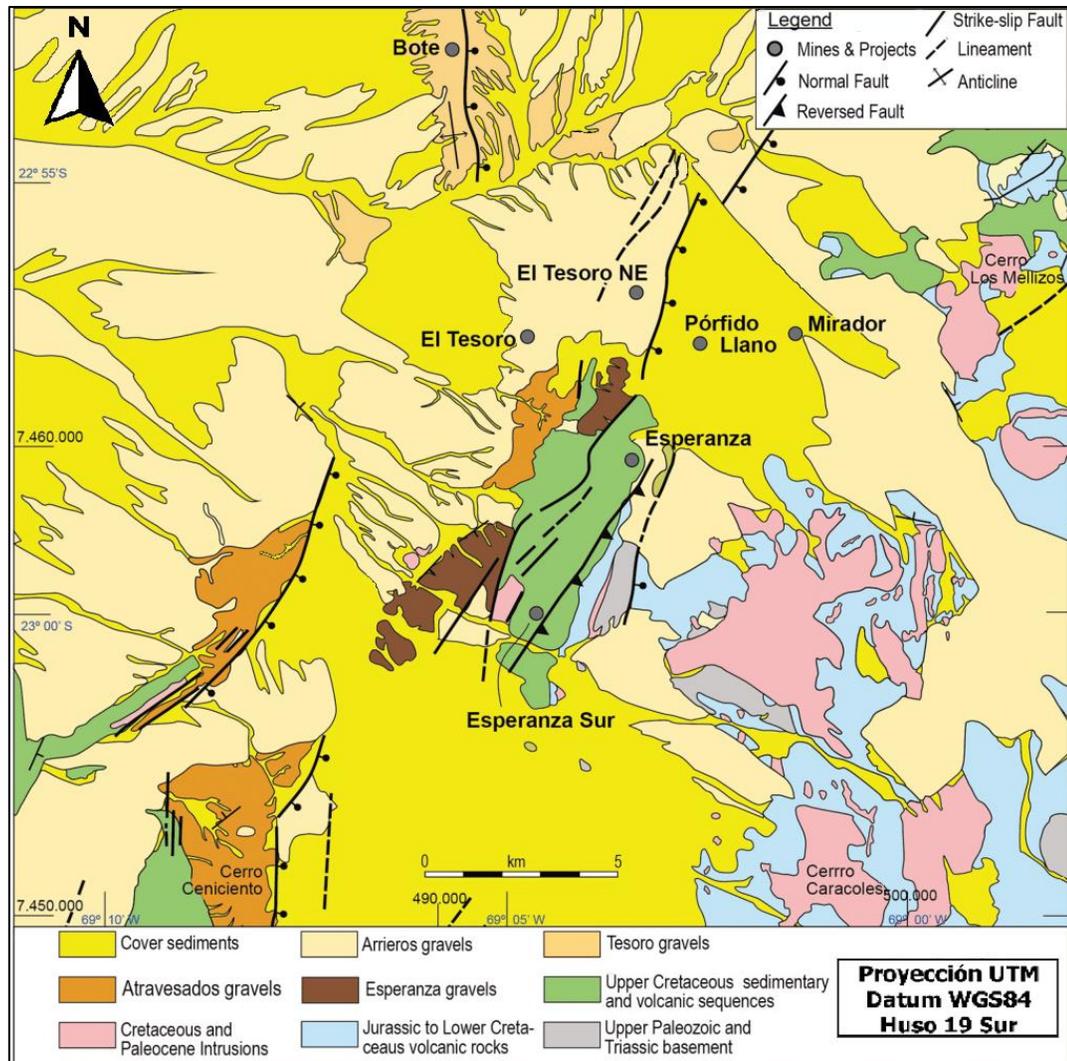


Figura 2.3: Geología del depósito Esperanza y la zona circundante. Modificado de Pizarro y otros (2019).

#### 2.4.1. Estructuras mayores

La secuencia mesozoica en la que se emplaza el depósito es afectada por numerosas fallas de alto ángulo con rumbo general NNE – SSO e inclinadas al este, que son parte del Sistema de Fallas de Domeyko (Bisso y otros, 2009).

El sistema mineralizado se encuentra desplazado hacia el oeste por la Falla Telégrafo, una falla inversa inclinada al este detectada a través de sondajes (no aflora en superficie), a lo largo de la cual se produce el cabalgamiento de la secuencia sobre rocas volcánicas y sedimentarias del Eoceno no alteradas ni mineralizadas (Marquardt y otros, 2012; Mpodozis y Cornejo, 2012).

En el sector oriental del yacimiento, la Falla Esperanza, una estructura inversa con importante componente de movimiento lateral, pone en contacto por falla a rocas jurásicas no alteradas del Grupo Caracoles sobre rocas de la Formación Quebrada Mala (Cretácico Superior) con alteración propilítica (Marquardt y otros, 2012; Mpodozis y Cornejo, 2012).

El bloque Esperanza está limitado hacia el este por la Falla Coronado y hacia el oeste por la Falla Llano, que cortan a las fallas Telégrafo y Esperanza (Marquardt y otros, 2012; Mpodozis y Cornejo, 2012; Fig. 2.4).

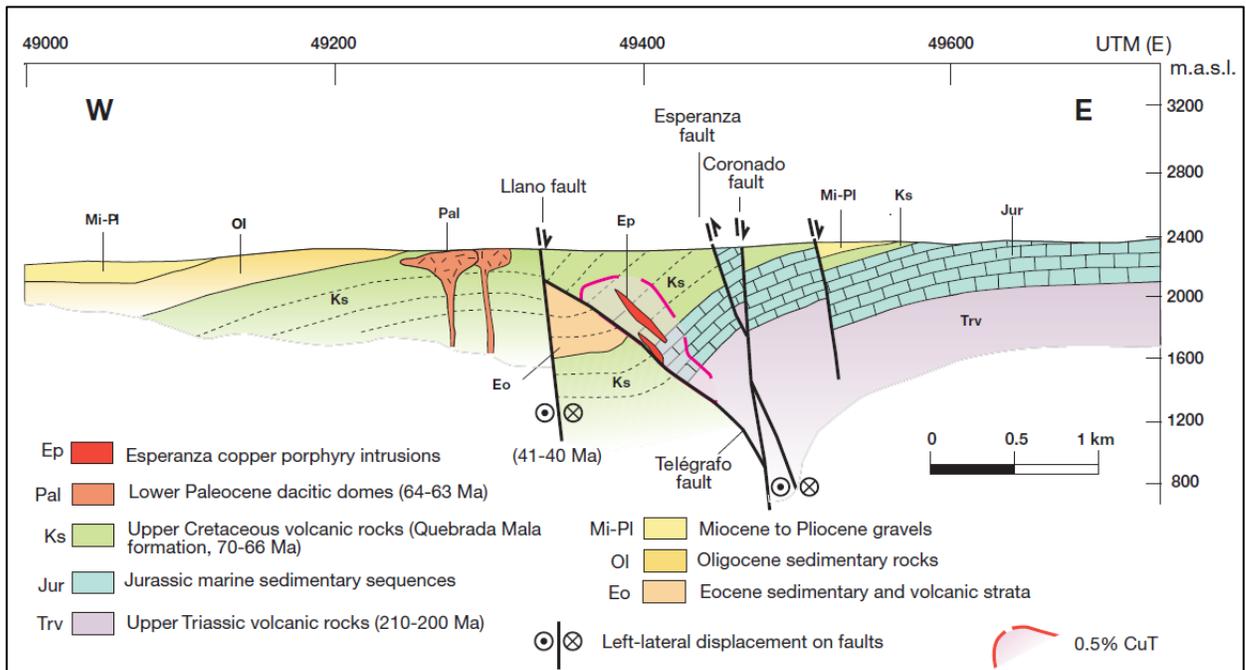


Figura 2.4: Sección estructural esquemática del depósito Esperanza. Obtenido de Mpodozis y Cornejo (2012).

## 2.4.2. Litologías del yacimiento

### 2.4.2.1. Estratos Las Lomas (Triásico Superior – Jurásico Inferior)

Secuencia de rocas volcánicas y piroclásticas que incluye tobas y lavas dacíticas y andesíticas, de colores gris oscuro y pardo oscuro. Localmente consiste en una potente capa de meta-andesitas (Marinovic y García, 1999; Kojima y otros, 2021).

### 2.4.2.2. Grupo Caracoles (Bajociano – Kimmeridgiano)

En el bloque Esperanza, el Grupo Caracoles sobreyace en discordancia de erosión (discordancia angular erosiva) a Estratos Las Lomas, y constituye una secuencia de ~300 m de rocas

sedimentarias marinas jurásicas, que incluye, de base a techo, areniscas y conglomerados litorales, calizas, areniscas y fangolitas calcáreas fosilíferas, y evaporitas (Marquardt y otros, 2012).

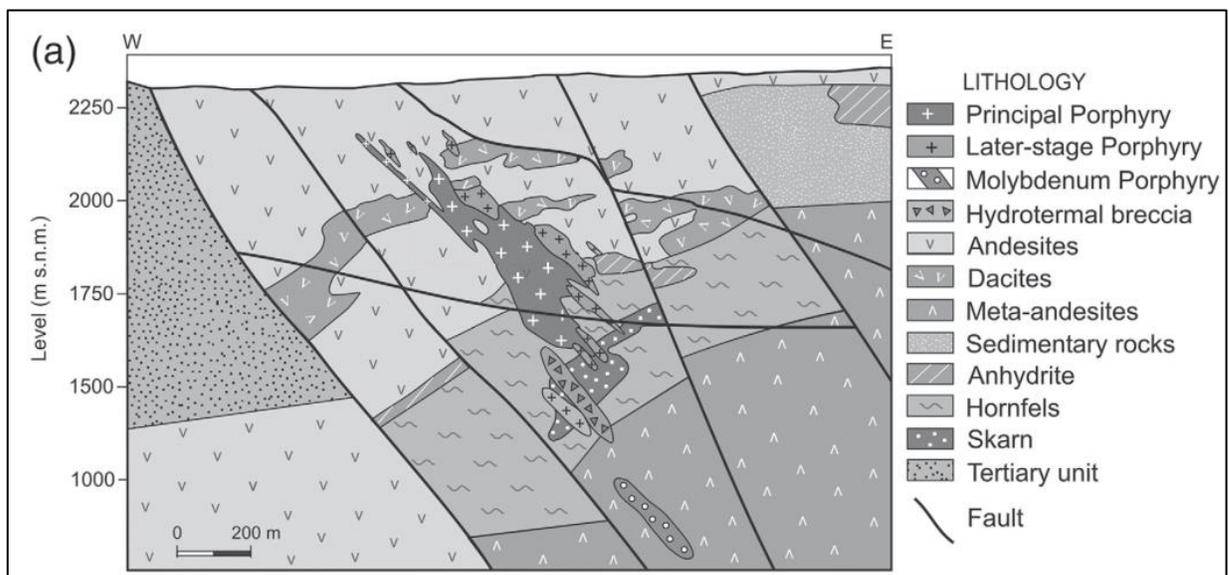
En este sector, la secuencia ha sufrido metamorfismo, por lo que las rocas consisten en grandes cantidades de *hornfels* (roca cornea), una zona de skarn y un nivel de anhidrita en el techo (Bisso y otros, 2009; Kojima y otros, 2021).

#### 2.4.2.3. Formación Quebrada Mala (Cretácico Superior)

Secuencia volcánica y sedimentaria continental que en el bloque Esperanza consiste en más de 600 m de andesitas y dacitas con intercalaciones de tobas líticas (Bisso y otros, 2009; Marquardt y otros, 2012).

#### 2.4.2.4. Intrusivos hipabisales

La mineralización del depósito está asociada a un complejo de diques hipabisales de composición granodiorítica emplazados paralelamente a las fallas mayores. Estos cuerpos intrusivos pueden dividirse en dos unidades principales: pórfido principal y pórfido tardío, de edad  $42,1 \pm 0,8$  Ma y  $41,3 \pm 0,3$  Ma respectivamente (Datos internos de Antofagasta Minerals en Pizarro y otros, 2020), los cuales se emplazan en las rocas cretácicas y jurásicas (Perelló y otros, 2004; Pizarro y otros, 2020). Otros autores (Bisso y otros, 2009; Kojima y otros, 2021) describen una tercera unidad: Pórfido de Molibdeno, que se sitúa en profundidad intruyendo a las rocas triásicas de Estratos Las Lomas (Fig. 2.5).



**Figura 2.5:** Perfil esquemático de la geología del depósito Esperanza. Modificado de Kojima y otros (2021).

El pórfido principal y el pórfido tardío tienen texturas y composiciones similares, siendo característica una textura porfídica con fenocristales de plagioclasa (25%), biotita (5%), cuarzo (3-4%) y hornblenda (3-4%) en una masa fundamental de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita, resultando en una composición granodiorítica (Perelló y otros, 2004).

Estas unidades se pueden diferenciar por la intensidad de sus alteraciones, presencia de vetillas, texturas y relaciones de contacto. El pórfido principal se caracteriza por una alteración potásica intensa y la presencia de vetillas de cuarzo-magnetita, mientras que el pórfido tardío se caracteriza por una textura más fina y el desarrollo de cuerpos de brecha a lo largo de sus contactos con la roca caja, los clastos de estas brechas típicamente consisten en andesitas y fragmentos de la unidad pórfido principal (Perelló y otros, 2004; Pizarro y otros, 2020).

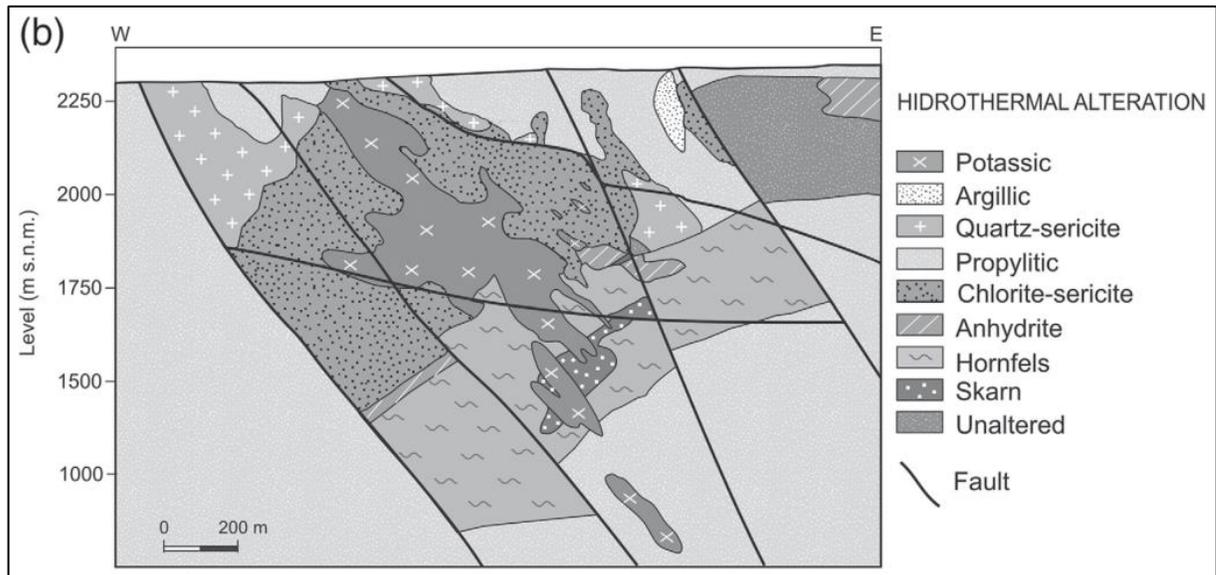
### **2.4.3. Alteraciones hidrotermales**

El sistema hidrotermal que dio origen a este depósito está representado por una zonación de alteraciones relacionadas espacial y genéticamente con la unidad pórfido principal. Un núcleo de alteración potásica que contiene feldespato potásico, biotita, cuarzo, magnetita y anhidrita se centra en esta unidad y se extiende hacia la roca andesítica circundante (Perelló y otros, 2004; Bisso y otros, 2009). La datación de biotita secundaria en la zona de alteración potásica mediante el método  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ , ha permitido establecer una edad de  $41,4 \pm 0,3$  Ma para este evento de alteración (Perelló y otros, 2004).

Rodeando al núcleo de alteración potásica, se desarrolla una zona de cuarzo, clorita, esmectita, illita y sericita. En esta zona la textura original de la roca se encuentra obliterada, los minerales ferromagnesianos primarios han sido reemplazados por clorita y esmectita, y los feldespatos por sericita e illita (Perelló y otros, 2004). Tanto Perelló y otros (2004), Bisso y otros (2009) como Pizarro y otros (2020) clasifican a esta zona como una alteración argílica intermedia, mientras que Kojima y otros (2021) la interpretan como una zona transicional de clorita-sericita.

Sobreimpuesta y rodeando a las alteraciones anteriores, se encuentra una zona de alteración fílica, que se caracteriza por la presencia de cuarzo, sericita e illita. Esta alteración afecta principalmente a las rocas andesíticas, obliterando totalmente su textura original y reemplazándola por mosaicos finos de cuarzo, sericita e illita (Perelló y otros, 2004; Pizarro y otros, 2020; Kojima y otros 2021).

En la zona superficial del depósito se identifica una zona de alteración argílica local, que contiene caolinita y jarosita (Kojima y otros, 2021), y rodeando a estas alteraciones se ubica un halo externo de alteración propilítica, que se caracteriza por la presencia clorita, epidota y calcita (Perelló y otros, 2004; Fig. 2.6).



**Figura 2.6:** Perfil esquemático de las alteraciones hidrotermales del depósito Esperanza. Modificado de Kojima y otros (2021).

#### 2.4.4. Mineralización del yacimiento

La mineralización del depósito Esperanza puede ser dividida en cuatro eventos principales: (1) etapa temprana de alteración potásica intensa, (2) etapa intermedia de alteración clorita-sericita, (3) etapa de pirita tardía con alteración filica y (4) etapa de enriquecimiento supérgeno (Kojima y otros, 2021).

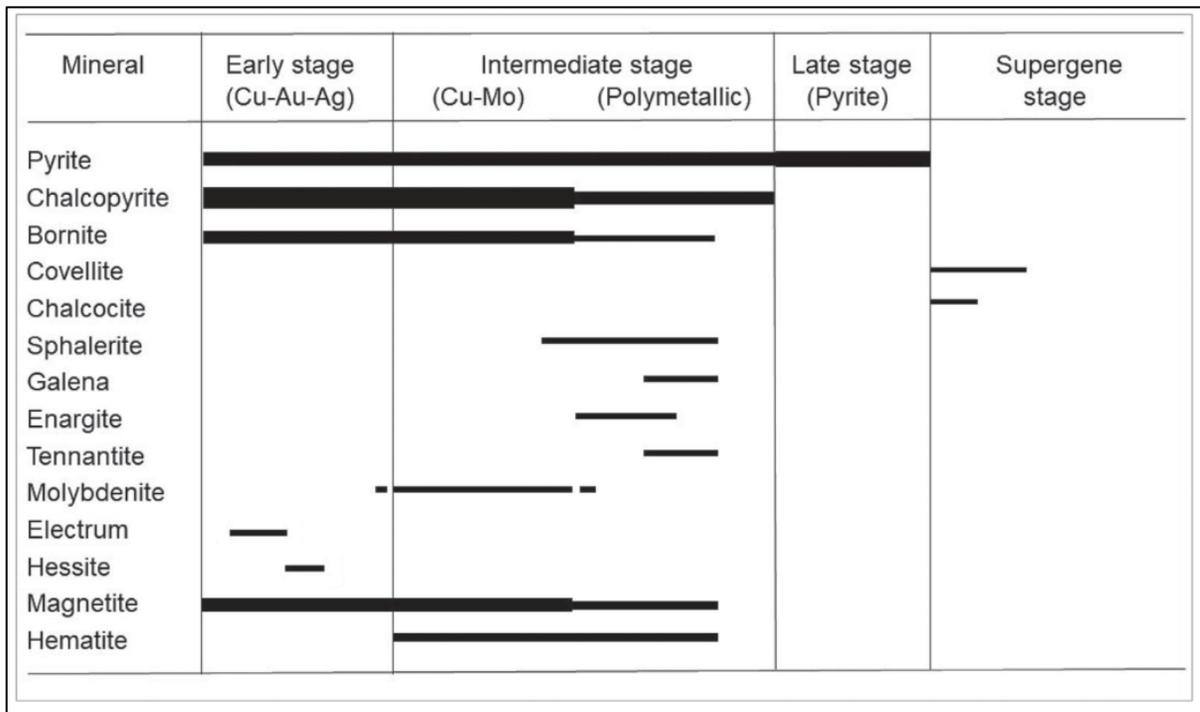
La mayor parte del cobre y oro del sistema se relaciona al primer evento, asociado temporal y espacialmente al núcleo de alteración potásica. La mineralización hipógena en esta zona se encuentra como granos diseminados de calcopirita y bornita, y en vetillas de milímetros a centímetros de espesor que configuran un complejo stockwork y que contienen calcopirita y bornita, además de magnetita, pirita, cuarzo, feldespato potásico, anhidrita y biotita (Perelló y otros, 2004; Kojima y otros, 2021).

En la zona clorita-sericita, la mineralización ocurre en vetillas y fracturas además de diseminaciones de grano fino a medio. Las vetillas típicamente contienen cuarzo, sericita y clorita con calcopirita, pirita y, localmente, molibdenita. Las vetillas están rodeadas por halos de alteración

con pirita y calcopirita diseminadas. Los contenidos de cobre en esta zona son menores que en la zona de alteración potásica, la bornita está ausente y el contenido de pirita es mayor que en el núcleo potásico (Perelló y otros, 2004; Kojima y otros, 2021).

La zona de alteración filica (etapa de pirita tardía) es esencialmente estéril en mineralización de cobre. La pirita es el sulfuro dominante (3-4 % volumen) y localmente se registran cantidades traza de molibdenita y esfalerita. La pirita se encuentra como diseminaciones y rellenando vetillas con cuarzo y sericita (Perelló y otros, 2004; Kojima y otros, 2021).

Adicionalmente, una zona de alteración supérgena se encuentra en los primeros 100 a 200 m de la superficie y consiste principalmente en atacamita, con cantidades menores de crisocola, brocantita, sampleita y algunos sulfatos y fosfatos. El enriquecimiento secundario de sulfuros es débil y de poca extensión, limitándose a la presencia de calcosina y covelina en una zona irregular de espesor entre 10 y 20 m (Perelló y otros, 2004; Bisso y otros, 2009; Fig. 2.7).

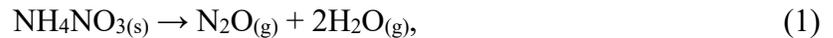


**Figura 2.7:** Secuencia paragenética del depósito Esperanza. El ancho de las barras indica la abundancia relativa de los minerales. Modificado de Kojima y otros (2021).

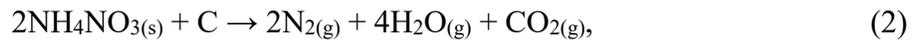
### 3. MARCO TEÓRICO: MACIZOS ROCOS REACTIVOS CON EXPLOSIVOS EN BASE A NITRATO DE AMONIO

#### 3.1. Explosivos en base a nitrato de amonio

El nitrato de amonio, o AN ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), es el componente principal en la mayor parte de los explosivos utilizados en minería; este compuesto se descompone mediante una reacción exotérmica ( $\Delta H = -36\text{kJ mol}^{-1}$ ) que produce tres moles de producto gaseoso por cada mol de reactivo sólido (Reacción 1) (Djerdjev y otros, 2018).



En condiciones atmosféricas, el nitrato de amonio es altamente estable, relativamente seguro, y por sí solo no se considera un explosivo (Fabin y Jarosz, 2021), sin embargo, al mezclarlo con un combustible oxidable (*fuel oil*) o FO, la reacción se vuelve más exotérmica ( $\Delta H = -280\text{kJ mol}^{-1}$ ) y libera más moles de productos gaseosos (Reacción 2) (Djerdjev y otros, 2018).



Esta mezcla se conoce como ANFO y es uno de los explosivos más utilizados en la industria minera (Djerdjev y otros, 2018).

El ANFO se puede fabricar en formato *prill* (granulado), que consiste en pequeños granos esféricos y porosos de nitrato de amonio sólido que adsorben un combustible oxidable en una proporción aproximada de 94% en peso de AN y 6% en peso de FO (Fabin y Jarosz, 2021).

Además, existen los explosivos de emulsión, que consisten en gotas de una solución saturada en nitrato de amonio (fase discontinua), dispersas en el combustible oxidable (fase continua), en conjunto con sustancias emulsificantes para estabilizar la mezcla (Priyananda y otros, 2015).

La mezcla de ANFO en formato *prill* y explosivos de emulsión se conoce como ANFO pesado, su combinación en distintas proporciones y con diferentes tipos de aditivos permite modificar propiedades tales como la resistencia al agua, la velocidad y potencia de detonación, temperatura de detonación, entre otras.

### **3.2. Rocas reactivas**

Se define como roca o suelo reactivo a la roca que es capaz de reaccionar espontánea y exotérmicamente al estar en contacto con los nitratos contenidos en los explosivos (AEISG, 2020).

En el desarrollo de la operación minera, los pozos de tronadura son perforados y luego cargados con explosivos en base a nitrato de amonio, dejando en contacto las paredes del pozo con el producto explosivo. Si esta operación se realiza en un macizo rocoso reactivo, pueden ocurrir reacciones químicas entre el nitrato de amonio y la roca, y provocar efectos indeseados, como la descomposición del explosivo, la emisión de gases tóxicos y contaminantes ( $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ ) y en el peor de los casos, la detonación espontánea y no planificada de la carga explosiva (AEISG, 2020).

Estos eventos han sido reportados en diversos países y representan un riesgo significativo tanto para la seguridad como para la rentabilidad económica en la industria minera (Briggs y Kelso, 2001). El fenómeno de reacción entre las rocas y el nitrato de amonio se ha convertido en un desafío de gran magnitud, dado el alto riesgo asociado. Por lo tanto, abordar y gestionar eficazmente esta problemática se ha vuelto de vital importancia para la seguridad de los trabajadores y la viabilidad de las operaciones mineras.

La reactividad de los macizos rocosos se atribuye principalmente a la presencia de sulfuros, (especialmente de piritita) los cuales experimentan procesos de meteorización que producen calor y compuestos químicos capaces de reaccionar con el nitrato de amonio al entrar en contacto con los explosivos (Briggs y Kelso, 2001).

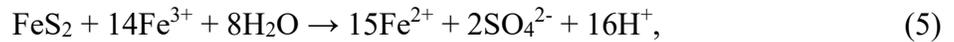
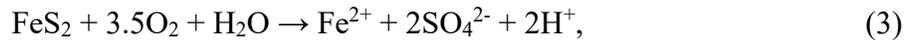
### **3.3. Reacción de rocas sulfuradas con nitrato de amonio**

Todos los sulfuros que contienen hierro son termodinámicamente inestables con el nitrato de amonio y pueden ser reactivos. Entre estos sulfuros se encuentran la pirrotina, bornita, calcopirita y, especialmente, la piritita. Este último es el sulfuro más común y abundante en distintos tipos de depósitos y ha sido ampliamente estudiado en el contexto de rocas reactivas (Briggs y Kelso, 2001).

Al entrar en contacto con agua y oxígeno, la piritita se oxida, desencadenando una serie de reacciones cuyos productos pueden reaccionar en contacto con el nitrato de amonio presente en los explosivos. La meteorización de la piritita, al igual que la de otros sulfuros, se ve favorecida por los procesos de perforación, que proporcionan un espacio de acceso para el agua y el oxígeno atmosférico. Además, el polvo fino de roca resultante de la perforación se acumula en el fondo del

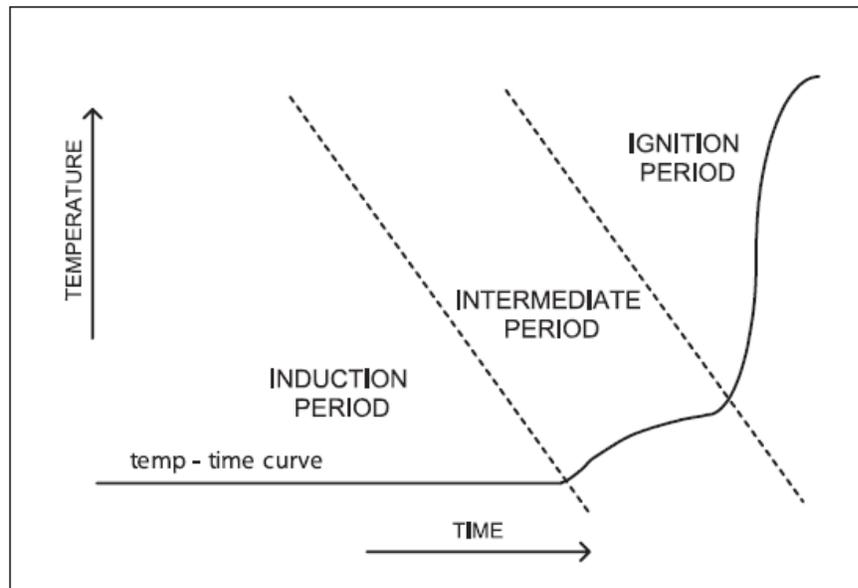
pozo, lo que aumenta la superficie de reacción y la probabilidad de reacciones no deseadas (Karabanov y Sivtsov, 2022).

Cuando un sulfuro como la pirita se oxida, se libera ácido sulfúrico en conjunto con iones de  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ . Estos iones catalizan las reacciones de meteorización, lo que a su vez genera más iones de hierro y ácido sulfúrico (Reacciones 3 a 5) (Karabanov y Sivtsov, 2022). Es decir, los productos de la meteorización promueven más meteorización, ya que estos iones actúan como catalizadores en el proceso.



Son los iones de  $\text{Fe}^{2+}$ , en conjunto con los sulfuros y el ácido sulfúrico, los que pueden reaccionar con el nitrato de amonio de los explosivos. Esta reacción genera una serie de productos que actúan como catalizadores tanto en las reacciones de meteorización de los sulfuros como en las reacciones con el nitrato de amonio. Es decir, la reacción entre los sulfuros y el nitrato de amonio es un proceso auto catalizado (Priyananda y otros, 2015).

La reacción entre los sulfuros y el nitrato de amonio se puede dividir en tres etapas principales (Fig. 3.1).



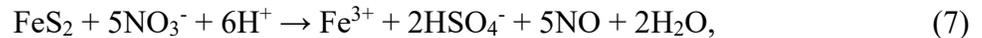
**Figura 3.1: Etapas de la reacción entre los sulfuros y el nitrato de amonio.**  
Obtenido de Briggs y Kelso (2001).

Durante la primera etapa, conocida como período de inducción, los iones de  $\text{Fe}^{2+}$  y la acidez del medio, que resultan de la meteorización de los sulfuros, reaccionan con el nitrato de amonio para producir ácido nítrico ( $\text{HNO}_2$ ) (Reacción 6).

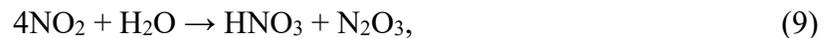


En este período, aunque las reacciones son exotérmicas, las tasas de reacción son lentas y el aumento de temperatura es mínimo y difícil de detectar. Además, su comportamiento resulta impredecible, ya que puede durar desde minutos hasta meses. Durante esta etapa, se produce una acumulación de especies catalizadoras que, al alcanzar niveles críticos, aceleran la velocidad de las reacciones (Briggs y Kelso, 2001; Karabanov y Sivtsov, 2022).

La etapa intermedia comienza cuando se acumula suficiente ácido nítrico para catalizar la oxidación de la pirita (Reacción 7), se caracteriza por un aumento moderado en la temperatura y por la liberación de óxido nítrico gaseoso (Briggs y Kelso, 2001; Karabanov y Sivtsov, 2022).



El óxido nítrico reacciona con el oxígeno ambiental y forma dióxido de nitrógeno, un gas de color marrón que se puede observar como fumarolas en los pozos de tronadura donde ocurren estas reacciones. Estas especies desencadenan una serie de reacciones que liberan calor y producen compuestos que catalizan tanto la oxidación de los sulfuros, como las reacciones con el nitrato de amonio (Reacciones 8 a 10) (Rumball, 1991; Briggs y Kelso, 2001; Karabanov y Sivtsov, 2022).



Con la acumulación de las diferentes especies catalizadoras, la velocidad de las reacciones aumenta drásticamente y se liberan grandes cantidades de calor, aumentando rápidamente la temperatura en el pozo de tronadura, de forma tal que se hace posible la reacción directa entre el nitrato de amonio y el combustible oxidable (Reacción 11) (Karabanov y Sivtsov, 2022).



Esto corresponde a la fase de ignición, que puede resultar en la detonación no planificada del producto explosivo en el pozo de tronadura (Rumball, 1991).

### 3.4. Factores que inciden en la reactividad de macizos rocosos

Además de la presencia de sulfuros de hierro, existen factores que pueden catalizar o inhibir la reactividad, acelerando la ocurrencia de las reacciones, o retardando su desarrollo.

Un factor de gran importancia es el contenido de humedad, que constituye el medio que transporta a la mayoría de las especies en reacción, además de ser un reactivo en gran parte de las reacciones involucradas en el proceso. Se ha determinado experimentalmente que el contenido de humedad óptimo para la reacción entre el nitrato de amonio y los sulfuros es de entre 1 a 5% p/p, pues en sistemas con un contenido menor al 1% p/p, el agua no es suficiente para transportar a los reactantes, mientras que cuando el contenido de agua es mayor al 5% p/p, los reactantes se diluyen y el calor no produce grandes incrementos en la temperatura debido a la elevada capacidad calorífica del agua (Briggs y Kelso, 2001).

El pH del medio es un factor importante en la reactividad de un macizo rocoso, ya que controla las concentraciones de los diferentes ácidos involucrados tanto en las reacciones de meteorización de los sulfuros como en las reacciones entre la roca y el nitrato de amonio. En general, valores bajos de pH se relacionan a una mayor reactividad de la roca (Rumball, 1991).

La mineralogía desempeña un papel crucial en la reactividad. Aunque la presencia de sulfuros de hierro condiciona la reactividad de la roca, otros minerales, como los carbonatos, pueden influir en la reacción al retardar su progreso, neutralizando los ácidos que se producen en las reacciones entre los sulfuros y el nitrato de amonio (Rumball, 1991).

Es posible que además de los sulfuros, otros minerales de hierro puedan tener incidencia en la reactividad de un macizo rocoso. La presencia de óxidos, hidróxidos, cloruros y sulfatos de hierro puede ser un factor importante a considerar (McDonald, 1984 en Rumball, 1991).

Considerando esto, se hace relevante tomar en cuenta las alteraciones que afectan al macizo rocoso, especialmente aquellas que contengan minerales que puedan afectar la reactividad, como sulfuros, sulfatos, óxidos o carbonatos.

Además de la presencia estos minerales, el grado de meteorización del macizo rocoso es un factor importante en la reactividad. Además de liberar los iones que participan en las reacciones, la oxidación de los sulfuros puede provocar la formación de otros minerales de hierro susceptibles a descomponerse en las condiciones fisicoquímicas de los pozos de tronadura.

La presencia de discontinuidades en el macizo rocoso puede ser otro factor de importancia en su potencial reactividad, otorgando una permeabilidad secundaria que permite el tránsito de fluidos que proporcionan la humedad necesaria para la ocurrencia de reacciones, además, el relleno estas estructuras puede componerse de minerales que inciden en la reactividad del macizo.

La temperatura, tanto de la roca como del explosivo, desempeña un papel significativo en la probabilidad de reacción, ya que aumenta la energía cinética de las partículas en el sistema. Además, la conductividad termal de la roca y los explosivos controla la tasa de aumento de temperatura en los pozos. Generalmente, los sulfuros y el nitrato de amonio tienen una baja conductividad térmica, lo que, junto con el confinamiento en el pozo de tronadura, favorece el calentamiento del sistema y permite aumentos rápidos en la temperatura. Por otro lado, altos contenidos de humedad o la presencia de minerales hidratados que absorben calor al deshidratarse pueden disminuir la tasa de aumento de temperatura (Rumball, 1991; Briggs y Kelso, 2001).

### **3.5. Manejo de macizos rocosos potencialmente reactivos**

En Enaex, el manejo del fenómeno de reactividad se aborda mediante una serie de protocolos, pautas y estándares operativos que, en su conjunto, buscan prevenir y/o mitigar los efectos relacionados con este fenómeno.

A modo general, el problema se aborda con un enfoque preventivo que implica el análisis y zonificación del macizo rocoso según su potencial de reacción con el propósito de establecer medidas operacionales para evitar accidentes.

A continuación, se describe de manera general algunos de los elementos clave utilizados para el manejo de macizos rocosos potencialmente reactivos, al nivel de detalle que permiten las consideraciones de confidencialidad.

#### **3.5.1. Zonificación preliminar**

Durante el desarrollo del rajo en una minera, las condiciones geológicas pueden tener una importante variación según el sector en el que se desarrollan las operaciones. Factores como litología, mineralogía, nivel freático, entre otros, pueden cambiar drásticamente al avanzar en el desarrollo del *pit*. Tomando esto en consideración, como primera medida se busca establecer una sectorización preliminar según el potencial de reactividad, y así tomar las medidas necesarias para abordar las condiciones de cada sector.

La zonificación del macizo rocoso según su potencial de reactividad implica el levantamiento y recopilación de información y antecedentes. Para una primera sectorización se considera:

- Litología.
- Fallas o zonas de fractura.
- Concentración de pirita y otros sulfuros de hierro.
- Alteraciones, en especial aquellas con carbonatos, sulfatos, clorita o biotita.
- Presencia de agua.
- Antecedentes de reactividad en la mina.

Basado en la interpretación, proyección e integración de esta información, se define una zonificación preliminar y se establecen zonas de muestreo para analizar su potencial reactividad.

### 3.5.2. Muestreo para análisis de la reactividad

El muestreo para análisis de reactividad consiste en tomar muestras representativas desde el *cutting* de perforación de los pozos de tronadura. El procedimiento para extraer las muestras desde el *cutting* se realiza siguiendo un detallado instructivo para asegurar la representatividad de las muestras. A modo general, es importante mencionar que, al perforar un pozo de tronadura, el material extraído se deposita en torno al pozo formando un cono donde el material superficial corresponde a lo que se ubicaba en el fondo del pozo, mientras que la base del cono es representativa del material que estaba al inicio de la perforación (Fig. 3.2).

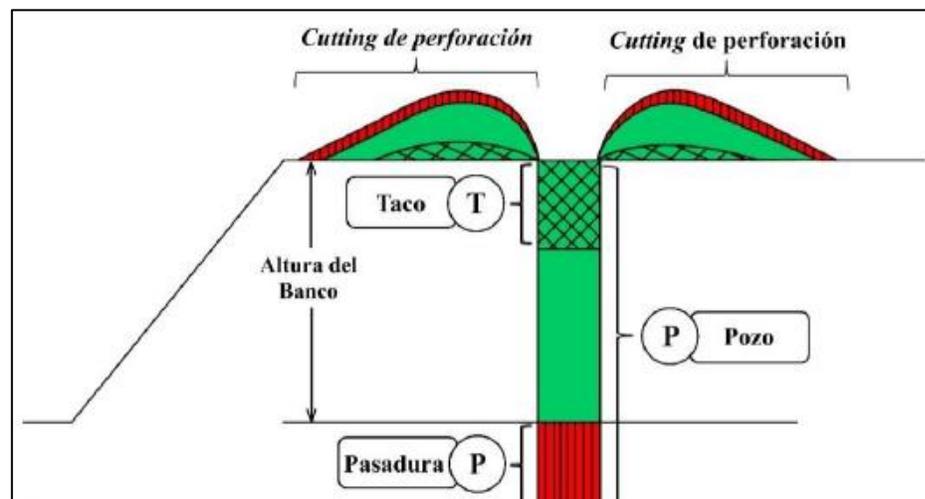
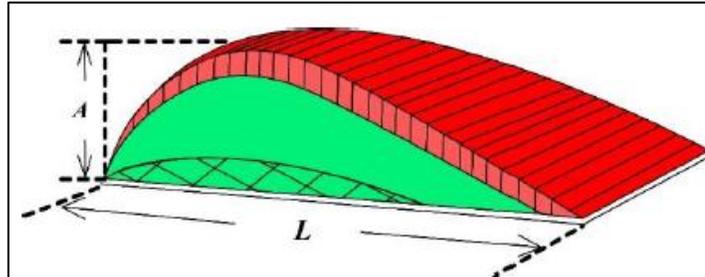


Figura 3.2: Esquema de un pozo de tronadura y su *cutting* de perforación.

Considerando esto, para asegurar un muestreo representativo se extrae una muestra triangular abarcando todo el largo y alto del cono (Fig. 3.3), además de un duplicado en el lado contrario. En ambos casos se extrae entre 1 y 3 kg de material.



**Figura 3.3:** Esquema de extracción de muestras desde el *cutting* de perforación.

### 3.5.3. Análisis de reactividad en laboratorio

Enaex S.A. aborda el estudio de la reactividad de una muestra mediante dos ensayos principales: el ensayo de reactividad y el ensayo de *sleep time*. Ambos ensayos se explican en detalle en el subcapítulo 4.2.1, y sus resultados son fundamentales para establecer medidas operacionales para el manejo preventivo de la reactividad en una minera.

### 3.5.4. Medidas operacionales

Considerando la zonificación preliminar y los resultados de los ensayos de laboratorio, se establece un conjunto de medidas para prevenir la ocurrencia de reacciones o para mitigar sus efectos. A continuación, se describe de forma general algunas de las medidas más relevantes.

#### 3.5.4.1. Medición de temperatura en pozos

La medición de temperatura en pozos de tronadura es un procedimiento que, idealmente, debería realizarse de manera regular en todos los sectores de la mina para determinar las temperaturas promedio en distintas zonas del macizo rocoso y así detectar rápidamente temperaturas anómalas que pudieran relacionarse a fenómenos de reactividad.

En la práctica, a partir de la sectorización de la mina y los resultados de ensayos de laboratorio, se establece, como medida operacional, un estricto protocolo de medición y monitoreo de temperatura en los pozos, que incluye la medición de temperatura mediante instrumentos calibrados y a profundidades determinadas en los pozos de sectores con potencial reactividad.

Los pozos se clasifican según el rango de temperatura en el que se encuentran y se toman medidas acordes, como no cargar con explosivo aquellos pozos con temperatura alta o dejar en observación aquellos con temperatura intermedia.

#### 3.5.4.2. Utilización de explosivos especiales

Una de las medidas preventivas al desarrollar labores de tronadura en zonas con alto potencial de reactividad consiste en el uso de productos explosivos con compuestos inhibidores de las reacciones.

En particular, Enaex cuenta con el producto explosivo Pirex®, un agente de voladura diseñado especialmente para zonas con alto potencial de reactividad.

#### 3.5.4.3. Consideraciones en el carguío y disparo

El carguío de explosivos en los pozos de tronadura es una operación compleja que se lleva a cabo por personal capacitado y certificado para esta labor. En este sentido, es fundamental que los operadores conozcan el fenómeno de reactividad y sus manifestaciones en terreno, por lo que el personal que desempeña estas funciones debe cumplir con capacitaciones relacionadas al tema.

De esta forma, el carguío de los pozos se desarrolla siguiendo las recomendaciones establecidas en cuanto a la medición de temperatura y al tipo de explosivo a utilizar.

Una vez cargado el pozo, se toma especial cuidado ante cualquier anomalía que pueda ser indicativa de una reacción en curso, como emisión de humos, gases o vapores, cambios de temperatura, burbujeo en el pozo, olor a azufre o “huevo podrido”, entre otras.

En cuanto al disparo, una medida operacional fundamental para disminuir el riesgo de reacción consiste en reducir al mínimo el tiempo de contacto entre el explosivo y las paredes del pozo. Es decir, en zonas con alto potencial de reactividad los pozos cargados deben ser detonados lo más pronto posible. Esto implica tomar consideraciones especiales al diseñar mallas de tronadura en sitios con rocas reactivas, reduciendo la cantidad de pozos por disparo o cargando al final los pozos en sectores de mayor riesgo.

## 4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

El desarrollo de este trabajo se divide en tres etapas principales: Etapa de Gabinete I, Etapa de Laboratorio y Etapa de Gabinete II.

### 4.1. Etapa de gabinete I

Revisión de conceptos teóricos asociados al fenómeno de rocas reactivas y a la geología del depósito Esperanza, además de la recopilación y análisis de antecedentes de reactividad en el rajo y de información relacionada al evento de reactividad en Fase 7.

### 4.2. Etapa de laboratorio

El trabajo en laboratorio se divide en dos etapas principales: (1) ensayos de reactividad y *sleep time*, ejecutados por personal de Enaex en los laboratorios de Planta Río Loa, Calama y (2) análisis mineralógicos realizados en el Instituto de Geología Económica Aplicada de la Universidad de Concepción.

#### 4.2.1. Ensayos de reactividad y *sleep time*

Las muestras obtenidas en el sector en estudio se analizan mediante ensayos de reactividad y *sleep time*.

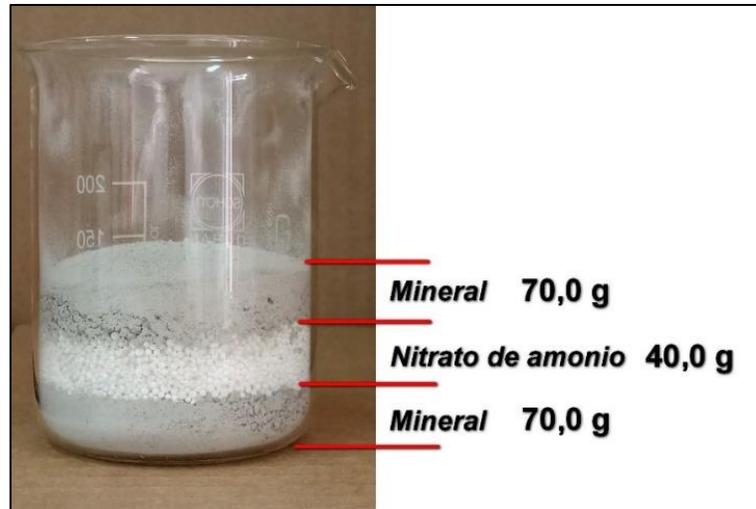
Estos ensayos son adaptaciones de los *tests* desarrollados por la *U.S. Bureau of Mines* (1979) y por el AEISG (2020) respectivamente.

Para los ensayos, las muestras son tratadas mecánicamente hasta que al menos un 90% de cada muestra pase bajo la malla #10 Tyler (1,65 mm). Una vez cumplido este requerimiento, las muestras son etiquetadas y despachadas para su análisis.

##### 4.2.1.1. Ensayo de reactividad

El ensayo de reactividad se desarrolla con el objetivo de evaluar el tipo de reacción que ocurre por el contacto entre una muestra y el nitrato de amonio sólido.

El montaje del ensayo consiste en poner en contacto la muestra mineral con el nitrato de amonio sólido en un vaso de precipitados (Fig. 4.1).



**Figura 4.1: Montaje para el ensayo de reactividad.**

Esta preparación se calienta gradualmente en una placa calefactora hasta una temperatura máxima de entre 250 a 300 °C, mientras se registran las variaciones de temperatura utilizando sensores termopares.

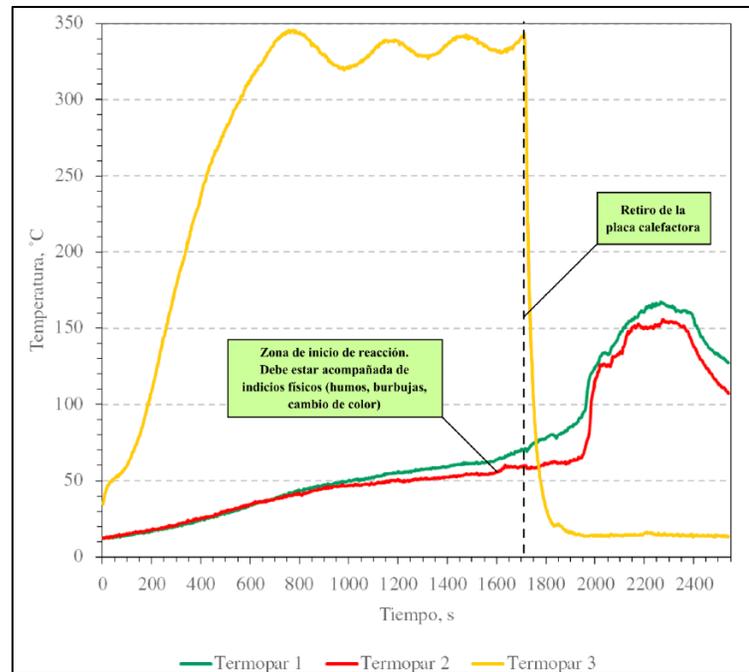
En cada ensayo se registra la temperatura mediante tres sensores, uno en la interfaz entre la muestra y el nitrato de amonio, otro en el fondo del vaso y un tercero que se ubica en contacto directo con la placa calefactora.

Los termopares están conectados a un adquisidor de datos que grafica el desarrollo del ensayo en una curva de temperatura versus tiempo, conocida como termograma.

El calentamiento se mantiene hasta que se observan señales de la ocurrencia de reacciones químicas, como burbujeo, emisión de humos o espuma, o un aumento súbito de temperatura. En el momento en que se detecta esta situación, se registra la temperatura de inicio de la reacción o " $T_{iRx}$ ", que corresponde a la temperatura registrada por el termopar de la interfaz. Inmediatamente se retira el vaso de precipitados de la fuente de calor, y luego se observa el comportamiento del termograma.

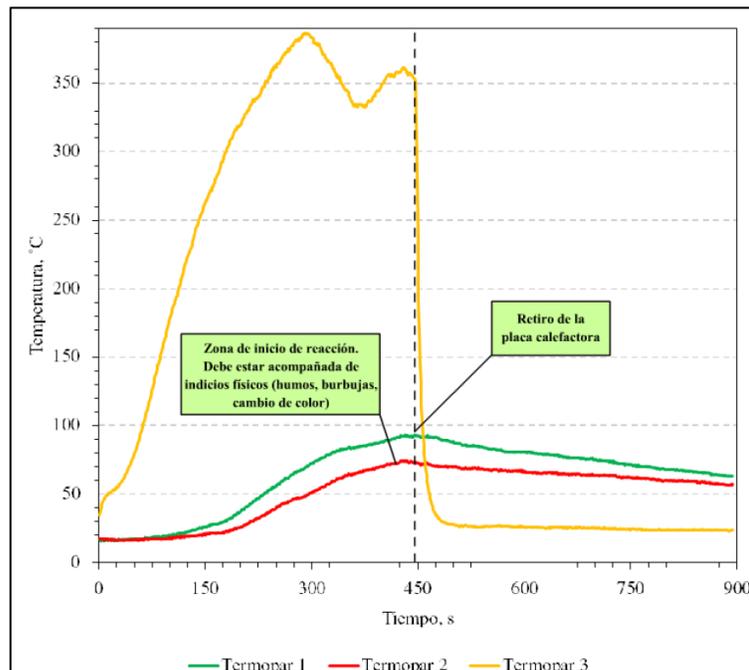
Según la evolución del termograma, la reacción puede clasificarse de tres formas:

(1) Reacción auto sostenida (AS): la reacción entre la muestra y el nitrato de amonio continúa incluso después de retirar la fuente de calor. La reacción es capaz de mantener o elevar la temperatura luego de retirado el conjunto de la placa calefactora (Fig. 4.2). De esta manera, el calor producido por la reacción misma permite que esta persista y se mantenga en el tiempo.



**Figura 4.2: Termograma típico de una reacción auto sostenida.**

(2) Reacción no auto sostenida (NAS): en este caso, la muestra deja de reaccionar con el nitrato de amonio una vez retirada la fuente de calor. El calor generado por la reacción no es suficiente para mantenerla de forma autónoma, y al remover el montaje de la placa calefactora, la temperatura disminuye gradualmente con el tiempo (Fig. 4.3).



**Figura 4.3: Termograma típico de una reacción no auto sostenida.**

(3) No ocurre reacción (NRx): en este caso, la muestra no reacciona con el nitrato de amonio sólido por lo que no hay un cambio de pendiente en el termograma y no se observan indicios físicos de la ocurrencia de una reacción química.

Según estos criterios, las muestras se clasifican como reactiva auto sostenida (AS), reactiva no auto sostenida (NAS) y muestra no reactiva (NRx).

Los valores obtenidos para la temperatura de inicio de la reacción y la temperatura máxima alcanzada por las muestras AS y NAS, se emplean para calcular el parámetro de intensidad de la reacción ( $T_{m\acute{a}x}/T_{iRx}$ ), que corresponde a la razón entre la temperatura máxima alcanzada durante un ensayo y la temperatura de inicio de la reacción. Este cociente se utiliza como un indicador indirecto de la exotermicidad de la reacción química y se utiliza para clasificar la criticidad de una muestra reactiva. Aquellas reacciones con un parámetro de intensidad cercano a 1 se consideran poco exotérmicas, mientras que las que presentan valores más elevados se consideran más exotérmicas y, por ende, potencialmente más violentas (Fig. 4.4).

Criticidad	Criterio ( $T_{m\acute{a}x}/T_{iRx}$ )= $\mu_{RX}$
Baja	$1,0 \leq \mu_{RX} < 2,0$
Intermedia	$2,0 \leq \mu_{RX} < 3,0$
Alta	$3,0 \leq \mu_{RX} < 4,5$
Extrema	$\mu_{RX} > 4,5$

Figura 4.4: Criterio de criticidad según el parámetro de intensidad de reacción.

#### 4.2.1.2. Ensayo *sleep time*

El ensayo de *sleep time* tiene por objetivo estimar el tiempo de contacto en que puede mantenerse una roca reactiva con un producto explosivo particular a una temperatura determinada antes de desencadenarse una reacción. Este ensayo se realiza únicamente con las muestras que han exhibido un comportamiento reactivo auto sostenido en el ensayo de reactividad, y la temperatura a la que se realiza el ensayo corresponde a la mayor temperatura registrada en la faena minera en estudio.

El ensayo consiste en poner en contacto una preparación de la muestra y el producto explosivo, junto con una disolución acelerante, en un tubo de ensayos de vidrio. Este conjunto se mantiene durante un período de hasta 30 días a una temperatura específica.

Dentro del tubo de ensayos se inserta un sensor termopar conectado a un adquisidor de datos, que registra la temperatura de la muestra durante el período que dura el ensayo.

El ensayo se mantiene hasta un máximo de 30 días o hasta que la muestra presente indicios instrumentales y físicos de la ocurrencia de una reacción química, es decir, un cambio en la pendiente del termograma que debe ser acompañado por burbujeo, emisión de humos, presencia de espuma o cambio de color de la muestra.

Mediante el registro de las fechas de inicio y término del ensayo, se procede a calcular el *sleep time* (ST), que representa el tiempo de contacto, expresado en días, que el producto explosivo ensayado permanece en contacto con la muestra mineral a la temperatura de trabajo, hasta que se desencadena una reacción química o hasta que se completa el tiempo total del ensayo.

Numéricamente, el valor de *sleep time* corresponde al 25% del tiempo transcurrido (en días), entre el inicio y término del ensayo. Esta cifra del 25% es una estimación empírica que toma en cuenta factores externos que el ensayo de laboratorio no considera y que podrían acelerar la ocurrencia de las reacciones, tales como la acidez del medio, el porcentaje de humedad, la granulometría, oxigenación, entre otros.

De esta manera, las muestras con un valor de *sleep time* bajo se consideran de mayor criticidad, ya que pueden permanecer un menor tiempo en contacto con el explosivo antes de desarrollarse una reacción. Por otro lado, las muestras con un valor de *sleep time* alto se consideran de menor criticidad, pues pueden permanecer más tiempo en contacto con el explosivo antes de reaccionar (Fig. 4.5).

Criticidad	<i>Sleep time</i> (días)
Alta	$0 < \textit{sleep time} < 2,5$
Intermedia	$2,5 \leq \textit{sleep time} < 5,0$
Baja	$5,0 \leq \textit{sleep time}$

Figura 4.5: Criterio de criticidad según los resultados del ensayo *sleep time*.

#### 4.2.2. Análisis mineralógicos

Las muestras en estudio son analizadas mediante microscopía óptica de luz reflejada, fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X y QEMSCAN®. Todas las muestras son tratadas previamente según los requerimientos granulométricos de los ensayos de reactividad y *sleep time*.

#### 4.2.2.1. Microscopía óptica

Descripción petrográfica mediante microscopía óptica de luz reflejada. Las muestras son montadas en briquetas pulidas para clasificarlas según tipo de roca, alteraciones, texturas y mineralogía.

#### 4.2.2.2. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Técnica analítica que se basa en la emisión de rayos X desde un equipo, los cuales inciden en los átomos de una muestra y producen la excitación y consecuente eyección de electrones desde sus orbitales. Esto crea vacantes que son ocupadas por electrones que “descienden” desde los orbitales externos, provocando una emisión de energía que es detectada por el instrumento. Las longitudes de onda e intensidades detectadas permiten identificar los elementos presentes y su abundancia relativa (Weltje y Tjallingii, 2008).

Para este estudio, se lleva a cabo un análisis mediante FRX en roca total, es decir, en una muestra pulverizada y homogenizada. A partir de este análisis, se obtienen resultados cuantitativos de las concentraciones elementales en cada muestra.

#### 4.2.2.3. Difracción de rayos X (DRX)

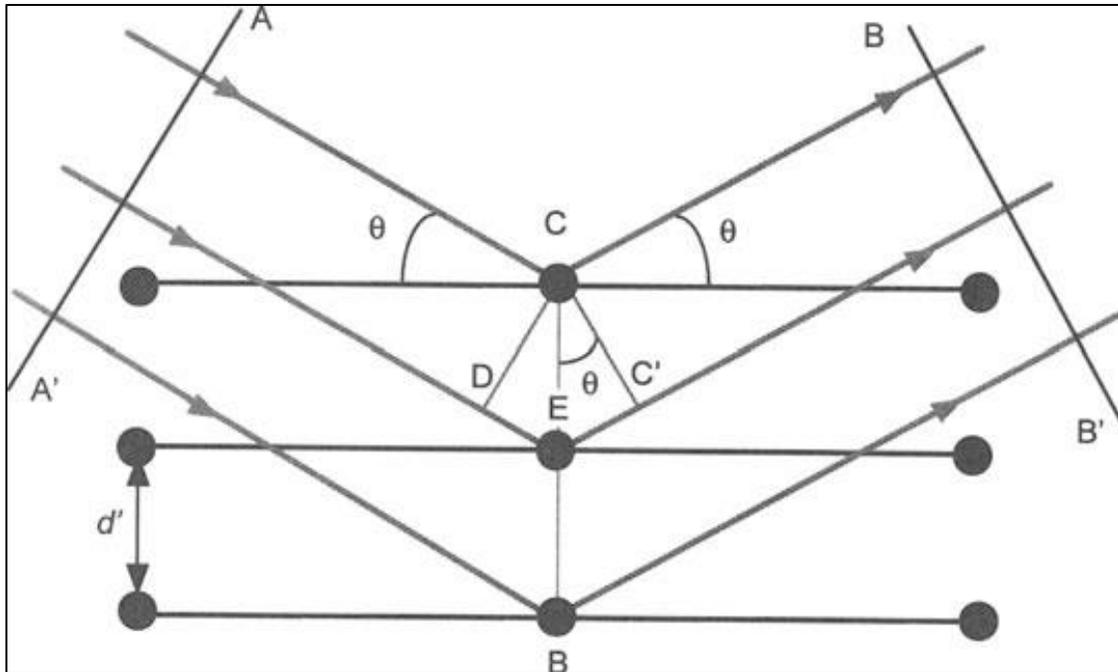
La difracción de rayos X es una técnica analítica empleada para la caracterización de sólidos cristalinos, y es de gran utilidad para la identificación y análisis de fases minerales.

Esta técnica se basa en la interferencia constructiva de los rayos X al interactuar con los planos cristalográficos de un sólido cristalino, y considerando que cada fase mineral tiene una estructura cristalina definida, la interacción de sus planos cristalográficos con rayos X de una longitud de onda y ángulo de incidencia determinados produce un patrón de difracción característico, el que permite la identificación de las fases minerales (Bunaciu y otros, 2015; Fig. 4.6).

El criterio para que se produzca la interferencia constructiva de los rayos X, es que los rayos difractados y dispersados se encuentren en fase, lo que se cumple cuando las condiciones geométricas satisfacen la ley de Bragg:

$$n\lambda = 2dsen(\theta)$$

Donde  $n$  es un número entero,  $\lambda$  es la longitud de onda de los rayos X,  $d$  es el espaciamiento interplanar que genera la difracción y  $\theta$  es el ángulo de difracción (Suryanarayana y Norton, 1998).



**Figura 4.6: Difracción de rayos X por un sólido cristalino.** Las líneas horizontales representan los planos cristalográficos,  $\theta$  el ángulo de incidencia de los rayos X y  $d'$  la distancia entre planos cristalográficos. Obtenido de Suryanarayana y Norton, 1998.

Esta ley relaciona la longitud de onda de la radiación electromagnética con el ángulo de difracción y el espaciamiento de los planos cristalográficos de una muestra mineral, lo que permite su identificación (Bunaciu y otros, 2015).

Para este estudio, las muestras son analizadas mediante el método del polvo utilizando un equipo Bruker® D4 Endeavor.

En el método del polvo, la muestra es reducida a un polvo muy fino, donde cada partícula es un pequeño cristal o agregado de cristales orientados de forma aleatoria con respecto al haz incidente.

En este tipo de análisis, las muestras son escaneadas a través de un rango de ángulos definido, para alcanzar todas las posibles direcciones de difracción de los planos cristalográficos (Bunaciu y otros, 2015). Para este trabajo, el análisis se realiza en un rango de 3 a 70°, en intervalos de 0,02° con tiempos de lectura de 1 segundo cada uno.

De este análisis se obtienen difractogramas, que grafican los ángulos de difracción detectados y el conteo de las señales en función de los ángulos de difracción. Cada fase mineral produce *peaks* característicos en un difractograma, lo que permite su identificación.

El conteo de cada *peak* en el difractograma se interpreta como la intensidad de la señal, la que puede relacionarse con la abundancia de cada fase en la muestra, aunque esta relación no necesariamente es lineal. Con estos datos y mediante el uso de *softwares* especializados, se puede obtener una semicuantificación de las fases presentes, aunque los resultados pueden ser imprecisos (Martín-Ramos y otros, 2012).

En este estudio, los datos se analizan utilizando el software DIFFRACT EVA de Bruker® y la base de datos PDF-4/Minerals 2023 de ICDD®, para obtener una identificación y semicuantificación automática de los minerales en cada muestra.

#### 4.2.2.4. Análisis QEMSCAN®

El análisis QEMSCAN® es una tecnología que combina las técnicas analíticas del microscopio electrónico de barrido (SEM), la espectrometría de energía dispersada (EDS) y *softwares* especializados para el análisis de minerales. Estos equipos, originalmente conocidos como QEM\*SEM (*Quantitative Evaluation of Materials by Scanning Electron Microscopy*), son una herramienta micro analítica de gran utilidad para la caracterización mineralógica, pues permiten la identificación y cuantificación de fases minerales, así como la obtención de información a escala microscópica sobre sus tamaños, formas y relaciones espaciales (Butcher y otros, 2000; Santoro y otros, 2014).

El método involucra la emisión de un rayo de electrones que es acelerado y concentrado para aumentar su energía y reducir su diámetro. Este rayo es dirigido hacia la muestra para escanear su superficie en una malla de puntos predeterminada (Goldstein y otros, 2018).

En cada punto de incidencia, la interacción del rayo de electrones con la muestra produce electrones retro dispersados (BSE, *backscattered electrons*) y electrones secundarios, cuyas señales pueden ser detectadas y procesadas para formar una imagen SEM, que es una imagen digital magnificada de la superficie del espécimen (Goldstein y otros, 2018).

Además, por su interacción con el rayo de electrones, los átomos de la muestra emiten rayos X con una longitud de onda específica y característica para cada elemento (salvo H y He, que no producen rayos X). Esta señal es registrada mediante un espectrómetro de rayos X de energía dispersada (EDS), y puede ser procesada para determinar la composición química de la muestra en cada punto (Goldstein y otros, 2018). Esta composición se utiliza identificar fases minerales en los puntos de análisis de acuerdo a su comparación con una librería de referencia conocida como

archivo SIP (*species identification protocol*), que es determinada por el usuario (Santoro y otros, 2014).

En este trabajo, el análisis es realizado mediante un equipo Qemscan 650, con muestras montadas en briquetas pulidas y carbonizadas en superficie, utilizando la modalidad PMA y la base de datos SIP CuS-1.

La modalidad PMA (*particle mineralogical analysis*) es un modo de medición utilizado para la caracterización mineralógica detallada de las partículas en una muestra. Lo que permite obtener información textural y mineralógica partícula por partícula (Gottlieb y otros, 2000).

En este caso, el análisis PMA efectuado consiste en un barrido bidimensional de la superficie de las muestras, midiendo las partículas expuestas utilizando una malla de muestreo de 5  $\mu\text{m}$  de distancia entre puntos de análisis sucesivos.

La información obtenida es simplificada creando agrupamientos de minerales a partir de la “lista secundaria condensada”, la cual es determinada por el usuario para agrupar algunas especies minerales y resaltar las fases relevantes para el estudio (Fig. 4.7).



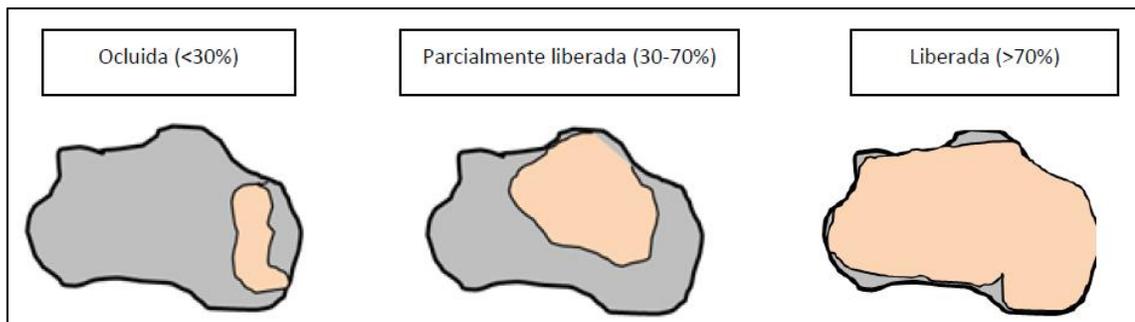
Figura 4.7: Lista secundaria condensada utilizada en este trabajo.

Mediante este análisis se logra una cuantificación modal, expresada en porcentaje en peso, de las especies minerales detectadas y agrupadas según la lista.

Además, se calcula el tamaño promedio de las fases minerales y se cuantifican las asociaciones minerales en cada muestra mediante de la medición del área de contacto de las diferentes fases. Para esto, dos fases se consideran “asociadas” si un pixel de una de ellas está en contacto con un pixel de otra fase.

Adicionalmente, se determina el grado de liberación de las partículas de pirita, por su relevancia en el estudio de fenómenos de reactividad.

El grado de liberación, se refiere al porcentaje de área ocupado por la fase mineral en la partícula analizada, que puede clasificarse como ocluida, parcialmente liberada o liberada (Fig. 4.8).



**Figura 4.8: Grado de liberación/oclusión de una fase mineral.**

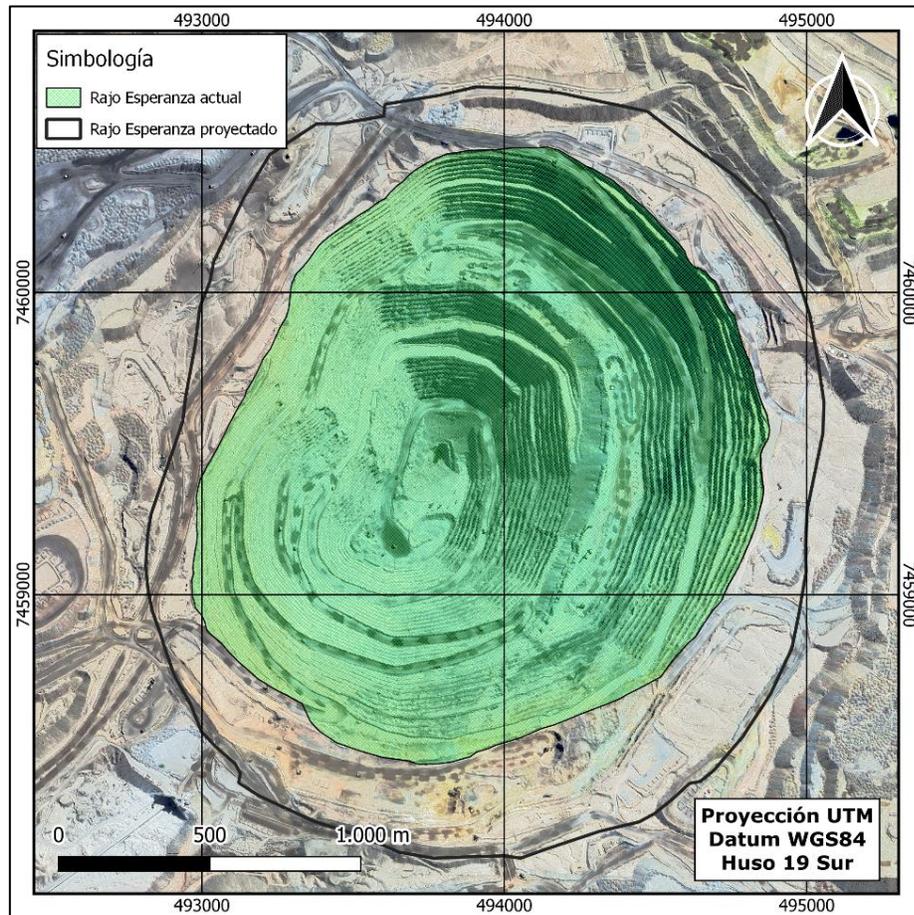
### **4.3. Etapa de gabinete II**

Revisión y análisis de los antecedentes, resultados y bibliografía para identificar los posibles factores mineralógicos y geológicos que condicionan la reactividad del macizo rocoso en el sector de Fase 7.

## 5. ANTECEDENTES DE REACTIVIDAD EN RAJO ESPERANZA

### 5.1. Antecedentes generales

El desarrollo del rajo Esperanza comienza el año 2010 y se estima que, una vez transcurridos los 25 años de vida útil del proyecto, el rajo final tendrá unas dimensiones de 2.600 m de largo, 2.100 m de ancho y 750 m de profundidad (Gestión Ambiental Consultores, 2007; Fig. 5.1).



**Figura 5.1: Rajo Esperanza actual y rajo final proyectado.**

Hasta el año 2022 no se registran manifestaciones de reactividad en el rajo, manteniéndose un desarrollo seguro en el carguío de explosivos y en los procesos de tronadura. Ese mismo año comienza el desarrollo de un plan de manejo de potenciales rocas reactivas en la minera.

El plan incluye la definición y muestreo de zonas de interés, el análisis de reactividad de las muestras mediante ensayos de reactividad y *sleep time*, y la caracterización geológica y mineralógica del macizo rocoso, para así entregar recomendaciones, establecer medidas operacionales y desarrollar un plan de acción para el manejo de esta problemática en la faena.

## 5.2. Reactividad en Fase 6 y Fase 8

En una primera etapa se determina analizar las zonas conocidas como Fase 6 y Fase 8, que corresponden al sector central y centro-sur del rajo respectivamente.

En estas zonas se ejecuta una campaña de muestreo de *cutting* de perforación de pozos de tronadura para su análisis mediante ensayos de laboratorio (Fig. 5.2).

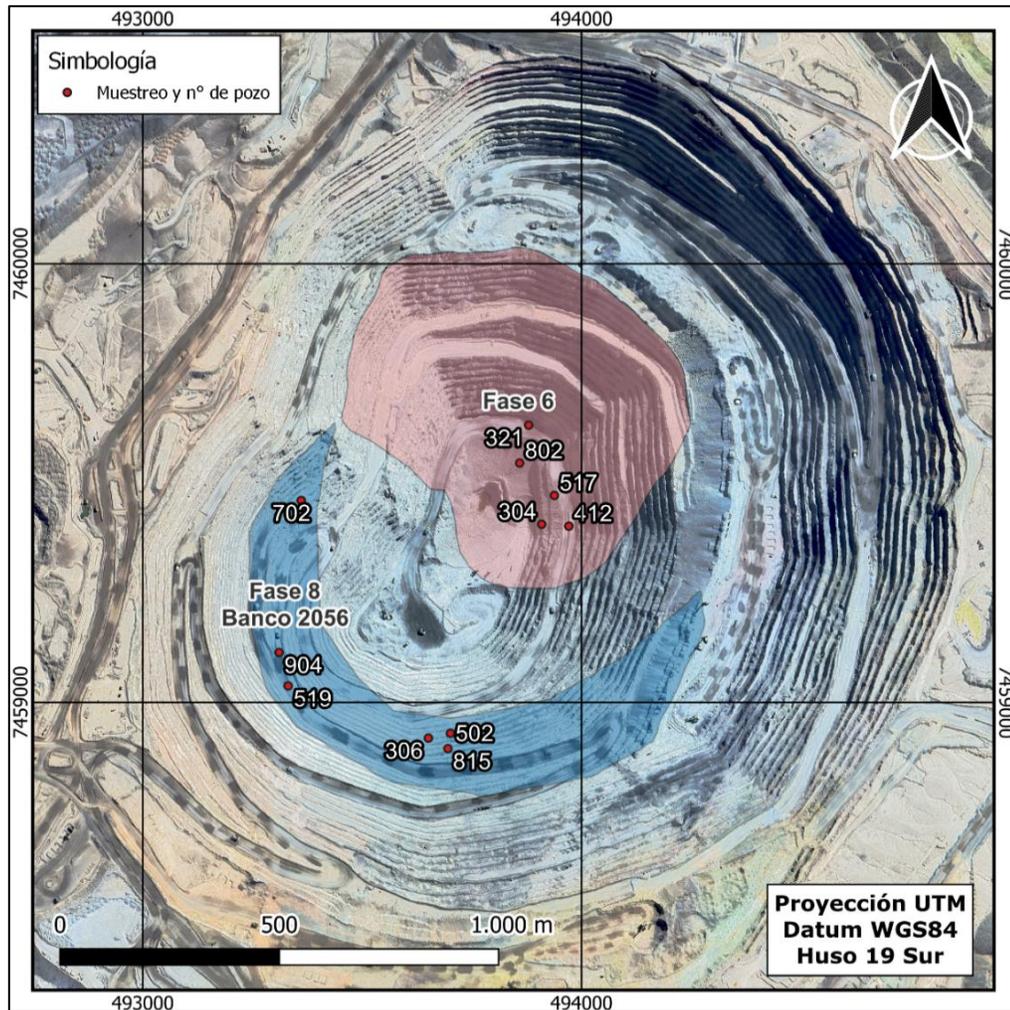


Figura 5.2: Fase 6, Fase 8 y pozos de tronadura muestreados.

### 5.2.1. Ensayos de reactividad

Las muestras provenientes de Fase 6 y Fase 8 se someten a ensayos de reactividad en laboratorio. De las 11 muestras reportadas, un 90,9% (10 muestras), desarrolla reacciones exotérmicas auto sostenidas (AS) en contacto con nitrato de amonio (Tabla 5.1).

**Tabla 5.1: Resultados de ensayos de reactividad en muestras de Fase 6 y Fase 8.** El código de las muestras hace referencia a la fase, banco, malla de tronadura y pozo de donde fueron obtenidas.

Pozo	Fase	Código de muestra	Tipo de reacción	T <sub>IRx</sub> (°C)	T <sub>máx</sub> (°C)	T <sub>máx</sub> /T <sub>IRx</sub>
304	6	F06 B1736 M602 P304	AS	60	162	2,7
321	6	F06 B1752 M608 P321	AS	34	66	1,9
412	6	F06 B1736 M601 P412	AS	30	57	1,9
517	6	F06 B1736 M602 P517	AS	29	67	2,3
802	6	F06 B1752 M608 P802	AS	27	56	2,1
306	8	F08 B2056 M814 P306	AS	25	170	6,8
502	8	F08 B2056 M814 P502	AS	27	57	2,1
519	8	F08 B2056 M807 P519	AS	38	140	3,7
702	8	F08 B2056 M815 P702	AS	28	53	1,9
815	8	F08 B2056 M811 P815	NAS	27	45	1,7
904	8	F08 B2056 M807 P904	AS	30	66	2,2

En el 36,4% de los ensayos (4 muestras), se obtienen parámetros de intensidad de reacción entre  $1,0 \leq (T_{máx}/T_{IRx}) < 2,0$ , considerados de baja criticidad e indicativos de reacciones poco exotérmicas, lentas y no violentas. En la reacción de 5 muestras (45,5%) se obtienen parámetros de intensidad de reacción entre  $2,0 \leq (T_{máx}/T_{IRx}) < 3,0$ , considerados de criticidad intermedia e indicativos de reacciones de velocidad baja a intermedia. En el ensayo de 1 muestra (9,1%), se obtiene un valor de  $(T_{máx}/T_{IRx})$  entre  $3,0 \leq (T_{máx}/T_{IRx}) < 4,5$ , considerado alto, e indicativo de reacciones químicas de velocidad intermedia a alta, que podrían presentar algún grado de violencia. Por último, la reacción de 1 muestra (9,1%), resulta en un valor del parámetro  $(T_{máx}/T_{IRx}) \geq 4,5$ , considerado extremo, e indicativo de reacciones descontroladas y violentas.

### 5.2.2. Ensayos de *sleep time*

Las muestras con comportamiento reactivo auto sostenido (AS) son sometidas a ensayos de *sleep time* a 30°C con los productos explosivos MIC®40 y Vertex®950. En estos ensayos, la totalidad de las muestras presenta valores de *sleep time* entre 0 y 2,5 días con el producto MIC®40 a 30°C, valores considerados altamente críticos.

En contraste, de los ensayos realizados con el producto Vertex®950 a 30°C, una muestra (10%) presenta un valor de *sleep time*  $\geq 5$  días, considerado de baja criticidad, 5 muestras (50%) tienen valores de entre  $2,5 \leq \textit{sleep time} < 5$  días, considerados de mediana criticidad, y 4 muestras (40%) presentan valores de entre  $0 < \textit{sleep time} < 2,5$  días, considerados de alta criticidad (Tabla 5.2).

**Tabla 5.2: Resultados de ensayos de *sleep time* para las muestras de Fase 6 y Fase 8.**

Pozo	Fase	Código de muestra	<i>Sleep time</i> a 30°C (días)	
			MIC®40	Vertex®950
304	6	F06 B1736 M602 P304	1,5	3,0
321	6	F06 B1752 M608 P321	1,2	5,5
412	6	F06 B1736 M601 P412	1,5	4,5
517	6	F06 B1736 M602 P517	1,0	1,7
802	6	F06 B1752 M608 P802	1,7	3,0
306	8	F08 B2056 M814 P306	0,2	1,7
502	8	F08 B2056 M814 P502	1,0	1,3
519	8	F08 B2056 M807 P519	1,0	1,8
702	8	F08 B2056 M815 P702	1,2	3,5
904	8	F08 B2056 M807 P904	0,2	3,5

### 5.2.3. Análisis y recomendaciones emitidas

Con el objetivo de analizar los posibles factores que controlan la reactividad en el rajo, los resultados son contrastados con la información geológica de las zonas de muestreo, incluyendo litología, alteraciones y abundancias de pirita (Tabla 5.3).

**Tabla 5.3: Resultados de reactividad y *sleep time* contrastados con información geológica para cada muestra.** Donde las litologías son PQFP = pórfido principal, AND = andesita, TUFAN = toba/andesita. Mientras que las alteraciones son KF = potásica feldespática, KB = potásica biotítica, PRO = propilítica, SC = sericita-clorita, N/I = No hay información.

Código de muestra	Tipo de reacción	$T_{\text{máx}}/T_{\text{Rx}}$	<i>Sleep time</i> MIC®40	<i>Sleep time</i> Vertex®950	Litología	Alteración	%Pirita
F06 B1736 M602 P304	AS	2,7	1,5	3,0	PQFP	KF	0,8
F06 B1752 M608 P321	AS	1,9	1,2	5,5	AND	KB	0,8
F06 B1736 M601 P412	AS	1,9	1,5	4,5	PQFP	KF	0,8
F06 B1736 M602 P517	AS	2,3	1,0	1,7	PQFP	KF	0,8
F06 B1752 M608 P802	AS	2,1	1,7	3,0	AND	KB	0,5
F08 B2056 M814 P306	AS	6,8	0,2	1,7	TUFAN	PRO	N/I
F08 B2056 M814 P502	AS	2,1	1,0	1,3	TUFAN	PRO	N/I
F08 B2056 M807 P519	AS	3,7	1,0	1,8	TUFAN	SC	3,71
F08 B2056 M815 P702	AS	1,9	1,2	3,5	TUFAN	PRO	N/I
F08 B2056 M811 P815	NAS	1,7	No aplica	No aplica	TUFAN	PRO	N/I
F08 B2056 M807 P904	AS	2,2	0,2	3,5	TUFAN	SC	2,5

La reactividad de las muestras de Fase 6 y Fase 8 se caracteriza por reacciones principalmente de tipo auto sostenido, lo que es una situación preocupante para el desarrollo de las operaciones de tronadura, especialmente en sectores con parámetros de intensidad de reacción altos y extremos.

Los valores de *sleep time* con el producto MIC®40 a 30°C son altamente críticos, por lo que su uso en estos sectores requiere de un especial cuidado. Por otra parte, los valores de *sleep time* con el producto Vertex®950 a 30°C son variables, con una mayor cantidad de valores altamente críticos en las muestras de Fase 8.

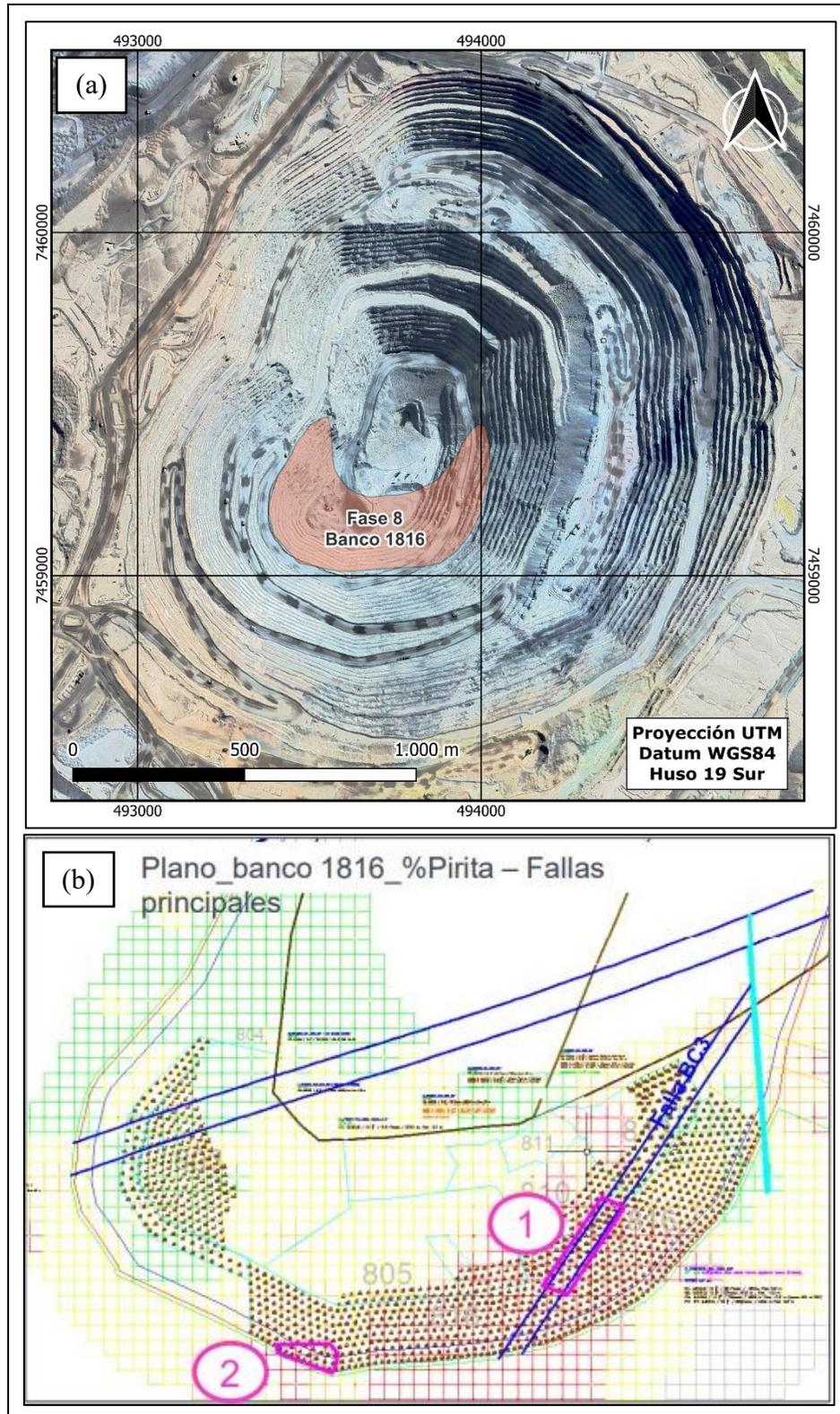
La diferencia en la reactividad de las muestras de Fase 6 y Fase 8 podría tener relación con las distintas litologías, alteraciones y contenidos de pirita en estos sectores, este último factor parece tener un control importante en la reactividad de las muestras de Fase 8. En este sentido, es importante establecer la relación entre los distintos factores y la reactividad de las muestras, para analizar estrategias de zonificación de la reactividad en el rajo.

Dados los antecedentes expuestos, se emiten recomendaciones y se establecen medidas operativas como parte del plan de manejo de potenciales rocas reactivas, las que incluyen:

- Reducir los tiempos de residencia de los explosivos, limitando el carguío de pozos a un máximo de 72 y 24 horas previas al disparo con producto Vertex y MIC respectivamente.
- Aplicar protocolo de control de temperatura en pozos, con una primera medición previa al carguío y una segunda medición posterior al carguío.
- En caso de tener cambios de Temperatura mayores a 2°C entre la primera y segunda medición, emisión de humos o cualquier evidencia de reacción, se debe evacuar el área y aislar el sector.
- Se conforma un equipo de trabajo para definir nuevas campañas de muestreo en zonas de interés.

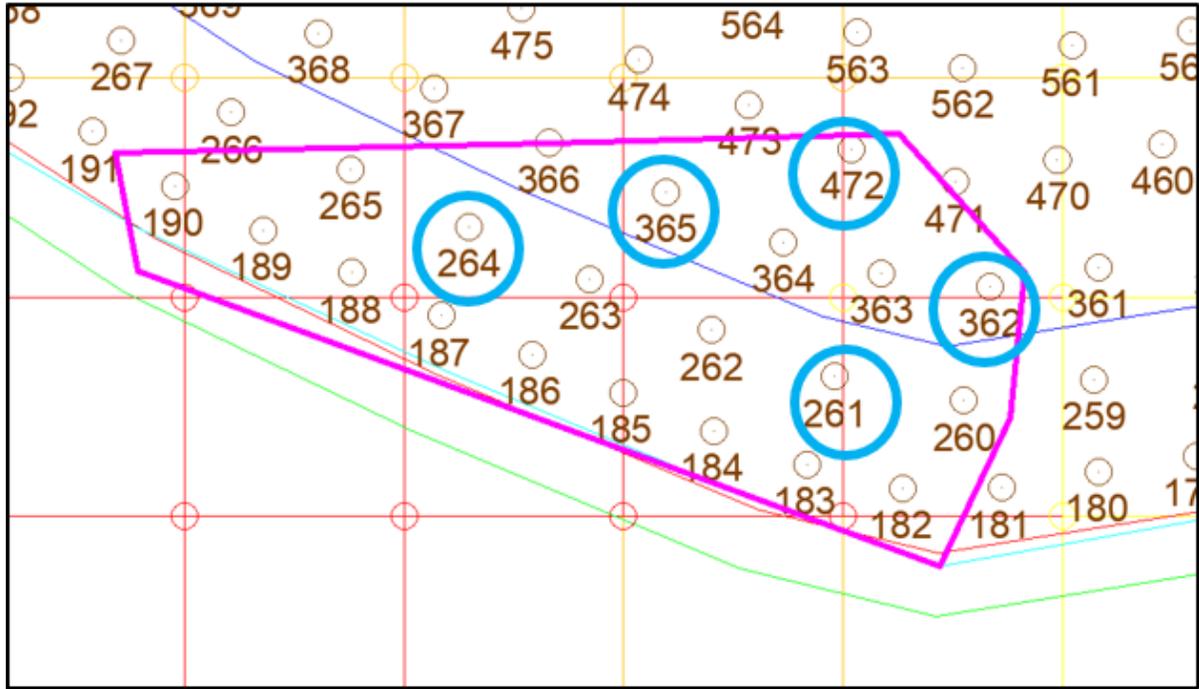
### **5.3. Reactividad en Fase 8 Banco 1816**

Dados los resultados del estudio previo y la necesidad de desarrollar este sector del rajo, se lleva a cabo un nuevo estudio de reactividad en Fase 8, Banco 1816, donde se identifican sectores con características geológicas favorables para la reactividad, en base a las cuales se definen dos zonas de muestreo para su análisis (Fig. 5.3).



**Figura 5.3:** Fase 8 Banco 1816. (a) Ubicación de Fase 8 Banco 1816. (b) Zonas de muestreo (1) y (2) y modelo de bloques %Pirita Fase 8 Banco 1816, donde bloques verdes  $< 1,5\%$  pirita; bloques amarillos  $1,5 \leq \% \text{pirita} < 3$ ; bloques naranjas  $3 \leq \% \text{pirita} < 4$  y bloques rojos  $\% \text{pirita} \geq 4$ .

De las dos zonas definidas, solo se muestrea la zona 2, de contenidos de pirita > 4% y alteración clorita-sericita según los modelos de bloques del sector. De esta zona, se obtienen 5 muestras de *cutting* de perforación de pozos de tronadura (Fig. 5.4).



**Figura 5.4:** Detalle de zona de muestreo 2 y pozos de tronadura. En celeste se destacan los pozos muestreados.

### 5.3.1. Ensayos de reactividad.

Las muestras provenientes de Fase 8 Banco 1816 se someten a ensayos de reactividad en laboratorio. En estos ensayos, un 100% de las muestras desarrolla reacciones exotérmicas auto sostenidas (AS) al estar en contacto con nitrato de amonio, evidenciando la presencia de rocas reactivas en este sector de Fase 8.

Estas muestras alcanzan elevadas temperaturas ( $T_{\text{máx}}$ ) en los ensayos, y altos valores de parámetro de intensidad de reacción.

En una muestra (20%), se obtiene un valor de entre  $3,0 \leq (T_{\text{máx}}/T_{\text{Rx}}) < 4,5$ , considerado alto e indicativo de reacciones químicas de velocidad intermedia a alta, mientras que el ensayo del resto de las muestras (80%) resulta en valores  $(T_{\text{máx}}/T_{\text{Rx}}) \geq 4,5$ , considerados valores extremos, indicativos de reacciones descontroladas y violentas (Tabla 5.4)

**Tabla 5.4: Resultados de ensayos de reactividad para las muestras de Fase 8 Banco 1816.** El código de muestra hace referencia a la fase, banco, malla y pozo de tronadura desde donde se extrae la muestra.

Código de muestra	Tipo de reacción	T <sub>iRx</sub> (°C)	T <sub>máx</sub> (°C)	T <sub>máx</sub> /T <sub>iRx</sub>
8-1816-816-261	AS	65	325	5
8-1816-816-264	AS	72	352	4,9
8-1816-816-362	AS	88	370	4,2
8-1816-816-365	AS	74	364	4,9
8-1816-816-472	AS	80	407	5,1

### 5.3.2. Ensayos de *sleep time*

Dado su comportamiento reactivo auto sostenido, la totalidad de las muestras son sometidas a ensayos de *sleep time* a 30°C con los productos explosivos MIC®45, Vertex®970 y Pirex®P-50 (Tabla 5.5).

**Tabla 5.5: Resultados de ensayos de *sleep time* para las muestras de Fase 8 Banco 1816.**

Código de muestra	<i>Sleep time</i> a 30°C (días)		
	MIC®45	Vertex®970	Pirex®P-50
8-1816-816-261	0,10	0,80	4,27
8-1816-816-264	0,07	0,80	4,29
8-1816-816-362	0,08	0,90	5,05
8-1816-816-365	0,07	0,90	4,29
8-1816-816-472	0,06	0,80	4,32

Del total de muestras analizadas, el 100% de los ensayos resulta en valores de *sleep time* entre 0 y 2,5 días con los productos explosivos MIC®45 y Vertex®970, valores que se consideran altamente críticos.

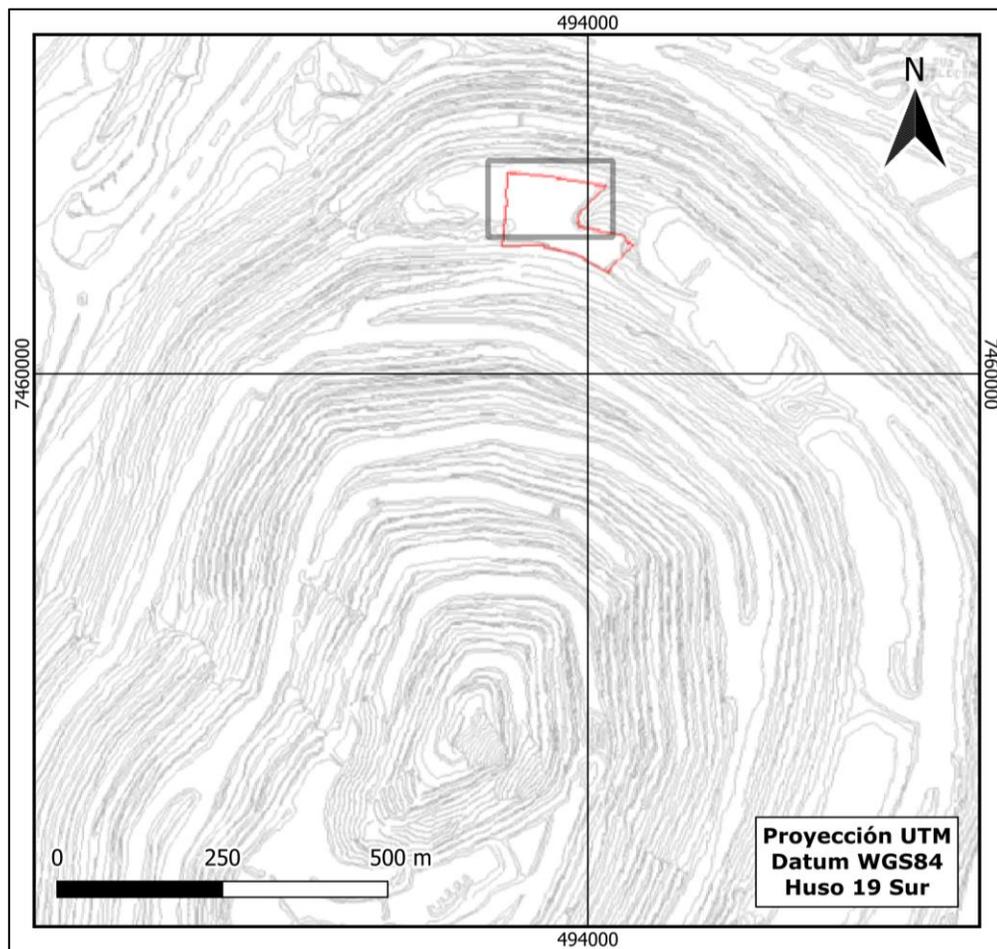
En los ensayos con el producto Pirex®P-50, 4 muestras presentan valores de *sleep time* entre 2,5 y 5 días, considerados de criticidad media, mientras que el ensayo de una muestra entrega un valor de *sleep time* sobre 5 días, considerado de criticidad baja.

Basándose en estos resultados, se recomienda el uso productos explosivos con inhibidores de reactividad para este sector, controlando el período de residencia de los explosivos en los pozos desde su carguío hasta el disparo.

## 6. EVENTO DE REACTIVIDAD EN FASE 7

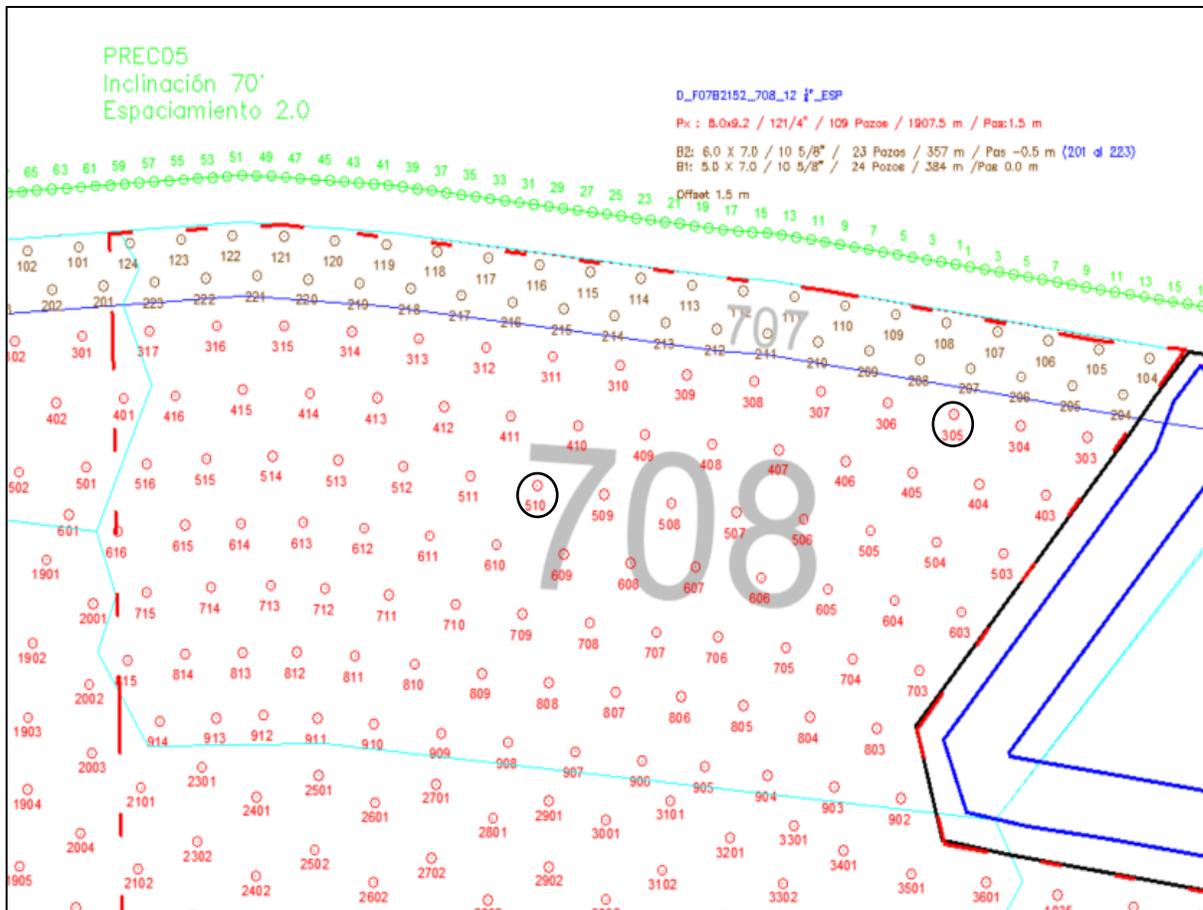
### 6.1. Descripción del evento

En febrero del año 2023, en el sector norte del rajo y específicamente en la zona conocida como Fase 7, mientras se realizaba el desarrollo del Banco 2152, se produce un evento de reactividad en la malla de tronadura 708, cuyo carguío de explosivos había comenzado 2 días atrás con productos explosivos sin componentes inhibidores de la reactividad (Fig. 6.1).



**Figura 6.1:** Localización del evento de reactividad en Fase 7. El polígono rojo muestra la extensión de la malla de tronadura 708 y el recuadro negro indica la ubicación de la Figura 6.2.

El evento comienza con la reacción espontánea y la detonación no planificada del pozo número 510 a las 8:00 horas. Dos horas más tarde se detectan emisiones gaseosas provenientes del pozo número 305, evidenciando la ocurrencia de reacciones espontáneas en los pozos de la malla de tronadura (Fig. 6.2).



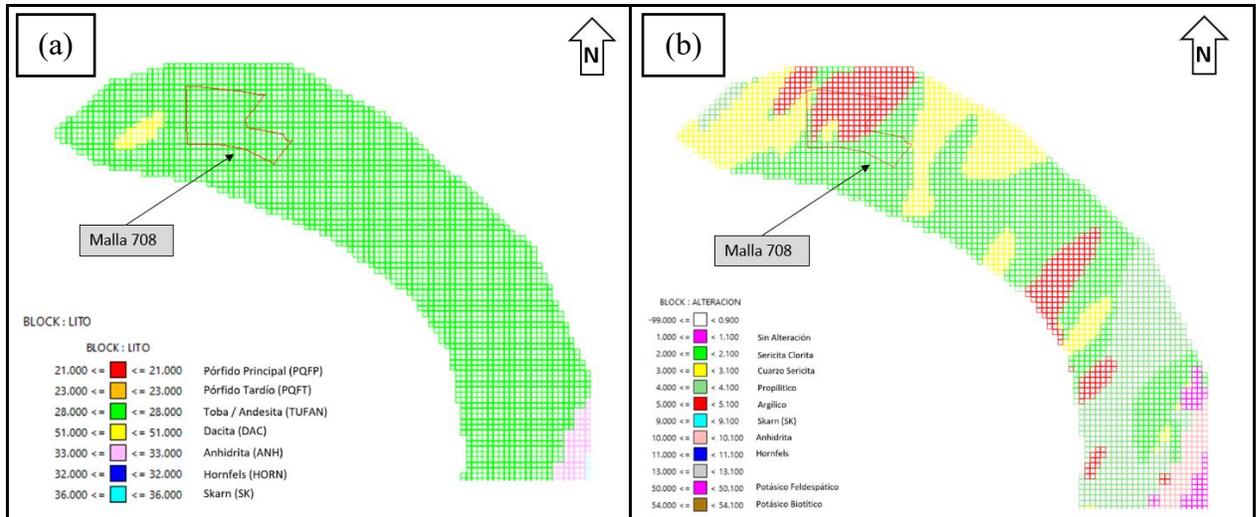
**Figura 6.2:** Detalle malla de tronadura 708. En los círculos negros se destaca la ubicación de los pozos 510 y 305.

Inmediatamente se activan protocolos correspondientes y se conforma un comité técnico para establecer un plan de manejo operativo, definiendo las prácticas operacionales inmediatas y el tipo de explosivo a utilizar en el sector.

## 6.2. Geología del sector del evento de reactividad

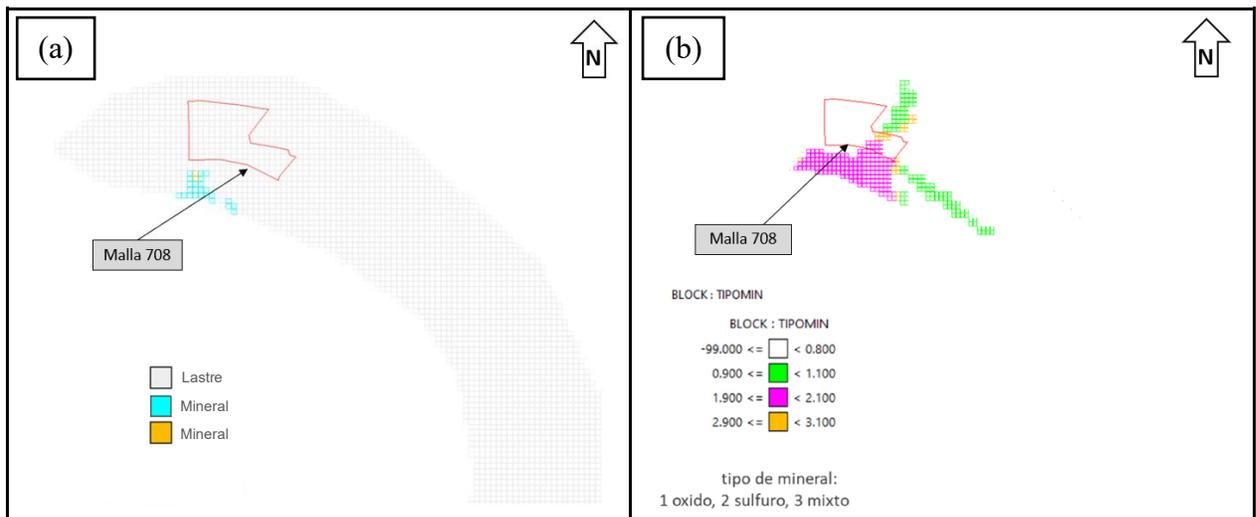
La información geológica disponible para este sector de Fase 7 se encuentra en los antiguos modelos de bloque de este banco, pues la malla ya se encuentra tronada y el material ha sido retirado de la zona.

Según estos antecedentes, en el sector donde ocurrió el evento la litología corresponde a tobas y andesitas, con alteraciones cuarzo-sericita, argílica y propilítica (Fig. 6.3).



**Figura 6.3: Modelos de bloques Fase 7 Banco 2152. (a) Modelo litológico. (b) Modelo de alteraciones.**

Con respecto a la mineralización, la malla 708 se emplaza en una zona considerada como lastre, sin interés económico y donde la mineralogía de mena se encuentra formando sulfuros, óxidos y sectores puntuales con una mezcla de ambos tipos de mineralización (Fig. 6.4).



**Figura 6.4: Modelos de bloques mineralización Fase 7 Banco 2152. (a) Modelo lastre/mineral. (b) Modelo tipo de mineralización.**

Además, es importante señalar que en la faena se desarrollan modelos de bloques del contenido de pirita, en los cuales no se considera su presencia en este banco.

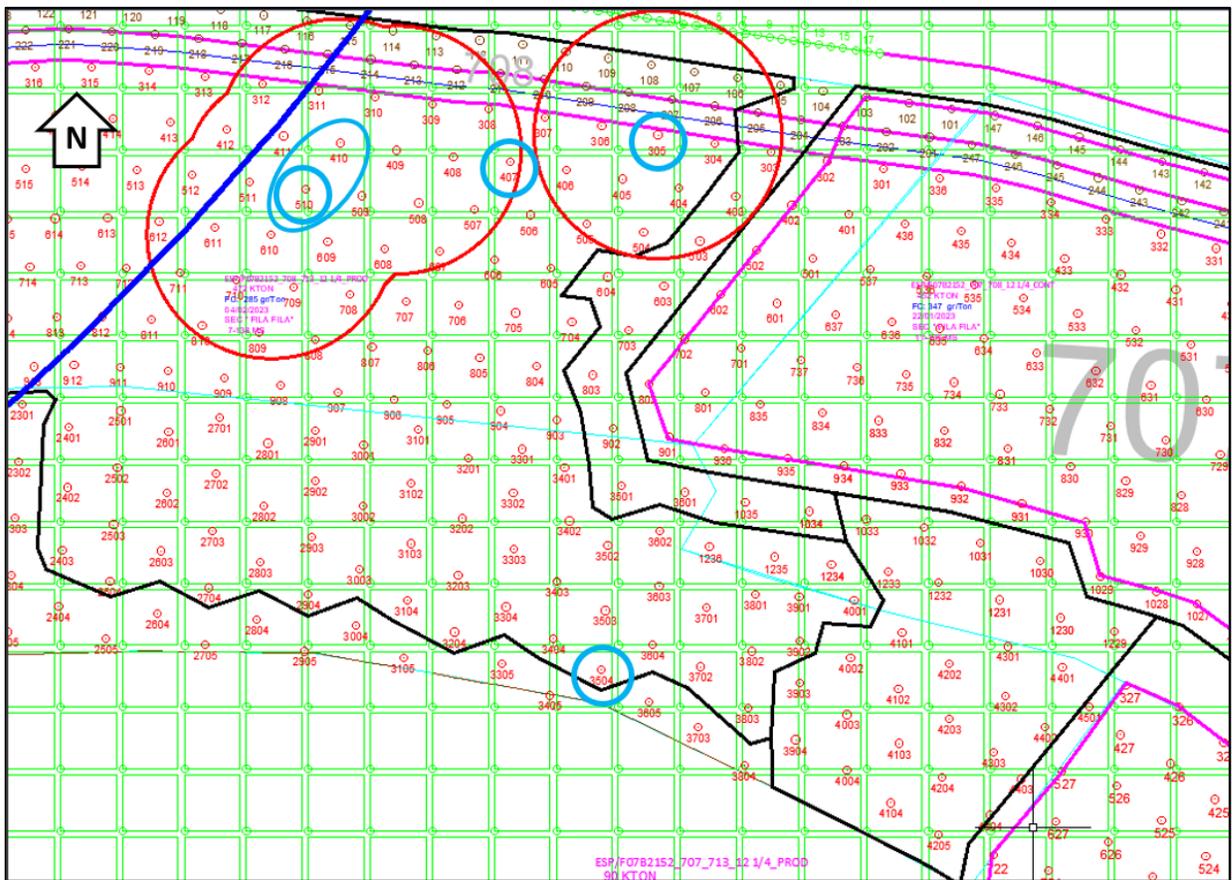
También es relevante mencionar que este sector se encuentra cerca de la Falla Túnel, una estructura de dirección NE/SO que puede ser un factor importante a considerar, pues la zona de falla asociada pudo canalizar fluidos y favorecer la meteorización de los minerales de hierro.

### 6.3. Muestreo en el sector del evento

En paralelo al plan de manejo operacional, se establece un plan de investigación del evento, buscando identificar los factores involucrados y definir criterios para aplicaciones futuras.

Con este objetivo, y siguiendo los protocolos de seguridad correspondientes, se realiza el muestreo de *cutting* de perforación de 4 pozos (305, 407, 510 y 3504), incluyendo los dos pozos involucrados en el evento.

Posterior a esto, se ejecuta el disparo de la malla y se toman 3 muestras adicionales, correspondientes al material tronado de la zona entre los pozos 510 y 410 (Fig. 6.5).



**Figura 6.5:** Muestreo de la zona del evento de reactividad en Fase 7. Los círculos celestes indican los pozos muestreados, mientras que la elipse indica el sector desde donde se obtienen las muestras post-disparo. La línea azul indica la traza de la Falla Túnel.

Estas muestras son almacenadas y etiquetadas para su despacho y análisis de reactividad y mineralogía.

## 7. RESULTADOS DE REACTIVIDAD Y MINERALOGÍA DE LAS MUESTRAS DE FASE 7

### 7.1. Análisis de reactividad

Para el análisis de reactividad en laboratorio, las muestras se someten a tratamiento mecánico hasta obtener la granulometría requerida para los ensayos (>90% sobre malla #10 Tyler). Además, las 3 muestras obtenidas post-disparo se mezclan y homogenizan en una sola, de código 510-410.

#### 7.1.1. Ensayos de reactividad

En los ensayos, la reactividad de las muestras al contacto con nitrato de amonio se evidencia por cambios abruptos en las temperaturas registradas en los termogramas, que son acompañados por indicios físicos de reacción, como la emisión de gases, cambios de coloración y volumen, efervescencia y burbujeo de las muestras (Fig. 7.1).



**Figura 7.1:** Ensayo de reactividad muestra 510-410. Se evidencia la ocurrencia de reacciones químicas y el desborde del vaso de precipitados.

De las 5 muestras analizadas en estos ensayos, el 100% exhibe un comportamiento reactivo auto sostenido (AS) al estar en contacto con nitrato de amonio (Tabla 7.1).

**Tabla 7.1: Resultados de los ensayos de reactividad para las muestras del evento en Fase 7.**

Código de muestra	Tipo de reacción	TiRx (°C)	Tmáx (°C)	Tmáx/TiRx
305	AS	59	141	2,4
407	AS	68	130	1,9
510	AS	65	183	2,8
3504	AS	73	149	2,0
510-410	AS	82	265	3,2

Para una muestra, se obtiene un parámetro de intensidad de reacción entre  $1,0 \leq (T_{máx}/T_{iRx}) < 2,0$ , considerado de baja criticidad e indicativo de reacciones poco exotérmicas, lentas y no violentas.

Tres de las muestras presentan valores del parámetro de intensidad de reacción entre  $2,0 \leq (T_{máx}/T_{iRx}) < 3,0$ , considerado de criticidad intermedia e indicativo de reacciones químicas de velocidad baja a intermedia.

Por último, en la reacción de una de las muestras se obtiene un parámetro de intensidad de reacción entre  $3,0 \leq (T_{máx}/T_{iRx}) < 4,5$ , considerado alto, e indicativo de reacciones que podrían presentar algún grado de violencia. Esta muestra corresponde al material tronado que fue obtenido del sector entre los pozos 510 y 410.

### 7.1.2. Ensayos de *sleep time*

Dado su comportamiento reactivo auto sostenido, la totalidad de las muestras se somete a ensayos de *sleep time* con los productos Vertex®950 y Pirex®50 a 30°C.

En estos ensayos, se registra la ocurrencia de reacciones químicas mediante cambios de temperatura detectados de manera instrumental, que son acompañados por indicios físicos, como cambios de color, disolución del *prill* de nitrato de amonio y aumentos de volumen del material en ensayo (Fig. 7.2).

Los ensayos de todas las muestras analizadas resultan en valores de *sleep time* de entre 0 y 2,5 días con ambos productos explosivos, valores que se consideran altamente críticos (Tabla 7.2).

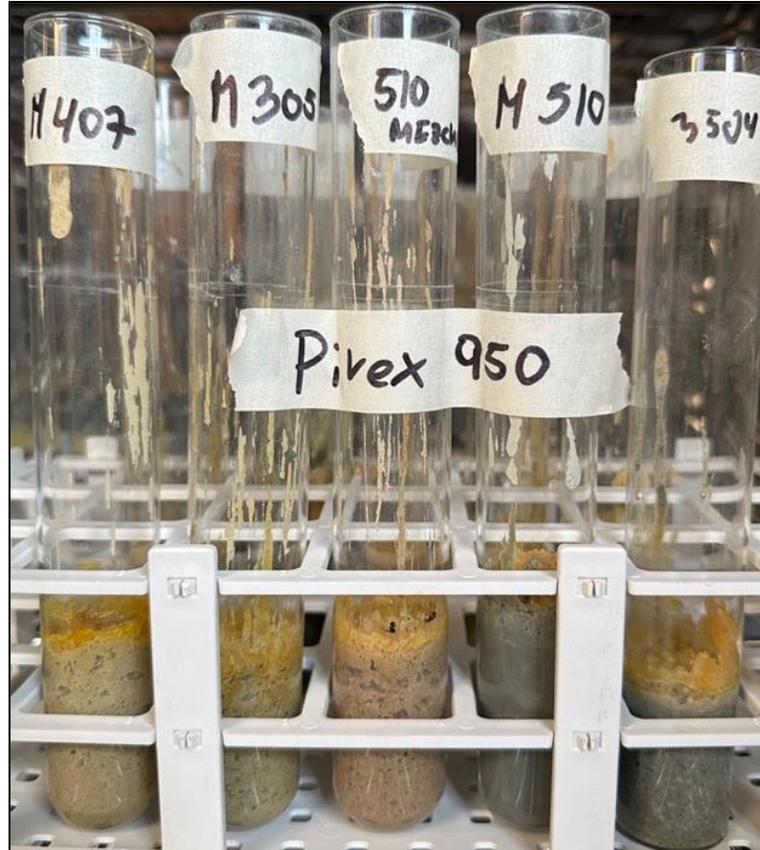


Figura 7.2: Muestras reaccionadas en el ensayo de *sleep time* con el producto Pirex®50. De izquierda a derecha las muestras 407, 305, 510-410, 510 y 3504.

Tabla 7.2: Resultados de los ensayos de *sleep time* para las muestras del evento en Fase 7.

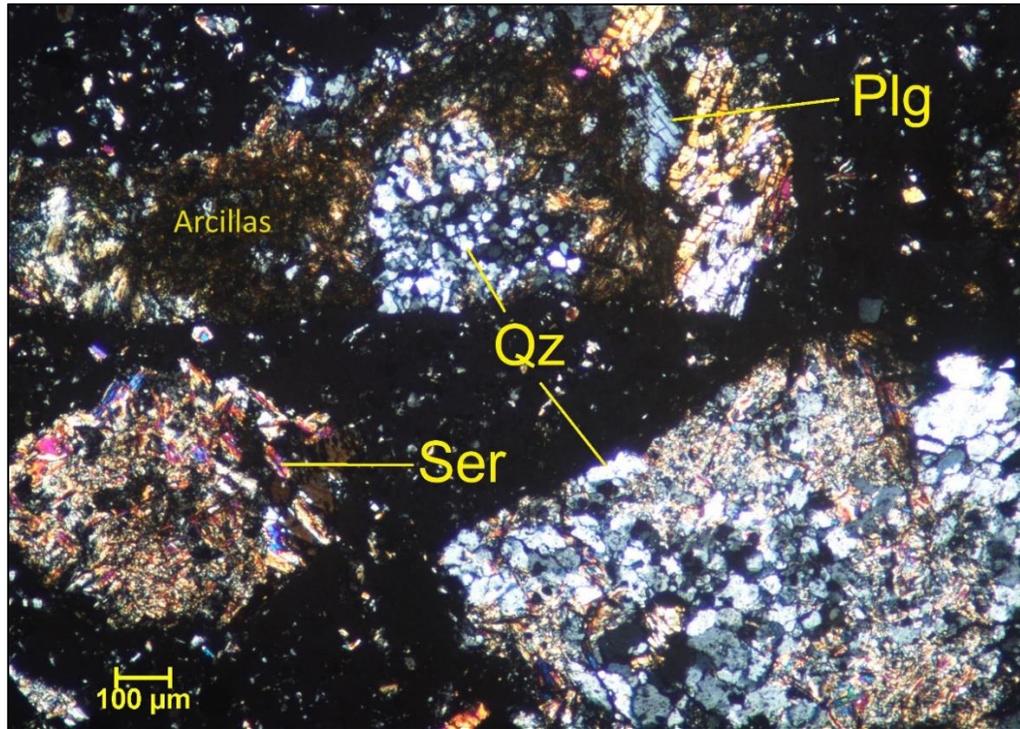
Código de muestra	<i>Sleep time</i> a 30°C (días)	
	Vertex®950	Pirex®50
305	1,3	1,5
407	1,0	1,0
510	1,0	1,0
3504	1,0	1,0
510-410	1,0	1,0

## 7.2. Análisis mineralógicos

Los análisis mineralógicos de las muestras provenientes del evento de reactividad en Fase 7 incluyen a las 7 muestras obtenidas inicialmente de la malla 708, manteniéndose las tres muestras de material tronado entre los pozos 510 y 410 como especímenes separados.

### 7.2.1. Microscopía óptica

Mediante este análisis se clasifica a la totalidad de las muestras como rocas tipo pórfido con intensa alteración hidrotermal, donde el porcentaje de roca alterada varía entre 80 y 85%, con evidencias de alteraciones sericítica, silíceas, alunitica, argílica y propilitica (Fig. 7.3).



**Figura 7.3: Fotomicrografía briqueta pulida de la muestra 510.** Se observa una intensa alteración de los fenocristales de feldespatos, que son reemplazados por cuarzo, sericita y arcillas. Plg: plagioclasa, Qz: cuarzo y Ser: sericita.

Entre los minerales primarios reconocidos por este método predomina el cuarzo, seguido en abundancia por feldespatos (de Ca, Na y K), además de anfíboles y micas (Tabla 7.3).

**Tabla 7.3: Mineralogía primaria mediante microscopía óptica.** Volumen en relación al total de minerales primarios.

Código de muestra	Cuarzo	Feldespatos	Anfíboles y micas
305	80%	19%	1%
407	85%	14%	1%
510	65%	34%	1%
3504	85%	14%	1%
510-410 (1)	75%	24%	1%
510-410 (2)	85%	14%	1%
510-410 (3)	80%	16%	1%

En cuanto a la mineralogía de alteración, se identifican elevados porcentajes de cuarzo y sericita, que se encuentran como pequeños cristales alterando a los feldespatos, preferentemente en sus bordes y fracturas. Además, se observan granos de alunita y anhidrita de tamaños variables, en conjunto con pequeñas cantidades de epidota, clorita y arcillas (Tabla 7.4).

**Tabla 7.4: Mineralogía de alteración mediante microscopía óptica.** Volumen en relación al total de minerales de alteración.

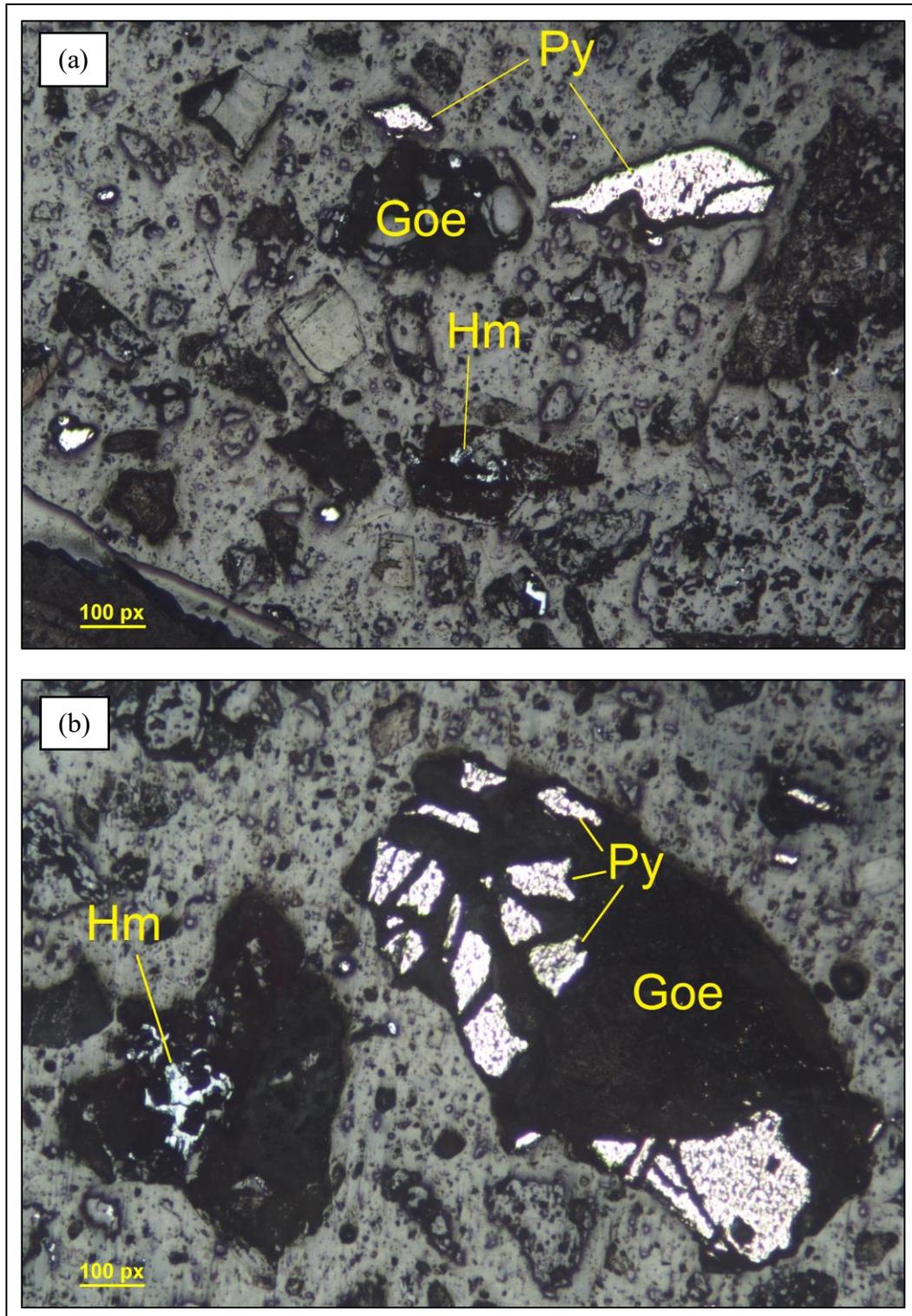
Código de muestra	Cuarzo	Sericita	Alunita	Anhidrita	Clorita y epidota	Arcillas
305	20%	35%	20%	23%	1%	1%
407	15%	40%	21%	19%	4%	1%
510	30%	45%	20%	-	1%	4%
3504	20%	25%	6%	20%	15%	4%
510-410 (1)	20%	35%	20%	20%	2%	3%
510-410 (2)	15%	35%	25%	20%	3%	2%
510-410 (3)	15%	35%	22%	22%	3%	3%

En lo que respecta a la mineralización metálica, en todas las muestras predominan importantes concentraciones de pirita. También se observa goethita y hematita en cantidades variables y se identifica calcopirita y magnetita en baja proporción en una de las muestras (Tabla 7.5).

**Tabla 7.5: Mineralización metálica mediante análisis de microscopía óptica.** Volumen en relación al total de la mineralización metálica.

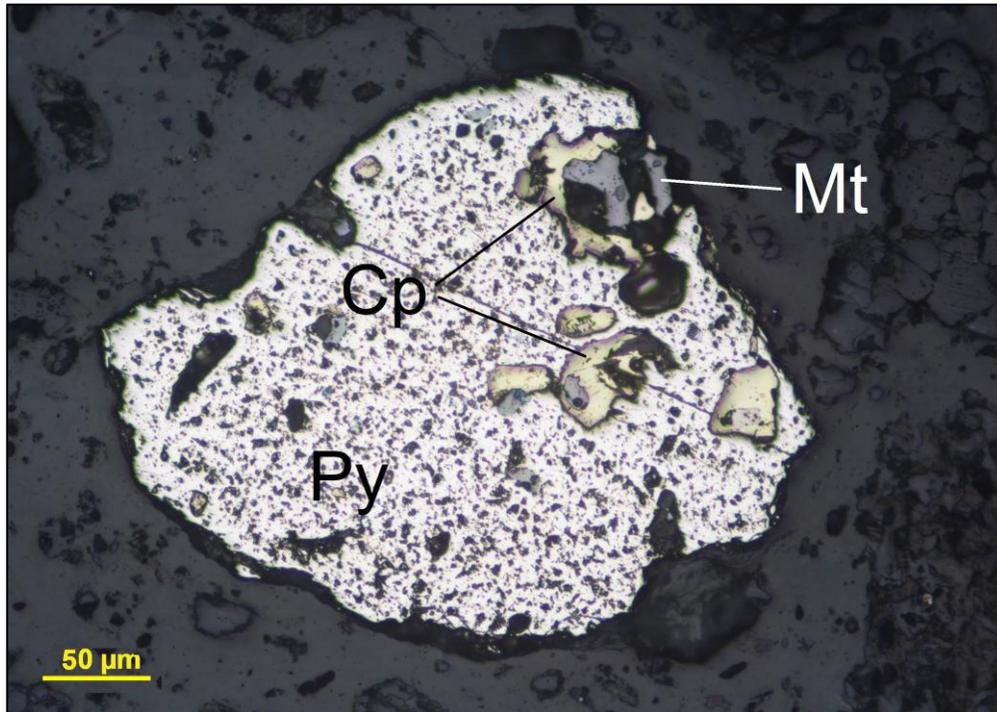
Código de muestra	Pirita	Hematita	Goethita	Magnetita	Calcopirita
305	60%	5%	35%	-	-
407	80%	5%	15%	-	-
510	80%	20%	-	-	-
3504	70%	3%	10%	7%	10%
510-410 (1)	50%	10%	40%	-	-
510-410 (2)	70%	20%	10%	-	-
510-410 (3)	70%	20%	10%	-	-

Con respecto a los modos de ocurrencia, la pirita se encuentra como disseminaciones de granos de tamaño variable y como relleno de espacios. La hematita se halla como reemplazo de cristales de pirita y como relleno de poros y fracturas y la goethita reemplaza granos de pirita y hematita y rellena poros y fracturas (Fig. 7.4).



**Figura 7.4:** Fotomicrografías de la mineralización metálica en la muestra 510-410 (1). (a) Pirita diseminada, hematita y goethita relleno de espacios. (b) Goethita reemplazando a pirita, hematita relleno de espacios. Py: pirita, Hm: hematita y Goe: goethita.

En la muestra 3504, la calcopirita se halla diseminada en granos finos, rellenando espacios, y como reemplazo de pirita, y la magnetita se encuentra rellenando espacios y como reemplazo de pirita y calcopirita (Fig. 7.5).



**Figura 7.5: Fotomicrografía muestra 3504.** Reemplazo de pirita por calcopirita, magnetita reemplazando calcopirita. Cp: calcopirita y Mt: magnetita.

### 7.2.2. Fluorescencia de rayos X

Para favorecer la interpretación de los resultados, se genera una simbología particular para los datos que no registran porcentaje, pero si se detecta la señal en el análisis. De esta manera se identifica la presencia de un elemento de la siguiente forma:

\* = Se observa presencia del elemento, se recomienda otra técnica de análisis.

? = Señal de muy baja intensidad.

\*? = Existe la posibilidad, pero se observa superposición de peak con otro elemento.

Además, se debe considerar la contaminación por molienda al analizar el %WO<sub>3</sub>, debido a la utilización de molino de carburo de tungsteno para el tratamiento mecánico de las muestras.

Considerando esta simbología, los resultados cuantitativos mediante FRX en roca total, se expresan en % de óxido (Tabla 7.6).

**Tabla 7.6: Concentraciones elementales mediante análisis por fluorescencia de rayos X.**

Óxido	Concentración (%)						
	Muestra 305	Muestra 407	Muestra 510	Muestra 3504	Muestra 510-410 (1)	Muestra 510-410 (2)	Muestra 510-410 (3)
F	0,12	0,07	-	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> O	0,31	0,36	0,34	2,11	0,89	1,07	0,76
MgO	1,70	2,11	2,02	4,05	2,96	2,90	2,31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,36	17,20	15,60	16,72	16,05	16,38	16,09
SiO <sub>2</sub>	36,63	38,62	35,25	38,86	40,71	41,98	40,71
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,23	0,29	0,20	0,41	0,23	0,22	0,20
SO <sub>3</sub>	23,62	21,28	24,95	15,76	21,31	20,17	20,97
Cl	0,59	0,72	0,46	0,37	0,65	0,75	0,84
K <sub>2</sub> O	4,20	4,02	3,98	1,67	2,55	2,56	2,96
CaO	8,29	7,45	6,65	9,57	6,29	6,16	6,87
TiO <sub>2</sub>	0,60	0,60	0,58	1,06	0,57	0,64	0,54
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	-	0,03	0,04	-	0,02	0,03
MnO	*	0,03	0,03	0,06	0,04	0,03	0,04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,04	7,07	9,69	8,97	7,49	6,85	7,38
Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	*	-	*	-	*	?	-
NiO	*	*	?	-	-	?	-
CuO	0,03	0,07	0,04	0,15	0,06	0,08	0,10
ZnO	0,01	*	*	*	0,02	0,02	0,03
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	?	?	-	-	?
Br	-	*	-	-	-	-	?
Rb <sub>2</sub> O	*	*	*	*	*	*	*
SrO	0,09	0,07	0,06	0,09	0,08	0,07	0,07
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	*?	-	*?	*?	*?	*?	*?
ZrO <sub>2</sub>	*	*?	*	0,03	*	*	0,02
MoO <sub>3</sub>	-	*	-	-	-	-	-
BaO	0,05	-	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05
WO <sub>3</sub>	0,02	-	0,03	?	*	*	*

### 7.2.3. Difracción de rayos X

Del análisis y procesamiento de los difractogramas (Anexo II), se identifica un total de 21 fases minerales y sus abundancias semicuantitativas (Tabla 7.7).

**Tabla 7.7: Resultados de la semicuantificación automática por análisis de difracción de rayos X. (\*) corresponde a un grupo de silicatos de boro con múltiples sustituciones iónicas.**

	Fase mineral y fórmula química	Muestra						
		305	407	510	3504	510-410 (1)	510-410 (2)	510-410 (3)
Mineralogía semicuantitativa (%)	Cuarzo SiO <sub>2</sub>	33,8	36,5	30,4	38,1	36,8	36,3	33,5
	Anhidrita CaSO <sub>4</sub>	32,5	31,4	27,8	8,2	22,7	28,2	25,7
	Yeso CaSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	-	-	-	7	-	-	-
	Pirita FeS <sub>2</sub>	1,2	1,3	5,7	2,9	1,8	1	2,1
	Szomolnokita Fe(SO <sub>4</sub> ) · H <sub>2</sub> O	2,6	2,2	4,6	-	1,7	1,5	1,4
	Kieserita Mg(SO <sub>4</sub> ) · H <sub>2</sub> O	-	-	1,9	-	3,7	3,8	5,8
	Jarosita KFe <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	1	1,8	-	-	1,2	0,7	1,4
	Alunita KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	3,9	4,7	5,9	-	3,4	2,9	2,5
	Botriógeno MgFe <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) · 7H <sub>2</sub> O	0,7	0,5	-	-	-	-	-
	Hematita Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5	0,5	0,8	-	0,2	0,8	0,7
	Goethita FeO(OH)	0,7	0,6	1,1	-	0,8	0,4	1,5
	Anortita Ca(Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	-	-	-	5	-	-	-
	Microclina K(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	2,1	-	-	-	-	1,6	2,4
	Albita Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	1,3	0,9	1,1	13,4	3,5	2,1	1,6
	Diópsido CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	-	1,9	2	2	1,3	-	-
	Turmalina *	3,3	5,2	4	-	-	-	-
	Muscovita KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	15,2	11,6	12,7	11	19,4	15,9	15,5
	Clinocloro Mg <sub>3</sub> Al(AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>8</sub>	-	-	-	12,4	2,5	-	-
	Caolinita Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	1,3	-	1,2	-	-	1,3	-
	Montmorillonita (Na,Ca) <sub>0,3</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> · nH <sub>2</sub> O	-	0,9	-	-	0,2	3,3	5,9
Rutilo TiO <sub>2</sub>	-	-	0,8	-	0,8	0,2	-	

## 7.2.4. Análisis QEMSCAN®

### 7.2.4.1. Cuantificación de la mineralogía modal

El recuento modal de las especies identificadas y agrupadas según la lista secundaria condensada (Fig. 4.7) permite obtener las concentraciones de estas fases minerales expresadas en su porcentaje en peso (Tabla 7.8).

**Tabla 7.8: Composición de las muestras mediante análisis QEMSCAN®.** Donde la clasificación “*Other fine mineral mixtures\**” corresponde a una mezcla muy fina de silicatos y sulfatos de hierro y aluminio.

Mineral	Composición (%)						
	Muestra 305	Muestra 407	Muestra 510	Muestra 3504	Muestra 510-410 (1)	Muestra 510-410 (2)	Muestra 510-410 (3)
Calcopirita	0,00	0,00	0,00	0,56	0,00	0,00	0,00
Calcosina/ Digenita / Covelina	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00
Óxidos de cobre	0,00	0,01	0,01	0,04	0,00	0,01	0,00
Otros sulfuros	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Pirita	3,63	2,75	9,57	10,10	5,83	3,57	5,89
Cuarzo	29,72	24,93	23,27	20,48	28,42	26,04	24,94
Feldspato potásico	4,10	4,19	3,31	2,50	2,70	2,89	2,49
Plagioclasas	0,06	0,05	0,01	8,19	0,98	2,09	0,94
Piroxenos / Anfíboles	0,04	0,02	0,02	0,16	0,02	0,02	0,01
Clorita	1,79	2,13	2,04	20,89	0,76	1,36	1,94
Muscovita	20,97	22,38	19,56	11,94	15,30	15,50	16,23
Biotita	1,07	1,10	1,01	1,33	0,21	0,31	0,22
Epidota	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00
Silicatos accesorios	0,17	0,46	0,15	0,78	0,35	0,38	0,29
Turmalina	1,51	1,19	1,61	0,02	0,01	0,02	0,15
Arcillas	1,29	3,35	1,63	5,78	7,18	8,69	8,16
Anhidrita / Yeso	13,67	12,44	10,91	5,05	12,62	11,75	13,75
Alunita / Jarosita	13,04	14,92	17,84	0,88	17,06	18,18	17,31
Carbonatos	0,00	0,01	0,00	0,05	0,00	0,00	0,01
Óxidos / hidróxidos de hierro	0,93	1,59	0,54	2,83	1,72	1,73	1,03
Rutilo / Anatasa	0,76	0,78	0,58	1,46	0,81	0,66	0,56
Molibdenita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02
<i>Other fine mineral mixtures*</i>	7,24	7,68	7,92	6,81	6,00	6,78	6,06

### 7.2.4.2. Tamaño promedio de las fases

El tamaño promedio de las fases medidas se presenta en la Tabla 7.9.

**Tabla 7.9: Tamaño de grano promedio de las fases medidas mediante QEMSCAN®.** La clasificación “*Other fine mineral mixtures*”\*) corresponde a una mezcla muy fina de silicatos y sulfatos de hierro y aluminio.

Mineral	Tamaño promedio (µm)						
	Muestra 305	Muestra 407	Muestra 510	Muestra 3504	Muestra 510-410 (1)	Muestra 510-410 (2)	Muestra 510-410 (3)
Calcopirita	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
Calcosina / Digenita / Covelina	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Óxidos de cobre	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Otros sulfuros	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pirita	0,7	0,6	1,9	2,0	1,2	0,7	1,2
Cuarzo	11,3	9,5	8,9	7,8	10,8	9,9	9,5
Feldespato potásico	1,5	1,6	1,2	0,9	1,0	1,1	0,9
Plagioclasas	0,0	0,0	0,0	3,1	0,4	0,8	0,4
Piroxenos / Anfíboles	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
Clorita	0,7	0,8	0,7	7,4	0,3	0,5	0,7
Muscovita	7,0	7,4	6,3	4,2	5,2	5,2	5,4
Biotita	0,3	0,4	0,3	0,4	0,1	0,1	0,1
Epidota	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Silicatos accesorios	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
Turmalina	0,5	0,4	0,5	0,0	0,0	0,0	0,1
Arcillas	0,5	1,2	0,6	2,2	2,6	3,2	3,0
Anhidrita / Yeso	5,8	5,3	4,6	2,3	5,4	5,0	5,9
Alunita / Jarosita	4,3	5,0	5,9	0,3	5,5	6,0	5,6
Carbonatos	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
Óxidos / hidróxidos de hierro	0,2	0,4	0,1	0,6	0,4	0,4	0,2
Rutilo / Anatasa	0,2	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,1
Molibdenita	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1
<i>Other fine mineral mixtures</i> *	2,4	2,6	2,6	2,1	2,0	2,3	2,0

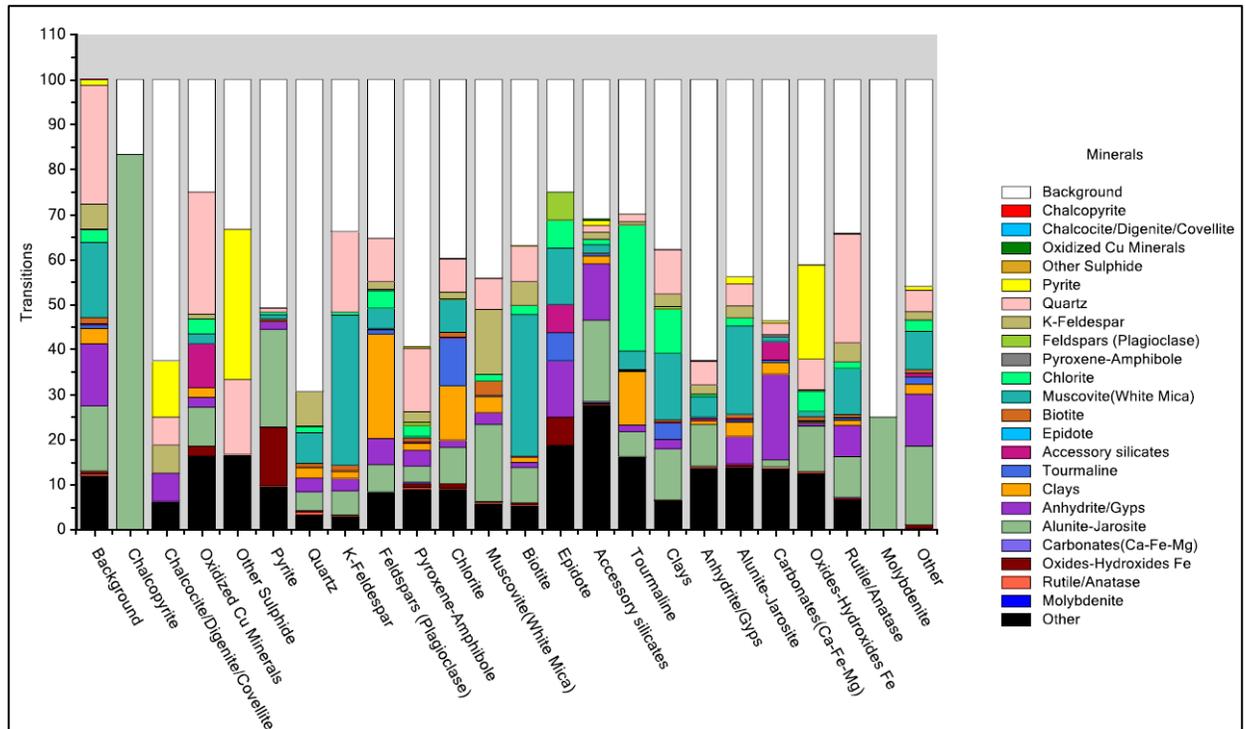
### 7.2.4.3. Asociación mineral

La asociación mineral de las fases en cada muestra se exhibe en los diagramas acumulativos por fase mineral (Anexo III).

Estos diagramas entregan información de la asociatividad de cada fase al cuantificar el área de contacto entre diferentes fases.

La asociación con el “*background*” corresponde a transiciones de pixel desde una fase mineral a la resina de la briqueta preparada para el análisis.

En general, la pirita en las muestras tiene un alto grado de asociación con alunita, jarosita y con óxidos e hidróxidos de hierro. Además, destaca su elevada asociación con el *background* (Fig. 7.6).



**Figura 7.6:** Asociación mineral (transiciones) de la muestra 407. Normalizado al 100% de transiciones entre minerales (columnas).

#### 7.2.4.4. Grado de liberación de la pirita

Para el cálculo del grado de liberación, QEMSCAN® establece categorías de liberación con incrementos de 10% en cada intervalo, comenzando con el intervalo de 0 a  $\leq 10\%$  de liberación.

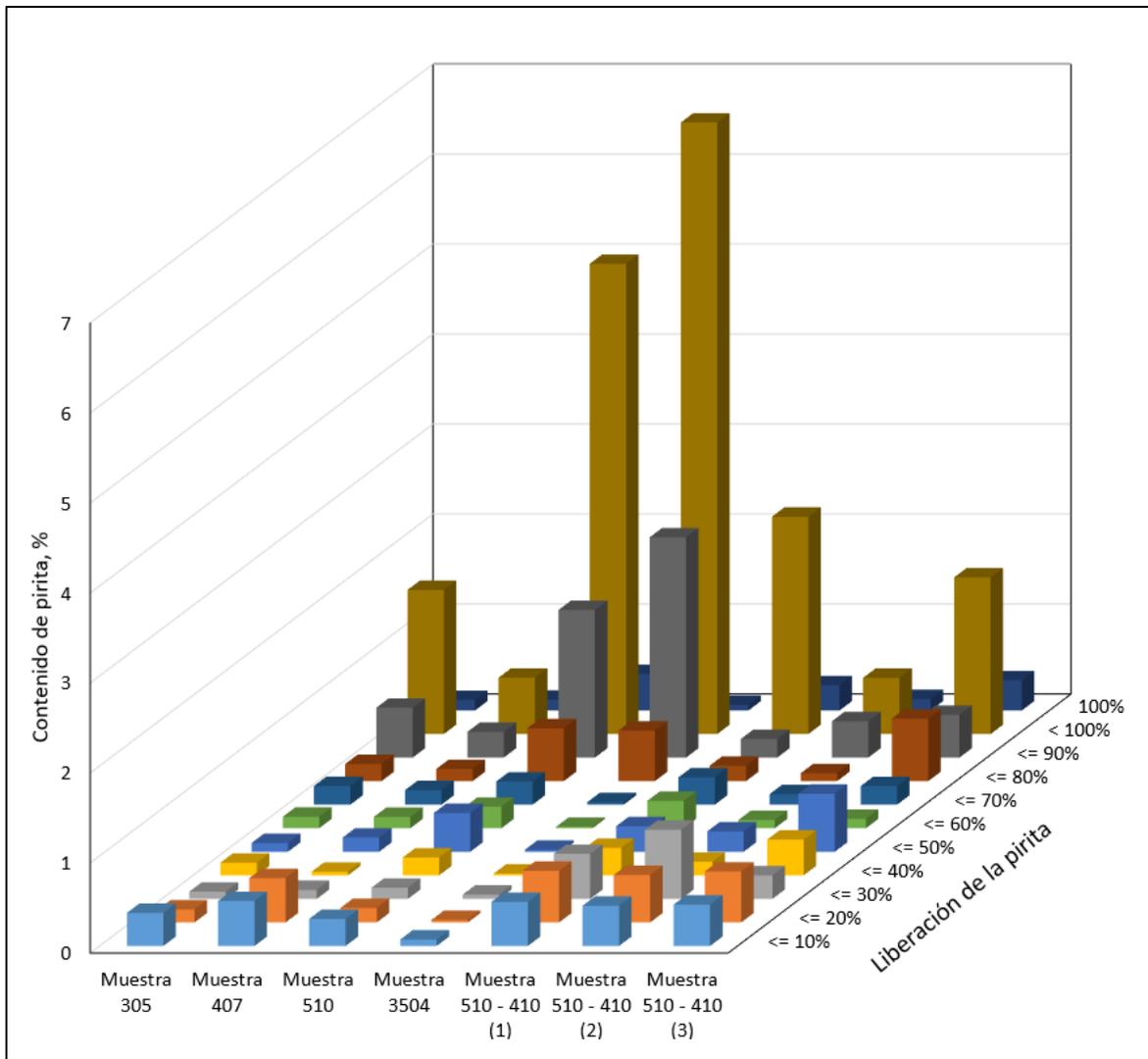
De esta forma, se clasifica el grado de liberación en 11 intervalos, donde la última clasificación corresponde al 100%, es decir, partículas compuestas únicamente por pirita.

El grado de liberación de las piritas de cada muestra puede ser expresado en términos del porcentaje en peso del mineral contenido en la muestra (Tabla 7.10), el cual puede ser representarse gráficamente para facilitar su interpretación (Fig. 7.7). En términos generales, el intervalo  $90\% <$

grado de liberación  $\leq 100\%$  concentra gran parte del contenido de pirita en las muestras, es decir, la mayoría de la pirita se encuentra en partículas donde este mineral ocupa más del 90% del volumen en cada partícula.

**Tabla 7.10: Grado de liberación de la pirita según su porcentaje en peso en cada muestra.**

		Muestra 305	Muestra 407	Muestra 510	Muestra 3504	Muestra 510-410 (1)	Muestra 510-410 (2)	Muestra 510-410 (3)
Liberación de la pirita, (% en peso)	$\leq 10$	0,37	0,50	0,30	0,07	0,49	0,45	0,46
	$> 10\%$ $\leq 20\%$	0,14	0,49	0,16	0,03	0,57	0,53	0,57
	$> 20\%$ $\leq 30\%$	0,08	0,10	0,12	0,05	0,50	0,77	0,26
	$> 30\%$ $\leq 40\%$	0,14	0,04	0,20	0,02	0,30	0,15	0,40
	$> 40\%$ $\leq 50\%$	0,10	0,16	0,43	0,02	0,28	0,23	0,65
	$> 50\%$ $\leq 60\%$	0,13	0,13	0,24	0,02	0,30	0,09	0,10
	$> 60\%$ $\leq 70\%$	0,21	0,16	0,26	0,03	0,30	0,12	0,21
	$> 70\%$ $\leq 80\%$	0,19	0,14	0,59	0,56	0,17	0,09	0,69
	$> 80\%$ $\leq 90\%$	0,55	0,29	1,64	2,45	0,21	0,40	0,47
	$> 90\%$ $\leq 100\%$	1,60	0,63	5,22	6,79	2,41	0,62	1,74
	100%	0,12	0,12	0,40	0,06	0,28	0,13	0,34
	Total	3,63	2,75	9,57	10,10	5,83	3,57	5,89



**Figura 7.7: Grado de liberación de la pirita según su porcentaje en peso en cada muestra.**

Alternativamente, el grado de liberación de las partículas de pirita puede ser expresado considerando el porcentaje normalizado con respecto al 100% de pirita en cada muestra.

En esta representación se mantiene el predominio del intervalo  $90\% < \text{grado de liberación} \leq 100\%$ , destacándose las muestras 510 y 3504, donde el 54,60 y 67,27% de la pirita total de cada muestra tiene un grado de liberación cuyo valor se encuentra en este intervalo (Tabla 7.11). La representación gráfica de estos datos (Fig. 7.8) permite facilitar su interpretación y destaca los altos grados de liberación de las piritas en gran parte de las muestras.



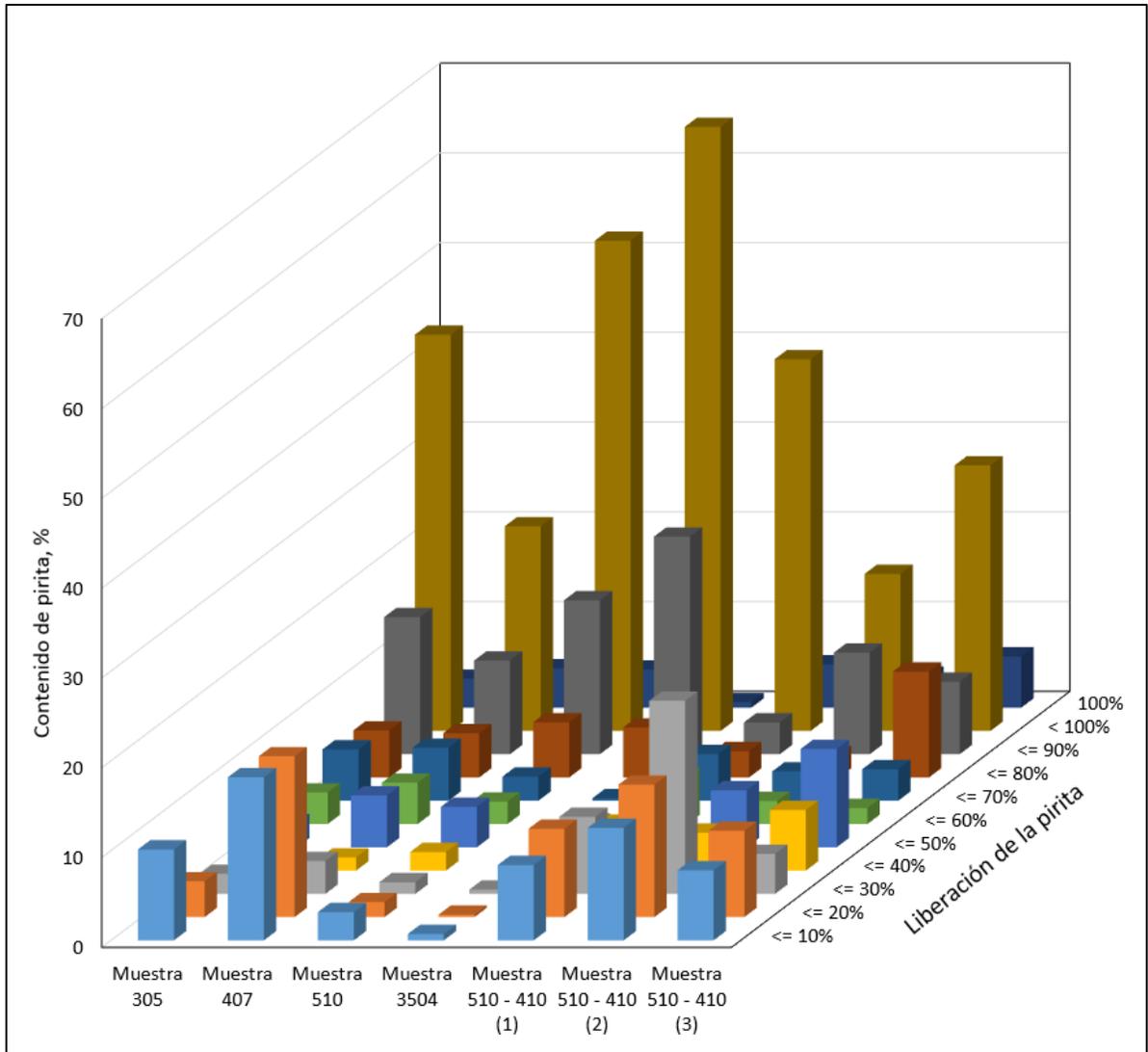


Figura 7.8: Grado de liberación de la pirita según porcentaje normalizado al total de pirita.

## 8. DISCUSIÓN

### 8.1. Antecedentes de reactividad en Fase 6 y Fase 8

La reactividad de Fase 6 y Fase 8 parece ser condicionada por factores geológicos diferentes entre sí.

En Fase 6, todas las muestras exhiben un comportamiento reactivo auto sostenido pese a sus bajas concentraciones de pirita (<1%). La reactividad del material en este sector podría deberse a la presencia de otros sulfuros de hierro, considerando que esta zona constituye el centro del rajo, donde se registran las mayores concentraciones de sulfuros de cobre y hierro como calcopirita y bornita, que podrían ser importantes en la reactividad de esta zona.

En cuanto a Fase 8, la reactividad se debe posiblemente al contenido de pirita, que es mayor a 2,5% en todas las muestras analizadas. El elevado porcentaje de pirita en la Fase 8 es consecuente con lo que se indica en literatura respecto a la distribución de la pirita en el depósito, con contenidos mayores en las alteraciones más externas del sistema hidrotermal (Perelló y otros, 2004; Kojima y otros, 2021), en este caso las alteraciones sericita-clorita y propilítica.

Además, los resultados de los ensayos de *sleep time* para las muestras de ambas fases ponen de manifiesto la efectividad del uso de explosivos con compuestos inhibidores como medida preventiva para abordar este problema en estos sectores.

La revisión de estudios previos en las fases 6 y 8 permite señalar que, si bien la reactividad de estos sectores no se ha manifestado de manera evidente, las rocas de Fase 6 y Fase 8 son capaces de reaccionar exotérmicamente al estar en contacto con nitrato de amonio.

### 8.2. Evento de reactividad en Fase 7

En la malla de tronadura involucrada en el evento de reactividad no se toman las medidas preventivas para evitar reacciones no deseadas, se utilizan explosivos sin compuestos inhibidores y se mantienen elevados tiempos de residencia de los explosivos en los pozos, esto ocurre porque no se anticipa el comportamiento reactivo en este sector, ya que no se registra la presencia de pirita.

La ausencia de pirita en los modelos de bloque se debe probablemente a que el mapeo no se realizó con suficiente detalle, ya que el sector se considera lastre y la minera enfoca sus esfuerzos en el mapeo de zonas con minerales de interés económico.

### 8.2.1. Ensayos de reactividad y *sleep time*

Los resultados de los análisis para caracterizar la reactividad de Fase 7 indican que todas las muestras del sector desarrollan reacciones auto sostenidas al estar en contacto con nitrato de amonio.

Los ensayos de reactividad registran temperaturas de inicio de reacción entre 59 y 82°C, es decir, fue necesario aplicar una cantidad considerable de calor a los montajes para desencadenar las reacciones. No obstante, esto no implica que los pozos involucrados en el evento debieron alcanzar estas temperaturas para comenzar a reaccionar, ya que dentro de cada pozo las condiciones fisicoquímicas son distintas; y factores como el confinamiento, la acidez, humedad y conductividad térmica pueden influir en las temperaturas de inicio de las reacciones *in situ*.

Las temperaturas máximas alcanzadas en estos ensayos no son tan elevadas como las de estudios previos en el rajo (Fase 6 y Fase 8), y los parámetros de intensidad de reacción ( $T_{\text{máx}}/T_{\text{Rx}}$ ) no constituyen valores de alta criticidad, sin embargo, las temperaturas alcanzadas en los pozos fueron suficientes para desencadenar emisiones gaseosas y la detonación espontánea de uno de ellos, por lo que no se puede descartar el riesgo de reacciones no deseadas considerando exclusivamente estos parámetros.

En cuanto a los ensayos de *sleep time*, es importante notar que con todas las muestras se obtienen valores altamente críticos, incluso al realizar ensayos con productos explosivos con compuestos inhibidores de la reactividad.

La capacidad de estas muestras de reaccionar con nitrato de amonio en tiempos tan acotados es un factor importante en la ocurrencia del evento en Fase 7. Las rocas de este sector tienen una combinación mineralógica específica que las hace especialmente reactivas, por lo que es de gran interés analizar la mineralogía de este material.

### 8.2.2. Análisis mineralógicos

#### 8.2.2.1. Microscopía óptica

En el análisis de pulidos se clasifica a las muestras como rocas tipo pórfido con una masa fundamental microcristalina, lo que difiere de la información disponible en el modelo de bloques, en el cual se muestra la presencia de andesitas y tobas en el sector.

Al analizar las microfotografías (Anexo I), en algunas muestras se logran distinguir cristales de tamaño importante en la masa fundamental, mientras que en otras la fracción fina se aprecia afanítica y con partículas que parecen ser vidrio. A partir de este análisis no queda claro si estas muestras corresponden a lavas o intrusivos someros, pues el grado de cristalización de la masa fundamental se encuentra en el límite entre ambos tipos roca, además, las múltiples alteraciones hidrotermales posteriores pudieron cambiar el aspecto de la textura original.

Un método más confiable para determinar el tipo de roca sería observar las relaciones de contacto de estas unidades en terreno, lo que permitiría distinguir si se trata de rocas intrusivas o extrusivas, sin embargo, este sector ya se encuentra tronado y removido. De todas formas, el tipo de roca original no es de gran relevancia para el análisis, considerando que en cualquier caso se trata de rocas de composición y textura similar.

En cuanto a la mineralogía de alteración, las relaciones entre sericita y cuarzo, arcillas y cuarzo y alunita y cuarzo, indican alteraciones filica, argílica intermedia y argílica avanzada respectivamente, evidenciando una evolución de los fluidos hidrotermales hacia composiciones cada vez más ácidas. Las alteraciones identificadas son consistentes con el modelo de bloques.

En este depósito, la presencia de estas alteraciones se asocia con altos contenidos de pirita y escasa concentración de minerales de mena (Kojima y otros, 2021), lo cual concuerda con los modelos de bloque y coincide con los resultados del análisis por microscopía óptica.

En las briquetas pulidas, se observan importantes cantidades de pirita en conjunto con hematita y goethita, lo que indica condiciones oxidantes que habrían provocado el reemplazo de parte de la pirita primaria por estos óxidos de hierro y es evidencia de procesos supérgenos afectando a las rocas de esta zona.

La muestra 3504 corresponde al borde sur de la malla, acercándose a zonas de interés económico con mayores concentraciones de sulfuros de cobre. En esta muestra, la paragénesis de pirita, calcopirita y magnetita indica mineralización hipógena, mientras que los bajos contenidos de hematita y goethita se relacionan a una alteración supérgena.

En todas las muestras se identifica mineralización metálica con hierro en su composición, lo que podría ser un factor importante que condiciona la reactividad del sector.

### 8.2.2.2. Fluorescencia de rayos X

Las concentraciones de elementos mayores de todas las muestras se encuentran dentro de lo esperado para rocas ígneas de composición intermedia a ácida (LeMaitre, 1976 en Winter, 2014; Fig. 8.1), aunque los contenidos de sílice son más bajos de lo normal.

Oxide	Peridotite	Basalt	Andesite	Rhyolite	Phonolite
SiO <sub>2</sub>	44.8	49.2	57.9	72.8	56.2
TiO <sub>2</sub>	0.19	1.84	0.87	0.28	0.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.16	15.7	17.0	13.3	19.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.36	3.79	3.27	1.48	2.79
FeO	6.85	7.13	4.04	1.11	2.03
MnO	0.11	0.20	0.14	0.06	0.17
MgO	39.2	6.73	3.33	0.39	1.07
CaO	2.42	9.47	6.79	1.14	2.72
Na <sub>2</sub> O	0.22	2.91	3.48	3.55	7.79
K <sub>2</sub> O	0.05	1.10	1.62	4.30	5.24
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.0	0.95	0.83	1.10	1.57
Total	99.36	99.02	99.27	99.51	99.20

**Figura 8.1: Composición química promedio representativa de rocas ígneas.** Obtenido de Winter (2014).

Es razonable que la señal geoquímica de la roca original haya cambiado producto de las sucesivas alteraciones hidrotermales, y esto se aprecia especialmente en la señal del azufre, con concentraciones superiores a 15% en todas las muestras.

Estos contenidos de azufre son mucho más altos que lo esperado en rocas ígneas y en este caso se relacionan con la presencia de cantidades importantes de sulfuros y/o sulfatos.

Con respecto a los elementos menores, la variedad y concentraciones no escapan de lo común para este tipo de rocas. El flúor, fósforo, titanio, vanadio y manganeso son elementos que pueden encontrarse formando minerales como la turmalina, apatito y rutilo, o sustituyendo a otros elementos en los minerales que conforman a estas rocas.

Los bajos contenidos de cobre y zinc, y la ausencia de molibdeno concuerdan con el mapeo y modelamiento del rajo, donde se considera a esta zona como lastre.

### 8.2.2.3. Difracción de rayos X

El mineral cuya señal se recibe con mayor intensidad es el cuarzo, además, se registra la señal de albita, anortita, microclina, turmalina, rutilo y muscovita, que son minerales de la roca primaria cuya presencia es coherente con los resultados del análisis por FRX. El alto conteo de señal de la muscovita se debe probablemente a que, además de muscovita primaria, hay elevadas concentraciones de sericita en todas las muestras.

Es interesante notar que no se detectan minerales primarios de hierro, por lo que se puede señalar que gran parte del hierro del sistema ha sido removilizado para formar minerales secundarios.

Además, se detecta la presencia de distintos tipos de arcillas, que se relacionan con la alteración argílica intermedia que afecta a estas rocas. En el caso de estas muestras, ninguna de las arcillas contiene hierro, por lo que no tendrían un rol relevante en el comportamiento reactivo del material en análisis.

La difracción de rayos X confirma nuevamente la presencia de pirita, uno de los minerales más asociados con fenómenos de reactividad. De igual modo, se identifica hematita y goethita, minerales relacionados con la oxidación de sulfuros primarios que también contienen hierro en su estructura.

Además, se detectan las señales de una alta variedad de sulfatos, que probablemente son productos de los procesos de alteración supérgena. En particular, es relevante la presencia de jarosita y szomolnokita, por la alta intensidad de sus señales y porque ambos contienen hierro en su estructura.

A partir de este análisis, se determina que la mayor parte del hierro en estas muestras se encuentra formando sulfuros, óxidos, oxihidróxidos y sulfatos.

La capacidad de estos minerales de aportar hierro a las reacciones con el nitrato de amonio y, por lo tanto, a la reactividad de estas muestras, puede variar según el grado de estabilidad de estas fases en las condiciones fisicoquímicas de los pozos de tronadura.

Con respecto a la estabilidad de la pirita, es ampliamente aceptado que este es un mineral que puede aportar hierro y causar descensos en el pH, incrementando el riesgo de reacciones no deseadas con el explosivo.

En contraste, la goethita es termodinámicamente el oxihidróxido de hierro más estable a temperaturas ambientales (Blowes y otros, 2014). La hematita es ligeramente menos estable y la magnetita es el mineral menos estable de estos tres (Schwertmann, 1991). Este último, aun siendo el mineral menos estable, es considerado relativamente estable excepto en condiciones de pH extremadamente bajos (Moncur y otros, 2009).

En cuanto a los sulfatos, la jarosita es un mineral que se forma a bajos valores de pH y es relativamente insoluble (Blowes y otros, 2014), por lo que su incidencia en la reactividad de estas rocas no sería muy relevante.

La szomolnokita es un mineral que se forma a partir de la oxidación de la pirita, la que, al ser expuesta al aire y la humedad, libera compuestos que participan en la formación de una serie de sulfatos de hierro. En las primeras etapas de oxidación supérgena de la pirita se forma la melanterita ( $\text{Fe}(\text{SO})_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), que es uno de los sulfatos más inestables a temperatura ambiente. La melanterita puede deshidratarse fácilmente para formar rozenita ( $\text{Fe}(\text{SO})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) y luego szomolnokita ( $\text{Fe}(\text{SO})_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), conformando una serie de transformaciones que ocurren en respuesta a condiciones progresivamente menos húmedas (Buckby y otros, 2006 en Buzatu y otros, 2016).

La estabilidad de los sulfatos de hierro depende en gran parte de la humedad relativa del ambiente en el que se encuentran. En la serie de sulfatos de hierro que se forma a partir de la oxidación de la pirita, la szomolnokita es el mineral que prevalece en condiciones áridas y de poca humedad (Buzatu y otros, 2016), como las que predominan en el rajo Esperanza.

La melanterita, rozenita y szomolnokita son sulfatos de hierro altamente susceptibles a disolverse en presencia de humedad, liberando metales y acidez en el sistema (Blowes y otros, 2014). Considerando esto, es probable que la szomolnokita sea un factor importante en la reactividad de estas muestras, siendo un mineral capaz de disolverse y aportar hierro y acidez, catalizando las reacciones entre el macizo rocoso y el nitrato de amonio.

Estos sulfatos de hierro son comunes en los drenajes ácidos de relaves mineros, donde se forman relativamente rápido en períodos secos y se disuelven en períodos húmedos (Blowes y otros, 2014). Es probable que la szomolnokita en Fase 7 se haya formado a partir de la oxidación del macizo rocoso en las condiciones áridas imperantes durante las últimas decenas de millones de años. No obstante, no se puede descartar que la perforación de pozos con mucha anticipación a su carguío y disparo sea un factor que promueve la formación de estos sulfatos.

#### 8.2.2.4. Análisis QEMSCAN®

A diferencia del análisis por DRX, que entrega una semicuantificación a partir de la intensidad de las señales, el análisis QEMSCAN® permite obtener la composición de las muestras según el porcentaje en peso de cada mineral identificado, por lo que los valores serían más exactos que los entregados por DRX.

En esta cuantificación se verifica el predominio de cuarzo además de la presencia de feldespatos, muscovita y minerales accesorios como componentes de la roca original.

En cuanto a los minerales considerados como reactivos, el análisis identifica elevados porcentajes de pirita en todas las muestras, además de otros sulfuros de hierro en la muestra 3504, verificando las observaciones anteriores.

Con respecto a la szomolnokita, es importante notar que la lista secundaria condensada que se utiliza en este trabajo (Fig. 4.7) no considera a este mineral como especie a identificar, por lo que probablemente se agrupa en la categoría *Other fine mineral mixtures\**, que contiene sulfatos de hierro de grano fino, aunque también puede agruparse en la categoría alunita/jarosita, por su composición similar. Estas categorías se detectan en elevados porcentajes en todas las muestras de Fase 7, y en conjunto con la pirita, serían los principales factores mineralógicos que condicionan la reactividad de este material.

Otra alternativa, es que la szomolnokita se haya disuelto durante la preparación de las muestras, considerando la susceptibilidad de este mineral a disolverse.

Además, es importante notar la nula presencia de carbonatos, salvo en algunas muestras donde se detectan concentraciones muy bajas. Como ya se ha mencionado, los carbonatos son minerales que pueden influir en la reactividad de un macizo rocoso retardando las reacciones mediante la neutralización del sistema.

Con respecto a los tamaños promedio de las fases medidas, son muy relevantes los bajos valores obtenidos para la pirita, pues diversos autores indican que pequeños tamaños de grano incrementan la reactividad, ya que hay una mayor superficie disponible para reaccionar (Rumball, 1991; Briggs y Kelso, 2001; Karabanov y Sivtsov, 2022).

Los tamaños de grano obtenidos parecen ser muy bajos al compararlos con lo observado mediante microscopía óptica, esto podría ser porque el análisis QEMSCAN® toma mediciones en

una malla de puntos con 5  $\mu\text{m}$  de espaciamento, y en cada punto realiza un análisis completo de la partícula encontrada. Es posible que las partículas analizadas sean de tamaño submicroscópico y que las fases medidas se encuentren formando agregados de cristales de pequeño tamaño en estas partículas.

Si este fuera el caso, es probable que exista una cantidad importante de partículas no incluidas en la medición, por lo que quizás otro tipo de análisis sería recomendable, por ejemplo, el *bulk mineralogical analysis* también mediante un equipo QEMSCAN®, que realiza un barrido de la muestra midiendo líneas paralelas y que, para tiempos de medición similares, generalmente entrega mejores resultados, pues analiza un mayor número de partículas (Gottlieb y otros, 2000).

Con respecto a las asociaciones minerales, la pirita tiene un alto grado de asociación con alunita/jarosita, óxidos e hidróxidos de hierro y *Other fine mineral mixtures*\*. Lo que tiene relación con los procesos de oxidación de la pirita que provocan la formación de hematita, goethita y sulfatos de hierro.

En el caso de que la szomolnokita no se haya disuelto en la preparación de las muestras, la alta asociación pirita/*Other fine mineral mixtures*\* y pirita/alunita/jarosita entregada por el análisis estaría representando un factor mineralógico muy importante en el comportamiento reactivo de las muestras de Fase 7. De todas formas, si esta categoría no corresponde a la señal de la szomolnokita, es de esperar que exista una asociación espacial entre ambos minerales, considerando que este sulfato es producto de la oxidación de la pirita, y la relación entre ambas especies sería una asociación mineralógica crítica que podría explicar la reactividad de Fase 7.

Otro aspecto relevante, es el alto grado de asociación de la pirita con el *background* o resina de la briqueta, lo que se puede relacionar indirectamente al grado de liberación superficial de las partículas de este mineral.

Esto se verifica en los resultados del grado de liberación, donde las piritas identificadas se encuentran principalmente liberadas en todas las muestras, habiendo una proporción muy baja de piritas ocluidas. En el contexto de la reactividad, la liberación de la pirita puede ser un factor muy relevante pues implica mayor superficie de contacto de las partículas con el resto de los componentes del sistema, lo que sería un factor que incrementa la reactividad de este material.

### 8.3. Utilidad de las técnicas analíticas

A partir del análisis de estos resultados, se puede señalar que las distintas técnicas analíticas utilizadas entregan diferentes tipos de información, y que su uso es complementario.

El análisis por fluorescencia de rayos X permite obtener una base geoquímica para validar la información del resto de los métodos y es útil para visualizar rápidamente la presencia de concentraciones elevadas de azufre, que se pueden relacionar con la ocurrencia de sulfuros o sulfatos de hierro.

Además, esta técnica se puede aplicar *in situ* y el tratamiento previo de las muestras es relativamente simple. Estas características podrían ser de utilidad para trabajar en el desarrollo de técnicas de terreno para zonificar la reactividad de macizos rocosos, que es una línea de investigación incipiente en esta temática.

El análisis mediante microscopía óptica es útil para identificar los minerales primarios y de alteración, además, permite examinar las texturas, modos de ocurrencia, tamaños de grano y concentraciones relativas de los diferentes minerales. Tal vez, sería de mayor utilidad realizar estos análisis con cortes transparentes y pulidos preparados a partir de muestras de roca no trituradas previamente, pues el tratamiento mecánico puede provocar que se pierdan algunos aspectos de la textura original.

El análisis por difracción de rayos X es el método fundamental para identificar fases minerales. Sin este análisis no se habría detectado la presencia de szomolnokita y no habría sido posible distinguir entre los diferentes tipos de arcillas, feldespatos y minerales accesorios.

El análisis QEMSCAN® entrega información de gran utilidad para relacionar las texturas y asociaciones minerales con la reactividad de las muestras. Al igual que para el análisis por microscopía óptica, se recomienda analizar muestras de mano sin el tratamiento mecánico previo, para apreciar las texturas y tamaños de grano originales. Además, sería útil obtener imágenes BSE para observar las texturas de los minerales de interés, pues algunos autores relacionan ciertas texturas, por ejemplo, la ocurrencia de pirita framboidal, con mayores grados de reactividad (Jefferson y otros, 2023).

## 9. CONCLUSIONES.

- Los macizos rocosos que conforman las fases 6, 7 y 8 del rajo Esperanza manifiestan fenómenos de reacción en contacto con el nitrato de amonio de los explosivos. Los factores que controlan la reactividad en estas fases son diferentes entre sí. En Fase 6, el factor serían los distintos sulfuros de hierro, en Fase 8 la reactividad estaría asociada a altas concentraciones de pirita y en Fase 7 se relaciona a altas concentraciones de pirita y sulfatos de hierro. En ninguno de estos casos se puede descartar la incidencia del resto de las condiciones del macizo rocoso en la reactividad.
- En el evento de reactividad ocurrido en Fase 7, los factores principales serían las características mineralógicas y condiciones geológicas del macizo rocoso del sector, donde la presencia de altos porcentajes de pirita y sulfatos de hierro son condiciones fundamentales para que ocurran reacciones espontáneas, que además pueden ser promovidas por otros factores como la ocurrencia de fallas mayores, agua subterránea y grado de confinamiento.
- El material involucrado en el evento de reactividad en Fase 7 desarrolla reacciones autosostenidas con el nitrato de amonio en tiempos acotados. Los minerales de hierro que componen a estas muestras son sulfuros, óxidos, oxihidróxidos y sulfatos, los que podrían tener diferentes grados de incidencia en la reactividad según su estabilidad en las condiciones fisicoquímicas al interior de los pozos.
- La szomolnokita es un sulfato que se origina a partir de la oxidación de la pirita en ambientes áridos y de baja humedad. Este mineral es altamente soluble en presencia de agua y aporta hierro y acidez al sistema, y en conjunto con la pirita, pueden ser una asociación mineralógica crítica que controla la reactividad de Fase 7. Este mineral puede ser considerado un elemento guía en la identificación de potenciales zonas reactivas.
- Desde el punto de vista operacional, la perforación adelantada con varios días previos al carguío y disparo, es una variable importante a considerar en el proceso de oxidación de la pirita y formación de szomolnokita y otros sulfatos de hierro en los pozos.
- Para tener un buen control preventivo en una explotación minera, es fundamental el mapeo geológico detallado de aquellos factores que inciden en la reactividad, que deben ser incorporados para establecer una zonificación de sectores según su potencial reactividad.

## 10. REFERENCIAS

- ABBASPOUR, H.; DREBENSTEDT, C.; BADRODDIN, M. y MAGHAMINIK, A. 2018. Optimized design of drilling and blasting operations in open pit mines under technical and economic uncertainties by system dynamic modelling. *International Journal of Mining Science and Technology*. Vol. **18**(6): 839-848.
- AMILIBIA, A.; SABAT, F.; MCCLAY, K.; MUÑOZ, J.; ROCA, E. y CHONG, G. 2008. The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean mountain belt: Insights from the Cordillera de Domeyko. *Journal of Structural Geology*. Vol. **30**(12): 1.520-1.539.
- AUSTRALASIAN EXPLOSIVES INDUSTRY SAFETY GROUP (AEISG). 2020. Code of practice: elevated temperature and reactive ground. 60pp.
- BISSO, C.; LAZCANO, E.; GUZMÁN, J. y GONZÁLEZ, S. 2009. Geología y desarrollo del yacimiento Esperanza, Distrito Centinela, Antofagasta. Congreso Geológico Chileno, N°12. Actas Digitales: S11-029. Santiago.
- BLOWES, D.W.; PTACEK, C.J.; JAMBOR, J.L.; WEISENER, C.G.; PAKTUNC, D.; GOULD, W.D. y JOHNSON, D.B. 2014. The Geochemistry of Acid Mine Drainage. Treatise on Geochemistry. Elsevier: 60 pp.
- BOTHA, G. 2014. Management of reactive ground at the Goedgevonden opencast coal mine in the Witbank coalfields in South Africa. Research report submitted for the degree of master of science. University of the Witwatersrand (inédito): 114 pp. Johannesburg.
- BRIGGS, T. y KELSO, I. 2001. Ammonium nitrate-sulfide reactivity at the Century Zn-Pb-Ag mine, Northwest Queensland, Australia. *Exploration and Mining Geology*. Vol. **10**(3): 177-190.
- BUNACIU, A.A.; UDRIȘTIOIU, E.G. y ABOUL-ENEIN, H.Y. 2015. X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. Vol. **45**(4): 289-299.
- BUTCHER, A.R.; HELMS, T.A.; GOTTLIEB, P.; BATEMAN, R.; ELLIS, S. y JOHNSON, N.W. 2000. Advances in the Quantification of Gold Department by QemSCAN. *Seventh Mill Operators' Conference*. 267-271.
- BUZATU, A.; DILL, H.G.; BUZGAR, N.; DAMIAN, G.; MAFTEI, A.E. y APOPEI, A.I. 2016. Efflorescent sulfates from Baia Sprie mining area (Romania) – Acid mine drainage and climatological approach. *Science of the Total Environment*. Vol. **542**: 629-641.
- CHARRIER, R.; PINTO, L. y RODRÍGUEZ, M.P. 2007. Tectono-stratigraphic evolution of the Andean orogen in Chile. The Geology of Chile. (Moreno, T. y Gibbons, W. editores). The Geological Society of London: 21-114. Londres.

- DJERDJEV, A.M.; PRIYANANDA, P.; GORE, J.; BEATTIE, J.K.; NETO, C. y HAWKETT, B.S. 2018. The mechanism of the spontaneous detonation of ammonium nitrate in reactive grounds. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Vol. **6**: 281-288.
- FABIN, M. y JAROSZ, T. 2021. Improving ANFO: effect of additives and ammonium nitrate morphology on detonation parameters. *Materials*. Vol. **14**: 5745-5757.
- FERNÁNDEZ, A. 2019. Sedimentología del Cenozoico del Distrito Minero Centinela y de la Cuenca Quebrada El Profeta (Desierto de Atacama, Chile): evolución paleoambiental y génesis de los depósitos de Cu-exótico. Memoria para optar al grado de doctor. Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Mineralogía y Petrología (Inédito): 246 pp. Madrid.
- FORSHEY, D.R.; RUTHE, T.C. y MASON, C.M. 1968. The reactivity of ammonium nitrate-fuel oil with pyrite-bearing ores. *U.S. Bureau of Mines*. N° **7.187**: 1-10. Washington.
- GARCÍA, M.; MAKSAEV, V.; TOWNLEY, B. y DILLES, J. 2017. Metallogeny, structural evolution, post-mineral cover distribution and exploration in concealed areas of the northern Chilean Andes. *Ore Geology Reviews*. Vol. **86**: 652-672.
- GESTIÓN AMBIENTAL CONSULTORES. 2007. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Esperanza.
- GOLDSTEIN, J.I.; NEWBURY, D.E.; MICHAEL, J.R.; RITCHIE, N.W.; SCOTT, J.H. y JOY, D.C. 2018. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. Springer: 550 pp. Nueva York.
- GOTTLIEB, P.; WILKIE, G.; SUTHERLAND, D.; HO-TUN, E.; SUTHERS, S.; PERERA, K.; JENKINS, B.; SPENCER, S.; BUTCHER, A. y RAYNER, J. 2000. Using Quantitative Electron Microscopy for Process Mineralogy Applications. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. Vol. **52**(4): 24-25.
- HERVÉ, M.; SILLITOE, R.H.; WONG, C.; FERNÁNDEZ, P.; CRIGNOLA, F.; IPINZA, M. y URZÚA, F. 2012. Geologic overview of the Escondida porphyry copper district, northern Chile. *Society of Economic Geologists Special Publication*. Vol. **16**: 55-78.
- JEFFERSON, M.; YENIAL-ARSLAN, U.; EVANS, C.; CURTIS-MORAR, C.; O'DONELL, R.; PARBHAKAR-FOX, A. y FORBES, E. 2023. Effects of pyrite textures and composition on flotation performance: A review. *Minerals Engineering*. Vol. **201**: 108234.
- KARABANOV, I.S. y SIVTISOV, E.V. 2022. Features of the use of ammonium nitrate in the sulfide-bearing ore mining. *Russian Journal of Applied Chemistry*. Vol. **95**(5): 646-654.
- KOJIMA, S.; MARTÍN, M.C.s.; NAGASE, T.; NAKASHIMA, D.; BISSO, C. y MENZIES, A. 2021. Distribution of gold and silver and its relation with hypogene ore minerals in the Esperanza porphyry deposit, Antofagasta Region, Chile. *Resource Geology*. Vol. **71**(1): 80-90.

- LUKASZEWSKI, G.M. 1968. The reaction of ANFO explosives with mineral sulphides. *Proceedings, the Australian Institute of Mining and Metallurgy*. N° **228**: 61-70.
- MAKSAEV, V. y ZENTILLI, M. 1998. Marco metalogénico regional de los megadepósitos de tipo pórfido cuprífero del Norte Grande de Chile. Congreso Geológico Chileno, N°5. Vol. **1**: 181-212. Santiago.
- MAKSAEV, V.; MUNIZAGA, F. y TASSINARI, C. 2014. Timing of magmatism of the paleo-Pacific border of Gondwana: U-Pb geochronology of Late Paleozoic to Early Mesozoic igneous rocks of the north Chilean Andes between 20 degrees and 31 degrees S. *Andean Geology*. Vol. **41**(3): 447-506.
- MARINOVIC, N. y GARCÍA, M. 1999. Hoja Pampa Unión, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, N°9. Escala 1:100.000. Santiago.
- MARQUARDT, C.; CÁCERES, M.; CORNEJO, P.; LAZCANO, E. y MPODOZIS, C. 2012. Falla Esperanza: cabalgamiento postmineral del Eoceno Superior-Oligoceno?, Distrito Centinela, Norte de Chile. Congreso Geológico Chileno, N°13. Actas Digitales: 171-173. Antofagasta.
- MARTÍN-RAMOS, J.D.; DÍAZ-HERNÁNDEZ, J.L.; CAMBESES, A.; SCARROW, J.H. y LÓPEZ-GALINDO, A. 2012. Pathways for Quantitative Analysis by X-Ray Diffraction. An introduction to the study of mineralogy. (Aydinalp, C. editor). InTech: 73-92.
- MIRON, Y.; RUTHE, T.C. y WATSON, R.W. 1979. Reactivity of AN-FO with pyrite containing weathering products. *U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations*. N° **8.373**: 1-24. Washington.
- MONCUR, M.C.; JAMBOR, J.L.; PTACEK, C.J. y BLOWES, D.W. Mine drainage from weathering of sulfide minerales and magnetite. *Applied Geochemistry*. Vol. **24**(12): 2362-2373.
- MPODOZIS, C. y CORNEJO, P. 2012. Cenozoic tectonics and porphyry copper systems of the Chilean Andes. *Society of Economic Geologists*. Vol. **16**: 329-360.
- MPODOZIS, C.; CEMBRANO, J. y MORA, R. 2009. Deformación compresiva-oblicua polifásica y pórfidos cupríferos eocenos en el Sistema de Fallas de Domeyko: la región de Esperanza-Caracoles (Distrito Centinela). Congreso Geológico Chileno, N°12. Actas Digitales: S11-062. Santiago.
- MUHR, R. y PERELLÓ, J. 2009. Exploración y descubrimiento en el distrito Centinela: historia y lecciones. Congreso Geológico Chileno, N°12. Actas Digitales: S11-033. Santiago.
- OERTER, E.; AMUNDSON, R.; HEIMSATH, A.; JUNGERS, M.; CHONG, G. y RENNE, P. 2016. Early to Middle Miocene climate in the Atacama Desert of Northern Chile. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. Vol. **441**: 890-900.

- PERELLÓ, J.; BROCKWAY, J. y MARTINI, R. 2004. Discovery and geology of the Esperanza porphyry copper-gold deposit, Antofagasta Region, Northern Chile. *Society of Economic Geologists Special Publication*. Vol. **11**: 167-187. Santiago.
- PIZARRO, H.; CAMPOS, E.; BOUZARI, F.; ROUSSE, S.; BISSIG, T.; GREGOIRE, M. y RIQUELME, R. 2020. Porphyry indicator zircons (PIZs): Application to exploration of porphyry copper deposits. *Ore Geology Reviews*. Vol. **126**: 103771.
- PIZARRO, H.; ROUSSE, S.; RIQUELME, R.; VELOSO, E.; CAMPOS, E.; GONZÁLEZ, R.; BISSIG, T.; CARRETIER, S.; FERNÁNDEZ-MORT, A. y MUÑOZ, S. 2019. The origin of the magnetic record in the Eocene-Miocene coarse-grained sediment deposited in hyper-arid/arid conditions: Examples from the Atacama Desert. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. Vol. **516**: 322-325.
- PRIYANANDA, P.; DJERDJEV, A.M.; GORE, J.; NETO, C.; BEATTIE, J.M. y HAWKETT, B.S. 2015. Premature detonation of an NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> emulsion in reactive ground. *Journal of hazardous materials*. Vol. **283**: 314-320.
- RIQUELME, R.; TAPIA, M.; CAMPOS, E.; MPODOZIS, C.; CARRETIER, S.; GONZÁLES, R.; MUÑOZ, S.; FERNÁNDEZ-MORT, A.; SANCHEZ, C. y MARQUARDT, C. 2018. Supergene and exotic Cu mineralization occur during periods of landscape stability in the Centinela Mining District, Atacama Desert. *Basin Research*. Vol. **30**(3): 395-425.
- RUMBALL, J. 1991. The interaction of partially weathered sulphides in the Mt McRae sale formation with ammonium nitrate. Thesis submitted to the School of Mathematical and Physical Sciences, Murdoch University. 363 pp. Perth.
- SANCHEZ, C. 2017. Denudation evolution and geomorphic context of supergene copper mineralization in Centinela District, Ataca Desert, Chile, from thermochronology and cosmogenic nuclides. Tesis para optar al grado de Doctor en Geociencias. Université Toulouse III Paul Sabatier. 220 pp. Toulouse.
- SANTORO, L.; BONI, M.; ROLLINSON, G.K.; MONDILLO, N.; BALASSONE, G. y CLEGG, A.M. 2014. Mineralogical characterization of the Hakkari nonsulfide Zn(Pb) deposit (Turkey): The benefits of QEMSCAN®. *Minerals Engineering*. Vol. **69**: 29-39.
- SCHWERTMANN, U. 1991. Solubility and dissolution of iron oxides. *Plant and Soil*. Vol. **130**: 1-25.
- SILLITOE, R.H. 1998. Epochs of intrusion-related copper mineralization in the Andes. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **1**(1): 89-108.
- SILLITOE, R.H. y PERELLÓ, J. 2005. Andean copper province: tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and Discovery. *Economic Geology*. 100th Anniv. Volume: 854-890.
- SURYANARAYANA, C. y NORTON, M.G. 1998. X-Ray Diffraction: A Practical Approach. Plenum Publishing Corporation. 273 pp. Nueva York.

- WELTJE, G.J. y TJALLINGII, R. 2008. Calibration of XRF core scanners for quantitative geochemical logging of sediment cores: Theory and application. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. **274**(3-4): 423-438.
- WINTER, J.D. 2014. Principles of Igneous and Metamorphic Petrology. Pearson: 737 pp.
- ZHANG, Z. 2016. Rock fracture and blasting: theory and applications. Butterworth-Heinemann: 505 pp.

# **ANEXOS**

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo</b>	<b>Página</b>
I Fotomicrografías .....	81
II Difractogramas (análisis DRX) .....	95
III Diagramas acumulativos de asociación mineral (análisis QEMSCAN®) .....	100

# **ANEXO I**

## **Fotomicrografías**

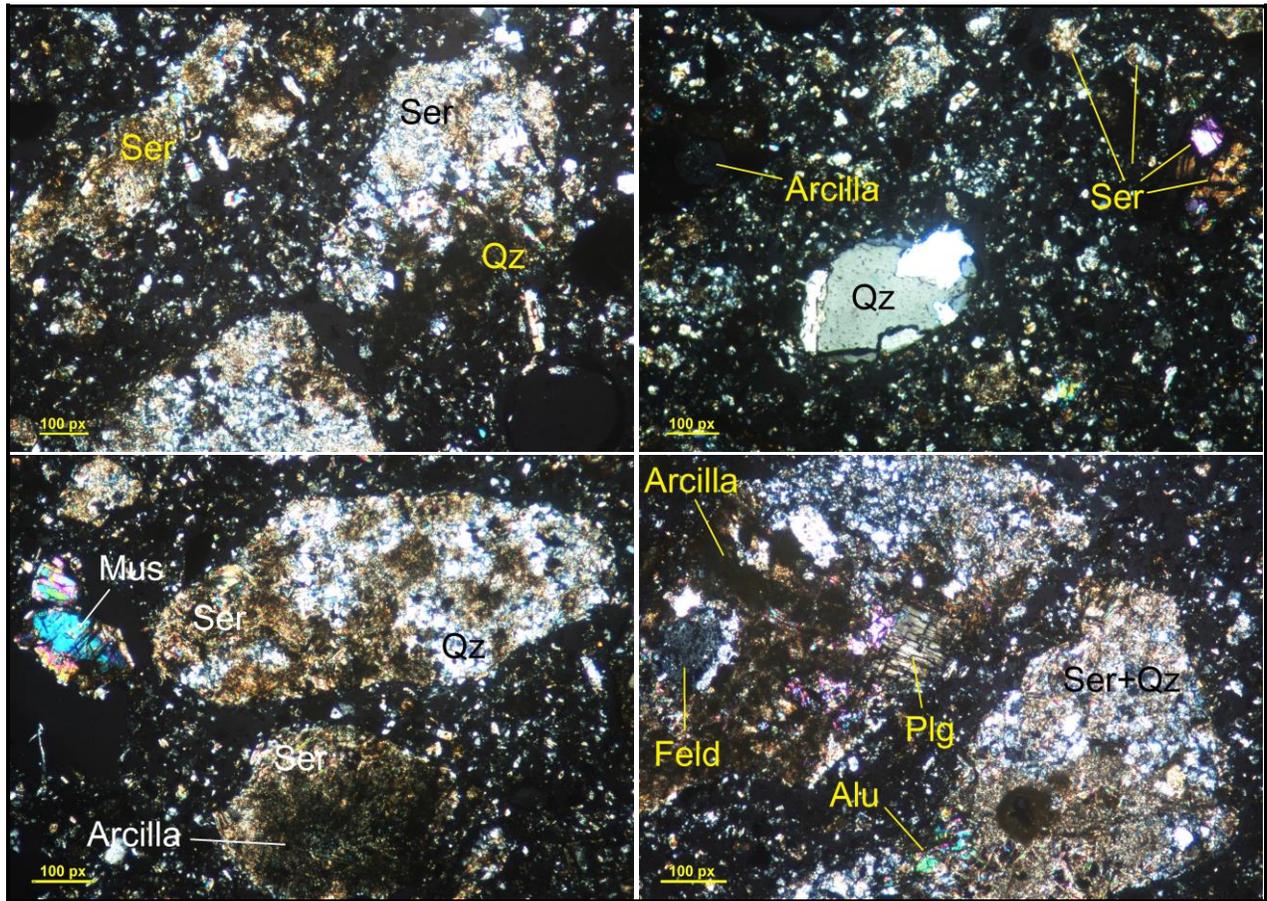


Figura 1: Fotomicrografías muestra 305 por microscopía óptica de luz transmitida.

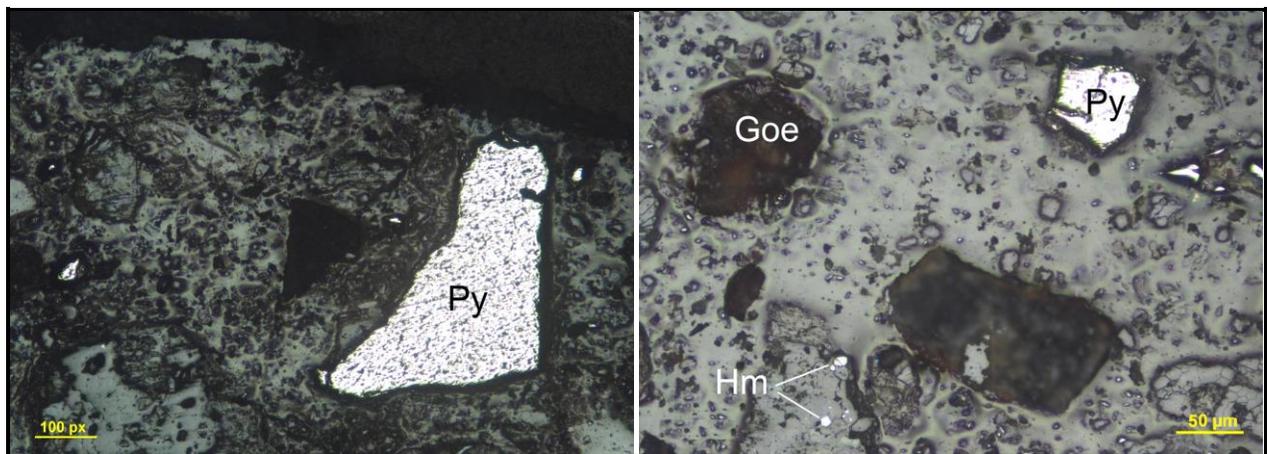


Figura 2: Fotomicrografías muestra 305 por microscopía óptica de luz reflejada.

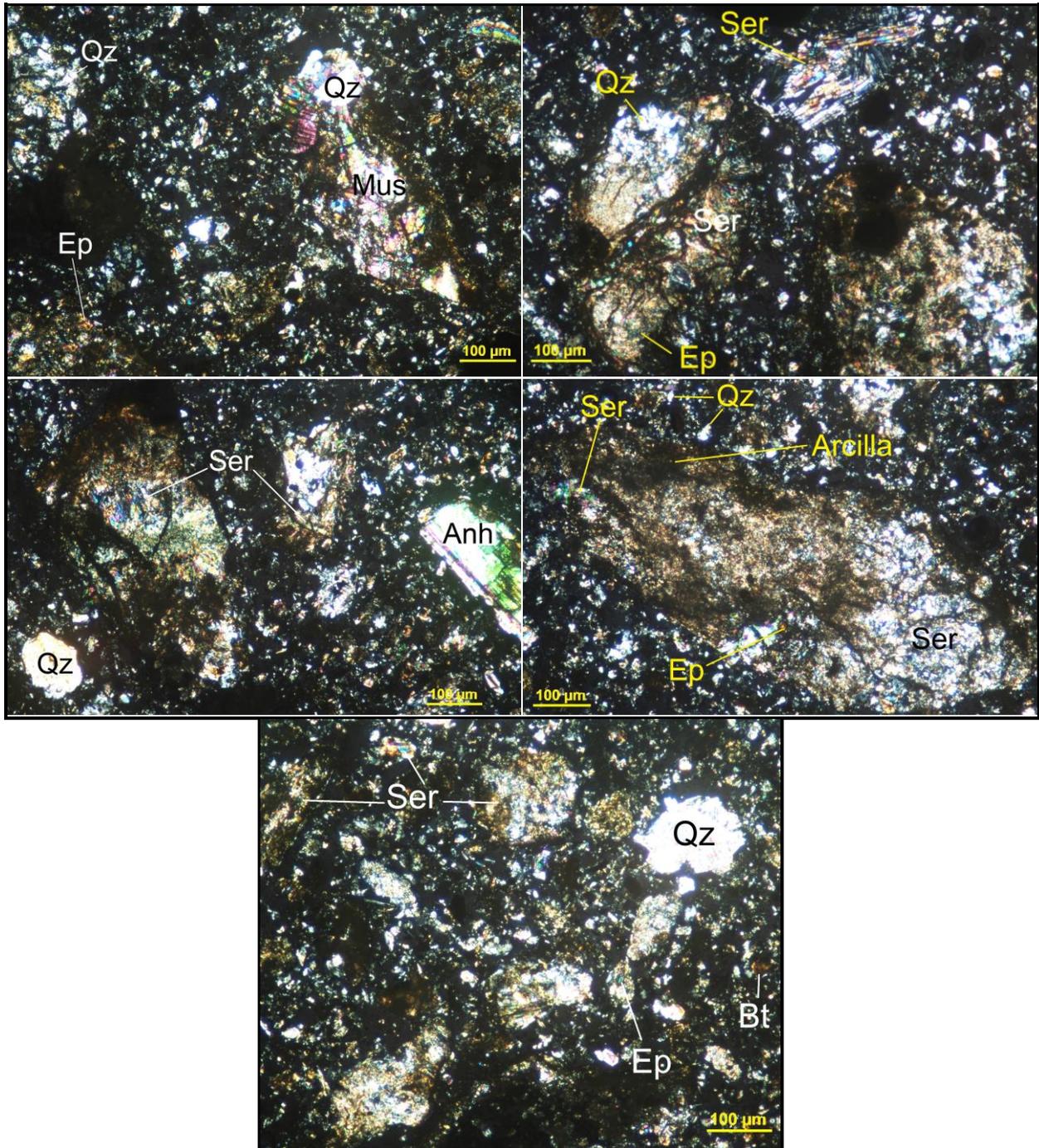


Figura 3: Fotomicrografías muestra 407 por microscopía óptica de luz transmitida.

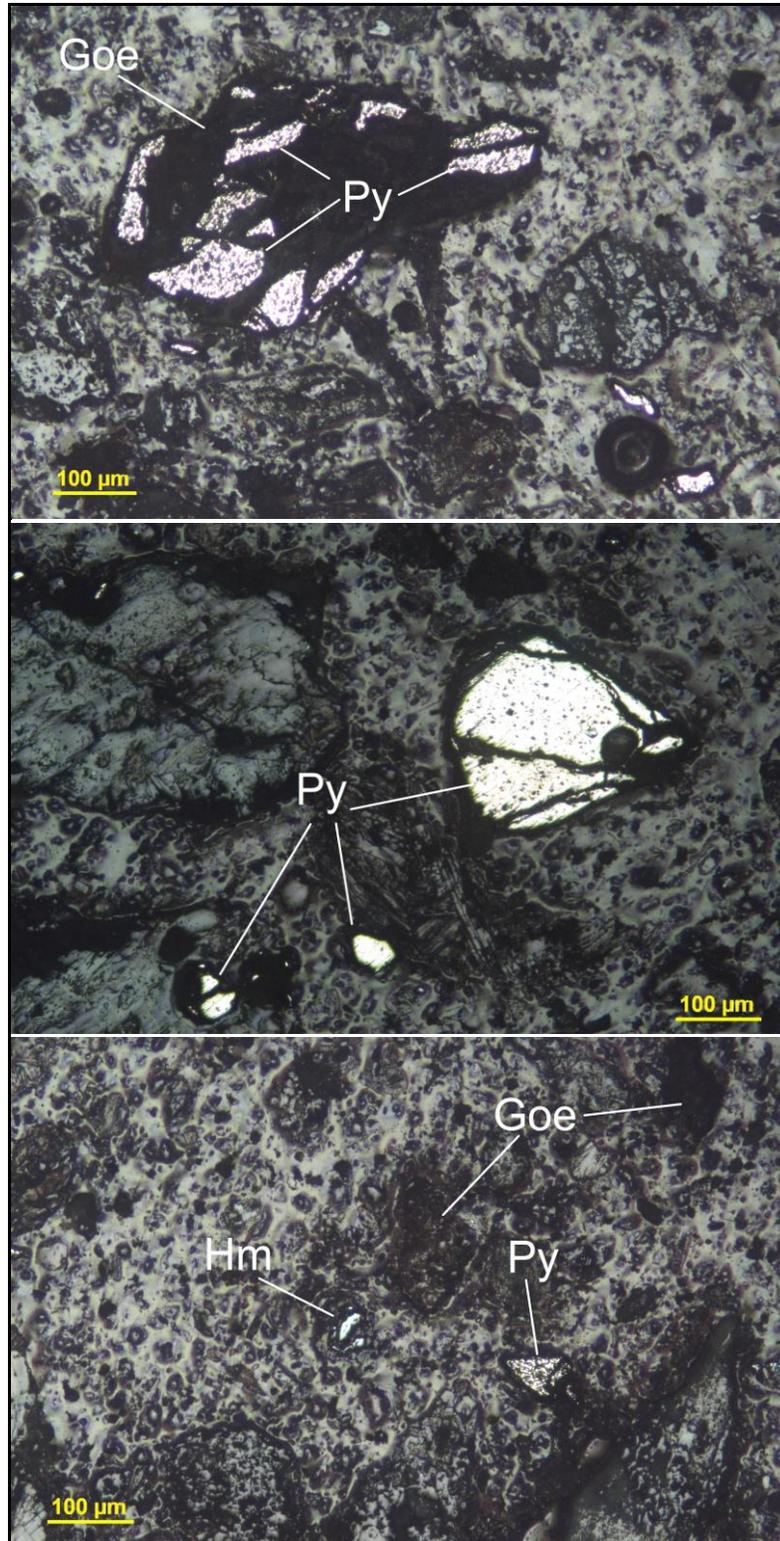


Figura 4: Fotomicrografías muestra 407 por microscopía óptica de luz reflejada.

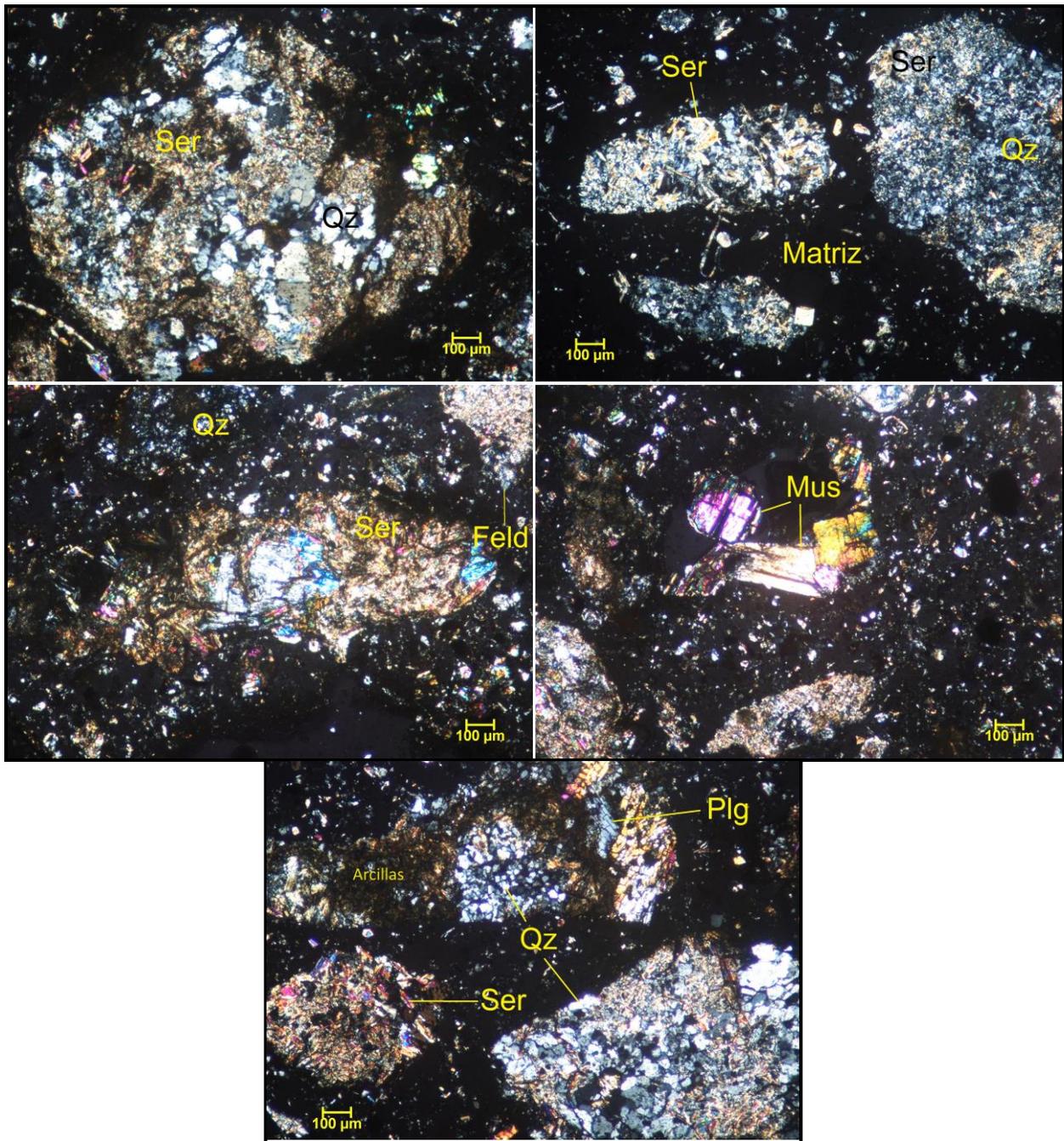


Figura 5: Fotomicrografías muestra 510 por microscopía óptica de luz transmitida.

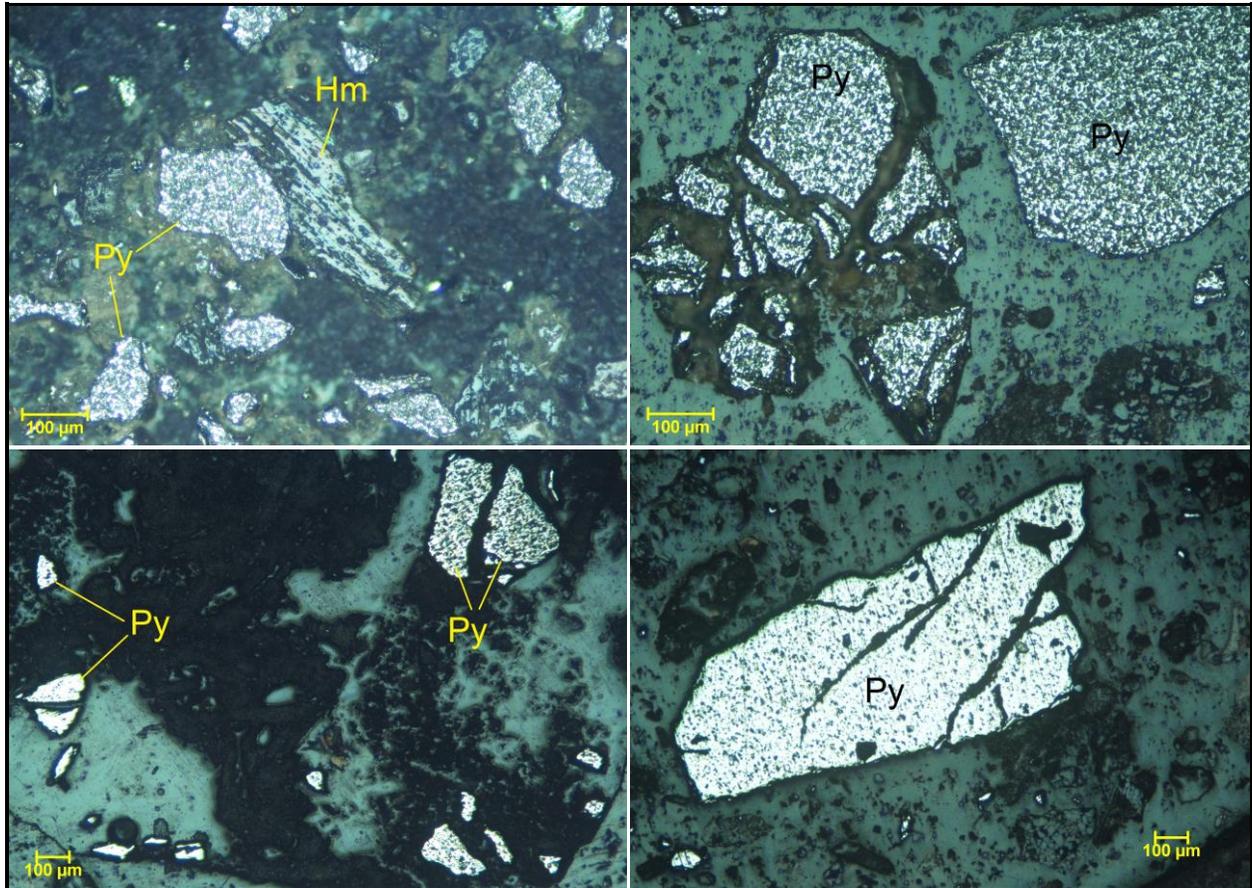


Figura 6: Fotomicrografías muestra 510 por microscopía óptica de luz reflejada.

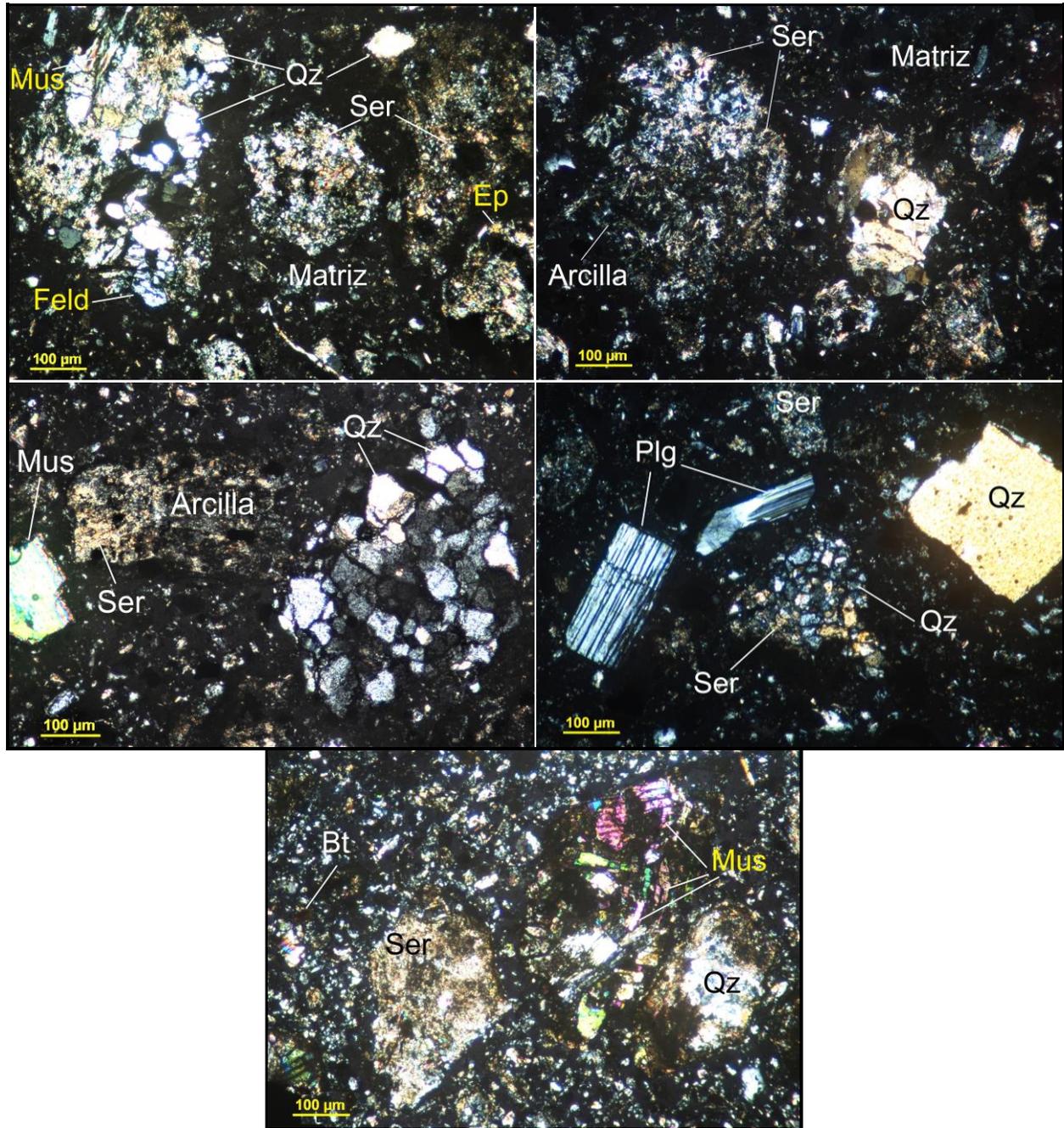


Figura 7: Fotomicrografías muestra 3504 por microscopía óptica de luz transmitida.

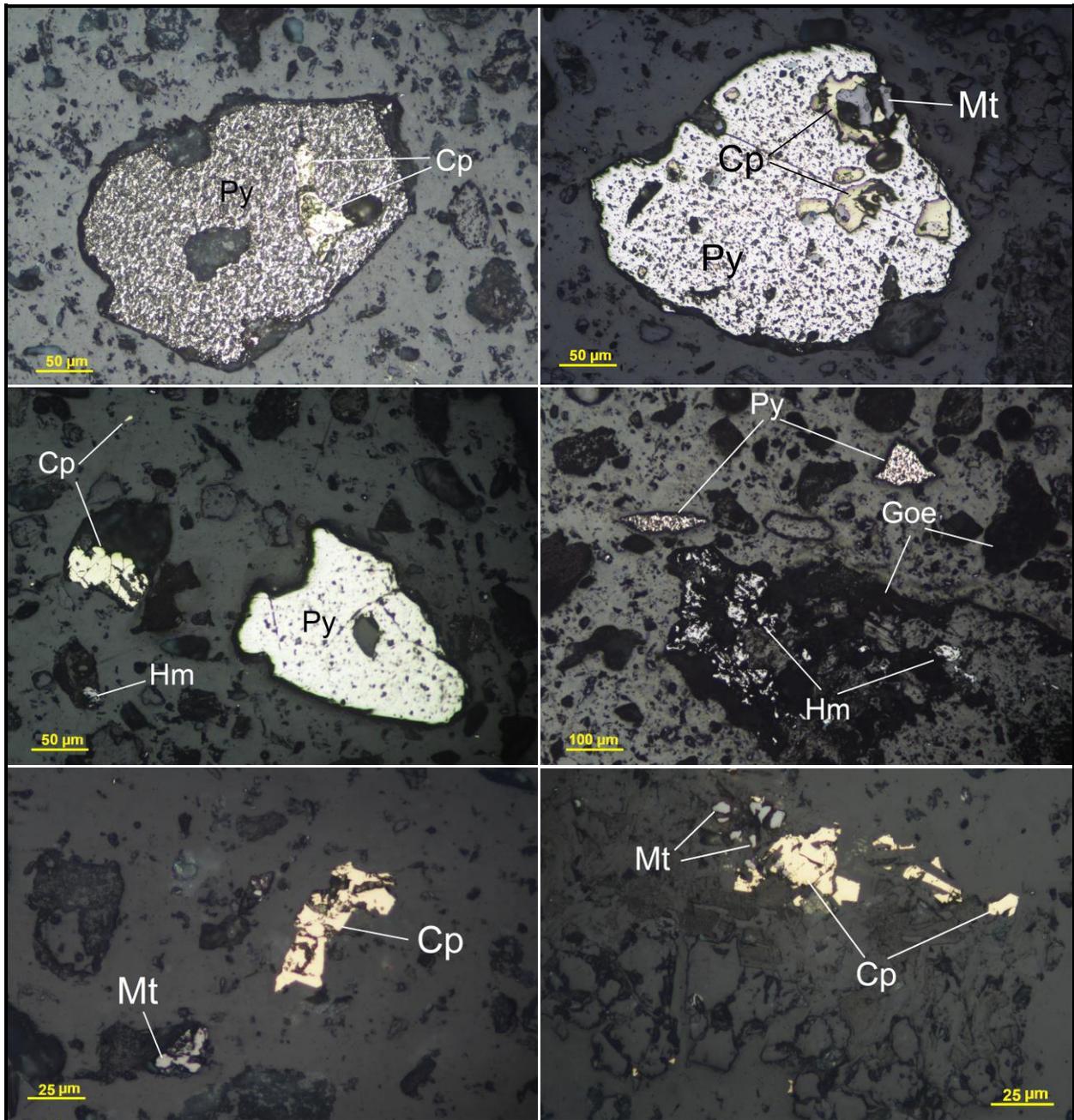


Figura 8: Fotomicrografías muestra 3504 por microscopía óptica de luz reflejada.

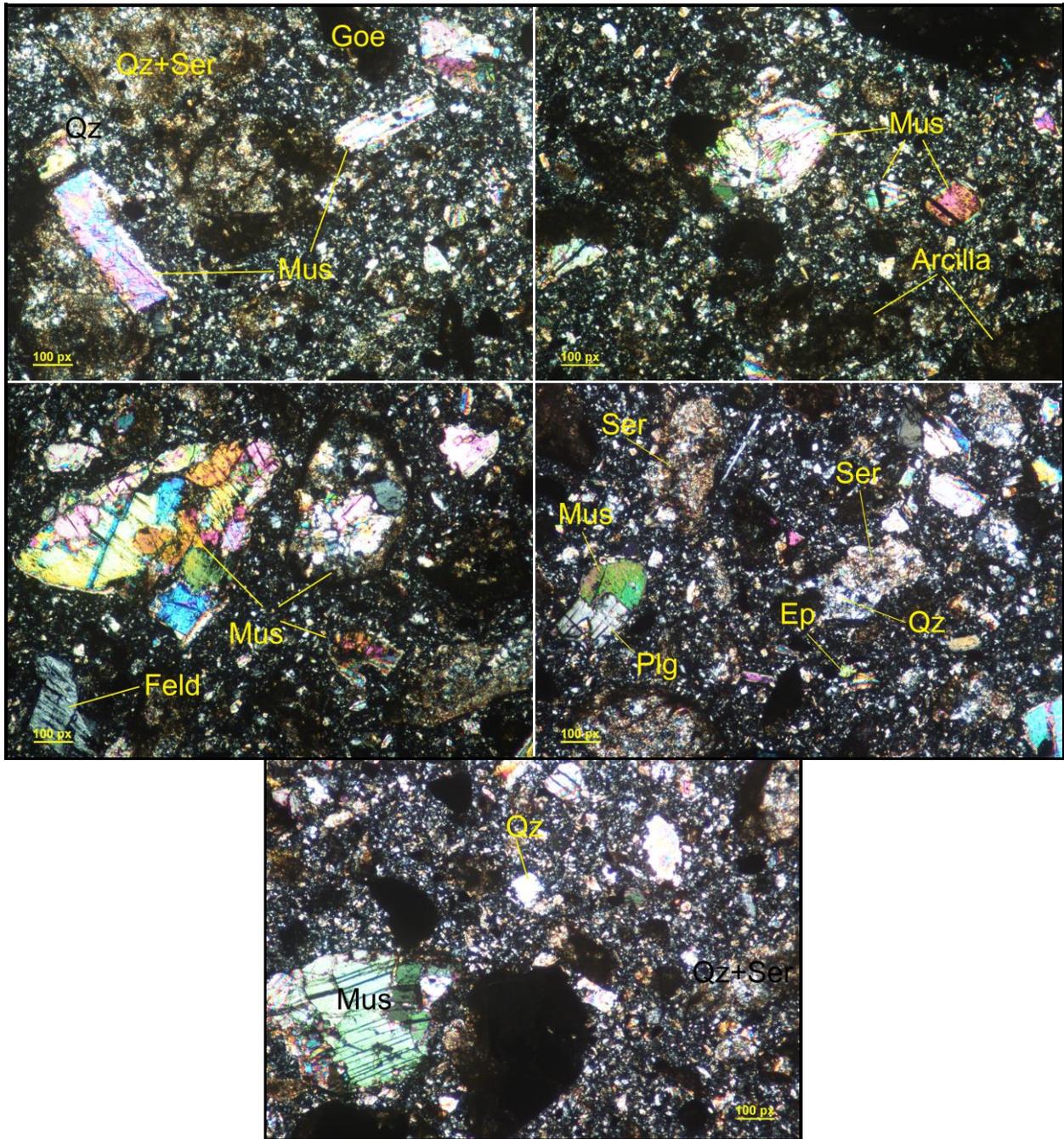


Figura 9: Fotomicrografías muestra 510-410 (1) por microscopía óptica de luz transmitida.

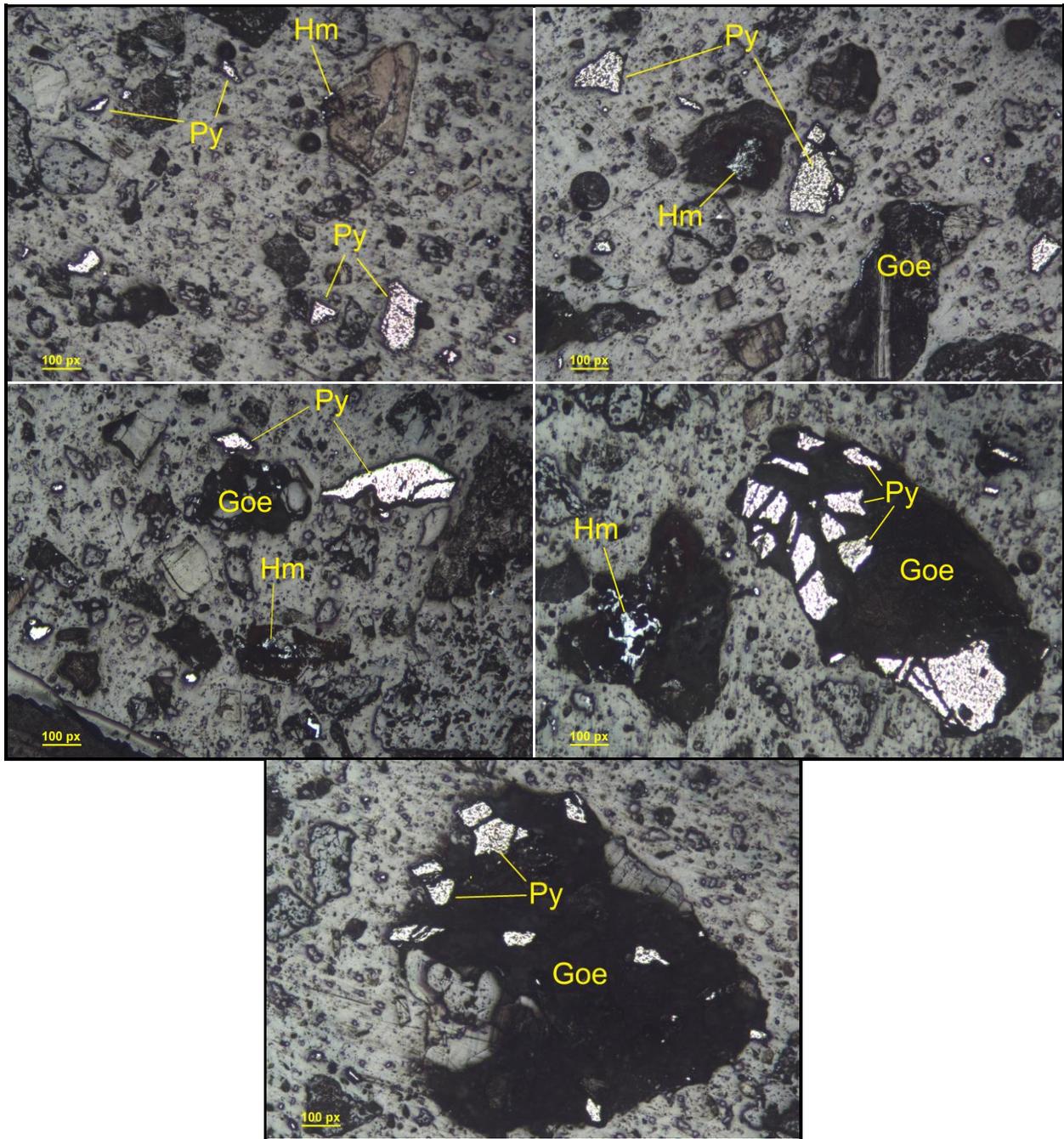


Figura 10: Fotomicrografías muestra 510-410 (1) por microscopía óptica de luz reflejada.

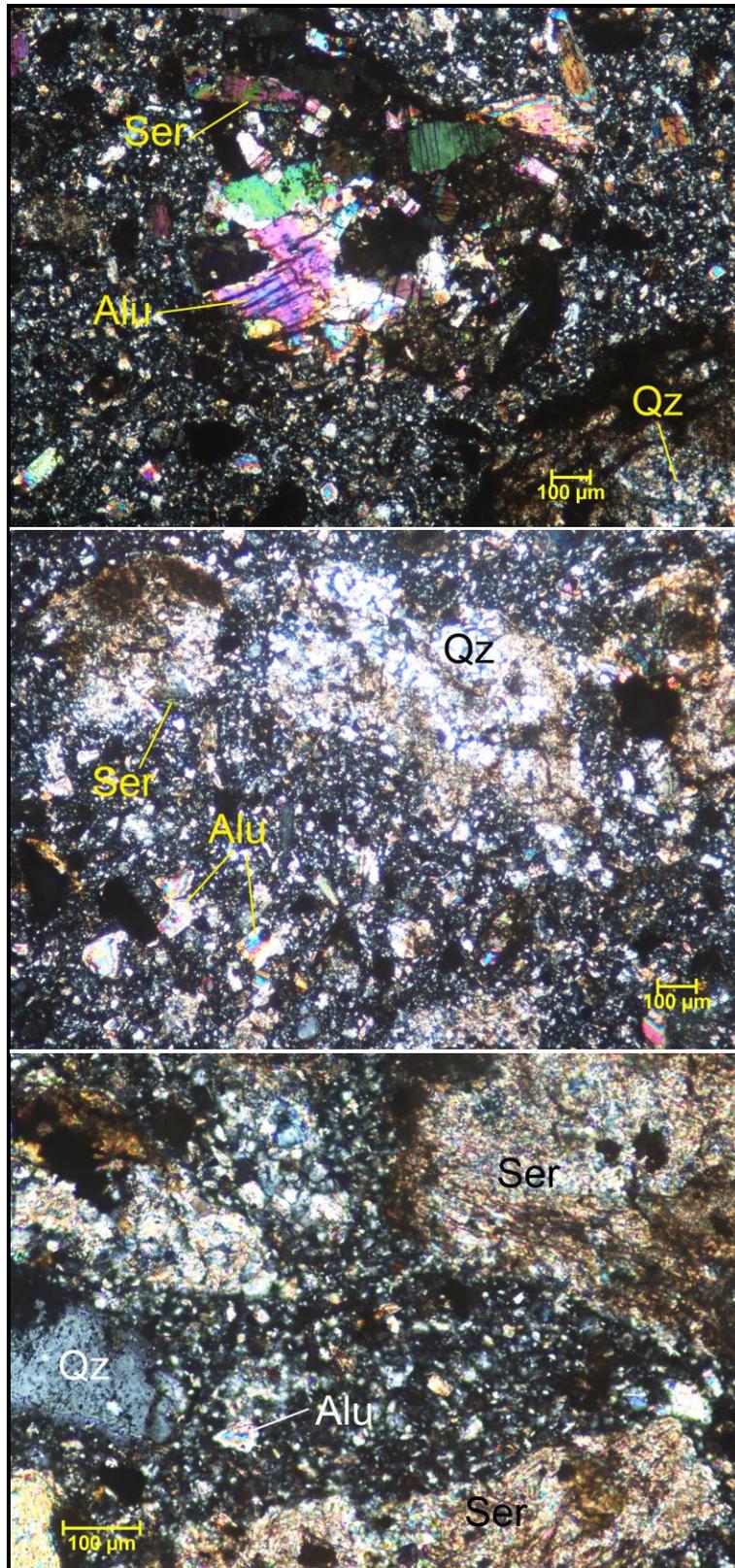


Figura 11: Fotomicrografías muestra 510-410 (2) por microscopía óptica de luz transmitida.

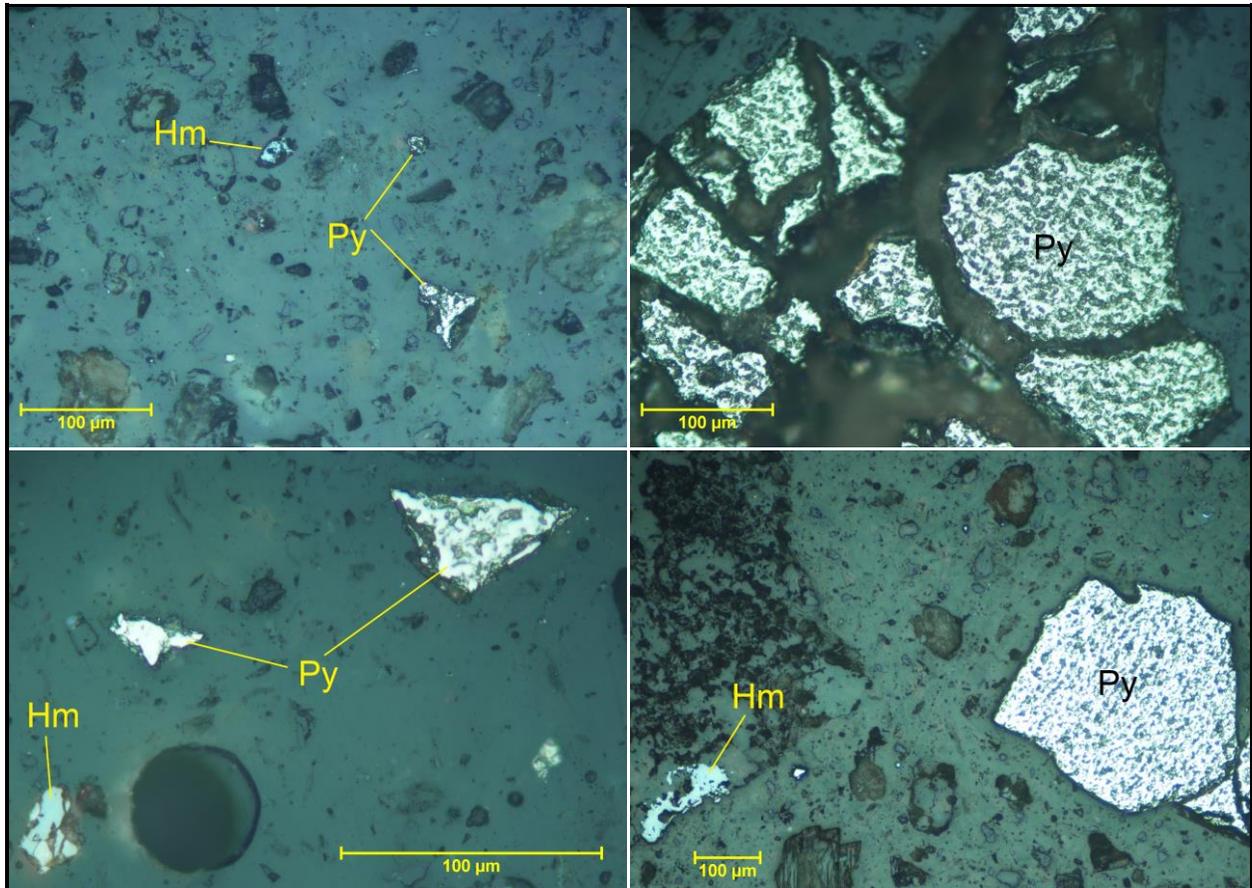


Figura 12: Fotomicrografías muestra 510-410 (2) por microscopía óptica de luz reflejada.

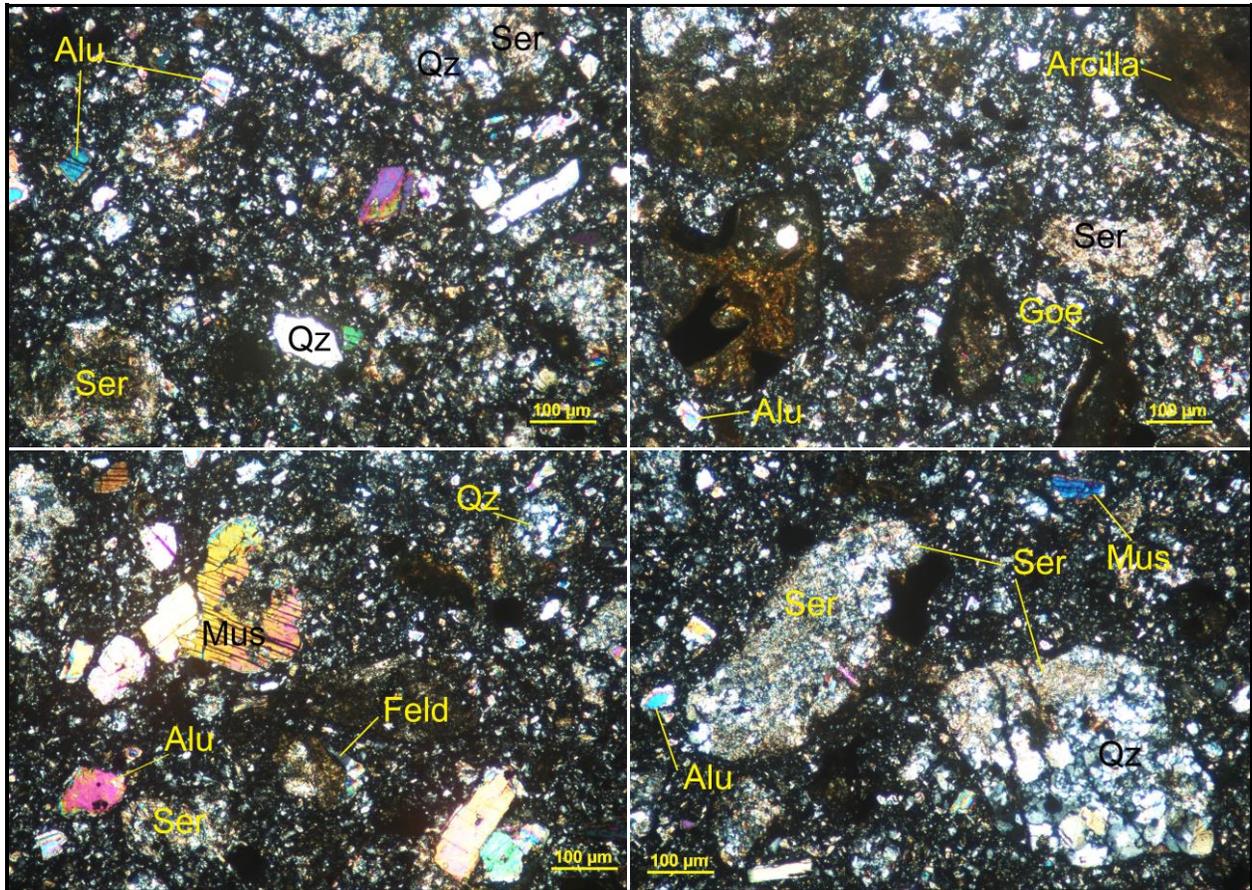


Figura 13: Fotomicrografías muestra 510-410 (3) por microscopía óptica de luz transmitida.

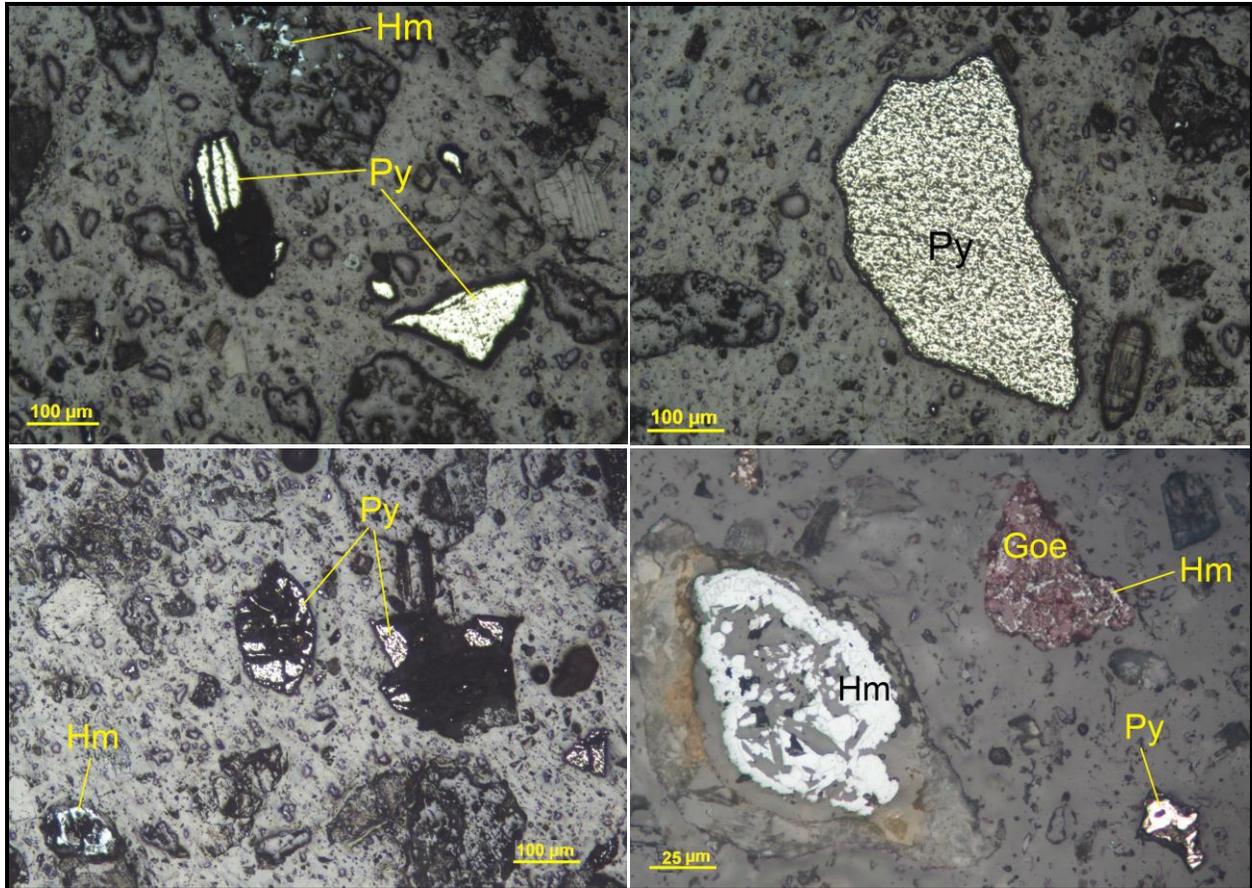


Figura 14: Fotomicrografías muestra 510-410 (3) por microscopía óptica de luz reflejada.

# **ANEXO II**

## **Difractogramas (análisis DRX)**

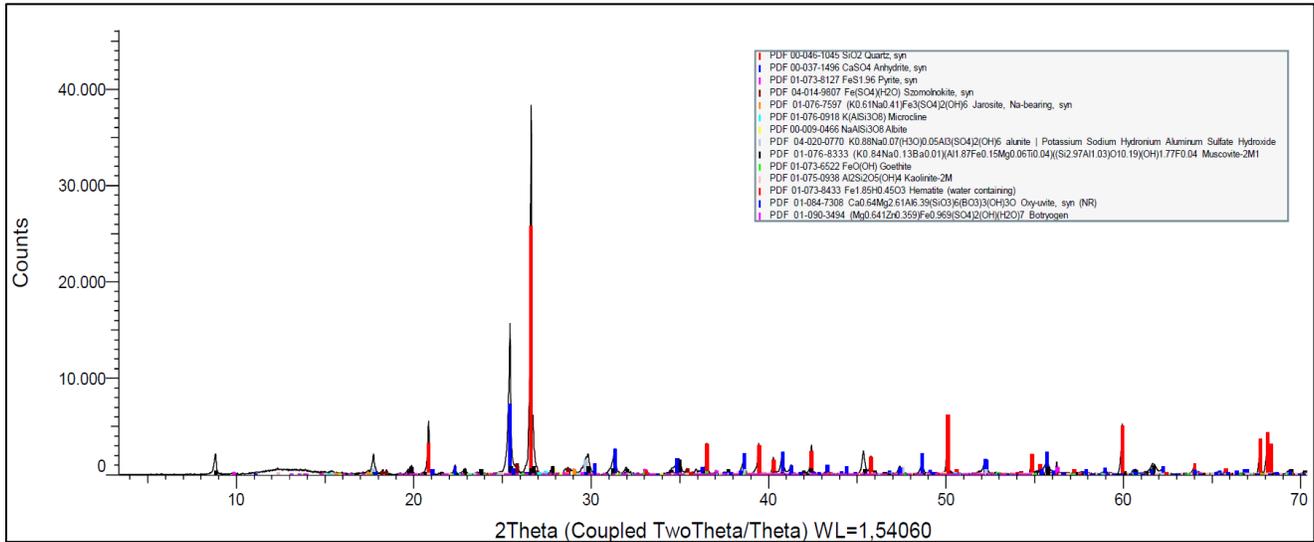


Figura 1: Difractograma muestra 305.

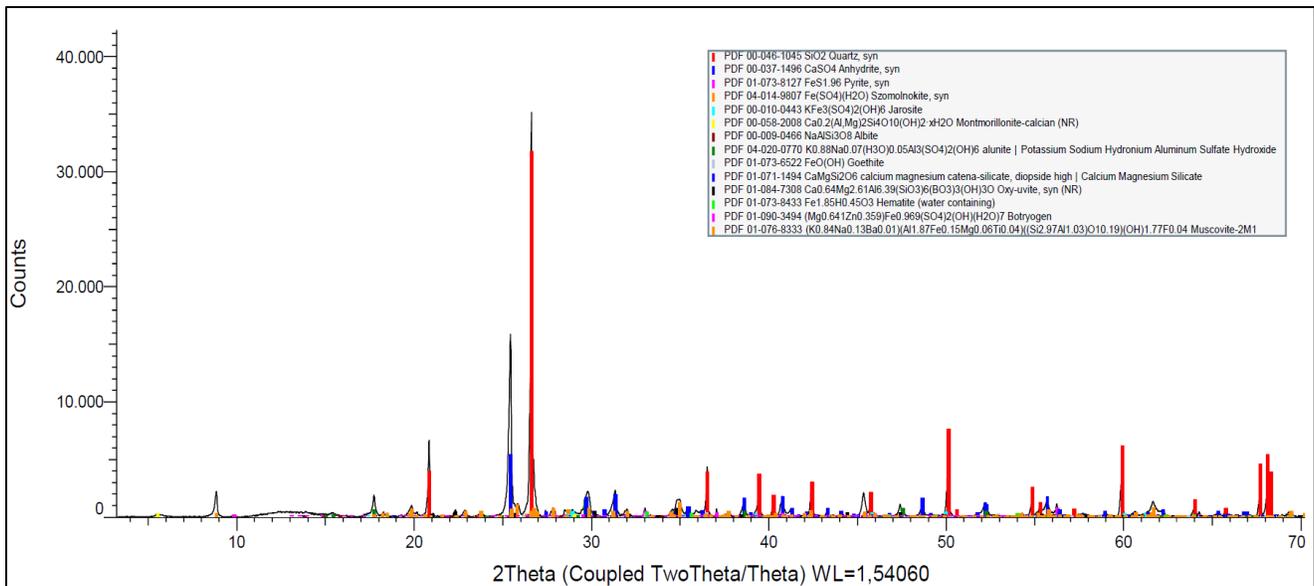


Figura 2: Difractograma muestra 407.

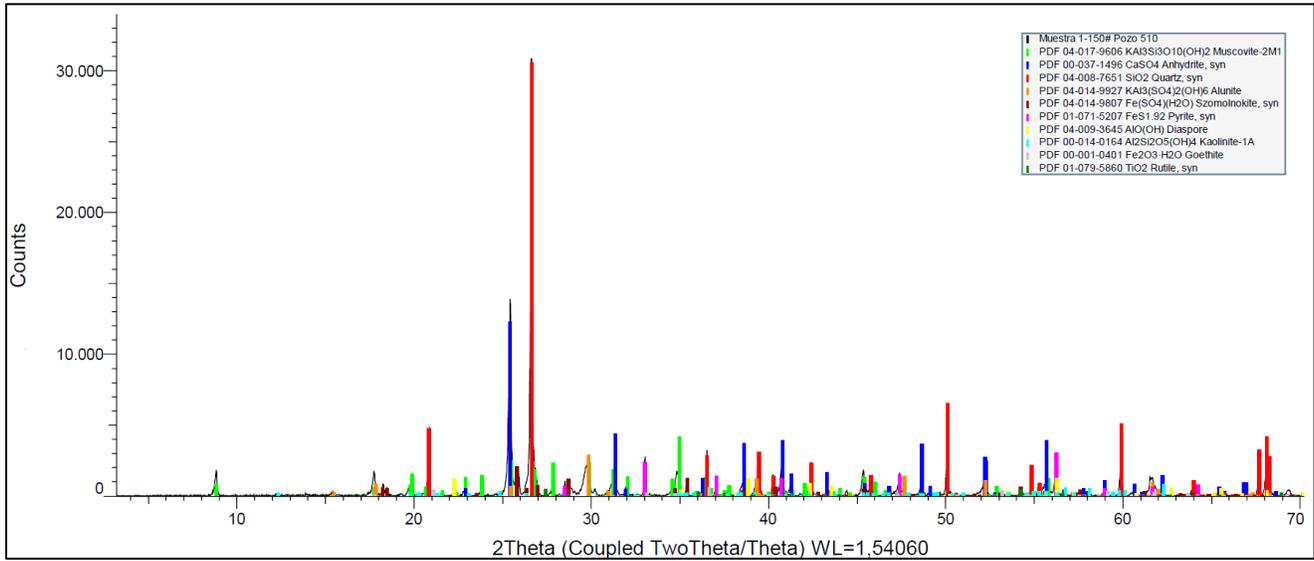


Figura 3: Difractograma muestra 510.

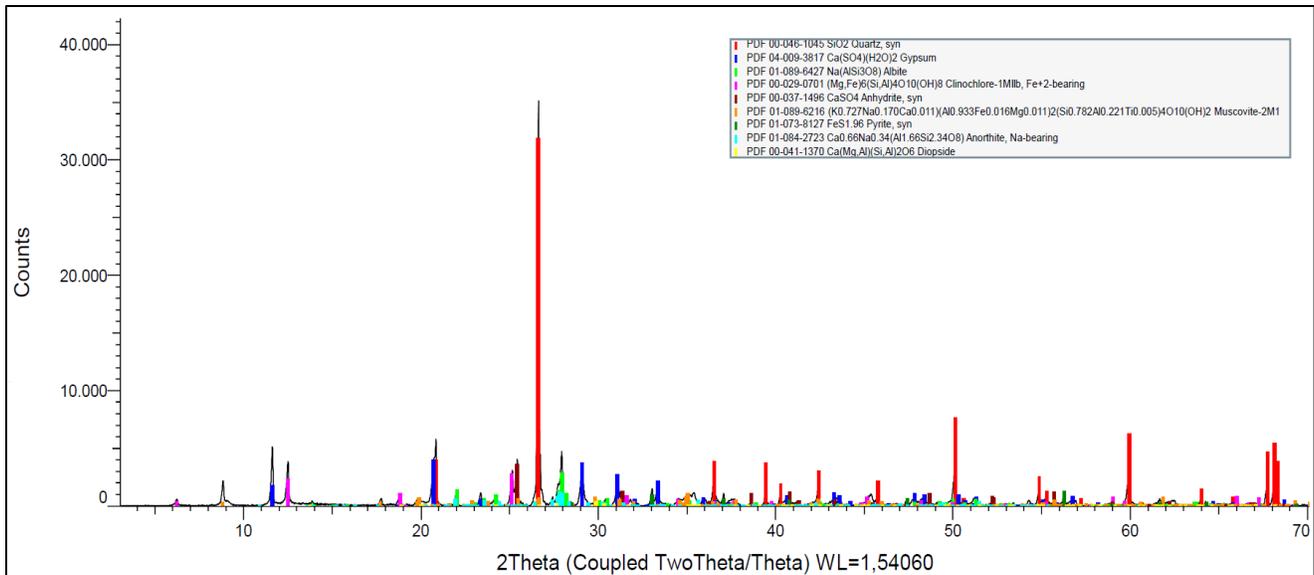


Figura 4: Difractograma muestra 3504.

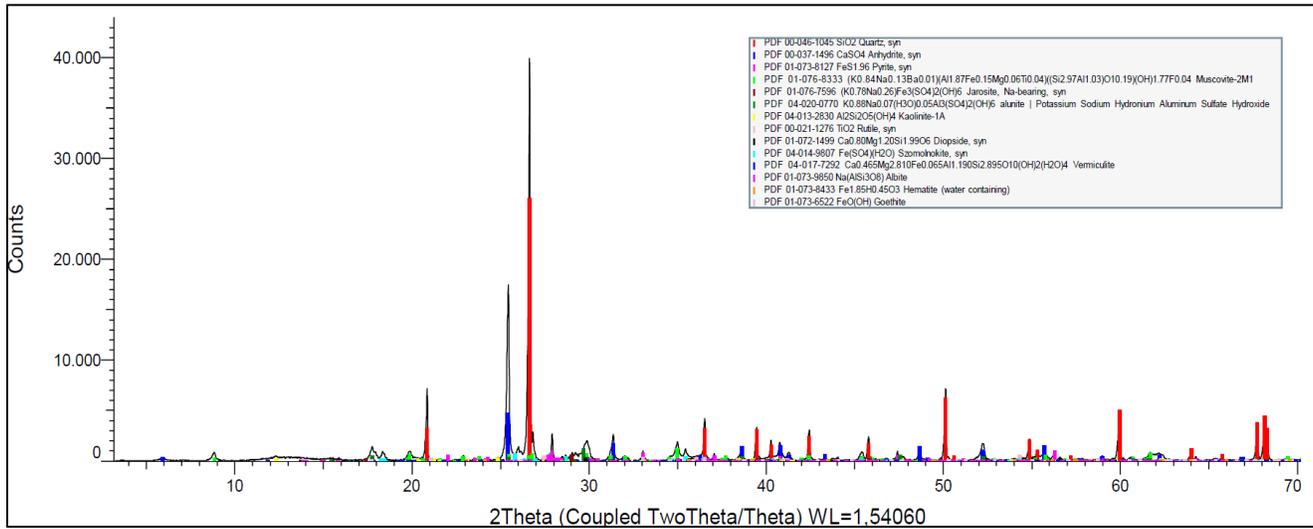


Figura 5: Difractograma muestra 510-410 (1).

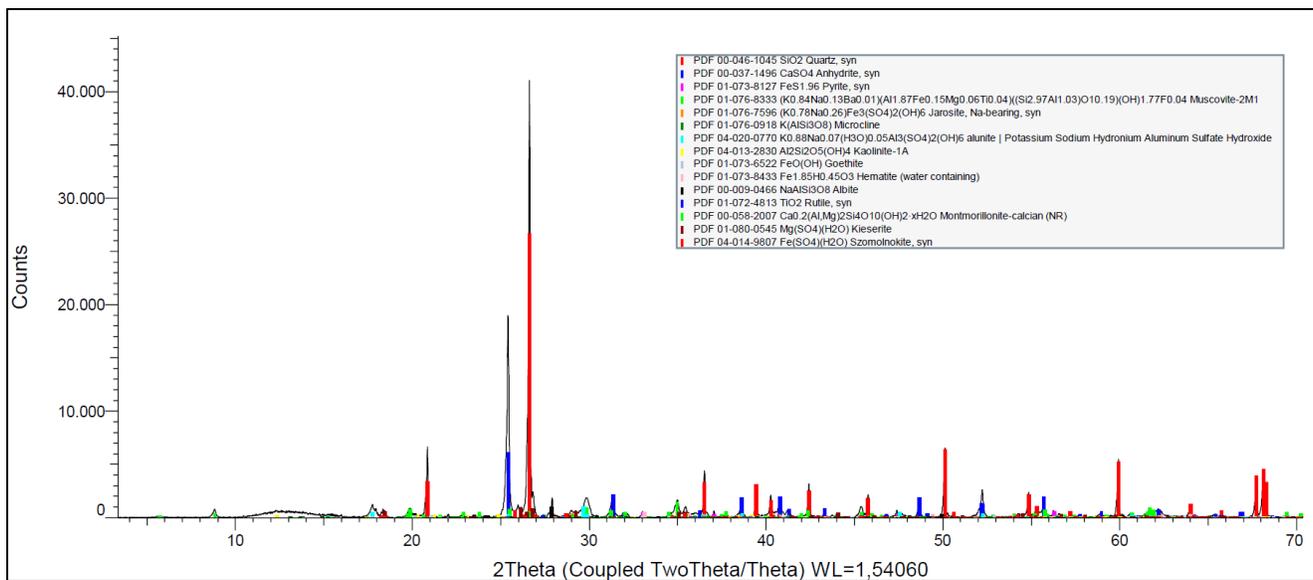


Figura 6: Difractograma muestra 510-410 (2).

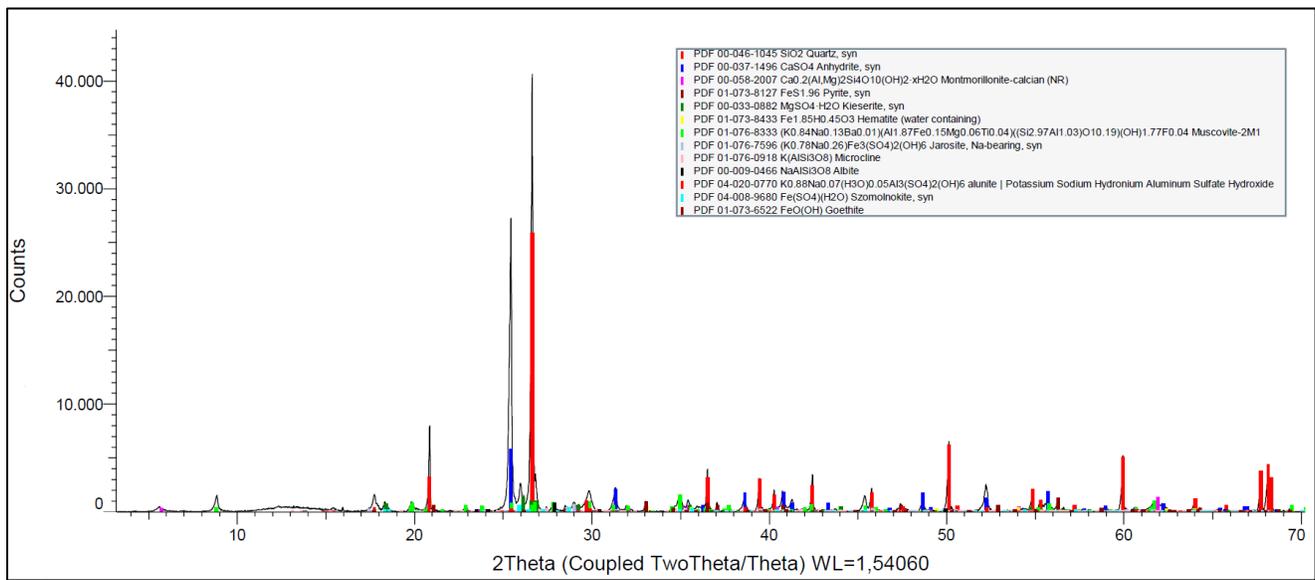


Figura 7: Difractograma muestra 510-410 (3).

# **ANEXO III**

## **Diagramas acumulativos de asociación mineral (análisis QEMSCAN®)**

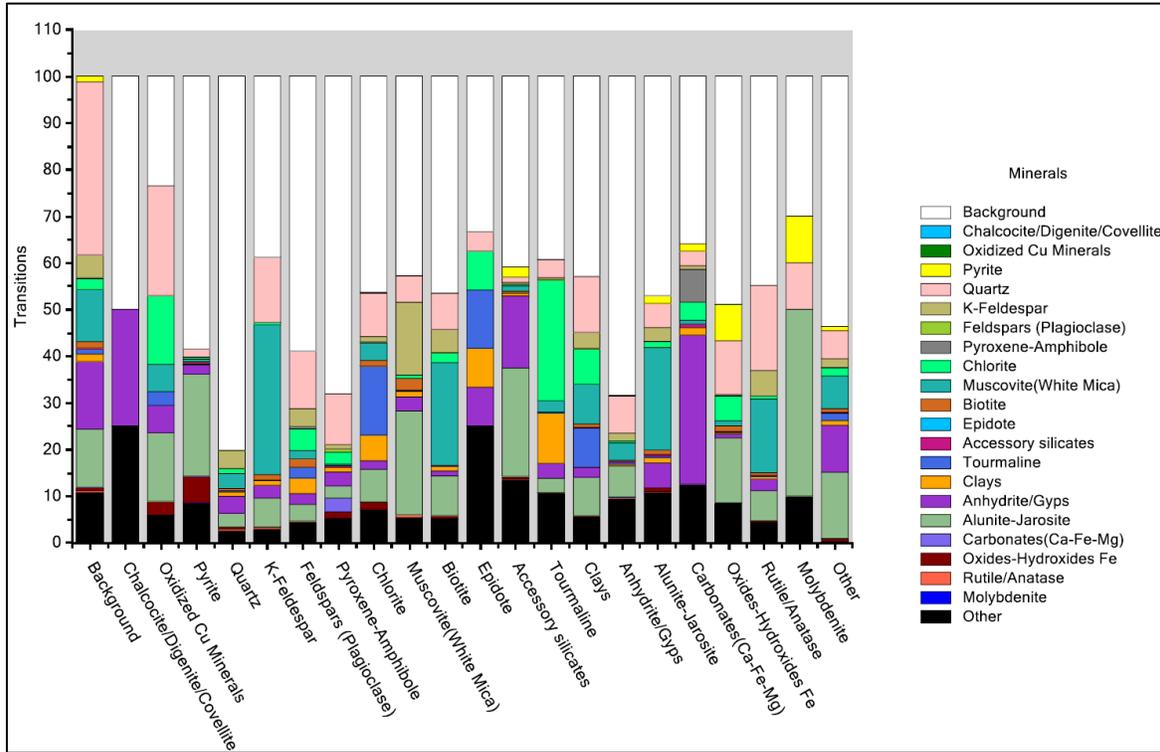


Figura 1: Asociación mineral (transiciones) de la muestra 305. Normalizado al 100% de transiciones entre minerales.

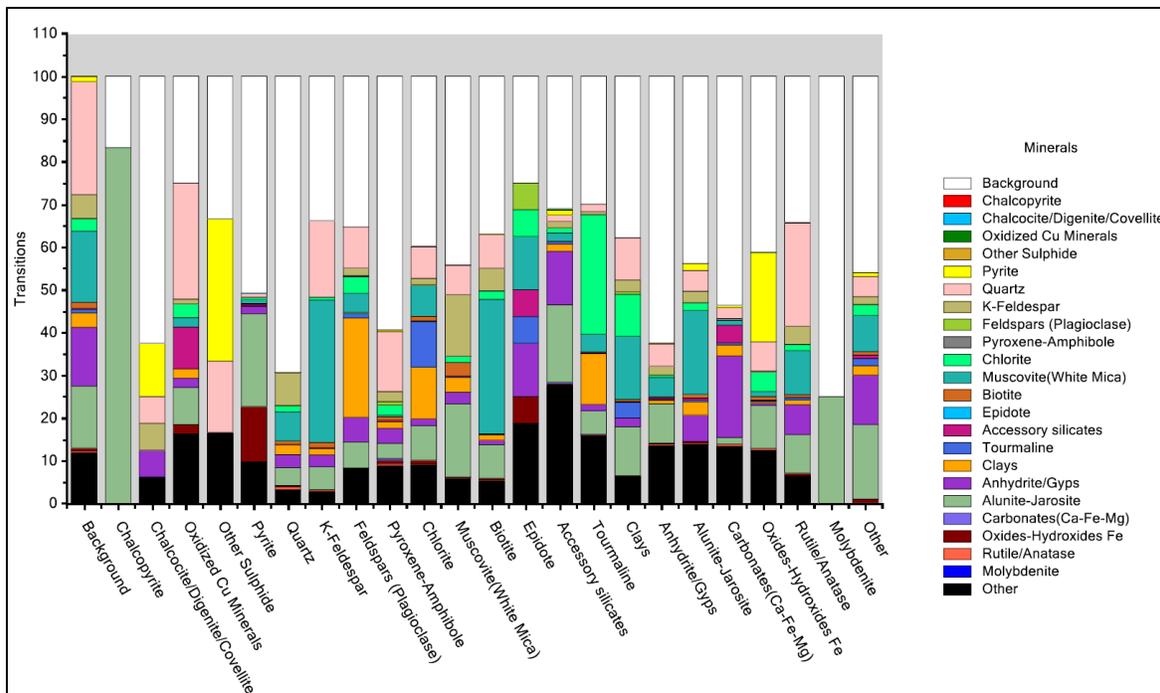


Figura 2: Asociación mineral (transiciones) de la muestra 407. Normalizado a 100% de transiciones entre minerales.

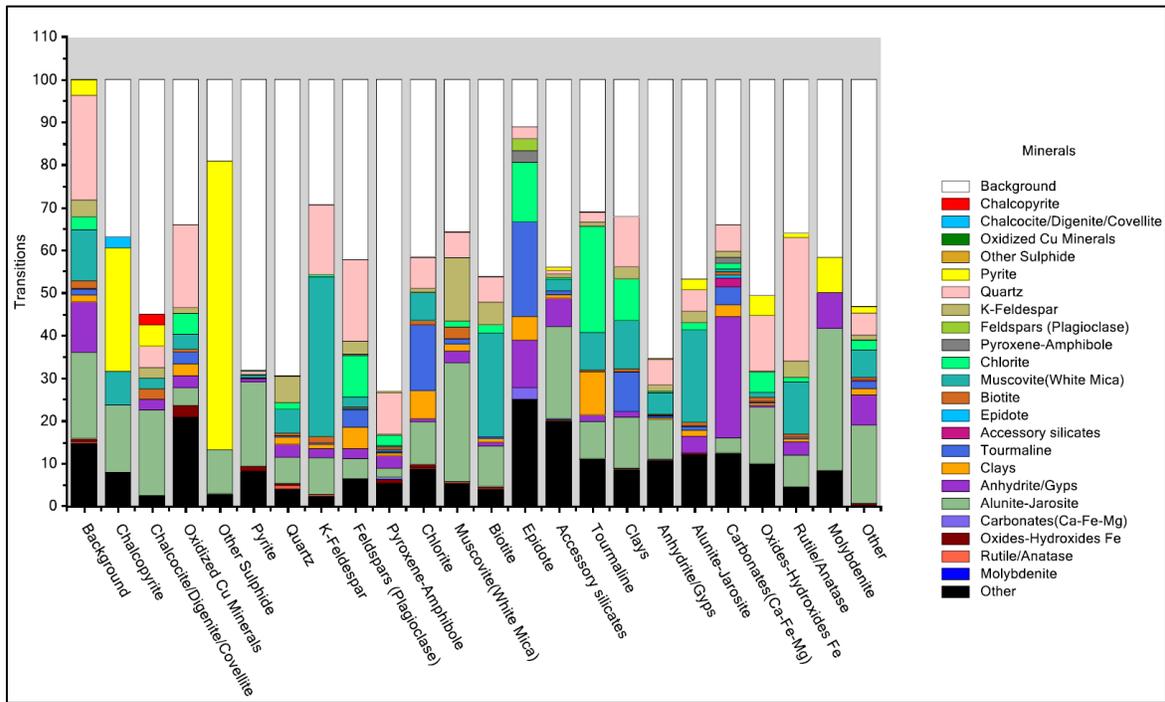


Figura 3: Asociación mineral (transiciones) de la muestra 510. Normalizado a 100% de transiciones entre minerales.

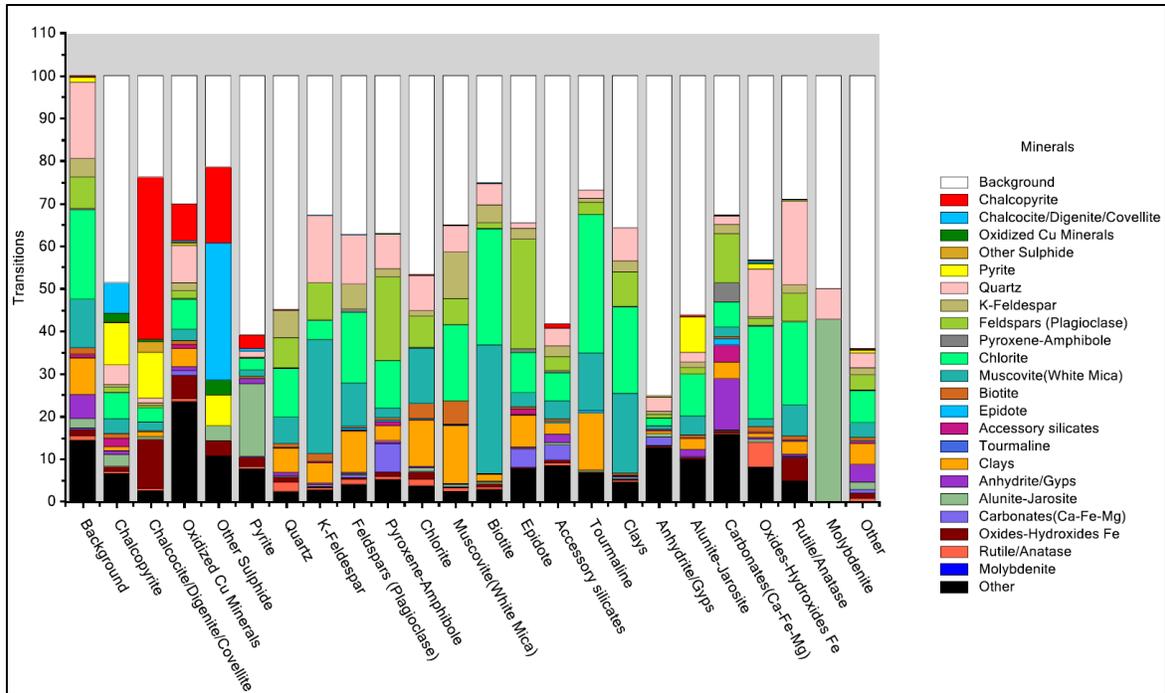


Figura 4: Asociación mineral (transiciones) de la muestra 3504. Normalizado a 100% de transiciones entre minerales.

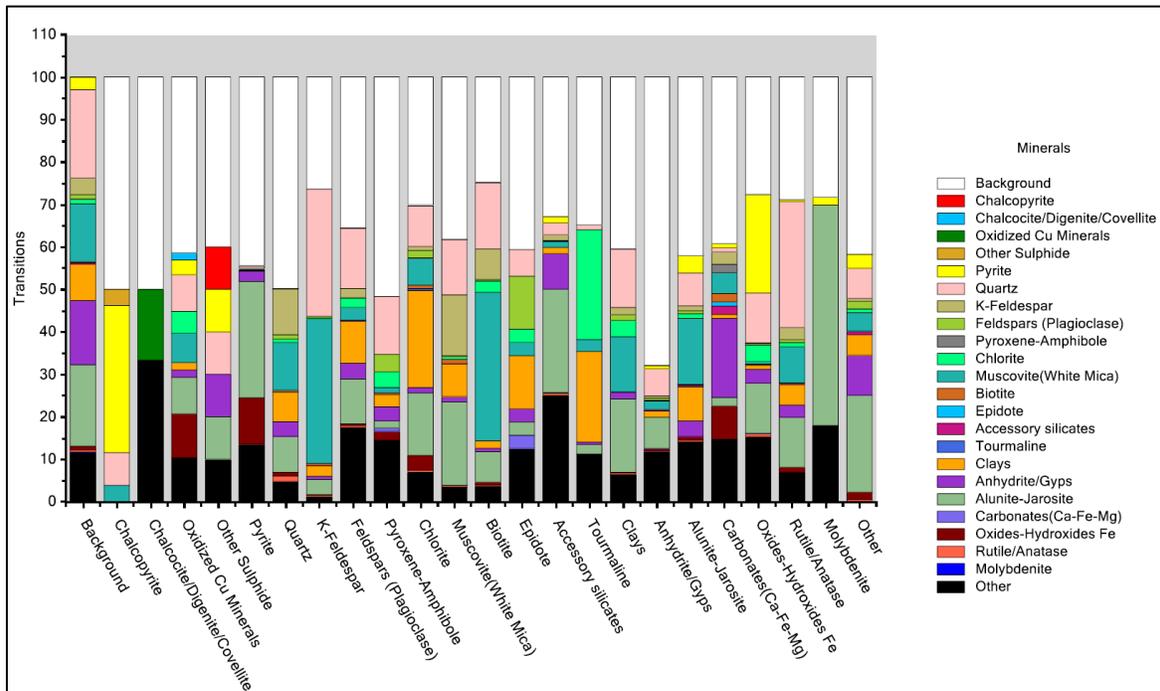


Figura 5: Asociación mineral (transiciones) de la muestra 510-410 (1). Normalizado a 100% de transiciones entre minerales.

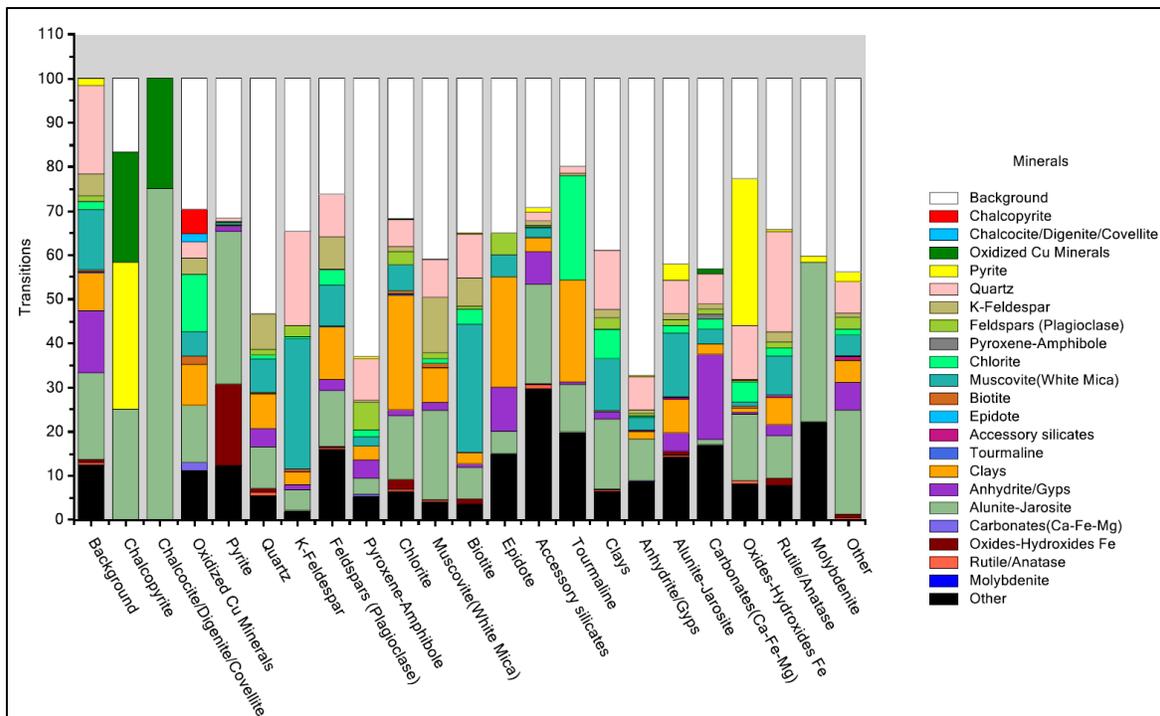


Figura 6: Asociación mineral (transiciones) de la muestra 510-410 (2). Normalizado a 100% de transiciones entre minerales.

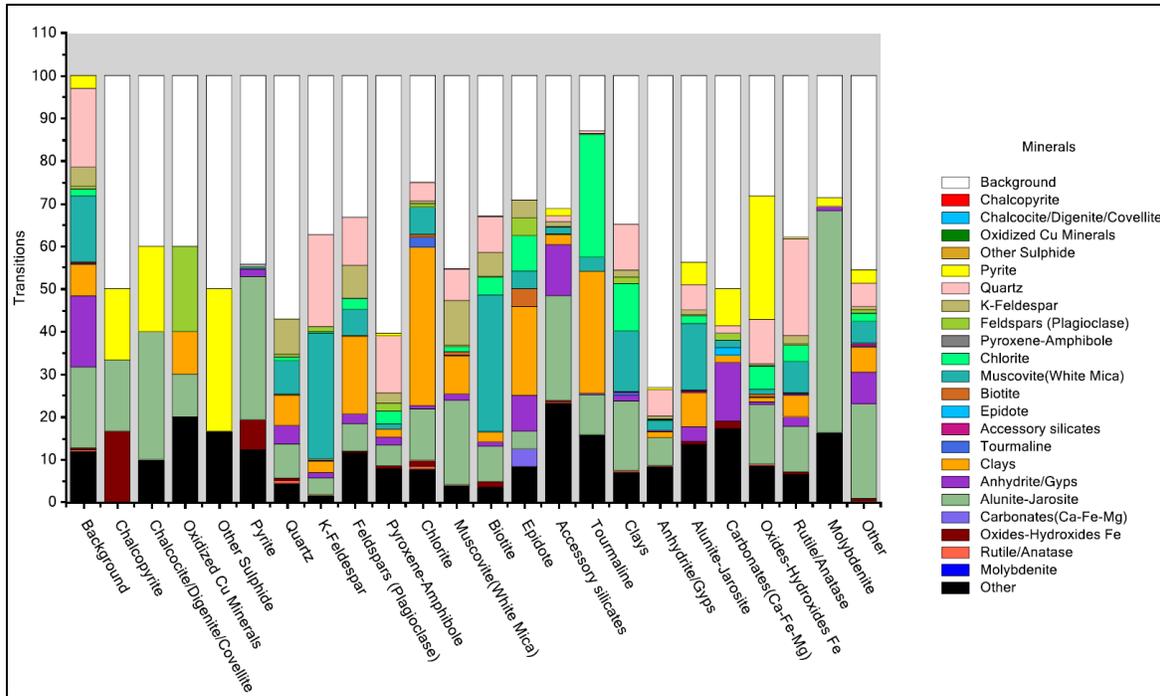


Figura 7: Asociación mineral (transiciones) de la muestra 510-410 (3). Normalizado a 100% de transiciones entre minerales.