



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ciencias Químicas
Departamento Ciencias de la Tierra



**CARACTERIZACIÓN Y DESARROLLO DE MODELO
GEOLÓGICO 3D PARA EVALUACIÓN DE MACIZOS
ROCOSOS POTENCIALMENTE REACTIVOS CON
EXPLOSIVOS, CASO DE ESTUDIO MINA LOS COLORADOS,
REGIÓN DE ATACAMA, CHILE.**

Memoria para optar al Título de Geólogo

Vicente Humberto Orellana Poblete

Profesor Patrocinante: MSc. Abraham Elías González Martínez
Profesional Guía: Sr. Héctor Aníbal Villalobos Kirmayr
Profesores Comisión: MSc. Liubow Nikolaivna González Martínez
Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

Concepción, 2023.

ÍNDICE

| | Página |
|---|--------|
| RESUMEN | |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Generalidades | 1 |
| 1.2. Definiciones | 2 |
| 1.3. Objetivos | 3 |
| 1.4. Agradecimientos | 4 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 5 |
| 2.1. Explosivos con base de nitrato de amonio | 5 |
| 2.2. Reacciones en rocas sulfuradas: meteorización de sulfuros y reacción con nitrato de amonio | 6 |
| 2.2.1. Meteorización de sulfuros | 6 |
| 2.2.2. Reacción con nitrato de amonio | 7 |
| 2.2.3. Emisiones de gases nitrosos | 15 |
| 2.3. Factores que influyen en la reactividad | 17 |
| 2.3.1. Factores químicos | 17 |
| 2.3.2. Factores físicos | 18 |
| 2.3.3. Mineralogía | 20 |
| 2.4. Identificación de macizos rocosos reactivos | 22 |
| 2.4.1. Observación y registro en terreno | 22 |
| 2.4.2. Identificación de reactividad por análisis de laboratorio | 23 |
| 2.4.2.1. Ensayo de reactividad | 24 |
| 2.4.2.2. Ensayo <i>sleep time</i> | 27 |
| 2.5. Seguimiento y monitoreo de reactividad | 28 |
| 2.5.1. Criterios geológicos como monitoreo preventivo | 29 |
| 2.5.1.1. Determinación de asociación mineralógica potencialmente reactiva | 29 |
| A. Determinación macroscópica | 29 |
| B. Determinación microscópica | 29 |
| 2.5.1.2. Mapeo geológico-estructural orientado | 30 |
| 2.5.2. Monitoreo instrumental en terreno | 31 |
| 2.5.2.1. Seguimiento de temperatura | 31 |
| 2.5.2.2. Medición de pH | 31 |
| 2.5.2.3. Análisis elemental <i>in situ</i> | 31 |
| A. Fluorescencia de rayos X portátil (XRF) | 31 |
| 2.6. Registro de incidentes significativos por reactividad del macizo ... | 32 |
| 3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL | 37 |
| 3.1. Unidades geológicas | 39 |
| 3.1.1. Formación La Negra | 39 |
| 3.1.2. Formación Punta del Cobre | 40 |
| 3.1.3. Depósitos aluviales y coluviales antiguos | 41 |
| 3.1.4. Depósitos cuaternarios | 42 |
| 3.2. Intrusivos | 43 |

| | |
|---|------------|
| 3.2.1. Complejo Plutónico Infiernillo | 43 |
| 3.2.2. Diorita de Llano de la Jaula | 44 |
| 3.3. Estructuras | 44 |
| 4. MARCO GEOLÓGICO LOCAL | 47 |
| 4.1. Litología y alteración hidrotermal | 47 |
| 4.2. Mineralización | 51 |
| 4.3. Geología Estructural | 53 |
| 4.4. Modelos geológicos..... | 54 |
| 4.4.1. Modelo geológico | 54 |
| 4.4.2. Modelo de alteración | 57 |
| 4.4.3. Modelo de mineralización | 58 |
| 4.4.4. Modelo estructural | 59 |
| 4.4.4.1. Modelo de estructuras mayores | 59 |
| 4.4.4.2. Modelo de discontinuidades intermedias y menores | 62 |
| 4.4.4.3. Dominios estructurales | 65 |
| 4.4.5. Modelo hidrogeológico | 67 |
| 5. ANTECEDENTES DE REACTIVIDAD EN MINA LOS COLORADOS | 69 |
| 5.1. Historial de eventos | 69 |
| 5.2. Análisis crítico de evento 2020 | 70 |
| 5.2.1. Criterios para selección de muestras | 71 |
| 5.2.2. Análisis de reactividad | 72 |
| 5.2.3. Análisis <i>sleep time</i> | 74 |
| 5.2.4. Conclusiones del estudio | 76 |
| 5.2.5. Comentarios y observaciones | 79 |
| 6. NUEVO ESTUDIO DE REACTIVIDAD PARA MINA LOS COLORADOS | 82 |
| 6.1. Selección de área de estudio | 82 |
| 6.2. Recopilación de información escala mina | 83 |
| 6.2.1. Planos del área de estudio | 85 |
| 6.3. Levantamiento de terreno en unidad potencialmente reactiva | 89 |
| 6.3.1. Litología, mineralización y alteración | 89 |
| 6.3.2. Estructuras..... | 90 |
| 6.4. Mapeo y muestreo de detrito de perforación | 92 |
| 6.4.1. Selección de muestras | 92 |
| 6.4.2. Método de muestreo | 94 |
| 6.4.3. Preparación mecánica | 95 |
| 6.5. Resultados ensayos de reactividad | 95 |
| 6.6. Resultados ensayos <i>sleep time</i> | 108 |
| 6.7. Análisis de los resultados | 110 |
| 7. PAUTAS PARA GENERACIÓN DE MODELO DE MACIZO GEOREACTIVO 3D | 114 |
| 7.1. Recopilación de información escala mina | 114 |
| 7.2. Levantamiento de información | 114 |

| | |
|--|------------|
| 7.2.1. Escaneo láser | 115 |
| 7.3. Construcción del modelo | 122 |
| 7.4. Definición de unidades geológica reactivas | 127 |
| 8. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL MODELO GEOREACTIVO | 129 |
| 9. CONCLUSIONES | 131 |
| 10. RECOMENDACIONES Y LIMITACIONES | 132 |
| 11. REFERENCIAS | 135 |

ÍNDICE DE FIGURAS Y FOTOGRAFÍAS

| Figura | Página |
|--|---------------|
| 2. 1. <i>Cutting</i> de perforación | 24 |
| 2. 2. Esquema de preparación mecánica | 24 |
| 2. 3. Montaje del ensayo de reactividad | 25 |
| 2. 4. Muestra reactiva autosostenida | 26 |
| 3. 1. Mapa geológico regional | 38 |
| 4. 1. Geología del yacimiento Los Colorados | 48 |
| 4. 2. Dique de Fe W | 51 |
| 4. 3. Texturas de mineralización | 52 |
| 4. 4. Unidades litológicas, de alteración y mineralización para Mina Los Colorados | 55 |
| 4. 5. Texturas de hierro para Fase 6 | 59 |
| 4. 6. Posición espacial para la mineralización en Fase 6 | 60 |
| 4. 7. Modelo estructural de fallas mayores para Fase 6 | 61 |
| 4. 8. Dominios estructurales y sistemas de discontinuidades menores | 63 |
| 4. 9. Dominios estructurales y sistemas de discontinuidades intermedias | 64 |
| 4. 10. Agrupación de dominios estructurales según cuadrantes | 65 |
| 4. 11. Dominios estructurales de Fase 6 | 66 |
| 4. 12. Distribución de dominios hidrogeológicos | 68 |
| 5. 1. Pozo de perforación con emisiones de humo blanco | 70 |
| 5. 2. Intrusivo Central alterado | 70 |
| 5. 3. Comparación de contenido de Fe por unidad geológica | 76 |
| 5. 4. Comparación de contenido de Al por unidad geológica | 77 |
| 5. 5. Comparación de contenido de Si por unidad geológica | 77 |
| 5. 6. Comparación de contenido de Ti por unidad geológica | 78 |
| 5. 7. Comparación de contenido de S por unidad geológica | 78 |
| 5. 8. Vista en planta de la zona de muestreo RY270 | 79 |
| 5. 9. Vista en planta de la zona de muestreo TZ165002 | 80 |
| 5. 10. Vista en planta de la zona de muestreo TZ165003 | 80 |
| 6. 1. Fotografía aérea de la zona principal del estudio | 83 |
| 6. 2. Vista en planta de las zonas a estudiar y la topografía del rajo | 84 |
| 6. 3. Modelo estructural de Mina Los Colorados | 86 |

| | | | |
|----|-----|---|-----|
| 6. | 4. | Plano de tronadura para la malla CA120169 | 87 |
| 6. | 5. | Plano de tronadura para la malla CA435135 | 88 |
| 6. | 6. | Pozos de contorno en la zona de Intrusivo Central | 89 |
| 6. | 7. | Esquema de pozo de tronadura y cutting de perforación | 94 |
| 6. | 8. | Ensayo de reactividad para la muestra CA435135-265 | 96 |
| 6. | 9. | Gráfico tiempo vs temperatura para la muestra de Intrusivo Central CA120169-1211 | 99 |
| 6. | 10. | Gráfico tiempo vs temperatura para la muestra de Baja Ley CA120169-1104 | 100 |
| 6. | 11. | Gráfico tiempo vs temperatura para la muestra de Diseminado CA120169-203. | 100 |
| 6. | 12. | Gráfico tiempo vs temperatura para la muestra de Brechoso CA120169-11105 | 101 |
| 6. | 13. | Gráfico tiempo vs temperatura para la muestra de APR CA435135-1043 | 101 |
| 6. | 14. | Gráfico tiempo vs temperatura para la muestra de Falla Magnetita Oeste CA435135-265 | 102 |
| 6. | 15. | Vista en planta de malla 435135 | 105 |
| 6. | 16. | Vista en planta de malla CA120169 con información estructural y ubicación de pozos analizados | 107 |
| 7. | 1. | Escáner láser Maptek | 116 |
| 7. | 2. | Pantalla de escáner láser Maptek | 116 |
| 7. | 3. | Escaneo visualizado en software Maptek PointStudio | 117 |
| 7. | 4. | Estructuras identificadas en el software PointStudio | 117 |
| 7. | 5. | Detalle de uno de los bancos escaneados | 118 |
| 7. | 6. | Vista en perspectiva de estructuras cuya traza intersecta la malla de perforación estudiada. | 118 |
| 7. | 7. | Concentración de polos (visualización de contornos) | 120 |
| 7. | 8. | Concentración de polos (estructuras representadas por polos) | 120 |
| 7. | 9. | Mecanismos de fallamiento planar | 121 |
| 7. | 10. | Mecanismos de fallamiento en cuña | 121 |
| 7. | 11. | Vista en planta de malla CA120169 con información estructural | 123 |
| 7. | 12. | Modelo georeactivo 3D de banco | 124 |
| 7. | 13. | Perfil pozo 1211 en modelo georeactivo | 124 |
| 7. | 14. | Perfil pozo 223 en modelo georeactivo | 125 |
| 7. | 15. | Perfil pozo 1111 en modelo georeactivo | 125 |
| 7. | 16. | Perfil pozo 1109 en modelo georeactivo | 126 |
| 7. | 17. | Perfil pozo 1206 en modelo georeactivo | 126 |
| 7. | 18. | Perfil pozo 1107 en modelo georeactivo | 127 |

ÍNDICE DE TABLAS

| Tabla | | Página | |
|--------------|----|--|-----|
| 2. | 1. | Nivel de humos rojos según color | 16 |
| 2. | 2. | Propiedades termales de ciertos materiales a 25°C | 19 |
| 2. | 3. | Reactividad relativa en minerales sulfuros | 21 |
| 2. | 4. | Criterio intensidad de reacción para ensayo de reactividad | 27 |
| 2. | 5. | Criticidad para resultados ensayo <i>sleep time</i> | 28 |
| 2. | 6. | Casos registrados de rocas reactivas en el periodo 2006-2017 | 33 |
| 4. | 1. | Unidades geológicas para Fase 6 de Mina Los Colorados | 56 |
| 4. | 2. | Alteraciones para Fase 6 | 57 |
| 5. | 1. | Información de las muestras extraídas | 71 |
| 5. | 2. | Resultados de ensayos de reactividad por muestra | 72 |
| 5. | 3. | Resultados de ensayos de reactividad y <i>sleep time</i> por muestra | 74 |
| 6. | 1. | Características de las principales estructuras mapeadas | 91 |
| 6. | 2. | Características del relleno y condición del macizo rocoso | 92 |
| 6. | 3. | Detalle de las muestras recolectadas para este estudio | 93 |
| 6. | 4. | Resultados de ensayos de reactividad por muestra | 98 |
| 6. | 5. | Resultados de ensayos de reactividad para muestras proveniente de la malla CA435135 | 104 |
| 6. | 6. | Resultados de ensayos de reactividad para muestras proveniente de la malla CA120169 | 106 |
| 6. | 7. | Resultados de ensayos <i>sleep time</i> para muestras proveniente de la malla CA120169 | 109 |
| 7. | 1. | Sistemas de fallas identificadas en la zona de estudio (malla CA120169). | 119 |
| 7. | 2. | Sistemas de diaclasas identificadas en la zona de estudio | 119 |

RESUMEN

El proceso de tronadura a rajo abierto implica la detonación controlada de explosivos en contacto directo con la roca del macizo rocoso. Sin embargo, algunos minerales presentes en la roca pueden manifestar una incompatibilidad química con el nitrato de amonio, principal componente de los explosivos. Históricamente, la pirita ha sido asociada a este fenómeno conocido como "rocas reactivas", pero es importante tener en cuenta que existen diversos factores que pueden influir en la reactividad de un macizo rocoso. En este trabajo, se propone el concepto de "macizo rocoso reactivo", definición que engloba no solo la capacidad de reacción de un mineral o roca, sino de un macizo rocoso que reúne todas las condiciones fisicoquímicas, mineralógicas o estructurales que lo constituyen. Para comprender y predecir esta propiedad del macizo, es necesario reunir toda la información geológica disponible y realizar ensayos de reactividad utilizando muestras representativas de cada zona. Se propone la generación de un modelo geológico 3D o "Modelo Georeactivo", que permita la creación de Unidades Geológicas Reactivas (UGR) definidas según sus características geológicas y capacidad de reacción con el nitrato de amonio. Contar con un Modelo Georeactivo en cada mina, es una información y herramienta fundamental para el control de fenómenos de reactividad y de los riesgos asociados a estos eventos.

El modelo presentado en este estudio está diseñado a escala de banco y fue desarrollado específicamente para Mina Los Colorados. Se describe la metodología utilizada para su construcción, que incluye el sistema de mapeo, el análisis químico de reactividad de la roca y la integración de esta información para definir las UGR. Esta metodología tiene como objetivo ser aplicable para cualquier faena que busque iniciar estudios sobre el potencial de reactividad del macizo rocoso con explosivos, comprendiendo la naturaleza de este fenómeno y así establecer directrices para su manejo preventivo.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Las rocas o macizos rocosos potencialmente reactivos (MRRx) son unidades geológicas que, al entrar en contacto con el explosivo, podrían originar una reacción exotérmica espontánea y en ocasiones violenta, generando un riesgo altamente crítico en el proceso de tronadura. Esta reacción se puede evidenciar por:

- Un aumento de temperatura por sobre el promedio en los pozos de tronadura.
- Burbujeo o emisiones de gases nitrosos (óxidos de nitrógeno) en pozos cargados con explosivos.

Este fenómeno se inicia con la reacción del nitrato de amonio presente en los compuestos explosivos y los productos resultantes de la meteorización de los sulfuros de hierro, como el Fe^{2+} , que puede liberarse de la pirita para formar ácido sulfúrico. El Fe^{2+} , al ser oxidado a Fe^{3+} en presencia de ácido sulfúrico y en contacto con el nitrato de amonio, experimenta una autocatálisis que produce energía en forma de calor, y potencialmente puede desencadenar una detonación no planificada.

Dada la existencia de riesgos asociados a la presencia de rocas reactivas, resulta imperativo investigar las zonas que potencialmente podrían generar este tipo de reacciones, así como comprender las condiciones geológicas que podrían desencadenar este fenómeno.

Existen dos ensayos de laboratorio para medir la capacidad de reacción y tiempo de respuesta de la roca al estar en contacto con el explosivo: el ensayo de reactividad y el ensayo de “*sleep-time*”, respectivamente. Es fundamental contrastar esta información con modelos o análisis mineralógicos que permitan identificar la mineralogía asociada a las zonas potencialmente reactivas. Estos métodos combinados brindan un enfoque integral para comprender y predecir la reactividad del macizo rocoso en contacto con explosivos.

El objetivo de este estudio es comprender las variables geológicas que influyen en el potencial de reacción exotérmica de un macizo rocoso con explosivos. Para lograrlo, se realizará un exhaustivo análisis geológico y de reactividad de la zona de estudio. A partir de los resultados

obtenidos, se desarrollará un modelo geológico "georeactivo" que permitirá zonificar el macizo rocoso según su potencial reactividad, proporcionando así una base sólida para implementar medidas de control adecuadas.

1.2. Definiciones

1. Pozo de tronadura: Orificio perforado en el macizo rocoso para ser cargado con explosivos y realizar una detonación controlada. En minería, estos pozos son creados durante la etapa de perforación y tronadura. Se ubican estratégicamente en la roca para fragmentarla y facilitar su extracción y traslado.
2. Cutting de perforación: Material rocoso fragmentado extraído del pozo de tronadura y depositado en superficie alrededor de él. Este material puede proporcionar información geológica relevante como la litología del banco perforado.
3. Malla de tronadura: Polígono que divide un banco en áreas más pequeñas y manejables dentro de una fase en desarrollo, facilitando la etapa de perforación y tronadura.
4. Banco: Porción horizontal que mantiene la misma altura geográfica dentro de un rajo y representa una etapa en el avance de la explotación.
5. Explosivo en base a ANFO: Tipo de explosivo utilizado comúnmente en la industria minera, compuesto principalmente por una mezcla de nitrato de amonio y combustible (petróleo).
6. Reactividad: Propiedad de una roca de experimentar una reacción química al interactuar con sustancias específicas, como los componentes de los explosivos utilizados en la tronadura. Estas reacciones pueden generar calor, gases o productos químicos indeseados.
7. Mineralogía reactiva: Se refiere a la presencia de minerales en una roca que tienen la capacidad de reaccionar químicamente al entrar en contacto con ciertos componentes, como el nitrato de amonio en explosivos utilizados en minería.
8. Rocas reactivas: Rocas que presentan la capacidad de reaccionar químicamente al entrar en contacto con explosivos en base a nitrato de amonio.

9. Macizo rocoso potencialmente reactivo: Macizo rocoso sometido a oxidación aeróbica, cuyo contenido en hierro (II y III) bajo ciertas condiciones de acidez, humedad y temperatura, podría provocar una serie de reacciones químicas exotérmicas y autocatalíticas al entrar en contacto con el nitrato de amonio presente en los explosivos.
10. Test o ensayos de reactividad: Pruebas realizadas en laboratorio para evaluar la capacidad de reacción (incompatibilidad química) de una muestra de roca específica ante determinados agentes, en este caso al nitrato de amonio utilizado en los explosivos.
11. Compatibilidad química: La capacidad de dos o más sustancias para interactuar sin desencadenar reacciones químicas no deseadas. En tronadura, se busca garantizar la compatibilidad química entre los explosivos y las rocas para evitar reacciones peligrosas.
12. Inhibición química: Proceso mediante el cual se añaden aditivos a una sustancia con el fin de retardar o prevenir reacciones químicas no deseadas. En tronadura se ofrecen productos explosivos con sustancias retardantes que buscan controlar la reactividad de aquellas rocas con altos contenidos de pirita.

1.3. Objetivos

Objetivo General:

- Desarrollar un modelo georeactivo 3D que permita comprender y predecir la potencial reactividad de un macizo rocoso en contacto con explosivos en el proceso de tronadura a rajo abierto, identificando las variables geológicas y mineralógicas que influyen en dicho fenómeno.

Objetivos Específicos:

- Identificar y analizar las variables geológicas que influirían en la reactividad de los macizos rocosos con explosivos.
- Comprender que variables estarían condicionando un resultado positivo en los ensayos de reactividad en laboratorio, y establecer correlaciones con las condiciones estructurales del macizo rocoso.

- Evaluar la efectividad del modelo georeactivo mediante la comparación con casos de reactividad históricos, y asegurar que las medidas de control a implementar consideren todas las variables que podrían aportar en la reactividad del macizo.

1.4. Agradecimientos

Agradezco de corazón a todas las personas que han sido parte fundamental en mi desarrollo como geólogo, brindándome su apoyo, conocimiento y cariño. A mis abuelos, Eliana y Vicente, quienes, aunque ya no están terrenalmente conmigo, su amor y sabiduría siempre están presentes en mi corazón. A mis padres, quienes desde el principio creyeron en mi pasión por la geología y me alentaron a seguir mis sueños. Su inquebrantable apoyo y confianza han sido un pilar fundamental en este camino. En especial, quiero expresar mi profundo agradecimiento a Javiera, mi compañera de estudios y vida. La geología no solo me brindó una carrera, sino también la oportunidad de conocer a alguien tan especial como ella. Formar una familia juntos ha sido la mayor bendición que la vida me ha otorgado, y estoy agradecido por cada instante compartido a su lado. Y a ti, mi querido hijo Valentín, tu llegada ha dado un nuevo significado a todo lo que hago, y cada logro alcanzado lleva tu nombre en mi corazón. Eres mi mayor inspiración y motivación para seguir adelante.

Finalmente, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la gente de Enaex por todo el soporte brindado durante este último año. A Héctor Villalobos y Marivi de Enaex Santiago por todo el apoyo, enseñanzas y haber depositado su confianza para incluirme en sus estudios y debates respecto a este tema. A Alejandro, Claudio, Danay y todo el equipo de SIA con quien compartimos conocimientos y muchas risas en Enaex Planta Río Loa. También, agradecer a todo el equipo de Enaex Los Colorados, quienes fueron un apoyo fundamental en mi paso por la mina, y a Camila, Paulina y Roberto del equipo de Geología MLC por compartir conmigo valiosos conocimientos y enseñanzas del mundo profesional. Su respaldo y confianza han sido fundamentales para el desarrollo de mi tesis, y estoy profundamente agradecido por la oportunidad de haber formado parte de este equipo. Espero sinceramente que el destino nos vuelva a cruzar en algún momento y que podamos seguir compartiendo nuestras historias, anécdotas y conocimientos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Explosivos con base de nitrato de amonio

Los productos de la meteorización de sulfuros de hierro, bajo ciertas circunstancias, pueden reaccionar con el nitrato de amonio presentes en explosivos. En las condiciones menos favorables, esta incompatibilidad puede provocar una serie de reacciones químicas autocatalizadas altamente exotérmicas, o incluso explosiones prematuras no controladas (AEISG, 2017).

Los explosivos utilizados en minería, especialmente a rajo abierto, se fabrican mediante la combinación de dos mezclas. El principal componente es el ANFO (*ammonium nitrate-fuel oil*), una mezcla de nitrato de amonio en formato *prill* (gránulos) con petróleo. El otro componente de un explosivo es la emulsión o matriz, mezcla heterogénea compuesta por una fase oxidante (solución de nitrato de amonio puro con agua y aditivos) y una fase combustible (petróleo, emulsificantes y/o aceites minerales). A la unión de estas dos grandes mezclas se le conoce como explosivos de base ANFO. Al ser mezcladas las partes, pasa a ser un producto explosivo de alto riesgo, por lo que se deben cumplir ciertas obligaciones de seguridad para su transporte, mezcla y detonación.

Actualmente, la retardación química (o inhibición química) es un mecanismo muy utilizado para demorar la reacción entre el explosivo y sulfuros, elevando la temperatura a la cual reaccionarían normalmente. Evaluaciones de la USBM (United States Bureau of Mines) han llegado a la conclusión de que bajas concentraciones de urea (1%-5%), carbonato de calcio, óxido de zinc y óxido de magnesio pueden ser agregados al ANFO para retardar su reactividad con los sulfuros de hierro oxidados. Entre ellos, la urea ha demostrado ser el retardante más efectivo (Miron y otros, 1992 en Briggs & Kelso, 2001).

Los explosivos de base ANFO que dispone Enaex están fabricados en base a las necesidades de la industria, y ofrece formulaciones específicas según el nivel de fragmentación requerida y requerimientos especiales de ciertas zonas, como zonas con agua o gran abundancia de pirita. Entre ellos destacan:

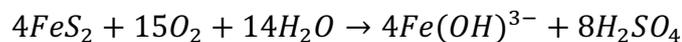
- **Pirex®**: agente de voladura especialmente diseñado para zonas mineralógicas con un alto contenido de pirita. Su principal característica es asegurar la seguridad en la operación ante posibles autodetonaciones causadas por la reacción entre el ANFO y los minerales reactivos.

- Vertex®: agente de voladura de alta versatilidad y energía, especialmente diseñado para optimizar energía y ampliar mallas. Su alto rendimiento le permite ser utilizado en terrenos con distintas condiciones y durezas de roca.
- Blendex® es la combinación de una emulsión no sensibilizada de alta energía que se usa junto con el *prill* de nitrato de amonio para proporcionar el mejor perfil de energía requerido para aplicaciones de granulometría específicas. Este producto de alta energía puede vaciarse o bombearse, según sus requisitos y necesidad de resistencia al agua.

2.2. Reacciones en rocas sulfuradas: meteorización de sulfuros y reacción con nitrato de amonio

2.2.1. Meteorización de sulfuros

Las reacciones químicas que se engloban en el concepto de rocas reactivas son de carácter impredecible ya que tienen un tiempo de inducción variable, aunque comienzan con un proceso natural inherente a la composición mineralógica de los suelos mineros: la generación de sulfato ferroso hidratado producto de la meteorización (desgaste natural) de los sulfuros, especialmente la pirita.

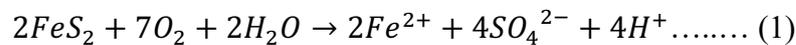


Reacción general para la oxidación de la pirita

La pirita (FeS_2) es uno de los principales minerales en la Tierra, participando en los ciclos globales del azufre y hierro. La pirita es conocida como *buffer* redox en condiciones anóxicas, y, por lo tanto, actúa como sumidero redox de azufre y hierro ya que su solubilidad es muy baja (Berner, 1984 en Descostes, 2004). Entre sus usos, su presencia, sinónimo de condiciones reductoras, se utiliza como indicador de uranio y otros minerales hidrotermales metálicos en exploración geoquímica (Rich y otros, 1977 en Descostes, 2004). Además, la reactividad superficial de la pirita suele ser analizada en el contexto del origen de la vida (McClendon, 1999; Wächtershäuser, 2000) y destaca la sorción de metales preciosos como Au y Ag, que tienen a nuclearse como pequeñas esferas en microfracturas en su superficie (Mycroft y otros, 1995).

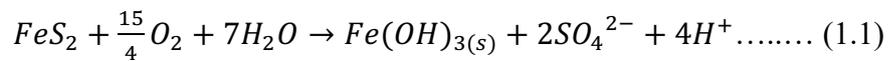
La pirita es un mineral que se meteoriza fácilmente en condiciones ambientalmente favorables. En una faena minera, a escala local, el contenido de sulfato ferroso en el macizo rocoso es función del tiempo que ha estado sometido a la oxidación aeróbica. Es relevante destacar que los sulfuros en pleno proceso de oxidación tienden a alcanzar temperaturas mayores que otras rocas en el área, lo que los hace altamente reactivos con explosivos.

Orlandi (2006) engloba la oxidación de la pirita en cuatro reacciones principales. La primera reacción en la meteorización de la pirita corresponde a la oxidación de pirita por el oxígeno (u otro oxidante). El sulfuro es oxidado en sulfato y se libera el ión ferroso (Fe^{2+}) y dos moles de H^+ por mol oxidado de pirita (reacción 1).

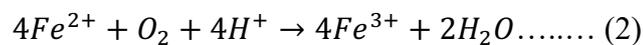


Desgaste inicial: Pirita + Oxígeno + Agua \rightarrow Hierro ferroso + Sulfato + Acidez

La acidificación puede aumentar aún mas por la oxidación del hierro según (reacción 1.1):

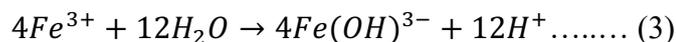


La segunda reacción comprende la conversión de hierro ferroso a hierro férrico (reacción 2). Ciertas bacterias incrementan la tasa de oxidación de hierro ferroso a férrico. La tasa de esta reacción depende del pH, siendo mas lenta bajo condiciones ácidas (pH 2 - 3) donde no hay bacterias, y muchos ordenes de magnitud mas rápida a pH cercanos a 5.



Oxidación de ión ferroso: Hierro ferroso + Oxígeno + Acidez \rightarrow Hierro Férrico + Agua

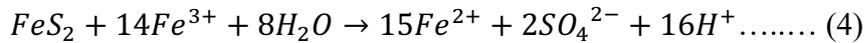
La tercera reacción que podría ocurrir es la hidrólisis de hierro, con la formación de precipitado de hidróxido férrico sólido a pH > 3.5 (reacción 3).



Hidrólisis de hierro: Hierro ferroso + Agua \rightarrow Hidróxido férrico + Acidez

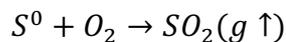
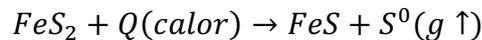
La cuarta reacción es la oxidación de pirita adicional por el hierro férrico generado en las reacciones anteriores (autocatálisis). Esta es una reacción cíclica y ocurre hasta que el hierro

férrico o la pirita se agota. Notar que, en esta reacción, el hierro es el agente oxidante, no el oxígeno (reacción 4).



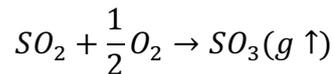
Aceleración del desgaste: Pirita + Hierro Ferrico + Agua \rightarrow Hierro Ferroso + Sulfato + Acidez

Producto de la meteorización natural de la pirita también se genera dióxido de azufre, trióxido de azufre y ácido sulfhídrico.

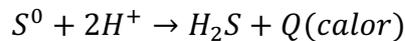


Generación de dióxido de azufre: Pirita + calor \rightarrow Sulfuro de hierro (II) + azufre gaseoso

Azufre + Oxígeno \rightarrow Dióxido de azufre



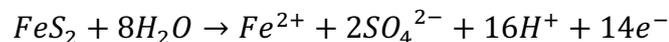
Generación de trióxido de azufre: Dióxido de azufre + oxígeno \rightarrow Trióxido de azufre



Formación de ácido sulfhídrico: Azufre + Acidez \rightarrow Ácido sulfhídrico + calor

Oxidación electroquímica de la pirita

Otro mecanismo de oxidación de la pirita es la electroquímica, reacción iniciada en un ambiente aireado acuoso o donde la humedad supera el 80%.



Un pH mas bajo de lo normal favorecerá la generación de sulfuro mientras que pH mas altos favorecerán oxianiones dependientes del pH y Eh. Condiciones de alto Eh favorecerá la generación de ión ferrico sobre los iones ferrosos y el sulfato sobre el sulfuro y aniones oxisulfuros (Garrels y Thompson, 1960 en Rumball, 1991). Además, las altas temperaturas favorecen la formación de sulfuro.

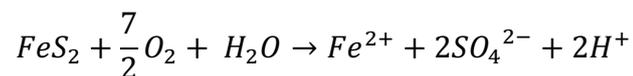
En un ambiente cercano al neutro, predomina la reducción de oxígeno al agua, mientras que bajo un pH 3.0 la reducción de los iones férricos podrían desplazarla debido a la solubilidad incrementada de los iones férricos a bajos pH (Singer y Stumm, 1970 en Rumball, 1991).

La oxidación de pirita por iones férricos puede ser significativa incluso a pH cercano al neutro (Moses y otros, 1987 en Rumball, 1991), donde la baja solubilidad del ión férrico se compensa por la facilidad de oxidación del ión ferroso.

A pesar de lo descrito anteriormente, el calor liberado por estas reacciones electroquímicas apenas alcanzaría la temperatura de ebullición del agua, por lo que no es suficiente para alcanzar la temperatura de combustión de los sulfuros (sobre los 330° C) que se requiere para provocar una ignición o combustión espontánea; es necesario que los reactivos estén en contacto con un material combustible y el tamaño de las partículas sea reducido (Rumball, 1991).

Oxidación molecular de la pirita

Taylor y otros (1984 en Rumball, 1991) usaron isótopos de oxígeno para demostrar que la oxidación electroquímica de pirita predomina en la mayoría de ambientes, sin embargo, también podría ocurrir una reacción de transferencia molecular de masa o difusión molecular:



En esta reacción, el 87.5% v/v del oxígeno en el sulfato es derivado del oxígeno molecular, en contraste con el mecanismo electroquímico donde todo el oxígeno en el sulfato es derivado del agua. Al igual que el mecanismo anterior, es difícil que esta reacción supere los 100°C debido al rol crítico del agua.

Oxidación bacteriana de la pirita

Las bacterias pueden incrementar la tasa de oxidación de pirita significativamente en los ambientes naturales. La especie más común es *Thiobacillus ferrooxidans*, aunque *Thiobacillus thiooxidans*, *Ferrobacillus ferrooxidans*, *Ferrobacillus thiooxidans* y *Thiobacillus acidophilus*, entre otras, también pueden acelerar la oxidación de pirita a través de dos mecanismos: ataque

directo, donde la bacteria se adhiere a la superficie de la pirita y la oxida por vía enzimática; y ataque indirecto, donde su rol es acelerar la oxidación de iones ferrosos a iones férricos. Las bacterias aceleran la oxidación de cinco a seis ordenes de magnitud en soluciones ácidas (Silverman y otros, 1967 en Rumball, 1991).

La oxidación de pirita catalizada por actividad bacteriana depende de los factores que controlan su proliferación, como la disponibilidad de dióxido carbono, oxígeno y nutrientes, agentes disponibles en la mayoría de ambientes geológicos, a excepción de aquellos muy profundos (bajo el nivel freático) donde el oxígeno y dióxido de carbono están ausentes o niveles muy bajos para mantener la actividad bacteriana (Kleinmann y otros, 1981 en Rumball, 1991).

2.2.2. Reacción con nitrato de amonio

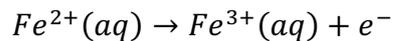
En contacto con nitrato de amonio (principal compuesto de los explosivos) el sulfato ferroso producto de la meteorización acelera la reacción, descomponiendo el nitrato y alcanzando una temperatura de “autocatalización” generalmente a los 115-120°C. Esta temperatura de autocatalización puede ser mucho menor bajo ciertas condiciones: la presencia de acidez puede reducir el umbral de riesgo a temperaturas inferiores a los 70°C, y el contenido de humedad en la roca puede comenzar la reacción exotérmica a temperaturas entre 80 y 100°C. Este fenómeno en minería se conoce como “pozos calientes”, y considera un riesgo importante en las faenas minera ya que somete al explosivo a condiciones favorables para su reacción.

La interacción entre sulfuros parcialmente meteorizados y nitrato de amonio se describen en cuatro etapas, propuestas por Rumball (1991), que pueden culminar en una combustión o detonación espontánea: etapa inicial, intermedia, ignición y combustión.

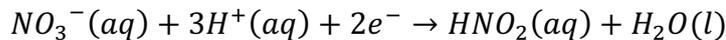
Etapa inicial

Las reacciones en la etapa inicial, o etapa de incubación, ocurren en solución; las especies que se oxidan fácilmente, como los iones ferrosos o la pirita, entran en contacto con el nitrato de amonio en un medio ácido. Los iones ferrosos y/o pirita son oxidados en iones férricos por los iones de nitrato derivados de la interacción entre los productos de la meteorización y el nitrato del ANFO, lo que lleva a una acumulación gradual de ácido nítrico (por reducción del nitrato)

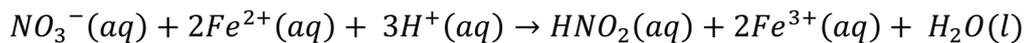
que puede ser absorbido en la superficie de minerales como la pirita o grafito. Se caracteriza por un aumento leve de temperatura (2°C aproximadamente), sin emisiones gaseosas. amonio en un medio ácido. Los iones ferrosos y/o pirita son oxidados en iones férricos por los iones de nitrato derivados de la interacción entre los productos de la meteorización y el nitrato del ANFO, lo que lleva a una acumulación gradual de ácido nítrico (por reducción del nitrato) que puede ser absorbido en la superficie de minerales como la pirita o grafito. Se caracteriza por un aumento leve de temperatura (2°C aproximadamente), sin emisiones gaseosas.



Ecuación de oxidación: Oxidación electroquímica de iones ferrosos en iones férricos.



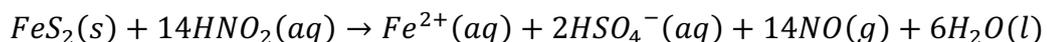
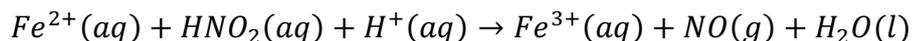
Ecuación de reducción: Reducción de nitrato en ácido nítrico.



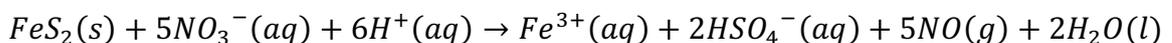
Ecuación redox

Etapa intermedia

Esta etapa termodinámicamente favorable y exotérmica (Miron y otros, 1979 en Rumball, 1991) comienza cuando el ácido nítrico se acumula hasta un nivel crítico donde es capaz de catalizar la reducción de iones nitrato (en el nitrato de amonio) a óxido nítrico (autocatálisis), provocando la oxidación de los iones ferrosos y/o pirita en iones férricos. La tasa de reacción alcanza su máximo con 5% w/w de contenido de agua, evidenciando la importancia del agua como medio que junta los reactantes y libera los productos. El óxido nítrico es el producto mas importante, ya que facilita la regeneración autocatalítica del ácido nítrico y se combina con dióxido de nitrógeno y calor para catalizar la etapa de ignición.



Ecuaciones Redox



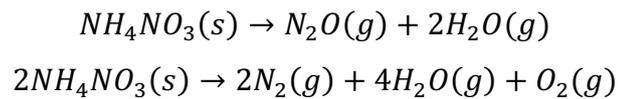
Ecuación general: como productos se genera calor, iones férricos, iones sulfato y óxido nítrico.

Luego, el óxido nítrico generado reacciona con sulfato ferroso en una solución muy ácida para formar un complejo color café, que por el calor generado se descompone en un residuo rojizo de $Fe_2O_3 \cdot H_2O$



Etapa de ignición

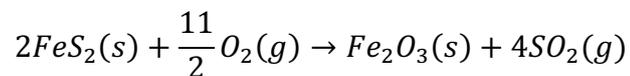
En la etapa de ignición, la acumulación de calor, óxido nítrico y óxido de nitrógeno producido por la oxidación atmosférica del óxido nítrico, inician la violenta descomposición exotérmica y/o explosiva del nitrato de amonio a temperaturas tan bajas como los 25°C, generando rápidamente una gran cantidad de calor, óxido nitroso, vapor, nitrógeno y oxígeno.



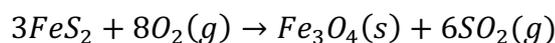
Ecuaciones de la etapa de ignición

Etapa de combustión

Las altas temperaturas alcanzadas anteriormente (más de 600°C) y un exceso de agentes oxidantes que facilitan la combustión dan comienzo a esta etapa, que incluye las reacciones de combustión de piritita a hematita y dióxido de sulfuro.



El acceso al oxígeno también controlará los productos a formarse; un aporte limitado de oxígeno resultaría en productos mas reducidos como la magnetita.

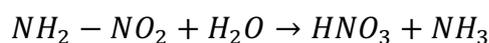
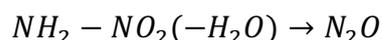
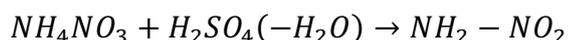
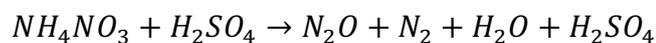


Las reacciones que comprenden la descomposición de nitrato de amonio y la oxidación de sulfuros parcialmente meteorizados son de carácter rápido, autocatalíticas y altamente

exotérmicas, lo que resulta en una reacción “autosostenida” (Miron y otros, 1979), concepto que también se utilizará en el capítulo de ensayos de reactividad (capítulo 2.4).

Otros productos intermedios

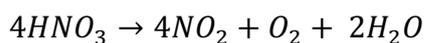
Existen otros productos de esta serie de reacciones, como el N_2O_3 , N_2O , N_2 , NH_3 , HNO_3 , H_2SO_4 , H_2O_2 y alumbres, cuyo rol no ha sido estudiado en detalle, pero suelen conocerse como “reacciones en cadena”, una combinación compleja de diversas reacciones que ayudan a liberar el calor necesario para comenzar la combustión que puede concluir en una explosión (Orlandi, 2006).



Una vez el nitrato de amonio se encuentra en estado fundido ($170^\circ C$), se disocia a través de una reacción fuertemente exotérmica en amoníaco y ácido nítrico.

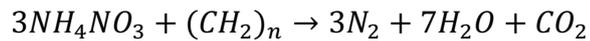
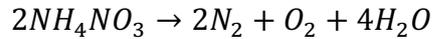


La baja solubilidad del amoníaco comparado al ácido nítrico en el nitrato de amonio fundido permite la volatilización del amoníaco liberado, causando un descenso en el pH del fundido. Luego, el fundido rico en ácido nítrico se puede descomponer de la siguiente forma en dióxido de nitrógeno:

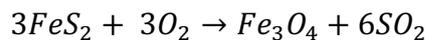
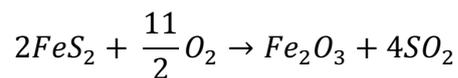


Es generalmente aceptado que la descomposición en nitrógeno, oxígeno y agua representa la descomposición mas completa y energética de nitrato de amonio, y se considera como la reacción que ocurre cuando el nitrato de amonio explota.

La presencia de 6% w/w de petróleo en el ANFO no cambia significativamente la química de las reacciones, pero el balance de oxígeno generado permite una explosión tres veces más energética.



Finalmente, a altas temperaturas, la descomposición exotérmica y explosiva del nitrato de amonio es responsable de iniciar las reacciones de combustión de los sulfuros (normalmente desde los 330°C). La combustión de la pirita genera dióxido de azufre y hematita o magnetita dependiendo del aporte de oxígeno.



En este punto, seguir calentando el fundido no elevará su temperatura ya que hay una tendencia hacia una reacción autosostenida una vez se retira la fuente de calor, aunque no es altamente exotérmica como cuando se emplea el nitrato de amonio en explosivos. Esta diferencia en el comportamiento es por la existencia de una energía de activación o barreras cinéticas que impiden las reacciones de descomposición altamente exotérmicas del nitrato de amonio, energías y barreras que pueden ser alcanzadas al utilizar un “*booster*” junto al nitrato de amonio en el explosivo, liberando una gran cantidad de energía que hasta resulta en una explosión.

Estas barreras cinéticas en la descomposición del nitrato de amonio también se pueden superar utilizando compuestos catalizadores o sensibilizadores que ayudan a disminuir la temperatura a la que se producirá la descomposición explosiva, que normalmente no ocurre bajo los 318°C. Sin embargo, la pirita, acidez, humedad, óxidos de hierro, carbón, óxido nítrico y dióxido de nitrógeno, especies que pueden ser encontradas o generadas a través de la meteorización de sulfuros, reducen significativamente esta temperatura.

2.2.3. Emisiones de gases nitrosos

Una detonación ideal es aquella en la que el explosivo alcanzaría una combustión de alto nivel, resultando en una conversión completa del explosivo a nitrógeno gaseoso, dióxido de carbono y agua. Sin embargo, los explosivos que contienen nitrógeno y oxígeno, normalmente en forma de nitrato de amonio (NH_4NO_3), también pueden producir óxidos de nitrógeno (o humos rojos) y monóxidos de carbono (o humos negros). Estos humos son generados en condiciones no ideales.

La definición de un evento de humos rojos es un evento que genera dióxido de nitrógeno gaseoso visible, que se mueve fuera de la zona de exclusión de explosión estándar, área dedicada a brindar protección. El dióxido de nitrógeno es más pesado que el aire y se puede acumular en áreas bajas, donde puede reemplazar al oxígeno o alcanzar concentraciones tóxicas.

La Tabla 2.1 detalla cómo se pueden evaluar los humos de NO_x de una explosión desde la superficie.

2.3. Factores que influyen en la reactividad

La forma en que interactúan los sulfuros parcialmente meteorizados y el nitrato de amonio está condicionado a ciertos factores químicos, mineralógicos y físicos que reúnen características que en combinación pueden incidir en la generación de una combustión o detonación espontánea. En este capítulo se describirán los factores más importantes.

2.3.1. Factores químicos

Humedad y agua

El contenido de agua cumple un rol muy importante y ha sido cuantificado por Mingging y Ronggi (1986 en Rumball, 1991), quienes muestran que la reactividad óptima se alcanza con un contenido de humedad entre 1 y 5% w/w. Aquellas muestras con menos de 1% w/w de humedad presentan reacciones lentas o nula, ya que el agua no es suficiente para reunir a los reactivos y liberar los productos. Por otro lado, muestras con más de un 5% w/w de humedad

también son lentas o fallan debido a una dilución excesiva de los reactivos o a la gran capacidad calorífica del agua que impide el inicio de la reacción exotérmica por pérdida de calor.

| Nivel | Color Código RGB | Apariencia típica |
|----------------------------------|----------------------------|--|
| 0 Sin humo | R: 244 G: 222 B: 217 |  |
| 1 Con humo | R: 244 G: 219 B: 170 |  |
| 2 Humo amarillo claro/naranja | R: 237 G: 160 B: 79 |  |
| 3 Humo naranja intermedio | R: 232 G: 117 B: 17 |  |
| 4 Humo naranja fuerte/rojizo | R: 181 G: 84 B: 0 |  |
| 5 Humo café-rojizo/morado | R: 99 G: 58 B: 17 |  |

Tabla 2.1: Nivel de humos rojos según color. Modificado de Australian Explosives Industry and Safety Group Inc. (AEISG, 2017).

El agua en el macizo rocoso puede tener diversas fuentes, además de las aguas subterráneas, la lluvia, el rocío y el aire húmedo. También puede ser proporcionada como resultado de las operaciones mineras, como la perforación de pozos o las prácticas de supresión de polvo. Es importante destacar que el agua se sentirá atraída de manera preferencial hacia las rocas contaminadas con nitrato de amonio debido a su higroscopicidad, es decir, su afinidad por absorber la humedad del ambiente. Esta característica hace que las rocas contaminadas con nitrato tengan una mayor capacidad de atraer y retener el agua en comparación con otras rocas no contaminadas. Esta presencia de agua en las rocas reactivas puede tener un impacto significativo en la cinética de las reacciones y en el comportamiento global del sistema (Rumball, 1991).

Acidez

Para muchos autores, un pH bajo es esencial para que se produzca la reacción entre el mineral y nitrato de amonio; normalmente se han medido pH entre 2 y 5, donde los valores más bajos se consideran más reactivos. Estos suelos son ácidos debido al ácido sulfúrico generado por la oxidación parcial de la pirita. La reactividad del ácido sulfúrico se puede deber a su habilidad para reaccionar con el nitrato de amonio para formar ácido nítrico, que se encarga de oxidar la pirita o disolver iones férricos oxidantes (Mingging y Ronggi, 1986 en Rumball, 1991).

Contenido de iones ferrosos

Mingging y Ronggi (1986 en Rumball, 1991) y Miron y otros (1979) han demostrado que los iones ferrosos aceleran la reacción entre sulfuros parcialmente meteorizados y el nitrato de amonio. Estos iones son derivados de la oxidación parcial de pirita, y existen como sulfato ferroso.

Contenido de sulfuros

El contenido en sulfuros no tiene influencia en las etapas acuosas de la interacción con nitrato de amonio (etapas inicial e intermedia). Sin embargo, en las etapas posteriores donde la roca sulfurada genera grandes cantidades de calor (etapas de ignición y combustión), estos minerales aumentan la temperatura local, lo que acelera la producción de calor.

2.3.2. Factores físicos

Propiedades termales del medio

Los sulfuros, lutitas, carbón y nitrato de amonio generalmente tienen una baja conductividad térmica y capacidad calorífica pequeña (Tabla 2.2). Estas son propiedades que ayudan en su autocalentamiento al no ser capaces de conducir el calor lejos del sistema, lo que hace aumentar la temperatura rápidamente y de forma exponencial si las altas temperaturas generan reacciones que liberan calor.

Tabla 2.2. Propiedades termales de ciertos materiales a 25°C. Modificado de Rumball, 1991.

| Material | Conductividad térmica ($\frac{J}{s \cdot m \cdot K}$) | Capacidad calorífica ($\frac{J}{g \cdot K}$) |
|-------------------|--|--|
| Lutita | 1.90 | 0.71 |
| Carbón | 0.29 | 1.00 |
| Pirita | 0.19 | 0.52 |
| Grafito | 150.0 | 0.71 |
| Nitrato de amonio | 0.25 | 1.72 |
| Aluminio | 237.0 | 0.90 |
| Hierro metálico | 72.8 | 0.45 |
| Agua | 0.61 | 4.18 |
| Aire | 0.03 | 1.02 |

Temperatura ambiental y energía cinética

Existen registros empíricos de reacción entre sulfuros y nitrato de amonio a temperaturas tan bajas como 50° C (Miron y otros 1979), o 30° C (Mingging y Ronggi, 1986 en Rumball, 1991).

Temperaturas ambientales altas van a incrementar la probabilidad de reacción al aumentar la energía cinética en las partículas potencialmente reactivas, que aumenta la probabilidad de colisiones exitosas entre ellas.

Tamaño de las partículas

Una superficie disponible mas grande aumentará la tasa de reacción. El área superficial por unidad de masa es inversamente proporcional al radio de la partícula: al considerar la mitad del radio, el área superficial disponible para la reacción será mas o menos duplicada. Además, un tamaño de grano mas pequeño aumentará el número de átomos cristalográficamente inestables y reactivos, como aquellos posicionados en esquinas del cristal (Rumball, 1991).

Permeabilidad y porosidad

Una alta permeabilidad permitirá un mayor acceso de los reactivos y la salida de los productos. En la mayoría de las circunstancias, esto aumentará la reactividad (Carrucio, 1979 en Rumball, 1991), sin embargo, Kolaczowski y Biskupski (1980 en Rumball, 1991) sugieren que los productos gaseosos intermedios de reacción pueden catalizar nuevas reacciones, lo que implica que al menos un confinamiento parcial puede acelerar las reacciones iniciales. El aumento de porosidad puede aumentar la susceptibilidad autocalentamiento al reducir la conductividad térmica.

2.3.3. Mineralogía

Presencia de sulfuros

La presencia de sulfuros es el indicador mas útil que indicaría que una roca es reactiva. Hay pocas circunstancias donde la presencia de sulfuros no es esencial, por ejemplo, rocas con una abundancia de ácido y especies que se oxidan fácilmente, como iones ferrosos. Por otro lado, el contenido en sulfuros no sería representativo en términos de reactividad, ya que una roca sulfurada puede ser no reactiva en presencia de carbonatos, que amortiguan el pH por sobre 7 (Rumball, 1991).

Aunque suele creerse que la pirita es el sulfuro que al meteorizarse es el mas reactivo en contacto con nitrato de amonio, se han descrito casos de reactividad en rocas sulfuradas sin pirita (Forshey y otros, 1968 en Rumball, 1991).

La pirita es relativamente no reactiva en comparación a otros sulfuros de hierro como la marcasita y pirrotina, aunque la reactividad es afectada por muchos factores, como el tamaño de grano, impurezas y el método utilizado para determinar reactividad.

A continuación, se presenta una tabla que compara ciertas paragénesis minerales en cuanto a su reactividad relativa (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Reactividad relativa en minerales sulfuros. Modificado de Rumball, 1991.

| Reactividad relativa ¹ | Método de estudio | Referencia |
|-----------------------------------|-------------------|---------------------------|
| Po > Mrc > Py | Acuoso | Lowson, 1982 |
| Apy > Py > Cpy > Sph > Gn > Cct | Acuoso | Klassen y Mokrousov, 1963 |
| Po >> Py = Apy > Cpy > Sph > Gn | Acuoso | Flann y Lukaszewki, 1970 |
| Po > Py > Cpy | Acuoso | Woodcock, 1967 |
| Py > Po > Cpy | Combustión | Fletcher y Shelef, 1963 |
| Cpy > Py > Po | Combustión | Lukaszewski, 1968 |
| Cpy > Py > Cv | Combustión | Losch y Monhemius, 1976 |

¹ Po: Pirrotina; Mrc: Marcasita; Py: Pirita; Apy: Arsenopirita; Cpy: Calcopirita; Sph: Esfalerita; Gn: Galena, Cct: Calcosina; Cv: Covelina.

Fases mixtas de sulfuros

Si en la roca hay mas de una fase (tipo) de sulfuros presente, entonces pueden acoplarse galvánicamente, lo que aumenta considerablemente la reactividad del mineral mas reactivo, mientras estabiliza el sulfuro mas resistente a la oxidación. Un estudio mostró que la oxidación de la pirita es de 8 a 20 veces más rápida en presencia de galena, esfalerita, covelina o enargita que cuando está sola (Anderson, 1930 en Rumball, 1991). Si la galena es menos reactiva que la pirita, actuaría como el cátodo, aceptando electrones, mientras que la pirita actuaría como el ánodo, liberando electrones y oxidándose más rápidamente.

Por otro lado, Peters (1977, en Rumball, 1991) ha demostrado que una capa de óxido pasivante sobre la pirita, es responsable de que se comporte como el sulfuro menos reactivo cuando se conecta galvánicamente a galena, covelina o esfalerita.

Composición de la roca caja

Los minerales formadores de la roca que hospeda la mineralización metálica pueden interactuar con reactivos y productos o afectar el flujo de calor durante las reacciones autocatalíticas. Los ejemplos incluyen: la amortiguación del pH por carbonatos, arcillas y feldespatos y la adsorción de calor por la deshidratación de minerales hidratados. Otras propiedades importantes de los minerales formadores son su capacidad para transferir calor y su tasa de aumento de temperatura cuando se les aplica calor (Rumball, 1991).

2.4. Identificación de macizos rocosos reactivos

El estudio macroscópico y mapeo de macizos rocosos es un aspecto fundamental en la evaluación de su potencial reactividad. En este capítulo, se abordará el proceso de observación y registro en terreno de las condiciones que permiten obtener una idea preliminar sobre la capacidad de reacción de un macizo rocoso al entrar en contacto con el nitrato de amonio presente en los explosivos utilizados en tronadura, y los métodos de laboratorio para categorizar una muestra de roca como reactiva.

2.4.1. Observación y registro en terreno

Durante el mapeo geológico en terreno, se debe llevar a cabo una exhaustiva observación de las características mineralógicas, estructurales y químicas del macizo rocoso. Estas observaciones proporcionan indicios sobre la potencial reactividad de la roca y su comportamiento al interactuar con el nitrato de amonio.

En términos visuales, se busca identificar signos de alteración, oxidación, presencia de minerales secundarios, cambios de coloración en la pared o suelo, así como cualquier otra manifestación que sugiera una posible reactividad del macizo rocoso.

La mineralogía juega un papel crucial en la identificación de macizos reactivos. Se analiza la composición mineral presente en la roca y se busca la presencia de minerales como pirita y

otros sulfuros que puedan ser susceptibles a la oxidación y generar reacciones químicas no deseadas.

La condición estructural del macizo rocoso también debe ser examinada. Se analiza la densidad de fracturas, fallas, diaclasas y otras discontinuidades que puedan facilitar la infiltración de agua o gases, favoreciendo la reactividad de la roca.

Además de la observación visual y estructural, se realizan análisis químicos preliminares en el terreno para evaluar la composición química de la roca y su potencial reactividad. Estos análisis pueden incluir pruebas de campo para detectar la presencia de minerales oxidados o alterados, así como mediciones de pH y conductividad eléctrica para evaluar la acidez o alcalinidad del macizo rocoso.

La combinación de todas estas observaciones y registros en terreno permite obtener una idea preliminar sobre la capacidad de reacción del macizo rocoso al entrar en contacto con el nitrato de amonio de los explosivos. Estos datos preliminares sientan las bases para realizar ensayos de reactividad más rigurosos en el laboratorio, que se describirán a continuación.

2.4.2. Identificación de reactividad por análisis de laboratorio

El ensayo de reactividad, desarrollado inicialmente por la U.S. Bureau of Mines (1979), es un test de laboratorio que tiene por objetivo identificar el tipo de reacción que ocurre por el contacto entre una muestra de roca de la faena minera y el nitrato de amonio sólido (NH_4NO_3), principal compuesto de los explosivos utilizados actualmente en minería. Para esto, se deben extraer muestras representativas desde el *cutting* de perforación, distribuidas de tal forma que representen de mejor manera la zona de estudio, y considerando la altura y largo total del *cutting* (Figura 2.1). Luego, para evitar procesos de oxidación al entrar en contacto con el aire, las muestras extraídas deben ser almacenadas de manera rápida y hermética.

Para asegurar que todo el posible material reactivo contenido en la muestra de *cutting* tenga la misma probabilidad de entrar en contacto con nitrato de amonio o explosivo, la muestra debe ser tratada mecánicamente para obtener una granulometría 90% bajo malla #10 Tyler. Los procedimientos y preparación mecánica a la que deben ser sometidas las muestras se resumen en el siguiente esquema (Figura 2.2).

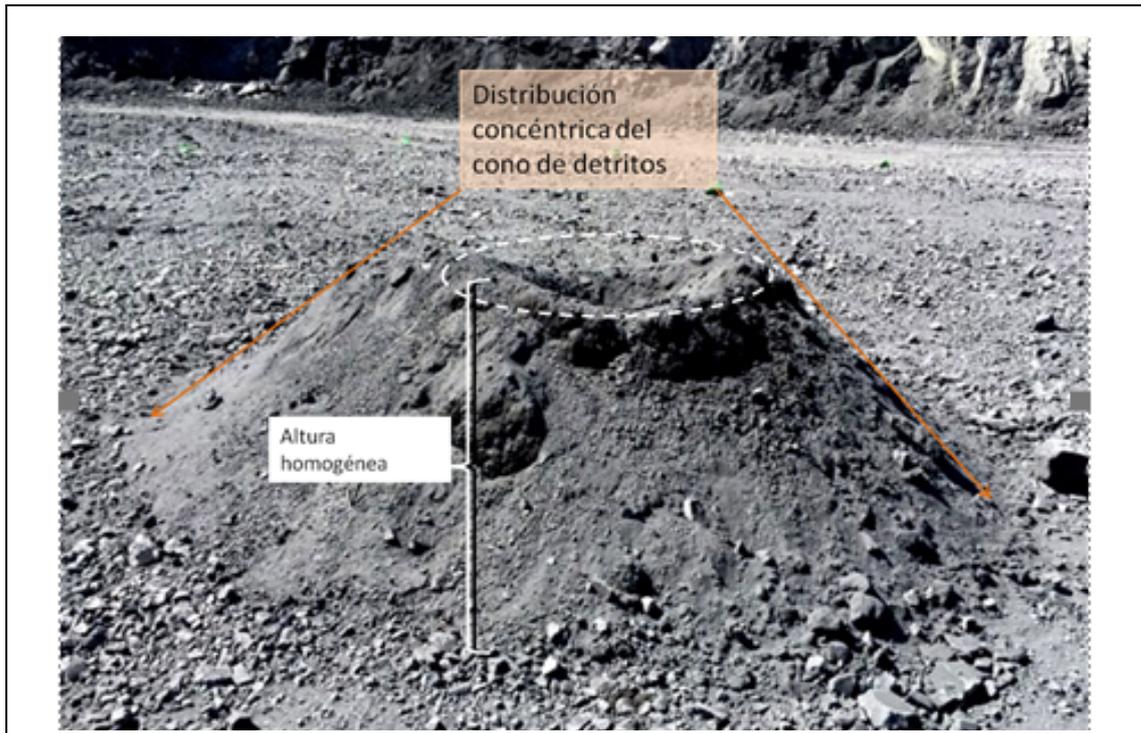


Figura 2.1.: *Cutting* de perforación

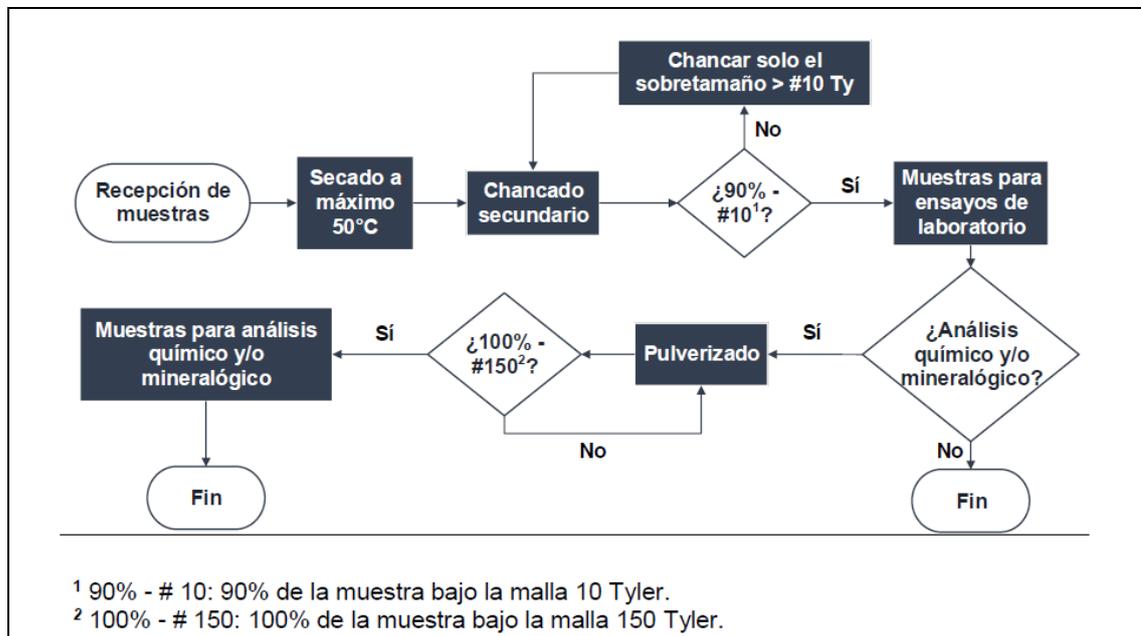


Figura 2.2.: Esquema simplificado de preparación mecánica para muestras de *cutting* de perforación

2.4.2.1 Ensayo de reactividad

El montaje del ensayo de reactividad, creado para reconocer una posible incompatibilidad química del suelo (roca tratada mecánicamente) con el nitrato de amonio, debe realizarse siguiendo ciertas consideraciones para que los resultados obtenidos sean lo mas cercano posible a lo que sucede cuando el explosivo es cargado dentro de un pozo de tronadura.

En un vaso precipitado se pone en contacto la muestra mineral con el nitrato de amonio, simulando la disposición del explosivo dentro del pozo en capas de mineral-nitrato-mineral (Figura 2.3). Luego, se introducen termopares para mantener un registro constante de la temperatura del sistema mientras se realiza el ensayo. Las temperaturas son registradas a través de un adquisidor de datos, que, al estar conectado a un computador con software especializado, permite un seguimiento de la temperatura en tiempo real. El vaso precipitado se calienta gradualmente y se mantiene sobre una placa calefactora hasta que el termograma (gráfico T° vs t) generado muestra un cambio súbito en la temperatura del sistema, o hasta que se observan señales físicas (burbujeo o emisión de humos) que indiquen una reacción química en curso.

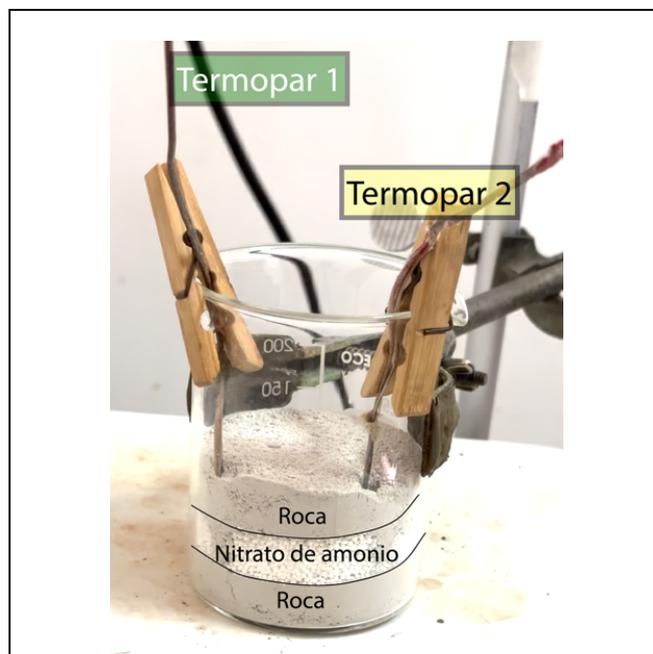


Figura 2.3.: Montaje del ensayo de reactividad

Una vez comenzada la reacción, se registra la temperatura de inicio de la reacción (T_{iRx}) e inmediatamente se separa el vaso precipitado de la fuente de calor para observar como se comporta el termograma, con el objetivo de verificar si la reacción es capaz de mantener o elevar la temperatura luego de retirada la fuente de calor. Hecho esto, la mezcla puede presentar los siguientes comportamientos:

- 1) Reacción autosostenida: si la temperatura dentro del vaso sigue en ascenso o se mantiene transcurridos 5 minutos, se denomina **reacción autosostenida (AS)**; evidencia experimental que se están generando productos que mantienen la reacción activa (autocatalización). La Figura 2.4 muestra una reacción autosostenida en curso.
- 2) Reacción no autosostenida: si existe evidencia de reacción (burbujeo, emisión de gases, cambio en la pendiente del termograma), pero la muestra disminuye gradualmente su temperatura una vez retirada la fuente de calor, se denomina **reacción no autosostenida (NAS)**, ya que no es capaz de sostener por sí sola la temperatura de la reacción, sino que desciende al estar en contacto con el aire.
- 3) Muestra no reactiva: si con la temperatura entregada no se registran señales físicas de reacción en el sistema mineral-nitrato de amonio, la muestra es clasificada como **no reactiva (NRx)**.

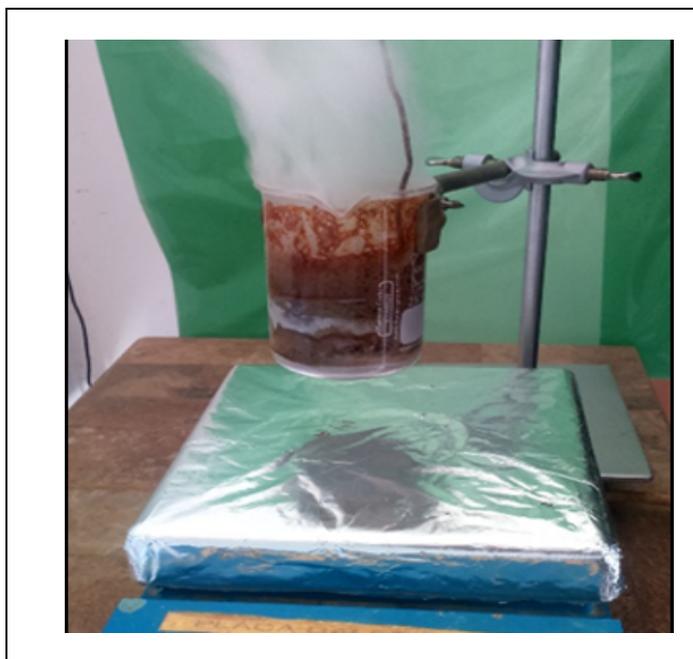


Figura 2.4: Muestra reactiva autosostenida

Para evaluar los cambios de temperatura que sufren las muestras en el ensayo de reactividad se utiliza el parámetro intensidad de reacción ($T_{\text{máx}}/T_{\text{Rx}}$ o μ_{Rx}), indicador indirecto de la exotermicidad de la reacción química entre la muestra de suelo y el nitrato de amonio. Este parámetro corresponde al cociente entre la temperatura máxima y la temperatura de inicio de la reacción, variables obtenidas a partir del ensayo de reactividad:

- la temperatura de inicio de la reacción (T_{Rx}) representa la temperatura inicial que se necesita alcanzar en el pozo para que comience la reacción entre el nitrato de amonio y la roca.
- la temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$) corresponde al *peak* de temperatura alcanzado en el ensayo.

Experimentalmente, se han definido los siguientes criterios para la intensidad de reacción (Tabla 2.4):

Tabla 2.4: Criterio intensidad de reacción (μ_{Rx}) para ensayo de reactividad

| Criticidad | Criterio ($T_{\text{máx}}/T_{\text{Rx}})=\mu_{\text{Rx}}$ |
|------------|--|
| Baja | $1.0 \leq \mu_{\text{Rx}} < 2.0$ |
| Intermedia | $2.0 \leq \mu_{\text{Rx}} < 3.0$ |
| Alta | $3.0 \leq \mu_{\text{Rx}} < 4.5$ |
| Extrema | $\mu_{\text{Rx}} \geq 4.5$ |

- Criticidad baja: indicativo de reacciones poco exotérmicas, lentas y no violentas, cuya liberación de energía al medio en forma de calor no es descontrolada.
- Criticidad intermedia: indicativo de reacciones químicas de velocidad baja a intermedia, burbujeo suave, aunque sin violencia.
- Criticidad alta: indicativo de reacciones químicas de velocidad intermedia a alta, semi controladas y que podrían presentar algún grado de violencia
- Criticidad extrema: indicativo de reacciones rápidas y violentas, que podrían presentar emisión de gases y proyección de material caliente.

2.4.2.2 Ensayo *sleep time*

El ensayo *sleep time* (AEISG, 2017) tiene por objetivo estimar experimentalmente el tiempo máximo que puede permanecer en contacto la muestra mineral sin reaccionar con un producto explosivo particular en el pozo de tronadura.

Para este ensayo, se deja en contacto la muestra rocosa junto al explosivo y una disolución acelerante de Fe^{3+} y Fe^{2+} , que simula las condiciones de oxidación de la pirita (AEISG, 2017). Luego, la muestra de roca en solución se introduce en una estufa calefactora a temperatura constante, y se mantiene monitoreada hasta que el sistema presente indicios visuales o físicos de la ocurrencia de una reacción, o hasta que transcurra un periodo de 30 días. El valor de *sleep time* corresponderá al 25% del tiempo transcurrido (en días), en el que el montaje se mantiene en contacto sin reaccionar. Este 25% es una estimación empírica de aquellos factores del terreno que no pueden ser reproducidos en laboratorio y que podrían acelerar la ocurrencia de la reacción, como la acidez del medio, humedad y oxigenación, entre otros. El seguimiento de la reacción se hace a través de termopares que miden la temperatura dentro del tubo de ensayo y lo registran en un *software*.

Para comprender mejor los resultados del ensayo *sleep time* con un producto explosivo particular, se han establecido rangos de criticidad que sirven de referencia para establecer el periodo máximo que un pozo de tronadura puede estar cargado con explosivo previo a su detonación (Tabla 2.5).

Tabla 2.5: Criticidad para resultados ensayo *sleep time*

| Criticidad | Criterio (días) |
|------------|--------------------------------------|
| Baja | $5.0 \leq \textit{sleep time}$ |
| Media | $2.5 \leq \textit{sleep time} < 5.0$ |
| Alta | $0 \leq \textit{sleep time} < 2.5$ |

2.5. Seguimiento y monitoreo de reactividad

Es crucial tener en cuenta que los ensayos de reactividad de laboratorio se realizan directamente en una muestra de roca y los resultados obtenidos no pueden extrapolarse a otras áreas de la mina, ni menos garantizan la reactividad en sectores geológicamente diferentes. Por lo tanto, a medida que se va avanzando en la explotación o profundización del rajo de la mina, es necesario implementar prácticas inmediatas para asegurar que las futuras zonas a tronar y cargar con explosivos no presenten incompatibilidad química con los mismos.

Para lograr esto, es fundamental llevar a cabo un seguimiento y monitoreo constante, permitiendo tomar medidas inmediatas en relación al tiempo entre la perforación y la carga del pozo de tronadura, así como en la elección del producto explosivo a utilizar. Por ejemplo, en áreas potencialmente reactivas, Enaex recomienda el uso del explosivo Pirex®, el cual contiene urea, compuesto químico que retarda la reacción en presencia de sulfuros como la pirita.

A continuación, se abordarán los criterios geológicos utilizados en el monitoreo continuo de la reactividad del macizo rocoso.

2.5.1. Criterios geológicos como monitoreo preventivo

2.5.1.1. Determinación de asociación mineralógica potencialmente reactiva

La determinación de la asociación mineralógica potencialmente reactiva es la herramienta más eficaz en el monitoreo preventivo de la reactividad en macizos rocosos. Se realizan análisis tanto macroscópicos como microscópicos para evaluar la presencia de minerales que puedan ser susceptibles a la oxidación y generar reacciones químicas indeseables al entrar en contacto con el nitrato de amonio. Por ejemplo, un porcentaje mayor a 1% de pirita, o una asociación de sulfuros ya cumple las condiciones iniciales para considerar y categorizar la zona como potencialmente reactiva, por lo que habría que tomar las medidas de control necesarias para el manejo de explosivos en zonas de rocas reactivas.

A) Determinación macroscópica

La determinación macroscópica implica la observación visual detallada de la muestra de roca para identificar la presencia de minerales con características reactivas. Se buscan signos de

alteración, oxidación, formación de sulfatos u otros indicadores de una posible reactividad. Esta evaluación se realiza en terreno y se registran los resultados de manera sistemática.

B) Determinación microscópica

El uso de técnicas de determinación mineralógica microscópica se presenta como el método más confiable para identificar minerales que no son fácilmente reconocibles a simple vista, pero que desempeñan un papel importante en la reactividad del macizo rocoso. La presencia de minerales reactivos "raros" en un rango de 1-5% de abundancia puede resultar difícil de detectar visualmente, ya que es una abundancia baja y suelen estar dispersos en una matriz rocosa meteorizada y alterada. A modo de ejemplo, utilizando estas técnicas para estudios de reactividad en mineras chilenas, se han definido zonas reactivas en base a la identificación de sulfuros como la pirrotina, arsenopirita, enargita, y sulfatos como la jarosita, voltaíta (sulfato hidratado), y szomolnokita (sulfato de hierro hidratado).

La determinación microscópica se basa en el análisis detallado de las muestras de roca utilizando técnicas como la difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (XRF) y el microscopio electrónico de barrido con análisis cuantitativo de minerales (QEMSCAN). Estas técnicas permiten identificar y cuantificar la presencia de minerales reactivos a nivel microscópico.

El análisis DRX (difracción de rayos X) proporciona información sobre la composición mineralógica de la muestra, mientras que la técnica XRF (fluorescencia de rayos X) permite determinar la presencia de elementos químicos asociados a la reactividad. Por su parte, QEMSCAN permite una caracterización más detallada de la muestra, identificando minerales y sus asociaciones texturales a nivel microscópico.

2.5.1.2. Mapeo geológico-estructural orientado

Considerando que las fallas aportan con permeabilidad que favorecería el ingreso de agua y oxígeno al macizo rocoso, el mapeo geológico-estructural orientado desempeña un papel fundamental en el seguimiento de la reactividad. Investigaciones realizadas en los últimos años han demostrado que la reactividad de una zona es mayor en sectores por donde pasan fallas principales, las cuales suelen generar un halo de influencia de varios metros, y en zonas con

una alta densidad de estructuras. Esto implica que, si una zona presenta un alto porcentaje de sulfuros, los pozos cercanos a fallas geológicas presentarán los resultados de reactividad más críticos, aumentando así el riesgo de una posible detonación prematura.

En este proceso, se lleva a cabo un mapeo detallado de las estructuras geológicas presentes en el área de estudio, centrándose especialmente en la identificación y caracterización de fracturas, fallas y diaclasas que pueden influir en la reactividad de la roca. Este mapeo se realiza de manera sistemática, registrando datos como la orientación, longitud, apertura y relleno de las discontinuidades identificadas. Se considera que el tipo de relleno de estas discontinuidades juega un papel decisivo en la reactividad del macizo, ya que el relleno puede tener una composición que favorezca la reactividad, como la presencia de sulfuros o sulfatos, o que la retarde, como en el caso de rellenos de carbonatos.

2.5.2. Monitoreo instrumental en terreno

El monitoreo instrumental en terreno desempeña un papel fundamental en el estudio y control de la reactividad de los macizos rocosos. Mediante el uso de diversas técnicas y dispositivos de medición, es posible obtener información precisa y en tiempo real sobre variables clave, como la temperatura, el pH y la composición química de las rocas.

2.5.2.1. Seguimiento de temperatura

El seguimiento de la temperatura, tanto en la superficie como en los pozos de tronadura, constituye una práctica fundamental en el monitoreo de la reactividad de los macizos rocosos. La medición regular de la temperatura es una herramienta inicial para identificar posibles reacciones exotérmicas en curso. Si se observa una temperatura más alta que la ambiental o de la superficie, esto podría ser indicativo de una reacción exotérmica en curso dentro del pozo.

2.5.2.2. Medición de pH

La medición del pH es otro aspecto importante en el monitoreo de la reactividad de los macizos rocosos. El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución, y puede proporcionar información importante sobre las condiciones químicas y la capacidad de reacción de la roca. Se deben realizar mediciones periódicas del pH en el agua intersticial de los macizos para

detectar posibles cambios en la acidez, lo cual puede ser indicativo de procesos de oxidación o alteración química en la roca.

2.5.2.3. Análisis elemental *in situ*

A) Fluorescencia de rayos X portátil (XRF)

La evaluación *in situ* de la reactividad se puede llevar a cabo mediante el uso de técnicas como la fluorescencia de rayos X portátil. Esta herramienta permite analizar la composición química de la roca en tiempo real, identificando la presencia de minerales y elementos que podrían tener un impacto en la reactividad. La fluorescencia de rayos X portátil proporciona datos rápidos y precisos, lo que facilita la toma de decisiones y el ajuste de las prácticas de tronadura de acuerdo con los resultados obtenidos. Este método es útil ya que puede determinar la presencia de sulfuros, mejor indicador para identificar rocas potencialmente reactivas.

Sin embargo, es importante destacar que al utilizar esta herramienta se asumiría que no hay presencia de azufre nativo ni sulfatos en la muestra, ya que estos grupos minerales, debido a su alto contenido de azufre, podrían interferir en la correcta detección de los sulfuros. En caso de que existan azufre nativo o sulfatos en la muestra, se requerirían técnicas adicionales o modificaciones en el proceso de análisis para lograr una adecuada interpretación de los resultados.

2.6. Registro de incidentes significativos por reactividad del macizo

Las rocas reactivas son un fenómeno conocido desde hace pocas décadas, aunque hasta la fecha no se han establecido protocolos globales para su manejo preventivo. Es bien sabido que, además de ser un problema de seguridad, la presencia de rocas con estas características representa un desafío en la estructuración operacional minera y diseño de tronadura.

Por ejemplo, los suelos mineros se cargan y tronan pocos días después de haberse perforado los respectivos pozos. Sin embargo, los resultados de los ensayos de reactividad de laboratorio, que determinan si el *cutting* de perforación reaccionará al entrar en contacto con el explosivo,

demoran un par de semanas. Durante este tiempo, los pozos muestreados ya fueron tronados de acuerdo con una planificación y diseño previos.

Esta discrepancia entre el tiempo de análisis y la tronadura puede aumentar el riesgo de posibles reacciones no deseadas en el macizo rocoso, lo que a su vez puede afectar significativamente la seguridad y la eficiencia de las operaciones mineras. Por lo tanto, resulta crucial desarrollar métodos de detección más rápidos y precisos para evaluar la reactividad de las rocas antes de llevar a cabo la tronadura. Una estrategia óptima sería implementar una zonificación basada en la creación de unidades geológicas según su potencial reactividad. Mediante esta zonificación, se categorizarían las diferentes áreas del macizo rocoso en función de su probabilidad de contener rocas reactivas. Utilizando esta estrategia preventiva, cada minera a partir de sus propios antecedentes operacionales y geológicos serían capaces de reconocer un posible contexto de rocas reactivas y realizar el diseño de tronadura considerando este fenómeno.

El estado del arte en torno a las rocas reactivas, que en este trabajo se escaló a macizo rocoso, es el resultado de diversas investigaciones por parte de instituciones y organismos alrededor de todo el mundo. Australia es el país que a la fecha ha participado de manera mas activa en todo lo relacionado a las rocas reactivas (*reactive ground*), instaurando una serie de pautas, protocolos y códigos que les ha permitido tener las consecuencias de este fenómeno al margen, disminuyendo la cantidad de accidentes graves o que pongan el riesgo la seguridad de sus faenas.

Sin embargo, los últimos años no han estado exceptos de accidentes de alto impacto producto de estas condiciones. En países como Australia, Sudáfrica y Chile, a pesar de sus diferencias geotectónicas y, en consecuencia, diferencias en los tipos de depósitos, han tenido accidentes cuyas repercusiones han dado lugar a investigaciones dedicadas a entender lo ocurrido y revelar posibles errores, para que a futuro las personas a cargo, sean capaces de detectar anticipadamente aquellas condiciones para la mitigación de futuros eventos.

La Tabla 2.6 describe algunos casos de rocas reactivas registrados entre 2006 y 2017, según registros de Enaex.

Tabla 2.6. Casos registrados de rocas reactivas en el periodo 2006-2017.

| Identificación del evento | | Observación | Antecedentes | Medidas de control |
|---------------------------|--------|---|--|---|
| Fecha y Localidad | | | | |
| Agosto 2006, | Chile | <ul style="list-style-type: none"> • Reacción del explosivo: Humos naranjos | <ul style="list-style-type: none"> • Pozos tronados hace 15 días • Temperatura de 190° | <ul style="list-style-type: none"> • Se aísla zona y observa por 5 días • Se detiene la operación en sector aledaño |
| Marzo 2013, | Chile | <ul style="list-style-type: none"> • Detonación no planeada en producto vaciable | <ul style="list-style-type: none"> • 4-30% de Pirita • Utilización de detritus • Olor a “huevo podrido” | <ul style="list-style-type: none"> • Uso de explosivo especial • Medición de T° de los pozos • Uso de separadores • Uso de gravilla |
| Agosto 2013, | Chile | <ul style="list-style-type: none"> • Reacción del explosivo en producto bombeable: gases blancos • La acidez catalizó la reacción | <ul style="list-style-type: none"> • Los pozos fueron tronados 4 horas después de ser cargados | <ul style="list-style-type: none"> • Desconocimiento total de lo que estaba ocurriendo |
| Febrero 2014, | Chile | <ul style="list-style-type: none"> • Iniciación espontánea de dos pozos cargados | <ul style="list-style-type: none"> • Se dejan 51 pozos sin tronar por altas temperaturas | <ul style="list-style-type: none"> • Medición de T° previa tronadura • Filmación e inspección visual • 12 días de estudios de rocas reactivas |
| Febrero 2014, | Chile | <ul style="list-style-type: none"> • Reacción del explosivo: emanación de gases asociados al detritus (fuera del pozo) | <ul style="list-style-type: none"> • Pozos con agua • Producto bombeable • T° detritus: 52°C • T° pozo: 23°C | <ul style="list-style-type: none"> • Evacuación de la malla • Se realizó el disparo |
| Junio 2014, | EE.UU. | <ul style="list-style-type: none"> • Deflagración no planeada: emisión de gases naranjos | <ul style="list-style-type: none"> • Pozo sin taco • No resultó en detonación espontánea | <ul style="list-style-type: none"> • Detención de operaciones mineras • Evacuación del personal del rajo • Capacitación sobre reactividad de rocas |

| | | | | |
|-----------------|-----------|---|---|---|
| Octubre 2014, | Indonesia | <ul style="list-style-type: none"> • Detonación no planeada en mina de carbón 47 minutos después de carga | <ul style="list-style-type: none"> • Pozos perforados 4 días antes de ser cargados • Se utilizaba revestimiento plástico en cada pozo debido a grietas | <ul style="list-style-type: none"> • Capacitación al personal sobre rocas reactivas • Se decide usar explosivo especial |
| Diciembre 2014, | EE.UU. | <ul style="list-style-type: none"> • Detonación no planeada | <ul style="list-style-type: none"> • Pozos con >5% de sulfuros de hierro • Carguío 5 días después de la perforación • | <ul style="list-style-type: none"> • Se revisa y modifica el código australiano para rocas reactivas • Se capacita al personal |
| Julio 2015, | Chile | <ul style="list-style-type: none"> • Reacción del explosivo: emanación de gases | <ul style="list-style-type: none"> • Zona tronada tres meses antes • Zona de lastre cargada con producto vaciable • Pozo tiene 1m de agua | <ul style="list-style-type: none"> • Se decide anegar con agua • Se aísla la zona hasta el término de la reacción |
| Julio 2015, | Chile | <ul style="list-style-type: none"> • Detonación no planeada: deflagración de un pozo dos días después del carguío | <ul style="list-style-type: none"> • Gases y humedad en sectores aledaños • Anillos amarillos en pozos aledaños | <ul style="list-style-type: none"> • No hay |
| Julio 2015, | Chile | <ul style="list-style-type: none"> • Reacción del mineral con el oxígeno: fuerte emanación de gases de un pozo • Se concluye oxidación de la pirita con el aire | <ul style="list-style-type: none"> • Malla perforada dos días antes • Pozos sin explosivos • Misma zona del banco anterior: deflagración de un pozo | <ul style="list-style-type: none"> • No se realiza carguío de pozos • Medición de T° (48°C y 23°C) • Se baja la T° del pozo, se carga y dispara con explosivo especial |
| Enero 2016, | Chile | <ul style="list-style-type: none"> • Detonación no planeada: fuerte emanación de gases y aumento de T° | <ul style="list-style-type: none"> • Malla perforada expuesta por 11 días • Adelanto de carguío: 3 día antes de primeras emanaciones • Ensayo de reactividad: reacción autosostenida • Pozos con T°:35-44°C (promedio 5-12°C) | <ul style="list-style-type: none"> • Se evalúa ingreso del personal sobrevolando área con Dron • Se cambia a explosivo especial |

| | | | | |
|---------------|-------|---|---|---|
| Febrero 2016, | Chile | <ul style="list-style-type: none"> • Detección a tiempo de alto potencial: reacción autosostenida en ensayo de reactividad | <ul style="list-style-type: none"> • Malla con alto % de Fe y sulfuros • Sector de carguío con explosivo vaciable • Se tenía programado carguío con adelanto • T° dentro de lo normal | <ul style="list-style-type: none"> • No se realiza adelanto del disparo • Se decide utilizar explosivo especial |
| Julio 2017, | Chile | <ul style="list-style-type: none"> • Reacción del mineral con el aire: emanación de gases por oxidación de la pirita | <ul style="list-style-type: none"> • Malla perforada un mes antes • Pozos sin explosivo • Pozos con T°>35°C | <ul style="list-style-type: none"> • No se realiza carguío de pozos • Se mide T° de los pozos • Se toman 5 muestras para ensayo de reactividad: todas con reacción autosostenida |

En el presente estudio, se analizarán las variables geológicas que influyen en la reactividad del macizo rocoso con explosivos, mediante la recopilación de antecedentes, caracterización geológica y análisis de reactividad en Mina Los Colorados.

3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El yacimiento de Los Colorados se encuentra ubicado en Sierra Los Colorados, formando parte de la "Faja Plegada y Corrida de Los Colorados" y está controlado por la Megafalla Los Colorados, una estructura subvertical de rumbo N20°E con movimientos sinestrales (Thiele y Pincheira, 1987). Esta zona pertenece a la Franja Ferrífera Chilena (FFC), una provincia metalogénica de edad Cretácico con yacimientos de tipo Fe-apatito, y es uno de los 7 grandes depósitos de la FFC con >100 MTM Fe, junto a El Tofo y El Romeral.

La litología del distrito (Figura 3.1) consiste en secuencias volcánicas y volcanosedimentarias del Jurásico Superior-Valanginiano de la Formación Punta del Cobre (Arévalo y Welkner, 2008), así como intrusivos del Complejo Plutónico Infiernillo de edad Cretácico Superior (Fortín, 2013 en Munizaga & Lagos, 2015). La alteración dominante es principalmente actinolítica, seguida de cuarzo feldespática y argílica, con presencia local de silicificación y alteración clorítica en zonas más distales.

Estos yacimientos están asociados espacialmente con la parte sur de la Zona de Falla Atacama (ZFA), una importante estructura del antearco en la zona central de Los Andes (Scheuber y González, 1999). La ZFA corresponde a un sistema de fallas de orientación NS, paralelo al margen continental, con movimiento principalmente sinistral, y su geometría a gran escala se formó durante el Jurásico superior y Cretácico Inferior (Cembrano y otros, 2005).

La mayoría de estos yacimientos están asociados estratigráficamente a formaciones del Jurásico (Formación La Negra) y Cretácico (Formación Punta del Cobre) y están espacialmente relacionados con cuerpos intrusivos máficos-intermedios de edad Cretácico (Sillitoe, 2003).

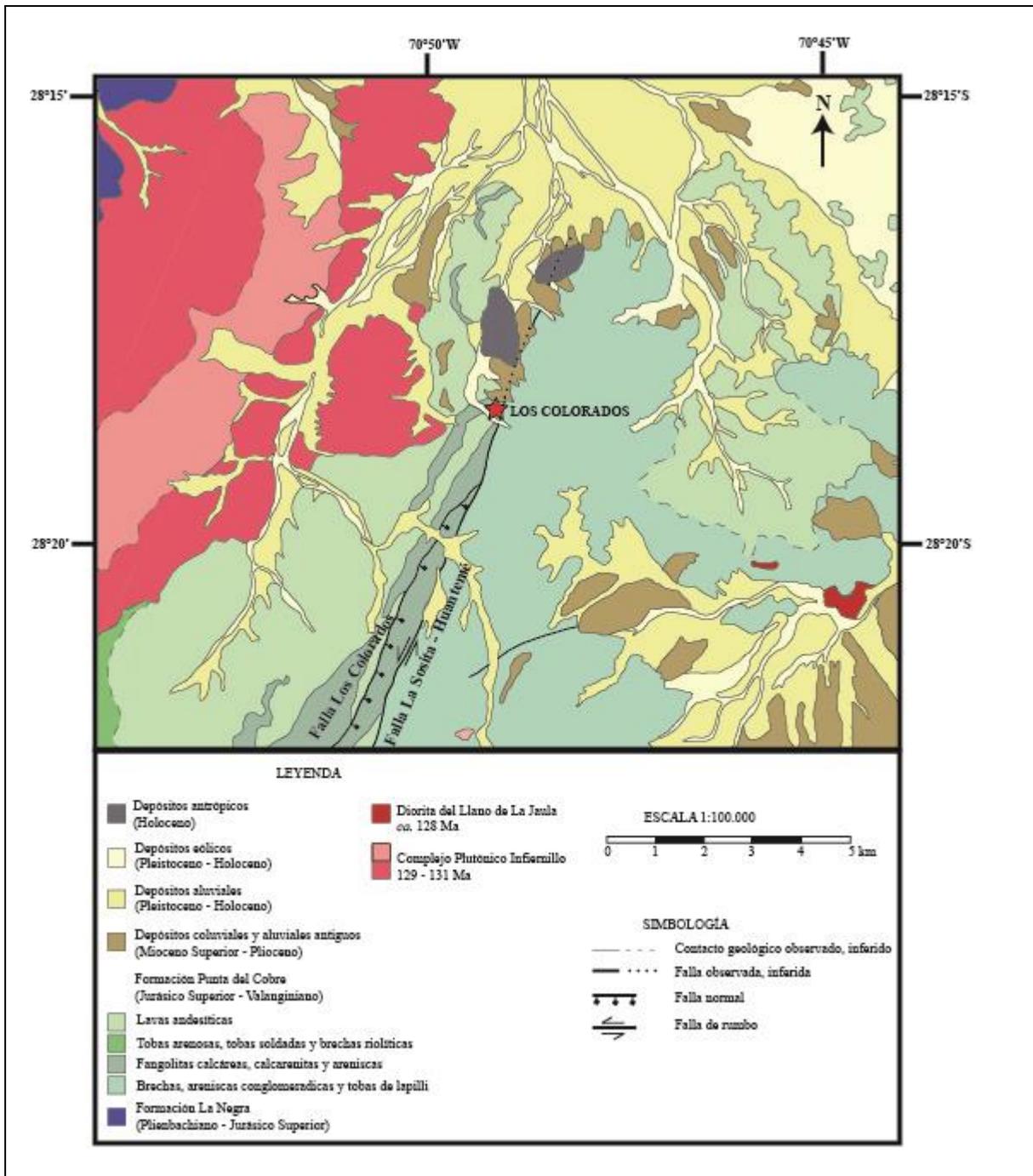


Figura 3.1: Mapa geológico regional. Extraído de Lagas (2016).

3.1. Unidades geológicas

Las unidades estratigráficas predominantes en la región se encuentran detalladas en la Hoja Geológica de Carrizal Bajo (Arévalo y Welkner, 2008). A continuación, se presenta una breve descripción de estas:

3.1.1. Formación La Negra (Pliensbachiano-Jurásico Superior; García, 1967)

La Formación La Negra, de edad Pliensbachiano-Jurásico Superior, se caracteriza por ser una secuencia volcánica homogénea con un espesor mínimo de 300 metros. Compuesta principalmente por andesitas a andesitas basálticas afaníticas y porfídicas, muestra signos de cloritización intensa en algunos sectores y presenta un color rojizo debido por meteorización. En la base de la formación, se observan intercalaciones de tobas soldadas.

Esta formación geológica se extiende en una franja continua de orientación NNE desde Sierra Astillas hasta el valle del río Huasco. En cuanto a sus relaciones de contacto, la Formación La Negra sobreyace discordantemente a las areniscas deformadas de la Formación Canto del Agua. Sin embargo, el techo de la formación no se encuentra expuesto. Además, se encuentra intruida por los cuerpos andesíticos y dioríticos de Sierra Granado, la Granodiorita Capote, la Diorita San Antonio, la Granodiorita Sierra Chañas y el Complejo Plutónico Infernillo. Estos últimos dos cuerpos están en contacto con la Formación La Negra a través de franjas de milonitas con una mineralogía de alto grado de metamorfismo, caracterizada por la presencia de biotita y anfíbola.

En cuanto a su edad, se estima que la Formación La Negra tiene una edad máxima Pliensbachiano, basándose en las areniscas sinemurianas de la Formación Canto del Agua que la subyacen. Por otro lado, la edad mínima Toarciano (ca. 183 Ma) que impone la edad $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en anfíbolos de la Granodiorita Capote restringiría toda esta formación al Pliensbachiano. Sin embargo, en la provincia de Chañaral, se han encontrado fósiles de fauna más joven del Bajociano, lo que sugiere una edad mínima más amplia correspondiente al Jurásico Superior. Además, la Formación Punta del Cobre que la sobreyace tiene una edad Jurásico Superior-Valanginiano.

En cuanto a su ambiente de formación, se cree que la Formación La Negra se formó como resultado de la acumulación de coladas andesíticas en condiciones continentales. Sin embargo, la presencia de horizontes marinos registrados en la quebrada El Morado también indica la influencia de condiciones marinas. Por otro lado, la presencia de tobas soldadas y brechas de fragmentos riolíticos poco seleccionados en la base de la formación sugiere la existencia de actividad piroclástica ácida contemporánea con la efusión de las coladas andesíticas a andesítico-basálticas.

3.1.2. Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior-Valanginiano; Segerstrom y Ruiz, 1962)

La Formación Punta del Cobre, de edad Jurásico Superior-Valanginiano, se caracteriza por ser una secuencia volcánica sedimentaria heterogénea con un espesor máximo de 3050 metros. Se divide en tres secciones distintas en términos litológicos.

La sección inferior, con un espesor máximo de 2500 metros, está compuesta principalmente por lavas andesíticas, tobas y calizas. Por otro lado, la sección intermedia, de aproximadamente 400 metros de espesor, está dominada por sedimentos clásticos, brechas, conglomerados y domos dacíticos. La sección superior, con un espesor de 150 metros, está compuesta principalmente por lavas, con intercalaciones menores de calizas.

En cuanto a su distribución, la Formación Punta del Cobre se extiende como una franja ancha de aproximadamente 25-30 km de ancho. Esta franja está limitada al oeste por el Complejo Plutónico Infiernillo, intrusión de origen cretácico, y al este por un contacto concordante con la Formación Nantoco, perteneciente al Grupo Chañarcillo. Es importante destacar que estos afloramientos generalmente se encuentran en áreas de cerros bajos o están cubiertos por depósitos no consolidados del Neógeno al Holoceno.

Con respecto a las relaciones de contacto, la Formación Punta del Cobre se superpone de manera concordante a las calizas de las formaciones Sosita (Barremiano Inferior) y Nantoco (Hauteriviano Superior). Además, es intruida por diversos complejos plutónicos, como el Complejo Plutónico Infiernillo, Complejo Plutónico Retamilla, Complejo Plutónico La Higuera, Granodiorita Sierra Chañar, Diorita de Llano de La Jaula y Diorita de Sierra Galena.

Respecto a la edad, aunque no se ha encontrado material faunístico que permita una datación precisa, se estima una edad mínima de Hauteriviano Inferior para la Formación Punta del Cobre, basándose en la edad Hauteriviano Superior de la Formación Nantoco. No se ha establecido una edad precisa para la base de esta secuencia, ya que se encuentra intruida por dioritas del Complejo Plutónico Infiernillo. Por lo tanto, se le asigna un rango de edad que abarca desde el Jurásico Inferior hasta el Valanginiano.

En términos ambientales, la predominancia de coladas andesíticas indica un ambiente volcánico no explosivo durante gran parte de la deposición de la formación. Sin embargo, se observa la presencia de calizas intercaladas en las coladas y la existencia de "*pillows*" en los contactos colada-caliza, lo que sugiere que la efusión de las lavas ocurrió en un medio subacuático marino, posiblemente de poca profundidad. Por otro lado, la presencia de tobas, domos y flujos de detritos conglomerádicos y arenosos en la sección intermedia indica una fase más explosiva, con efusión de domos en la superficie, avalanchas volcánicas, flujos piroclásticos y acumulación de depósitos de caída.

3.1.3. Depósitos aluviales y coluviales antiguos (Mioceno Superior-Plioceno)

Los depósitos aluviales y coluviales antiguos (Mioceno Superior-Plioceno) consisten en gravas polimícticas, mal a moderadamente consolidadas, que forman conos aluviales individuales o coalescentes, depósitos coluviales y llanuras de inundación adosadas a zonas topográficamente altas. Estos depósitos presentan una morfología de abanico, con zonas apicales estrechas y zonas distales más anchas. A diferencia de las Gravas de Atacama, no muestran evidencia de pediplanización. Los llanos Chacritas, Las Campanas y el área al este del llano de Lagarto son las principales áreas de exposición de estos depósitos. Además, cubren las Gravas de Atacama y todas las rocas que componen el basamento de esta unidad. Su contacto superior está cubierto por los depósitos aluviales del Pleistoceno-Holoceno.

En términos de litología, en las zonas proximales, las gravas y ripios son mal consolidados y presentan una selección de partículas que varía de mala a moderada. La composición litológica de estos depósitos suele ser similar a la de las rocas de los sustratos cercanos. Por otro lado, en las zonas distales, los depósitos consisten principalmente en gravas arenosas y arenas bien estratificadas.

En cuanto a la edad de estos depósitos, no se disponen de datos directos para una determinación precisa. Sin embargo, la falta de pediplanización permite asignarles una edad máxima de aproximadamente 10 millones de años. Esta estimación se basa en las edades obtenidas en las ignimbritas que se encuentran por encima del nivel de pedimentación en la zona de Carrera Pinto e Inca de Oro, en Copiapó. Además, se ha establecido una correlación con depósitos de características similares presentes en la Cordillera de la Costa y la Precordillera de Chañaral y Copiapó, los cuales se designan como “Depósitos aluviales y coluviales antiguos” y tienen una edad comprendida entre el Mioceno tardío y el Plioceno, según edades K-Ar (biotita) obtenidas de cenizas intercaladas, que oscilan entre 7 y 3 millones de años.

Se interpreta que estas gravas se formaron como resultado de procesos aluviales y coluviales restringidos a zonas altas cercanas a la fuente de los materiales detríticos que conforman los depósitos.

3.1.4. Depósitos Cuaternarios (Pleistoceno-Holoceno)

Los depósitos cuaternarios en la región se dividen en depósitos aluviales y depósitos eólicos, que representan sedimentos no cohesivos a moderadamente consolidados de diferentes composiciones y características morfológicas.

Los depósitos aluviales (Pleistoceno-Holoceno) están compuestos por bloques, ripios, gravas, arenas y limos. Se distinguen dos tipos de depósitos aluviales: los inactivos y los activos. Los depósitos inactivos se encuentran en llanuras aluviales a ambos lados de quebradas y valles anchos, así como en los llanos intermontanos de la Cordillera de la Costa. Estos depósitos están formados por bloques, ripios, gravas y arenas mal redondeadas y seleccionadas, que se encuentran en una matriz de arena y arcilla. Presentan bancos polimícticos con una estructura interna caótica característica de los depósitos de flujos de detritos. Por otro lado, los depósitos aluviales activos se encuentran en cauces someros de actividad esporádica, en grandes quebradas y como abanicos aluviales en el borde costero. Estos depósitos se diferencian por su granulometría, composición química y ubicación, incluyendo ripios, arenas, gravas, limos y sales evaporíticas.

En cuanto a los depósitos eólicos (Pleistoceno-Holoceno), se trata de arenas bien seleccionadas, mal a semiconsolidadas, depositadas por transporte eólico. Estos depósitos se distribuyen principalmente a lo largo de la línea de la costa y al norte del llano Punta de Díaz. Se distinguen los depósitos eólicos inactivos y los depósitos eólicos activos. Los depósitos eólicos inactivos son mantos de arena ligeramente compactados y suavemente inclinados en la vertiente de sotavento de cordones montañosos, estabilizados por la vegetación. Cubren gran parte de los depósitos costeros y son disectados por cauces aluviales activos. Están compuestos por arenas bioclásticas bien seleccionadas, que incluyen fragmentos de cuarzo, plagioclasa, líticos metamórficos, magnetita, epidota y hematita. Por otro lado, los depósitos eólicos activos incluyen dunas lineales o “*seif*” en el borde litoral y los valles transversales, mantos de arenas en los llanos intermontanos y dunas parabólicas.

3.2. Intrusivos

Los intrusivos del Cretácico Inferior corresponden a rocas plutónicas a hipabisales de composición variada, que intruyen las rocas estratificadas según franjas con edades progresivamente menores hacia el este.

3.2.1. Complejo Plutónico Infiernillo (131-129 Ma; Arévalo et al., 2003)

El Complejo Plutónico Infiernillo es un complejo rocoso compuesto principalmente por granodiorita y diorita. Se extiende en una franja de aproximadamente 25 km en dirección NNE desde el Llano de La Jaula hasta el valle del río Huasco, y continúa por otros 35 km hacia el sur antes de desaparecer en la quebrada El Morado.

El complejo muestra diferentes tipos de contactos con las rocas circundantes. Al este, se encuentra en contacto con lavas y tobas de la Formación Punta del Cobre a través de un contacto intrusivo plano. Al oeste, intruye lavas de la Formación La Negra a través de un contacto compuesto. Hacia el norte, el contacto con las lavas es plano y concordante, mientras que, hacia el sur, se produce a través de una franja milonítica que constituye la Zona de Cizalle de Infiernillo, la cual es parte del Sistema de Falla de Atacama en la latitud de Vallenar.

Internamente, el complejo está compuesto por dos subunidades plutónicas: una granodiorita y una diorita. Las dioritas son verdosas y contienen piroxeno y anfíbola, con texturas faneríticas

e inequigranulares. Las granodioritas son rosadas y contienen biotita, anfíbola y piroxeno como minerales principales. Presentan variaciones a tonalitas y granitos y pueden mostrar una foliación magmática vertical en el margen occidental cerca de la Zona de Cizalle Infiernillo.

Las edades de cristalización obtenidas mediante análisis U-Pb y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ indican que el complejo plutónico se formó hace aproximadamente 131-129 millones de años. La franja de milonitas en el borde oeste presenta una edad discordante de aproximadamente 126 millones de años, lo que sugiere un enfriamiento más lento debido a la persistencia de la actividad de cizalle después de la cristalización del complejo.

3.2.2. Diorita de Llano de La Jaula (circa 128 Ma; Arévalo y Welkner, 2008)

La Diorita de Llano de La Jaula es un conjunto de cuerpos dioríticos epidotizados que se encuentran dispersos en los cerros bajos al este de los llanos Punta de Díaz y de La Jaula. Estas dioritas son de color verde y presentan texturas faneríticas, microgranulares y porfídicas. Están altamente alteradas y se pueden encontrar sericita, clorita y ocasionalmente escapolita. La anfíbola se encuentra actinolitizada y cloritizada, y la biotita está oxidada. También se encuentra piritita diseminada en estas rocas. Se ha determinado una edad U-Pb de aproximadamente 128 millones de años en titanita en un cuerpo diorítico con piritita diseminada, que aflora en la loma La Invernada.

3.3. Estructuras

En la carta geológica del Área Carrizal Bajo-Chacritas, se pueden observar diferentes rasgos estructurales que proporcionan información sobre la evolución geológica de la región.

El Complejo Epimetamórfico Chañaral es el rasgo estructural más antiguo en la zona y está compuesto por grandes pliegues recumbentes con un eje moderadamente inclinado hacia el NNE y SSO. Estos pliegues son transpuestos hacia el oeste por una foliación S2, la cual está asociada con mesopliegues que se inclinan hacia el noreste o el sur. La transposición es heterogénea, ya que en algunas áreas se conservan paquetes con orientación original hacia el este. La asimetría de los limbos de los pliegues indica una vergencia general hacia el oeste o noroeste. En la carta Freirina-El Morado, se observan escamas de rocas metamórficas con

protolito volcánico básico intercaladas estructuralmente con metasedimentos, lo que sugiere que el complejo se formó por la adición tectónica de rocas oceánicas profundas en sedimentos más someros durante el Devónico-Carbonífero.

En la Cordillera de la Costa, se pueden identificar dos sistemas estructurales principales: la Zona de Cizalle Infiernillo (ZCI) y la Faja Plegada y Corrida Los Colorados (FPCC). La ZCI es una banda de milonitas y migmatitas sinplutónicas de orientación NE a NNE. Estas rocas dúctiles exhiben una mineralogía que indica condiciones desde facies de anfibolita hasta esquistos verdes. Se extiende por aproximadamente 43 km desde Llano Pintados hacia el sur y marca el contacto entre el Complejo Plutónico Infiernillo y la Formación La Negra en la carta Geología del Área Carrizal Bajo-Chacritas. La FPCC es una franja de fallas y pliegues que se extiende por al menos 80 km desde la mina Los Colorados hacia el sur. Está compuesta por una estructura occidental y otra oriental. La falla occidental desplaza niveles calcáreos y clásticos de la Formación Punta del Cobre en dirección oeste con un ángulo creciente hacia el este. La falla oriental, conocida como Falla Los Colorados, marca el margen occidental del Complejo Plutónico Retamilla y correspondería a la estructura que absorbe el mayor salto estratigráfico, y por lo tanto, es la falla maestra del sistema. Las rocas deformadas en la FPCC muestran pliegues sinclinales y anticlinales de vergencia occidental. Estas estructuras indican un movimiento transpresional sinistral y extensional temprano que probablemente ocurrió durante el emplazamiento del Complejo Plutónico Infiernillo.

En la Precordillera de Vallenar, se pueden observar fallas de alto ángulo y rumbo norte-sur que desplazan la Formación Punta del Cobre y las unidades del Grupo Chañarcillo de manera normal. Estas fallas están asociadas con pliegues sinclinales y anticlinales de vergencia occidental, que indican movimientos extensionales de edad probablemente Cretácico-Terciario. Estos movimientos están relacionados con la apertura de la Cuenca Marginal Abortada de Chile Central, que ocurrió entre el Albiano y el Cenomaniano. La acumulación de sedimentos en una cuenca continental durante este período se evidencia en la Formación Cerrillos.

En el borde occidental del Complejo Plutónico Los Morteros, se encuentra la Falla Agua de Los Burros, una estructura de orientación NNE que marca el contacto entre el Grupo Chañarcillo y la Formación Cerrillos en la región de Vallenar. Esta falla está asociada con una franja milonítica que yuxtapone el complejo con calizas de la Formación Pabellón y brechas, conglomerados y areniscas de la Formación Cerrillos. La deformación en esta zona implica

movimientos sinplutónicos y dúctiles de "plutón hacia abajo" y más tarde, de "plutón hacia arriba". Estos movimientos están relacionados con la depresión del piso plutónico en el colgante de la falla y la contracción documentada por fallas inversas y pliegues de vergencia occidental que afectan las secuencias calcáreas del Grupo Chañarcillo.

Finalmente, en la sierra Marañón, se pueden observar fallas inversas y pliegues que deforman y desplazan las Gravas de Atacama hacia el oeste. Estos rasgos estructurales representan la fase más joven registrada en la Cordillera de la Costa hasta ahora, con una edad estimada Mioceno medio. Estas estructuras están asociadas con una componente de acortamiento y son similares a las fallas de rumbo observadas en la Franja de Maricunga.

4. MARCO GEOLÓGICO LOCAL

El yacimiento de Magnetita-Apatito Los Colorados (Figura 4.1) forma parte de la denominada Franja Ferrífera Chilena (**Espinoza, 1990**), a lo largo de la Cordillera de la Costa de la Región de Atacama. El depósito se ubica 47 km al noroeste de la ciudad de Vallenar. Los Colorados cuenta con reservas de 490.7 Mt y una ley media de 38%. y se clasifica como un depósito tipo Kiruna, cuya mena es la magnetita con presencia de apatito y actinolita como principal mineral de alteración (Munizaga & Lagos, 2015).

La mena es dividida en texturas mineralógicas, siendo clasificadas como Macizo, Brechoso y Diseminado-Guías. La morfología de los cuerpos mineralizados la conforman el Dique de Magnetita W de alta ley, que se emplaza a través de la Falla Magnetita W, y el Cuerpo Irregular Este controlado por la Falla Blanca. Estos cuerpos son probablemente singenéticos, o están asociados a intrusivos de composición intermedia del Cretácico Inferior. La roca caja corresponde a rocas volcanosedimentarias de la Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior-Valanginiano) (Munizaga & Lagos, 2015).

4.1. Litología y alteración hidrotermal

Andesitas basálticas de olivino y piroxeno:

Unidad litológica identificada en la pared E-NE del rajo de la mina Los Colorados. Esta roca se caracteriza por presentar un color verdoso a pardo y exhibir tanto texturas porfídicas como afaníticas. Su mineralogía está compuesta por olivinos, piroxenos alterados a clorita y fenocristales de plagioclasa alterados a albita, illita y clorita.

Metandesita:

La Metandesita es una unidad litológica presente en la pared E-SE del rajo de la mina Los Colorados. Esta roca se caracteriza por exhibir un color que varía entre verde y gris verdoso. En cuanto a su textura, presenta una variación de afanítica a brechizada fina. La mineralogía de la Metandesita está marcada por una alteración actinolítica, que puede ser débil a intensa y se encuentra diseminada en la matriz y en vetillas milimétricas junto con magnetita.

Ocasionalmente, se puede observar la presencia de pirita fina, tanto diseminada como en vetillas. Además, se ha registrado una moderada a fuerte silicificación local y una alteración propilítica de intensidad moderada a baja, identificada por la presencia de clorita y epidota.

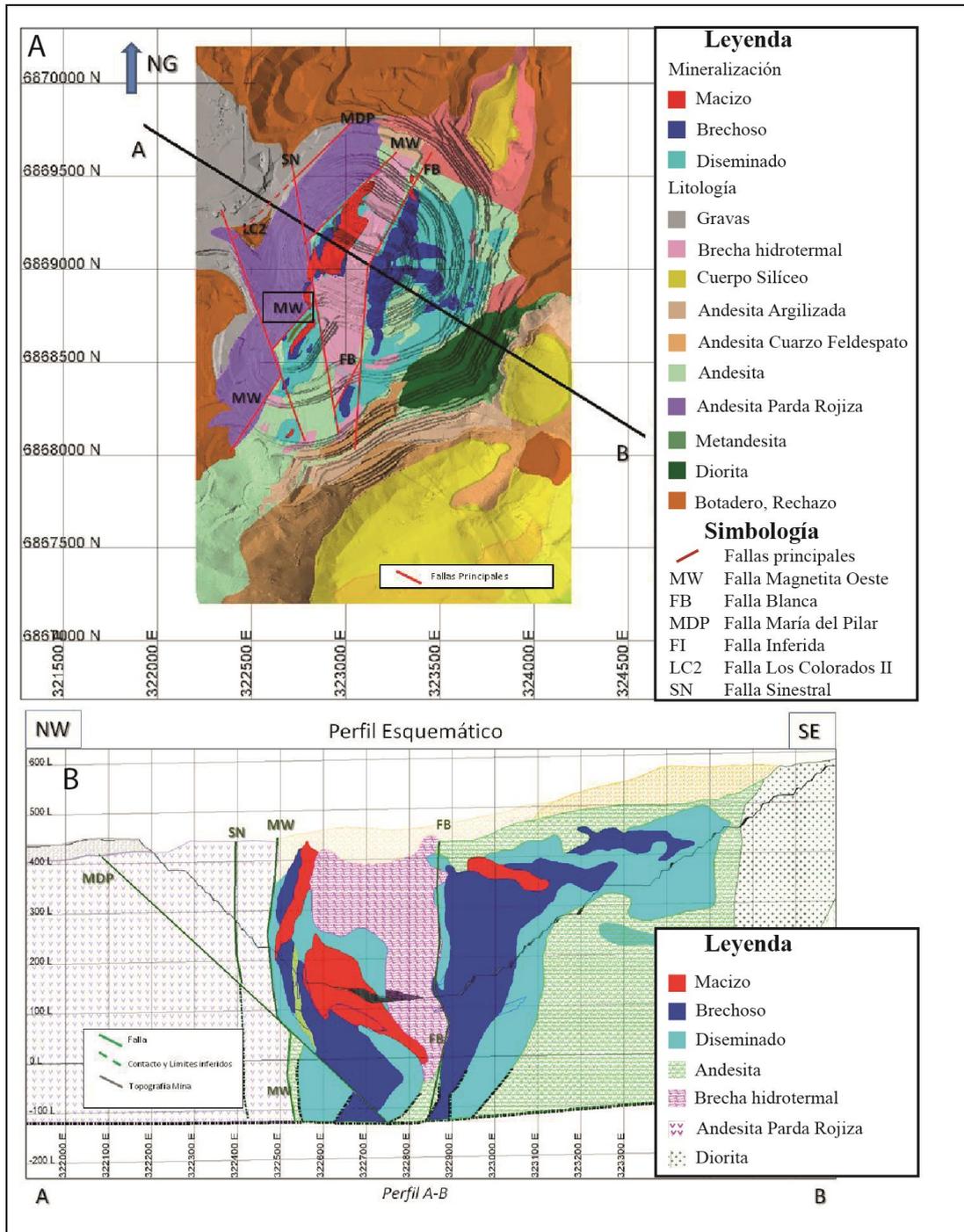


Figura 4.1: Geología del yacimiento Los Colorados. A: Geología en vista de planta; B: Perfil esquemático del yacimiento. Extraído de Munizaga & Lagos (2015).

Andesita Pardo Rojiza:

La unidad litológica denominada Andesita Pardo Rojiza se encuentra ampliamente distribuida en toda la pared W del rajo de la mina Los Colorados. Corresponde a un cuerpo de forma tabular, que hacia el este se encuentra en contacto con el Dique de Fe W de alta ley a través de la falla Falla Magnetita W. Esta roca se caracteriza por presentar un color pardo rojizo distintivo. Su textura se clasifica como porfídica, lo que implica la presencia de fenocristales dispersos en una matriz fina. En términos de mineralogía y alteraciones, la Andesita Pardo Rojiza se destaca por su alto contenido en óxidos de hierro. En algunos sectores, esta unidad litológica se presenta como una brecha volcánica con una fuerte silicificación.

Andesita Argilizada:

Ubicada en la pared SE del rajo de la mina Los Colorados, en contacto directo con un intrusivo diorítico. Esta unidad muestra un control estructural orientado en dirección NS a NNW. En cuanto a su apariencia, la Andesita Argilizada presenta un color blanco-grisáceo distintivo. Con respecto a su mineralogía y alteraciones, se observa una intensa alteración argílica en la roca. Además, la unidad se caracteriza por una fuerte fracturación con rellenos de arcilla, hematita y clorita.

Andesita Cuarzo-Feldespato:

Esta unidad se encuentra presente en la parte sur del rajo de la mina Los Colorados. Se caracteriza por su color blanquecino a verdoso y su textura porfídica. En términos de mineralogía y alteraciones, se observa una alteración cuarzo-feldespática, la cual se manifiesta mediante el reemplazo de los fenocristales de plagioclasa por feldespato potásico y la recristalización de cuarzo en los poros de la roca (Muñoz y Guerra 2006 en Munizaga & Lagos, 2015). Además, se registra una alteración argílica de moderada a intensa, con la presencia abundante de hematita, jarosita y arcillas. En algunos sectores, también se observa una alteración silícea de débil a fuerte.

Intrusivo Central:

La unidad litológica denominada Intrusivo Central, anteriormente conocida como Brecha Hidrotermal, se encuentra ubicada en una disposición espacial alargada en el centro del rajo de la mina Los Colorados, entre los dos cuerpos mineralizados. Esta unidad ha sido afectada por un intenso metasomatismo, lo que ha resultado en importantes alteraciones y cambios en su composición. En términos de mineralogía y alteraciones, el Intrusivo Central exhibe una serie

de características distintivas. Se encuentra reemplazada por una masa de cristales de actinolita y presenta una fuerte brechización en zonas de falla, con presencia de cuarzo, feldespato potásico, clorita, turmalina, pirita y calcopirita. Además, se observa una intensa silicificación y una moderada argilización. Cerca de los contactos con las zonas mineralizadas, se pueden observar vetillas y cúmulos de magnetita, con indicios una incipiente martitización.

El protolito de esta unidad litológica se considera indiferenciado, aunque se han identificado relictos de titanomagnetita alterada a rutilo en secciones delgadas. Esto podría indicar un posible origen diorítico del protolito (Cornejo, 2013 en Munizaga & Lagos, 2015). Es importante destacar que esta unidad ha sido objeto de especial atención en esta tesis debido a su relevancia en términos de reactividad.

Diorita:

La unidad litológica Diorita se encuentra presente en el sector sureste del rajo de la mina Los Colorados, en forma de un stock diorítico aflorante. Esta roca se caracteriza por su color gris verdoso y su textura porfídica a microcristalina.

En cuanto a su mineralogía y alteraciones, la unidad Diorita presenta cristales de plagioclasas alterados a sericita y arcillas, así como cuarzo, piroxenos y relictos de biotita. Se observa una alteración fílica en sectores donde se identifican actinolita-clorita y una moderada silicificación. En términos de mineralización, se encuentran trazas y guías de mineralización de hierro, junto con pirita diseminada y en vetillas, aunque en cantidades escasas.

Cuerpo Silíceo:

El Cuerpo Silíceo es una unidad litológica presente en las partes noreste y sureste, así como en las zonas más elevadas del depósito de la mina Los Colorados. Esta unidad se caracteriza por su color pardo-amarillento, el cual es atribuido a la presencia abundante de limonitas.

El Cuerpo Silíceo se encuentra intensamente silicificado, presentando también escasa sericita y alunita según observaciones microscópicas. Además, se observan rasgos brechosos difusos en esta unidad.

Diques:

Los diques son cuerpos intrusivos que se reconocen principalmente como intrusiones dentro de las secuencias volcánicas del Jurásico en la mina Los Colorados. Estos diques exhiben una variabilidad litológica que abarca desde microdioritas hasta aplitas.

En cuanto a su mineralogía y alteraciones, se observa un escaso vetilleo de clorita y arcillas en los diques. No se detectan rasgos significativos de mineralización en esta litología.

4.2. Mineralización

La mineralización de Los Colorados está compuesta principalmente por magnetita y casi nula presencia de hematita, minerales de ganga asociados como apatito y actinolita, e impurezas de P, V, Ti y Si.

Los cuerpos mineralizados se clasifican como Dique de Fe W (Figura 4.2) y Cuerpo Irregular E. Para estos cuerpos se definen tres texturas de mena principales, en base a su ocurrencia y carácter geometalúrgico: Macizo, Brechoso y Diseminado-Guías (Figura 4.3).



Figura 4.2: Dique de Fe W. Principal exponente de magnetita de alta ley en el yacimiento (58%-67% de Fe, textura Macizo). Vista hacia el NNE, nivel 270 Norte (Extraído de Munizaga & Lagos, 2015).

Macizo (58 % - 67 % Fe): representado principalmente por el cuerpo tabular conocido localmente como Dique de Fe W, con leyes superiores al 58% Fe y una corrida discontinua de 1200 a 1400 m, una potencia de 100 a 120 m y una profundidad aproximada de 500 m. La mineralización está dominada por magnetita en forma masiva, junto con pirita y calcopirita diseminadas y en vetillas, y ocasionalmente covelina en el borde fino de la calcopirita (secundaria). La ganga está compuesta por apatito, actinolita-tremolita y cristales finos de titanita en intersticios y fracturas (Cornejo 2013 en Munizaga & Lagos, 2015).

En menor medida, el macizo de alta ley también incluye diques de alta ley de menores dimensiones, que componen el Cuerpo Irregular Este (Munizaga & Lagos, 2015).

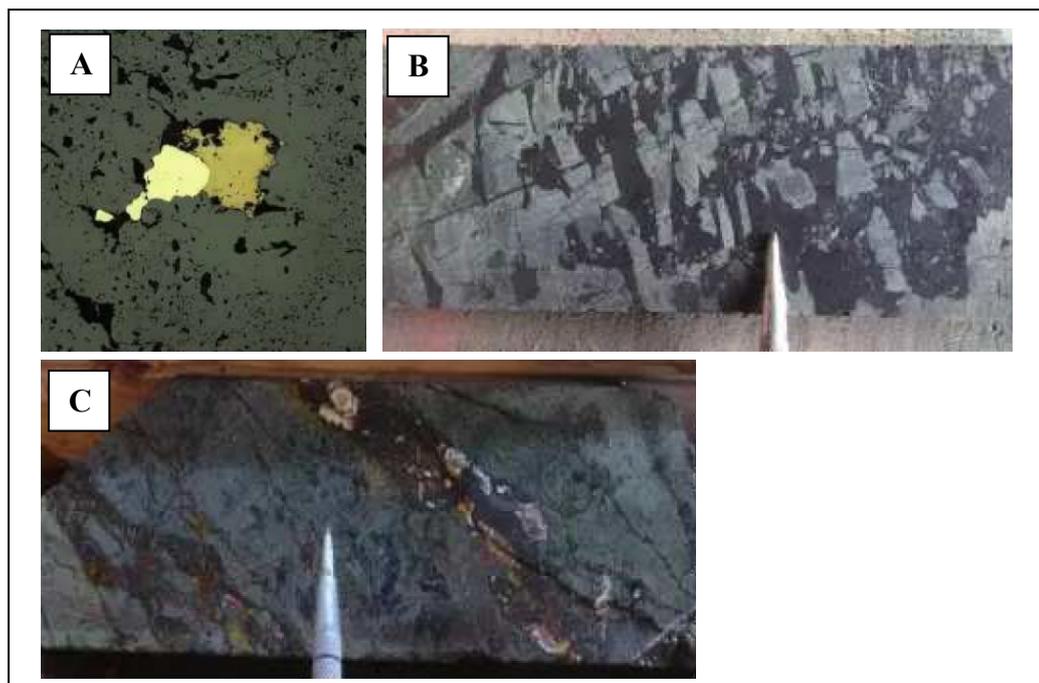


Figura 4.3: Texturas de mineralización. A) Textura Macizo: Sección calcográfica, inclusión de pirita y calcopirita en magnetita. En el borde de la calcopirita se encuentran trazas de covelina. Nicoles paralelos 10x14; B) Textura Brechoso: Se observan cristales de actinolita centimétricos en una "matriz" de magnetita dando un aspecto brechoso a la roca. Muestra de testigo de sondaje; C) Textura Diseminado-Guías: Roca metandesítica con magnetita diseminada y vetillas centimétricas de magnetita-apatito. Muestra de testigo de sondaje. Modificado de Munizaga & Lagos (2015).

Brechoso (45 % - 57 % Fe): Textura mineralógica principal del Cuerpo Irregular E y en menor medida se encuentra como envolvente del Dique de Fe W. Corresponde a magnetita entrecrecida con aspecto de “matriz”, con cristales de actinolita centimétrica que otorgan un aspecto brechoso a la roca. La actinolita se encuentra levemente alterada a cloritas y esmectitas. En ocasiones se puede observar una leve martitización, y cantidades menores de apatito y vetillas finas de piritita (Munizaga & Lagos, 2015).

Diseminado y guías (29 % - 44 % Fe): Unidad caracterizada por presentar magnetita diseminada y en vetillas de alta ley compuestas por magnetita, escasa mushketovita, apatito y piritita fina. Este tipo de mineralización se encuentra principalmente en rocas metandesíticas, en la periferia de los cuerpos mineralizados de alta ley, sobre todo como envolvente del Cuerpo Irregular E (Munizaga & Lagos, 2015).

4.3. Geología estructural

Existen tres sistemas estructurales principales en el yacimiento (Munizaga & Lagos, 2015).

1) El primer sistema, de rumbo preferencial N15°-20°E y subvertical, corresponde al más importante ya que controla el emplazamiento de la mineralización, esencialmente del Dique de Fe W, el cual presenta el mismo rumbo. Este dique se encuentra controlado en su flanco occidental por la Falla Magnetita W (MW), asociada a una zona de cizalle de 10 a 12 m de espesor, y en su flanco oriental por la Falla Magnetita E. La Falla Blanca es otra estructura importante de este sistema, con rumbo N-S a N15°E, que controla el emplazamiento del Cuerpo Irregular E.

2) El segundo sistema corresponde a las estructuras NS/N10°W, principalmente la Falla Sinistral (SN) y la Falla Los Colorados 2 (LC2), las cuales son fallas de rumbo sinestrales posteriores al sistema anterior, debido a que cortan y desplazan la mineralización en el mismo sentido.

3) El tercer sistema está representado por la Falla María del Pilar (MDP), que corresponde a una falla inversa de rumbo N10°-15°E y manteo aproximado de 45° al SE, que corta y desplaza en profundidad al Dique de Fe W. Este sería el rasgo estructural más joven asociado al depósito.

4.4. Modelos geológicos

Los modelos geológicos se resumen a partir de información recopilada y generada por E-Mining Technology (EMT) en el Estudio Geomecánico e Hidrogeológico Fase 6 Mina Los Colorados, que tuvo por objetivo general establecer las bases geotécnicas para el diseño de Fase 6, actualmente en explotación. La información base del estudio esta compuesta por información topográfica de la mina, mapeos de sondaje diamantina, mapeo litológico-estructural de bancos, base de datos de ensayos de roca intacta y discontinuidades, informes geológicos, geotécnicos y mineros de estudios precedentes, modelo geológico y estructural de mina Los Colorados, y modelos geotécnicos anteriores. Esta información fue complementada con levantamiento de datos en terreno realizado por personal de la empresa mediante mapeo geotécnico de banco, mapeo geológico de sondajes, mapeo geotécnico de sondajes y selección de muestras para ensayos de roca intacta y discontinuidades.

4.4.1. Modelo geológico

Se subdivide en los sub modelos litológico, de alteración y mineralización. Se identificaron 14 unidades geológicas divididas en 12 unidades de rocas y 2 unidades de materiales no consolidados:

- Litologías volcánicas (2 unidades): Andesita y Andesita Pardo Rojiza.
- Rocas alteradas (5 unidades): Andesita Argilizada, Andesita Cuarzo-Feldespató, Cuerpo Silíceo, Intrusivo Central y Metandesita.
- Rocas mineralizadas (3 unidades): Hierro Macizo, Hierro Brechoso y Diseminado.
- Rocas intrusivas (2 unidades): Diorita y Dique.
- Depósitos no consolidados: Gravas.
- Rellenos Antrópicos: Material de Relleno y Botaderos.

Estas unidades se representan en el plano de superficie de la Figura 4.4, y se resumen en la Tabla 4.1.

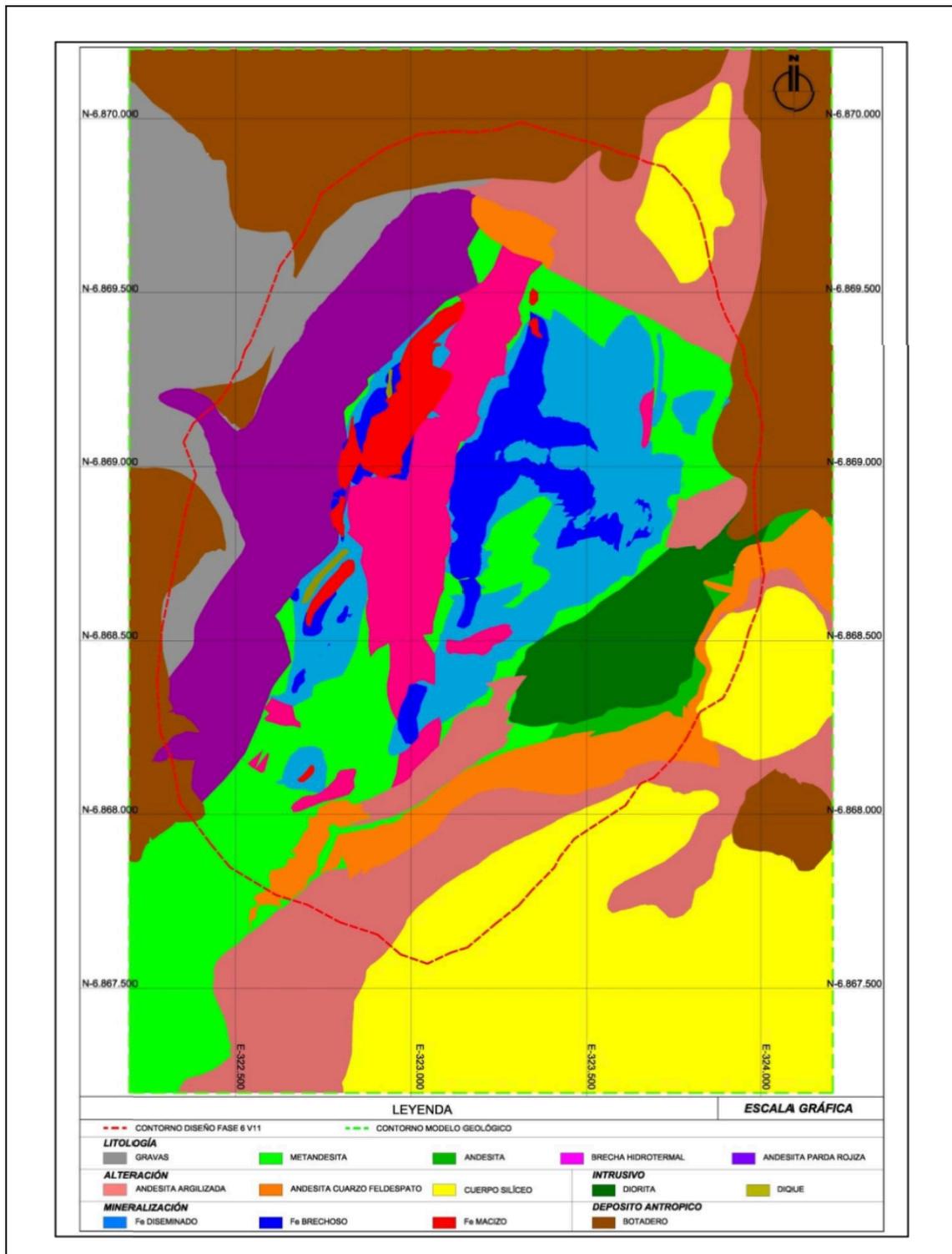


Figura 4.4: Unidades litológicas, de alteración y mineralización para Mina Los Colorados (EMT, 2016).

Tabla 4.1: Unidades geológicas para Fase 6 de Mina Los Colorados (Extraído de EMT, 2016).

| Unidades Geológicas MLC 2014 | Unidades Geológicas MLC 2022 | Código | Tipo de Litología (origen) | Alteración hidrotermal principal | Mineralización de Fe |
|------------------------------|------------------------------|--------|----------------------------|---|--------------------------|
| Andesita Parda Rojiza | Andesita Parda Rojiza | APR | Volcánica | Baja a moderada silicificación | - |
| Andesita | Andesita | AND | Volcánica | Baja alt. propilitica | - |
| Brecha hidrotermal | Intrusivo Central | IC | Subvolcánica alterada | Baja silicificación y baja alt. propilitica | <15% |
| Metandesita | Metandesita | MET | Volcánica alterada | Moderada actinolización | <15% |
| Andesita Cuarzo-Feldespatos | Andesita Cuarzo-Feldespatos | ACF | Volcánica alterada | Alta alt. cuarzo-sericita | - |
| Andesita Argilizada | Andesita Argilizada | AAR | Volcánica alterada | Alta argilización intermedia | - |
| Cuerpo Silíceo | Cuerpo Silíceo | CPS | Volcánica alterada | Alta argilización | - |
| Diorita | Diorita | DIR | Intrusivo | Baja alt. propilitica | - |
| Diques | Diques | DIQ | Intrusivo | Baja alt. propilitica | - |
| Macizo | Macizo | MZ | Unidad mineralizada | - | Masiva |
| Hierro Brechoso | Hierro Brechoso | BX | Unidad mineralizada | Baja actinolización | Brechosa |
| Diseminado | Diseminado | DI | Unidad mineralizada | Moderada actinolización y baja silicificación | Diseminada y en vetillas |
| Baja Ley | | | | | |
| Gravas | Gravas | GRV | Depósitos no consolidados | Supérgena | - |
| - | Botadero | BOT | Depósitos Antrópicos | - | - |

4.4.2. Modelo de alteración

Se han identificado ocho tipos de alteración en Fase 6: silicificación, propilitización, actinolización, argilización, silicificación intensa, alteración filica, potásica y supérgena. Cada tipo de alteración se identifica por ciertas asociaciones minerales, que se describen para cada unidad geológica en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Alteraciones para Fase 6.

| Unidad Geológica | Minerales de alteración | Tipo de alteración |
|----------------------------------|--|--|
| Andesita (AND) | Leve argilización, Sílice. | Argilización |
| Andesita Parda Rojiza (APR) | Sílice, Clorita-Epidota, Calcita, Hematita. | Silicificación |
| Intrusivo Central | Clorita-Epidota, Sílice, Actinolita. | Propilítica Silicificación |
| Metandesita (MET) | Actinolita, Vetillas Clorita-Epidota, Sílice. | Actinolitización |
| Andesita Argilizada (AAR) | Arcillas, Sílice, Hematita. | Argilización |
| Andesita Cuarzo Feldespato (ACF) | Sílice, Arcillas, Hematita, Limonitas. | Silicificación Argilización Supérgeno |
| Cuerpo de sílice (CPS) | Sílice, Limonita, Hematita. | Silicificación Supérgeno |
| Diorita (DIR) | Clorita-Epidota, Sericita. | Propilítica |
| Dique (DIQ) | Clorita-Epidota, Sericita Arcillas. | Propilítica |
| Macizo (MZ) | Martita-Especularita-Goethita-Mushketovita. | Oxidación |
| Brechoso (BX) sobre BRH | Sílice, Clorita-Epidota, Calcita, Hematita, Martita-Especularita-Goethita-Mushketovita. | Propilítica + Silicificación Oxidación |
| Brechoso (BX) sobre MET | Actinolita, Vetillas Clorita-Epidota, Sílice, Martita-Especularita-Goethita-Mushketovita. | Actinolitización Oxidación |
| Diseminado (DI) sobre BRH | Sílice, Clorita-Epidota, Calcita, Hematita. | Propilítica+Silicificación |
| Diseminado (DI) sobre MET | Actinolita, Vetillas Clorita-Epidota, Sílice. | Actinolitización |
| Gravas (GRV) | Yeso y sales. | Supérgeno |

De la tabla, se desprende que:

- La silicificación afecta a todas las unidades (excepto a las Gravas y Botadero) y tiene una distribución homogénea por todo el yacimiento.
- La alteración propilítica afecta a todas las unidades (excepto a las Gravas y Botadero) y tiene una distribución homogénea por todo el yacimiento
- La actinolitización afecta a las unidades mineralizadas (Macizo, Brechoso y Diseminado), a la Metandesita e Intrusivo Central. Esta alteración afecta intensamente a las rocas cercanas a la mineralización y disminuye al alejarse de ella.
- La argilización afecta débilmente a todas las unidades y de manera muy intensa a la Andesita Argilizada
- Existe un segundo episodio de silicificación intensa que genera los Cuerpos de Sílice en los altos topográficos.

- La alteración filica afecta de manera intensa a la Andesita Cuarzo Feldespato. Esta alteración también está asociada a fallas; aunque afecta débilmente a todas las unidades ígneas.
- La alteración potásica se ha reconocido de manera puntual.
- La alteración supérgena tiene una potencia variable a lo largo del rajo. Teniendo como referencia la topografía de 1956; en la pared Oeste el espesor medio es de 50m, en las Andesitas Argilizadas, Andesita Cuarzo Feldespato y Cuerpo de Sílice tiene espesores superiores a 100 m y si esta relacionada con fallas supera los 150 m. En las unidades mineralizadas se identifica oxidación de la magnetita, distribuyéndose principalmente en vetillas.

4.4.3. Modelo de mineralización

La mineralización esta conformada mayoritariamente por magnetita de hábito granular con actinolita, piritita y apatito. La roca caja que alberga la magnetita presenta mayoritariamente alteración actinolítica; a veces silicificada o alterada por epidota. La magnetita a veces se presenta en textura Brechosa (brechas de hierro). En ocasiones la magnetita se encuentra reemplazada por hematita, sin una distribución espacial específica.

Dependiendo del arreglo mineralógico entre la magnetita y la ganga, en MLC se definen 5 tipos de texturas de menas: 1) Diseminado, 2) Semi Diseminado-Brechoso, 3) Brechoso, 4) Vetillas y 5) Masivo. En Fase 6, se utilizan las unidades texturales 5) Masiva (>65%Fe); 3) Brechosa (45-65% Fe) y 1) Diseminada (15-45% Fe). En la Figura 4.5 se esquematizan estas texturas de mineralización.

La mineralización se emplaza en la parte central del rajo con una dirección general N20-30°E intruyendo a la sección intermedia de la Formación Punta del Cobre. En la Figura 4.6 se observa la distribución de los cuerpos de mineralización, respecto al contorno de Fase 6.

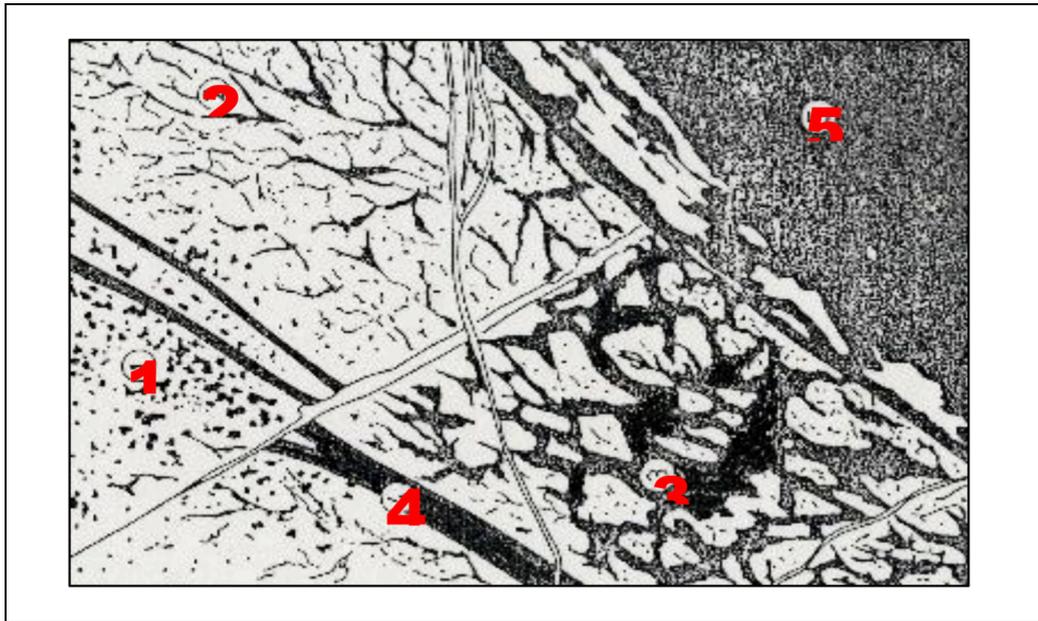


Figura 4.5: Texturas de hierro para Fase 6 (EMT, 2016).

4.4.4. Modelo estructural

El modelo estructural de MLC se compone de los submodelos de estructuras mayores, discontinuidades intermedias y menores.

4.4.4.1. Modelo de estructuras mayores

El modelo estructural de fallas mayores para Fase 6 se resume en la Figura 4.7. La falla Magnetita W y María Julieta, por su orientación, espesor e importancia, posiblemente sean fallas regionales. La falla Magnetita W pone en contacto el Miembro Inferior y el Miembro Medio de la Formación Punta del Cobre y, a través de esta, intruyó el primer pulso de mineralización. Esta falla se encuentra desplazada por el sistema de fallas NS/Subvertical, con un movimiento sinistral.

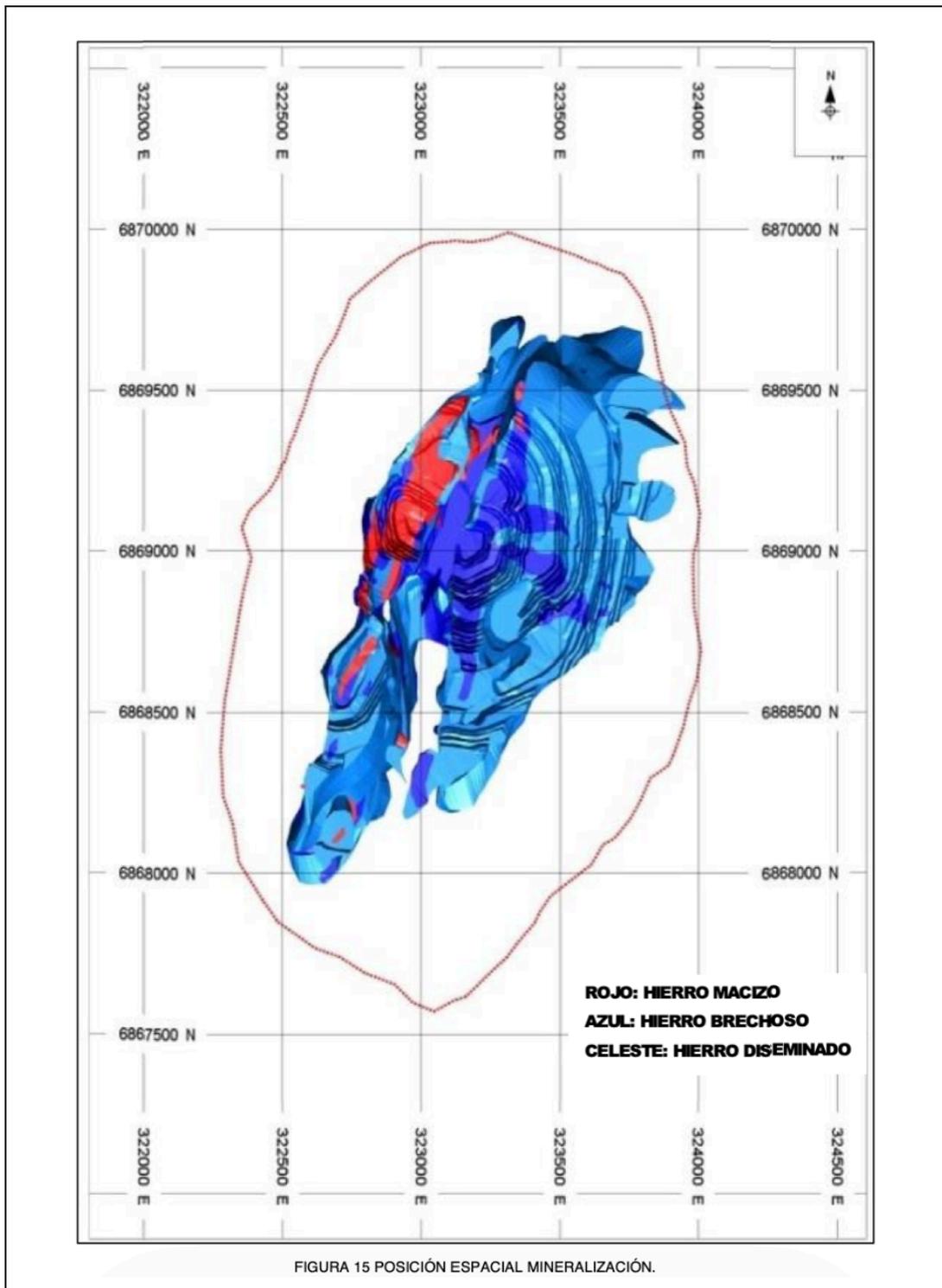


Figura 4.6: Posición espacial para la mineralización en Fase 6 (EMT, 2016).

El segundo pulso de mineralización intruyó a favor del sistema NE/40-66°N y la Falla Blanca. La Falla Contacto F4S controla la Diorita por el noroeste, mientras que la falla Mencia la controla por el norte. La falla F5N limita las unidades de alteración Andesita Argilizada, Andesita Cuarzo Feldespato y Cuerpo de Sílice en el norte. Finalmente, la falla Norte Sur (NS) separa los dos pulsos de mineralización.

| Sistemas | Modelo Estructural MLC 2006 | Modelo Estructural MLC 2013 | Modelo Estructural EMT 2014 | Longitud (km) | Espesor (cm) | Relleno | Halo de influencia (m) | |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|--------------|----------------|------------------------|------|
| NNE/Subvertical | Falla W | Magnetita_W | Magnetita_W_2014 | > 8 | 100-500 | SLB y BXF | 0-3 | |
| | FA E Ext | Magnetita_E | Magnetita_E_2014 | > 0,8 | 20-100 | BXF | 1 | |
| | - | Blanca_V2_2 | Blanca_2014 | > 0,4 | 25 | BXF y SLB | 1 | |
| | - | Contacto_Fas_V3 | Contacto_F4S_2014 | > 1,2 | s.a. | BXF | s.a. | |
| EW/53-73°N | - | Consentida_V2 | Consentida_1_2014 | > 1,2 | 10 | ACT y PY | 1.5 | |
| | - | Consentida_V2 | Consentida_2_2014 | > 0,9 | 7 | ARC y MGT | 1-5 | |
| NS/Subvertical | Falla Sur | Norte_Sur | Norte_Sur_2014 | > 3 | 7-76 | SLB, BXF y MGT | 3.2 | |
| | Los Colorados 1 | Sinistral | Sinistral_2014 | > 3 | 10-90 | SLB | 1 | |
| | Los Colorados 2 | - | Los_Colorados_2_2014 | > 0,4 | s.a. | s.a. | s.a. | |
| | Los Colorados 3 | - | Los_Colorados_3_2014 | > 1,8 | 2-4 | SLB | 0.3 | |
| | Los Colorados 4 | - | Los_Colorados_4_2014 | > 3 | 2-200 | SLB | 0.2 | |
| | Los Colorados 5 | - | Los_Colorados_5_2014 | > 2,3 | 7-25 | SLB, BXF y MGT | 2-4 | |
| | - | Zorro | Zorro_2014 | 0.3 | 4 | ARC | 0.2 | |
| | FA NE 03 | - | NE_03_2014 | 0.4 | s.a. | s.a. | s.a. | |
| | FA Sur 01 | - | Sur_01_2014 | 0.4 | s.a. | s.a. | s.a. | |
| | FA Toba N | La Negra | La_Negra_2014 | > 1,2 | 110 | MGT y BXF | 7 | |
| NE/40-66°N | - | María_Julieta | María_Julieta_2014 | > 2,5 | 5-100 | SLB, BXF y PY | 2-5 | |
| | - | - | Aurora_2014 | 0.4 | 250 | SLB y BXF | 1 | |
| | FA E 25 | Cuñaita_0 | Cuñaita_0_2014 | > 1,3 | <30 | MGT | s.a. | |
| | FA E 5 | Cuñaita_1 | Cuñaita_1_2014 | > 1,3 | 50-170 | MGT y SLB | 1.5 | |
| | FA E 24 | Cuñaita_2_V2_1 | Cuñaita_2_2014 | > 1,3 | 20-300 | MGT y SLB | 1.5 | |
| | - | Cuñaita_3 | Cuñaita_3_2014 | > 1,3 | < 5 | MGT | <0,1 | |
| | - | Cuñaita_4 | Cuñaita_4_2014 | > 1,3 | < 50 | MGT y SLB | 0,2-0,6 | |
| | - | - | Cuñaita_5_2014 | > 1,3 | < 20 | SLB y BXF | 0.3 | |
| - | Rama_La_Consentida_V2 | Rama_La_Consentida_2014 | > 1,3 | 130 | s.a. | s.a. | | |
| NEE/43°N-Subvertical | - | La_Morena | La_Morena_2014 | > 1,7 | < 15 | BXF | s.a. | |
| | - | Tonka | Tonka_2014 | > 2 | 10 | SLB | 4 | |
| | - | - | Aragón_2014 | > 1,1 | 30-40 | SLB y MGT | 0,5-2,5 | |
| | - | - | Josefa_2014 | > 0,9 | 1,000 | MGT | 0 | |
| | FA Toba SE | - | Toba_SE_2014 | > 1,2 | 80 | BXF, SLB y MGT | 2.5 | |
| | - | - | Mencia_2014 | > 1,4 | 40 | MGT, BXF y SLB | 8.6 | |
| WNW/50-65°N | - | Sureña | La_Sureña_2014 | > 1,3 | s.a. | s.a. | s.a. | |
| | FA Toba NE | - | Toba_NE_2014 | 0.4 | s.a. | s.a. | s.a. | |
| | - | Contacto_F5N_V2 | Contacto_F5N_2014 | > 1,2 | 10-20 | SLB | s.a. | |
| Varios | NW/Subvertical | - | Corte_Carolita | Corte_Carolita_2014 | 0.2 | s.a. | s.a. | |
| | ENE/38-45°S | - | Carolita | Carolita_2014 | 0.7 | 30 | ARC | s.a. |
| | ENE/41°S | - | María_Del_Pilar | María_Del_Pilar_2014 | > 1 | 3-15 | SLB y MGT | 0.2 |
| | WNW/79°N | - | Contacto_W_79NE | Contacto_W_79NE_2014 | 0.3 | s.a. | s.a. | s.a. |
| | NWN/31-37°N | - | - | Amauta_2014 | > 1,5 | 25-300 | BXF y SLB | s.a. |
| | NE/60°S | - | - | Teruel_2014 | > 1,2 | 400 | BXF y SLB | 2 |

s.a. = sin antecedentes

Figura 4.7: Modelo estructural de fallas mayores para Fase 6 (EMT, 2016).

4.4.4.2. Modelo de discontinuidades intermedias y menores

Los modelos de discontinuidades intermedias y menores se expresan como sistemas de discontinuidades, estableciendo orientaciones preferentes, en torno a un valor medio del rumbo y manteo. Las discontinuidades intermedias son sistemas de fallas, mientras que las discontinuidades menores son sistemas de diaclasas.

El modelo se construyó integrando la información de mapeo de banco y escaneo de pozo en sondajes, siguiendo la hipótesis según la cual las orientaciones preferenciales de las discontinuidades intermedias y menores son controladas por las direcciones de esfuerzos principales. Este análisis concluyó que:

- Existen orientaciones preferentes agrupables en 4 dominios estructurales.
- Cada dominio posee un grupo de sistemas característicos, tanto en discontinuidades intermedias como en discontinuidades menores.

En las Figuras 4.8 y 4.9 se muestran las definiciones de los dominios estructurales para discontinuidades menores e intermedias.

| DISCONTINUIDADES MENORES | | | | | | | |
|--------------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-------|--|
| Dominio Estructural | Sistema | Dip | | Dipdir | | L [m] | Estereograma Concentraciones de Polos |
| | | media [°] | desvest [°] | media [°] | desvest [°] | | |
| I | JS1_Dom_I | 34 | 8 | 163 | 15 | 6 | |
| | JS2_Dom_I | 79 | 6 | 298 | 5 | 6 | |
| | JS3_Dom_I | 75 | 4 | 326 | 8 | 5 | |
| | JS4_Dom_I | 52 | 4 | 110 | 8 | 6 | |
| | JS5_Dom_I | 68 | 4 | 065 | 6 | 10 | |
| | JS6_Dom_I | 76 | 7 | 014 | 8 | 7 | |
| | JS7_Dom_I | 39 | 8 | 316 | 11 | 9 | |
| II | JS1_Dom_II | 42 | 8 | 231 | 12 | 5 | |
| | JS2_Dom_II | 40 | 9 | 003 | 12 | 6 | |
| | JS3_Dom_II | 40 | 6 | 175 | 12 | 4 | |
| | JS4_Dom_II | 66 | 8 | 025 | 6 | 7 | |
| | JS5_Dom_II | 64 | 6 | 067 | 6 | 5 | |
| | JS6_Dom_II | 72 | 7 | 291 | 7 | 5 | |
| III | JS1_Dom_III | 51 | 7 | 315 | 10 | 6 | |
| | JS2_Dom_III | 49 | 8 | 228 | 6 | 5 | |
| | JS3_Dom_III | 40 | 8 | 253 | 8 | 2 | |
| | JS4_Dom_III | 50 | 9 | 057 | 8 | 7 | |
| | JS5_Dom_III | 80 | 5 | 214 | 3 | 9 | |
| | JS6_Dom_III | 78 | 5 | 229 | 4 | 7 | |
| IV | JS1_Dom_IV | 41 | 9 | 327 | 16 | 9 | |
| | JS2_Dom_IV | 41 | 9 | 020 | 12 | 7 | |
| | JS3_Dom_IV | 74 | 4 | 169 | 4 | 3 | |
| | JS4_Dom_IV | 77 | 5 | 208 | 5 | 4 | |
| | JS5_Dom_IV | 71 | 5 | 287 | 8 | 3 | |

Figura 4.8: Dominios estructurales y sistemas de discontinuidades menores (EMT, 2016).

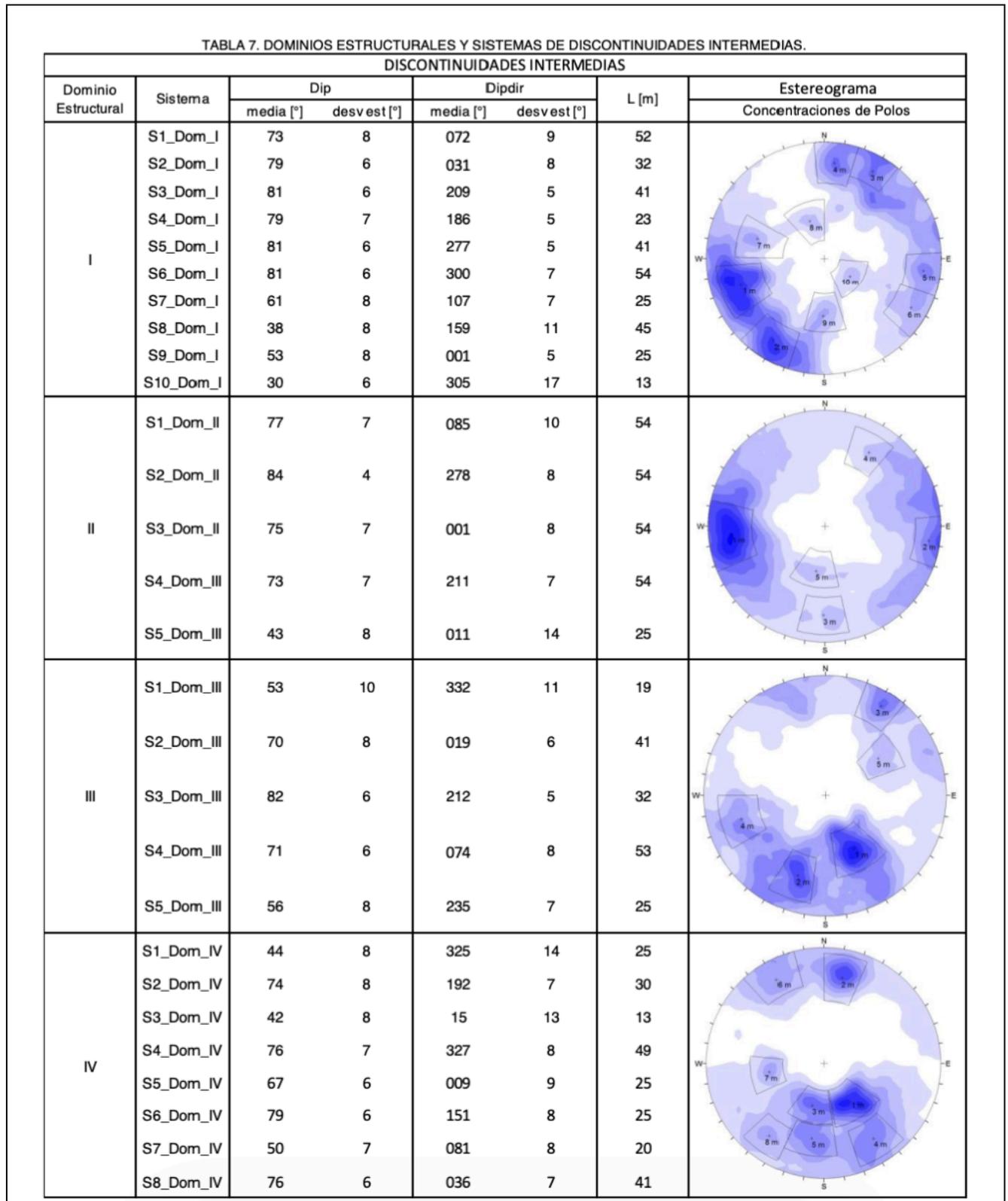


Figura 4.9: Dominios estructurales y sistemas de discontinuidades intermedias (EMT, 2016).

4.4.4.3. Dominios estructurales

Los dominios estructurales corresponden a sectores del yacimiento donde el macizo rocoso se caracteriza por presentar una fábrica estructural reconocible que se diferencia de los sectores circundantes. Dentro de cada dominio estructural se identificaron orientaciones preferentes para los sistemas de discontinuidades menores e intermedias.

Para esto, se levanta la información estructural de bancos en un software GIS, donde se representan las discontinuidades mediante un estereograma, para luego agrupar por cuadrantes que presentaban similar orientación tanto en rumbo como en manteo (Figura 4.10).

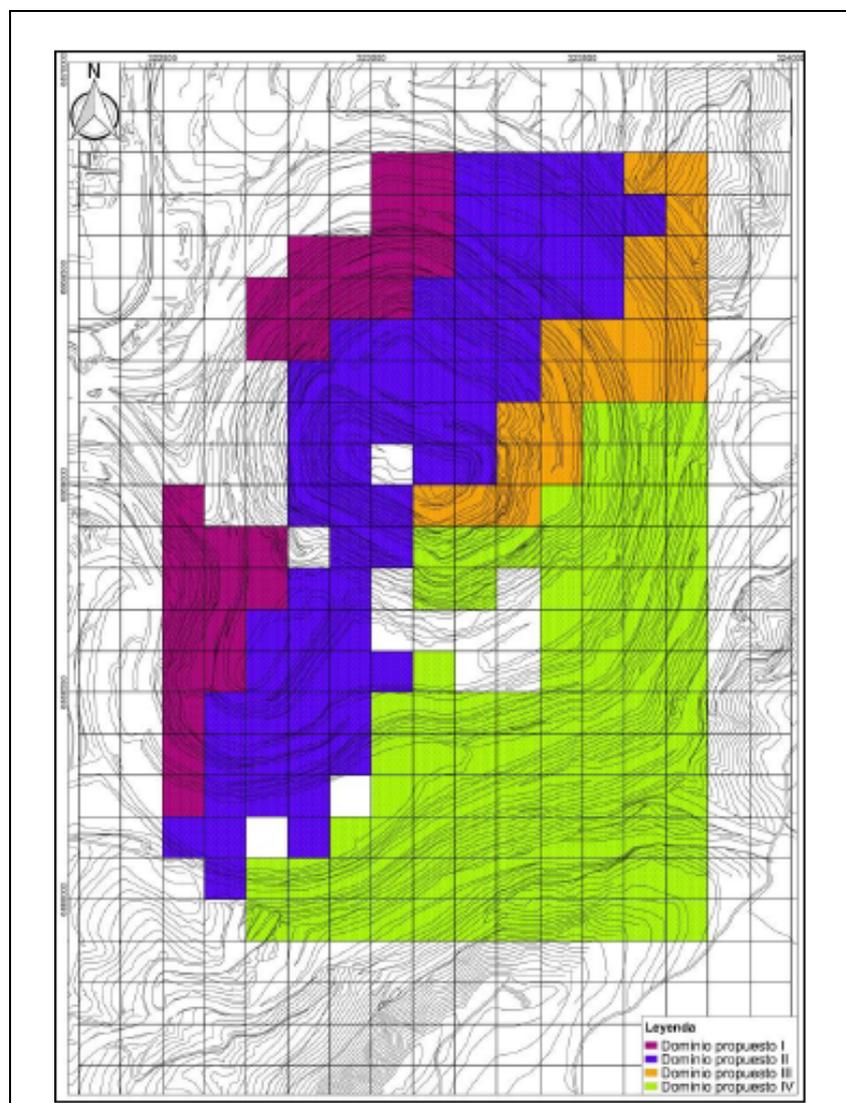


Figura 4.10: Agrupación de dominios estructurales según cuadrantes (EMT, 2016).

Con la agrupación de cuadrantes se logra identificar cuatro dominios estructurales, los cuales se encuentran limitados por fallas mayores (Figura 4.11).

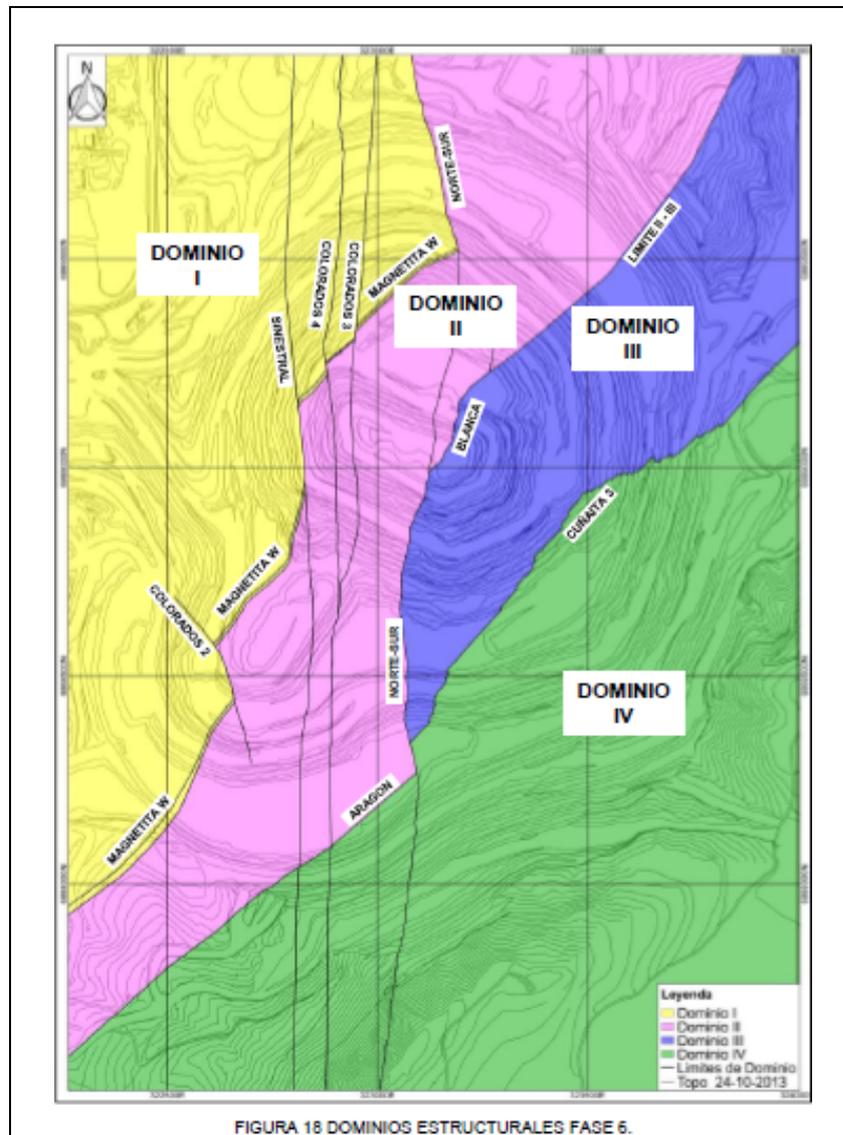


Figura 4.11: Dominios estructurales de Fase 6 (EMT, 2016).

A partir del análisis de los dominios estructurales se concluyó que:

- El modelo de discontinuidades intermedias y menores reconoce 4 dominios estructurales: Dominio I, II, III Y IV.
- Los límites para estos dominios estructurales son discontinuidades mayores.
- Los sistemas de discontinuidades reconocidos en superficie son validados en profundidad con la información obtenida del escaneo de pozos de sondajes.
- Para los Dominios I y II, los límites son las fallas Magnetita W, Los Colorados 2, Sinestral, Colorados 4 y Norte-Sur.

- Entre el Dominio II y III, los límites de dominio son las fallas Norte-Sur, Blanca y el Límite inferido II-III.
- Entre el Dominio III y IV, los límites son las fallas Aragón, Norte-Sur y Cuñaita 3.

4.4.5. Modelo hidrogeológico

El estudio hidrogeológico, realizado por la empresa VAI Groundwater Solutions como parte del estudio para Fase 6, proporcionó valiosos resultados sobre el macizo rocoso en Mina Los Colorados:

- La permeabilidad del macizo rocoso es relativamente baja, con valores que oscilan entre 10^{-9} y 10^{-8} m/s, lo cual es consistente con el ambiente volcánico predominante.
- A partir de los 200 m de profundidad, se observó una leve disminución de la permeabilidad, relacionada con la presencia de fracturas y discontinuidades cerradas, indicando un aumento en la calidad del macizo rocoso.
- Las fallas en el talud sureste del rajo actúan como barrera de flujo, mientras que las fallas del sector Oeste funcionan como vía preferencial al flujo.
- El análisis de niveles piezométricos confirmó que el flujo subterráneo en la subcuenca del rajo Los Colorados se da en dirección SE-NW, siguiendo el gradiente topográfico. Se identificaron controles estructurales en la zona noreste y sureste del rajo, que actúan como barreras hidráulicas, restringiendo el flujo hacia el centro del rajo. Por otro lado, en los sectores noroeste y suroeste, la Falla Magnetita Oeste desempeña un papel relevante, facilitando el drenaje de esos sectores.

Los dominios hidrogeológicos propuestos en este estudio se muestran en la Figura 4.12.

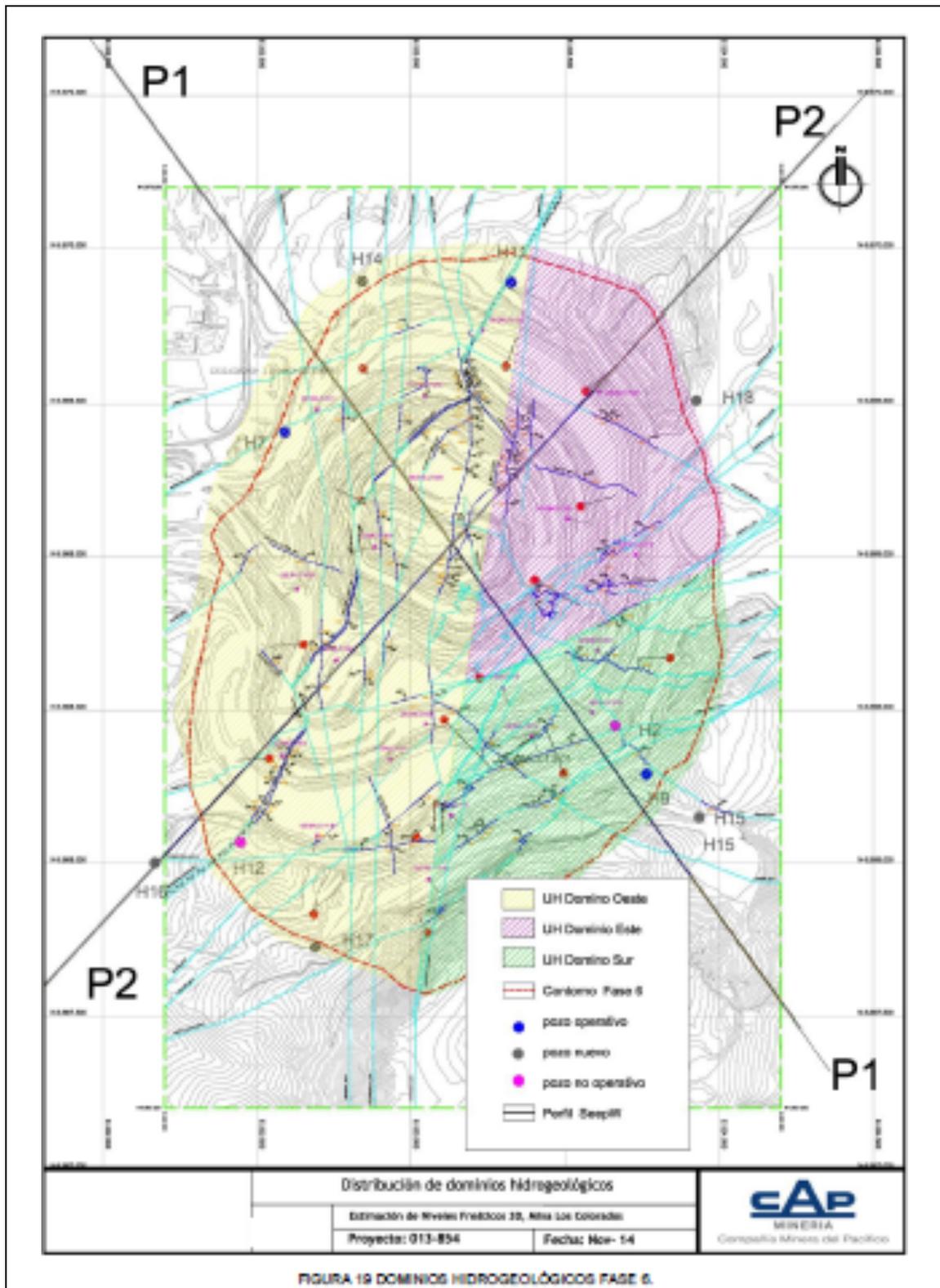


Figura 4.12: Distribución de dominios hidrogeológicos (EMT, 2016).

5. ANTECEDENTES DE REACTIVIDAD EN MINA LOS COLORADOS

5.1. Historial de eventos

En mina Los Colorados no existe registro de detonaciones no controladas que puedan relacionarse al fenómeno de rocas reactivas. Sin embargo, en los últimos años se han observado algunos indicios de posibles reacciones en curso, asociadas a la descomposición de la pirita o a la interacción entre el macizo rocoso y el explosivo en los pozos. A continuación, se describen brevemente algunos de estos eventos:

- a) Evento 1: Durante un mapeo de rutina, se identificó un color anormal en el terreno, descrito como verde amarillento con emisiones de humo blanco (Figura 5.1). La litología asociada a este pozo, que ya se había tronado hace un mes, corresponde a una roca de origen ígneo con abundante pirita, identificada como Intrusivo Central. En base a los antecedentes, el color anormal y la emisión de humo este evento podría relacionarse a rocas reactivas, donde la presencia de minerales como la pirita u otros sulfuros en el Intrusivo Central pudo reaccionar con el nitrato de amonio de los remanentes de explosivos.
- b) Evento 2: Se registró emanaciones de humo blanco procedente de un pozo asociado a Intrusivo Central, que había sido perforado la noche anterior (banco 225, pozo 2014).
- c) Evento 3: Se identificó una zona con intensa alteración hidrotermal y presencia de arcillas, sericita, anhidrita, alunita y abundante pirita. Se tomaron las precauciones necesarias para una zona con alta concentración de pirita y potencialmente reactiva, por lo que no se cargaron los pozos de manera anticipada. Después de la tronadura, se realizó una inspección en la cual se describe un fuerte olor a huevo podrido, probablemente debido al azufre liberado durante los procesos de meteorización de los sulfuros.



Figura 5.1: Pozo de perforación sin carga explosiva, pero con emisiones de humo blanco.

5.2. Análisis crítico de evento 2020

En el año 2020, se detectó la presencia de agua con tonalidad amarillenta a gris verdoso aflorando en el banco 240. Con el objetivo de tomar medidas preventivas, se recolectaron 6 muestras de agua para realizar mediciones de pH, obteniéndose valores entre 5,5 y 6,9. Con estos antecedentes, se decidió recopilar información adicional y llevar a cabo un estudio sobre rocas reactivas en la zona. Cabe destacar que esta área está compuesta principalmente por la unidad litológica Intrusivo Central, la cual se encontraba altamente alterada, manifestando un color blanquecino en superficie (Figura 5.2).

5.2.1. Criterios para selección de muestras

Se extrajeron 7 muestras del mismo banco donde se observó el afloramiento de agua, específicamente de aquellos pozos que presentaban un control estructural asociado, es decir, aquellos que intersectaban con las fallas principales. En consecuencia, del banco 270 se tomaron 3 muestras de Intrusivo Central, 2 de Baja Ley, 1 de Brechoso y 1 de Diseminado.



Figura 5.2: Intrusivo Central alterado

Además, se seleccionaron algunas muestras de pozos ubicados en el banco 165, situado al oeste del rajo y afectadas por una de las fallas más importantes de la mina, la Falla Magnetita Oeste (MW). El detalle de cada muestra se presenta en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Información de las muestras extraídas

| Código muestra | Pozo | Unidad | Fase | Banco | Control estructural |
|----------------|------|-------------------|------|-------|-----------------------------------|
| RY 270 01 | 01 | Intrusivo central | VI N | 270 | Falla NS y Falla La Blanca |
| RY270 02 | 02 | Intrusivo central | VI N | 270 | Falla NS y Falla La Blanca |
| RY270 03 | 03 | Intrusivo central | VI N | 270 | Falla NS y Falla La Blanca |
| RY270 04 | 04 | Brechoso | VI N | 270 | Falla La Negra |
| RY270 05 | 05 | Baja ley | VI N | 270 | Falla La Negra |
| RY270 06 | 06 | Baja ley | VI N | 270 | Falla Kenita Sur |
| RY270 07 | 07 | Diseminado | VI N | 270 | Falla Kenita Sur |
| TZ165 002 204 | 204 | Brechoso | V S | 165 | Falla MW, Liverpool y Colorados H |
| TZ165 002 1000 | 1000 | Diseminado | V S | 165 | Falla MW, Liverpool y Colorados H |
| TZ165 002 1002 | 1002 | Macizo | V S | 165 | Falla MW, Liverpool y Colorados H |
| TZ165 002 1006 | 1006 | Diseminado | V S | 165 | Falla MW, Liverpool y Colorados H |
| TZ165 002 1007 | 1007 | Diseminado | V S | 165 | Falla MW, Liverpool y Colorados H |
| TZ165 002 1100 | 1100 | Diseminado | V S | 165 | Falla MW, Liverpool y Colorados H |
| TZ165 002 1103 | 1103 | Brechoso | V S | 165 | Falla MW, Liverpool y Colorados H |
| TZ165 002 1105 | 1105 | Diseminado | V S | 165 | Falla MW, Liverpool y Colorados H |
| TZ165 002 1106 | 1106 | Brechoso | V S | 165 | Falla MW, Liverpool y Colorados H |
| TZ165 003 1603 | 1603 | Intrusivo central | V S | 165 | Falla Colorados 4 |
| TZ165 003 1604 | 1604 | Intrusivo central | V S | 165 | Falla Colorados 4 |

| | | | | | |
|----------------|------|-------------------|-----|-----|-------------------|
| TZ165 003 1904 | 1904 | Intrusivo central | V S | 165 | Falla Colorados 3 |
| TZ165 003 2102 | 2102 | Intrusivo central | V S | 165 | Falla Colorados 3 |
| TZ165 003 2401 | 2401 | Intrusivo central | V S | 165 | Falla Colorados 3 |
| TZ165 018 1016 | 1016 | Baja ley | V S | 165 | Falla MW |
| TZ165 018 1210 | 1210 | Intrusivo central | V S | 165 | Falla MW |

5.2.2. Análisis de reactividad

Se llevó a cabo ensayos de reactividad en las 23 muestras seleccionadas, de las cuales 22 presentaron una reacción autosostenida (AS) al entrar en contacto con nitrato de amonio (Tabla 5.2).

Tabla 5.2: Resultados de ensayos de reactividad por muestra.

| Código muestra | Pozo | Unidad | Tipo de reacción | Ti Rx (°C) | Tmáx Rx (°C) | Tmáx Rx/Ti Rx |
|----------------|------|-------------------|------------------|------------|--------------|---------------|
| RY 270 01 | 01 | Intrusivo central | AS | 37,0 | 215,0 | 5,8 |
| RY270 02 | 02 | Intrusivo central | AS | 40,0 | 174,0 | 4,4 |
| RY270 03 | 03 | Intrusivo central | AS | 27,0 | 150,0 | 5,6 |
| RY270 04 | 04 | Brechoso | AS | 49,0 | 70,0 | 1,4 |
| RY270 05 | 05 | Baja ley | AS | 44,0 | 73,0 | 1,7 |
| RY270 06 | 06 | Baja ley | AS | 66,0 | 77,0 | 1,2 |
| RY270 07 | 07 | Diseminado | AS | 28,0 | 47,0 | 1,7 |
| TZ165 002 204 | 204 | - | AS | 56,0 | 97,0 | 1,7 |
| TZ165 002 1000 | 1000 | - | AS | 28,0 | 92,0 | 3,3 |
| TZ165 002 1002 | 1002 | - | AS | 47,0 | 60,0 | 1,3 |
| TZ165 002 1006 | 1006 | - | AS | 52,0 | 66,0 | 1,3 |
| TZ165 002 1007 | 1007 | - | AS | 30,0 | 47,0 | 1,6 |
| TZ165 002 1100 | 1100 | - | AS | 46,0 | 80,0 | 1,7 |
| TZ165 002 1103 | 1103 | - | AS | 26,0 | 66,0 | 2,5 |
| TZ165 002 1105 | 1105 | - | AS | 59,0 | 69,0 | 1,2 |
| TZ165 002 1106 | 1106 | - | AS | 49,0 | 82,0 | 1,7 |
| TZ165 003 1603 | 1603 | Intrusivo central | NAS | 41,0 | 97,0 | 2,4 |
| TZ165 003 1604 | 1604 | Intrusivo central | AS | 24,0 | 82,0 | 3,4 |
| TZ165 003 1904 | 1904 | Intrusivo central | AS | 30,0 | 50,0 | 1,7 |
| TZ165 003 2102 | 2102 | Intrusivo central | AS | 30,0 | 53,0 | 1,8 |
| TZ165 003 2401 | 2401 | Intrusivo central | AS | 29,0 | 50,0 | 1,7 |
| TZ165 018 1016 | 1016 | - | AS | 26,0 | 39,0 | 1,5 |
| TZ165 018 1210 | 1210 | - | AS | 34,0 | 50,0 | 1,5 |

De las 23 muestras ensayadas, el 69.6% (16 muestras) mostró valores del parámetro de intensidad de reacción ($T_{m\acute{a}x}/T_{iRx}$) entre $1.0 \geq (T_{m\acute{a}x}/T_{iRx}) < 2.0$, lo cual se considera de baja criticidad e indica reacciones poco exotérmicas, lentas y no violentas, con liberación controlada de energía en forma de calor. Un 8.7% de las muestras (2 de 23), presentaron valores de este parámetro entre $2.0 \geq (T_{m\acute{a}x}/T_{iRx}) < 3.0$, lo cual se considera de criticidad intermedia e indica reacciones químicas de velocidad baja a intermedia, con un burbujeo suave, pero sin violencia. Por otro lado, el 13.0% de las muestras (3 de 23) mostraron valores entre $3.0 \geq (T_{m\acute{a}x}/T_{iRx}) < 4.5$, lo cual se considera de alta criticidad e indica reacciones químicas de velocidad intermedia a alta, semi controladas y que podrían presentar algún grado de violencia. Finalmente, el 8.7% restante (2 muestras) presentaron valores del parámetro ($T_{m\acute{a}x}/T_{iRx}) > 4.5$, lo cual se considera extremo e indica reacciones químicas de alta velocidad, descontroladas y violentas.

5.2.3. Análisis *sleep time*

Posteriormente, se realizaron ensayos *sleep time* a 30°C para las 22 muestras que mostraron reactividad autosostenida (AS) en el ensayo de reactividad (Tabla 5.3). Para estas pruebas se utilizó el producto explosivo Vertex®945.

Tabla 5.3: Resultados de ensayos de reactividad y *sleep time* por muestra.

| Código muestra | Pozo | Unidad | Tipo de reacción | Ti Rx (°C) | Tmáx Rx (°C) | Tmáx Rx/Ti Rx | <i>sleep time</i> @ 30°C (días) Vertex®945 |
|----------------|------|-------------------|------------------|------------|--------------|---------------|--|
| RY 270 01 | 01 | Intrusivo central | AS | 37,0 | 215,0 | 5,8 | 0,04 |
| RY270 02 | 02 | Intrusivo central | AS | 40,0 | 174,0 | 4,4 | 0,03 |
| RY270 03 | 03 | Intrusivo central | AS | 27,0 | 150,0 | 5,6 | 0,04 |
| RY270 04 | 04 | Brechoso | AS | 49,0 | 70,0 | 1,4 | 2,5 |
| RY270 05 | 05 | Baja ley | AS | 44,0 | 73,0 | 1,7 | 2,3 |
| RY270 06 | 06 | Baja ley | AS | 66,0 | 77,0 | 1,2 | 2,6 |
| RY270 07 | 07 | Diseminado | AS | 28,0 | 47,0 | 1,7 | 2,3 |
| TZ165 002 204 | 204 | Sin información | AS | 56,0 | 97,0 | 1,7 | 2,3 |
| TZ165 002 1000 | 1000 | Sin información | AS | 28,0 | 92,0 | 3,3 | 1,1 |
| TZ165 002 1002 | 1002 | Sin información | AS | 47,0 | 60,0 | 1,3 | 2,6 |
| TZ165 002 1006 | 1006 | Sin información | AS | 52,0 | 66,0 | 1,3 | 2,5 |

| | | | | | | | |
|----------------|------|-------------------|-----|------|------|-----|-----|
| TZ165 002 1007 | 1007 | Sin información | AS | 30,0 | 47,0 | 1,6 | 2,3 |
| TZ165 002 1100 | 1100 | Sin información | AS | 46,0 | 80,0 | 1,7 | 2,3 |
| TZ165 002 1103 | 1103 | Sin información | AS | 26,0 | 66,0 | 2,5 | 1,7 |
| TZ165 002 1105 | 1105 | Sin información | AS | 59,0 | 69,0 | 1,2 | 2,5 |
| TZ165 002 1106 | 1106 | Sin información | AS | 49,0 | 82,0 | 1,7 | 2,4 |
| TZ165 003 1603 | 1603 | Intrusivo central | NAS | 41,0 | 97,0 | 2,4 | |
| TZ165 003 1604 | 1604 | Intrusivo central | AS | 24,0 | 82,0 | 3,4 | 1 |
| TZ165 003 1904 | 1904 | Intrusivo central | AS | 30,0 | 50,0 | 1,7 | 2,4 |
| TZ165 003 2102 | 2102 | Intrusivo central | AS | 30,0 | 53,0 | 1,8 | 2,4 |
| TZ165 003 2401 | 2401 | Intrusivo central | AS | 29,0 | 50,0 | 1,7 | 2,3 |
| TZ165 018 1016 | 1016 | Sin información | AS | 26,0 | 39,0 | 1,5 | 2,4 |
| TZ165 018 1210 | 1210 | Sin información | AS | 34,0 | 50,0 | 1,5 | 2,5 |

De las 22 muestras, el 72.7% (16 muestras) presentó valores de *sleep time* en días a 30.0 °C entre $0 \geq \text{sleep time} < 2.5$, lo cual se considera de alta criticidad. Las 6 muestras restantes mostraron valores entre $2.5 \geq \text{sleep time} < 5.0$, lo cual se define como un rango de criticidad intermedia.

5.2.4. Conclusiones del estudio

A partir de los ensayos realizados, se observó que las 3 muestras con reactividad mas crítica (RY27001, RY27002 y RY27003) correspondan a muestras de Intrusivo Central procedentes del banco 270, lugar donde se evidenciaron signos de reacción en terreno. Esta correlación entre la reactividad y la litología del Intrusivo Central es altamente significativa. Además, estas 3 muestras exhibieron los tiempos más cortos de *sleep time*, reaccionando en menos de una hora desde el inicio del ensayo.

Asimismo, en los laboratorios de Mina Los Colorados se llevaron a cabo análisis químicos para determinar la abundancia de algunos elementos críticos por unidad litológica. Se midieron los contenidos de Fe (Figura 5.3), Al₂O₃ (Figura 5.4), SiO₂ (Figura 5.5), TiO₂ (Figura 5.6) y S (Figura 5.7) en cada tipo de roca muestreada.

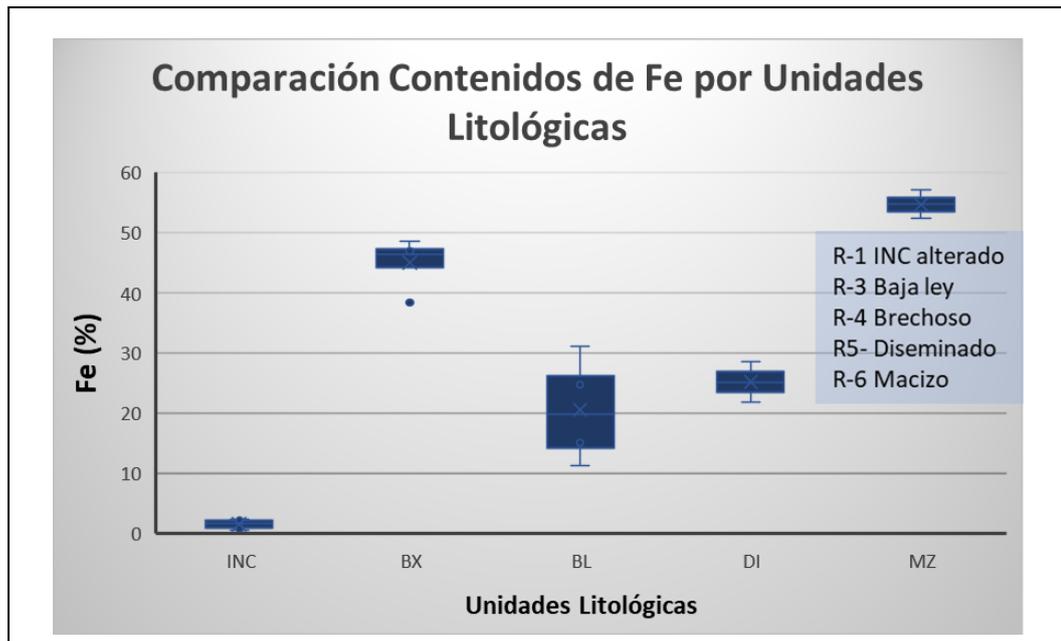


Figura 5.3: Comparación de contenido de Fe por unidad geológica.

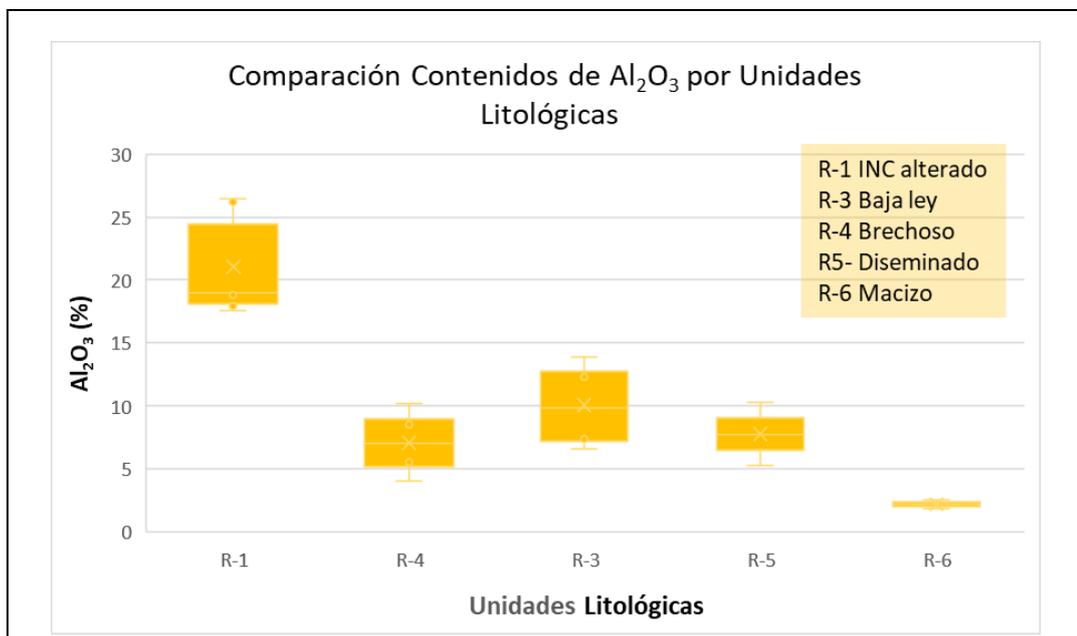


Figura 5.4: Comparación de contenido de Al por unidad geológica.

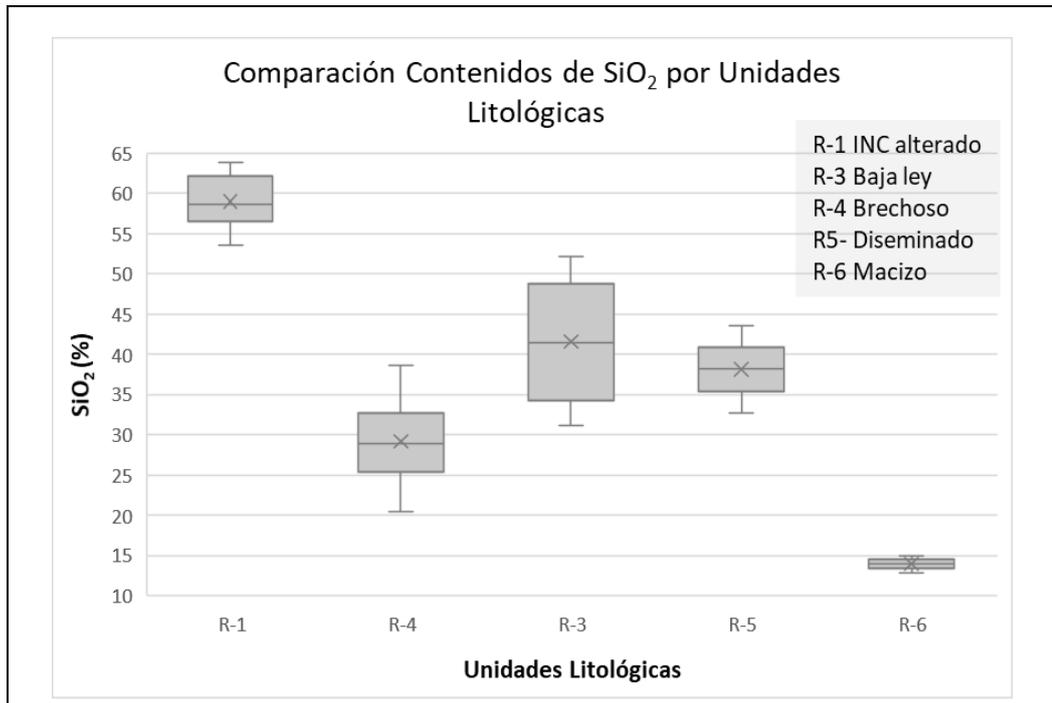


Figura 5.5: Comparación de contenido de Si por unidad geológica.

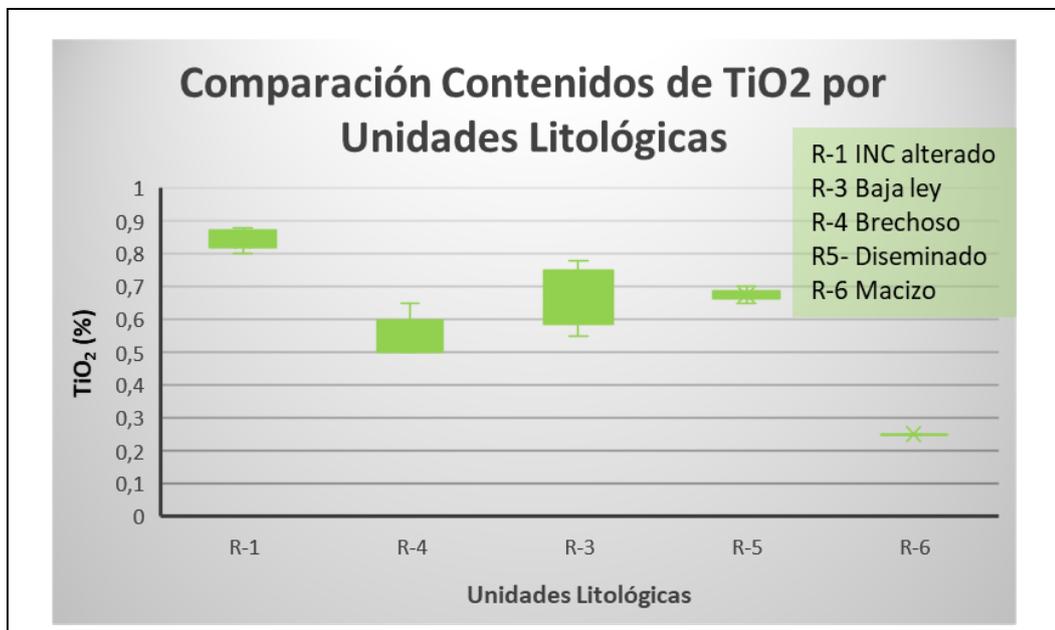


Figura 5.6: Comparación de contenido de Ti por unidad geológica.

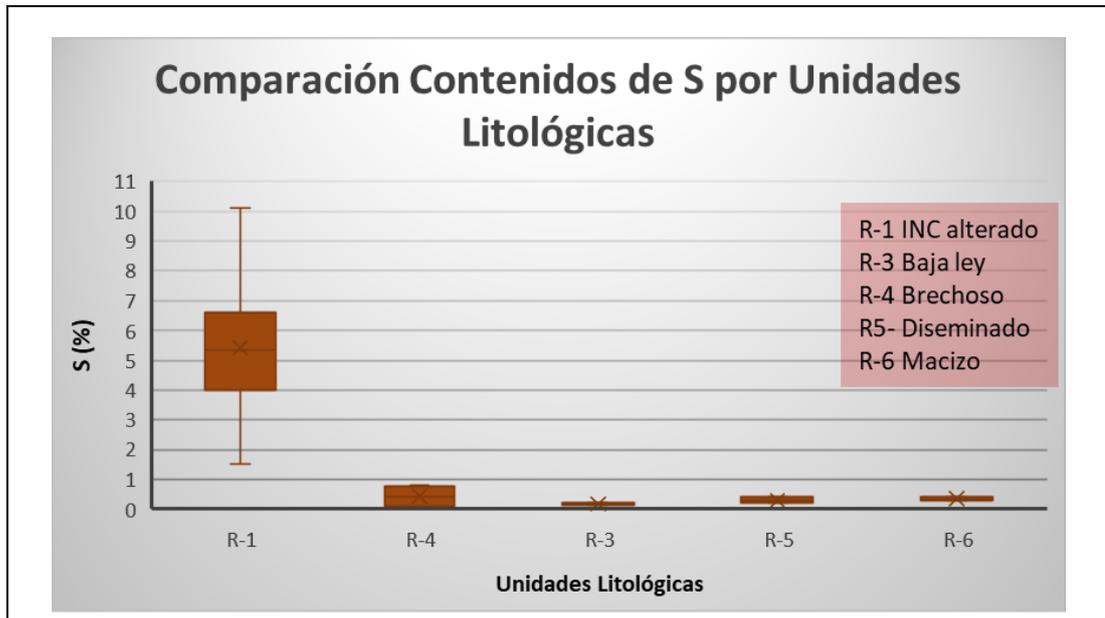


Figura 5.7: Comparación de contenido de S por unidad geológica.

Con base en los resultados, se concluyó que la composición del Intrusivo Central asociado a la alta reactividad de la zona estudiada presenta una concentración elevada de Al_2O_3 , SiO_2 , Ti y S, mientras que presenta un bajo contenido en Fe en comparación a las otras litologías.

5.2.5. Comentarios y observaciones

Aunque se logró establecer una correlación clara entre la composición del Intrusivo Central y la elevada reactividad de esas muestras, aún queda pendiente identificar la razón específica por la cual otras muestras de Intrusivo Central (por ejemplo, las de la malla de tronadura TZ165003), a pesar de contener una cantidad considerable de pirita, mostraron una reactividad baja en los ensayos de reactividad.

Las siguientes imágenes en planta (Figuras 5.8, 5.9 y 5.10) muestran el control estructural asociado a cada zona estudiada, junto con los resultados de reactividad obtenidos en cada pozo según los criterios de la Tabla 2.4; verde para las muestras que mostraron intensidad de reacción ($T_{m\acute{a}x}/Ti_{Rx}$) baja, amarillo intensidad intermedia, naranja alta y rojo intensidad de reacción extrema.

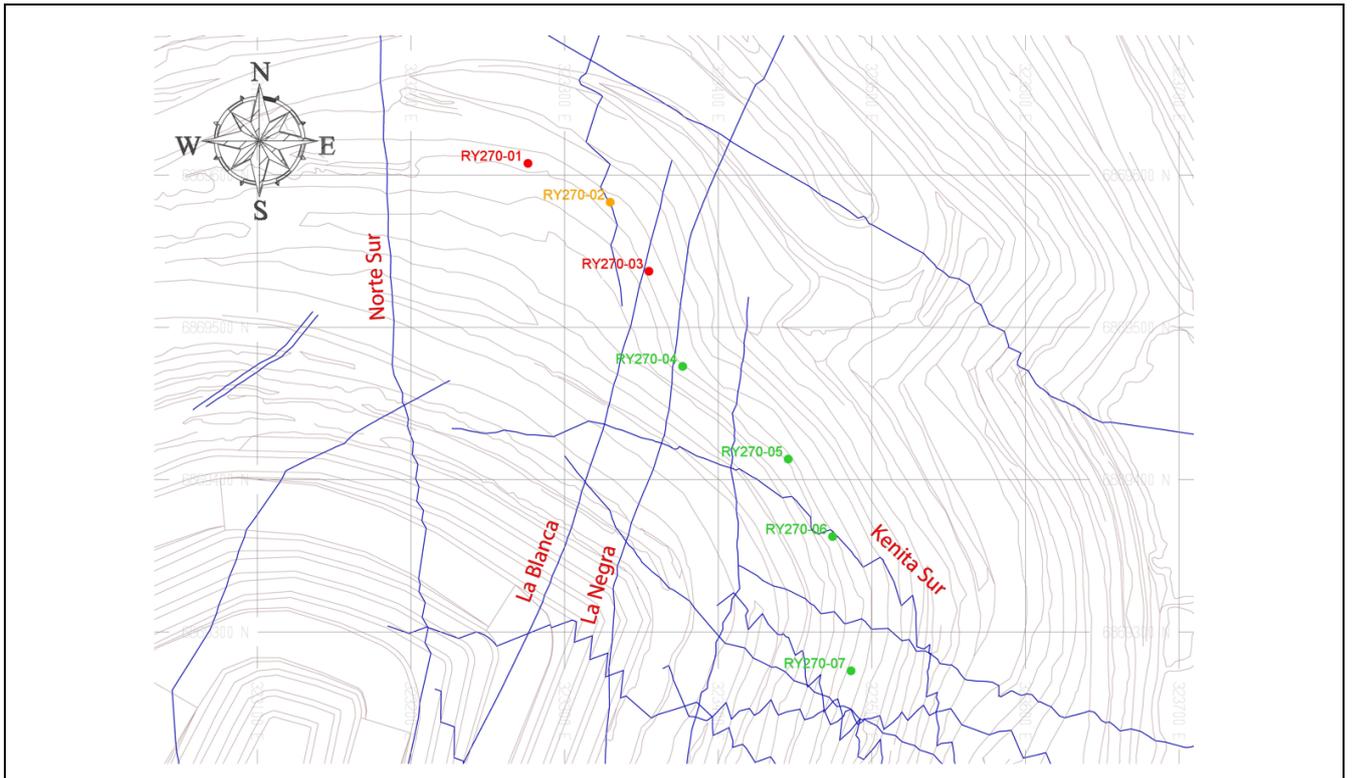


Figura 5.8: Vista en planta de la zona de muestreo RY270. En líneas azules se visualizan las fallas principales, y en círculos de colores los pozos muestreados y su nivel de reactividad.

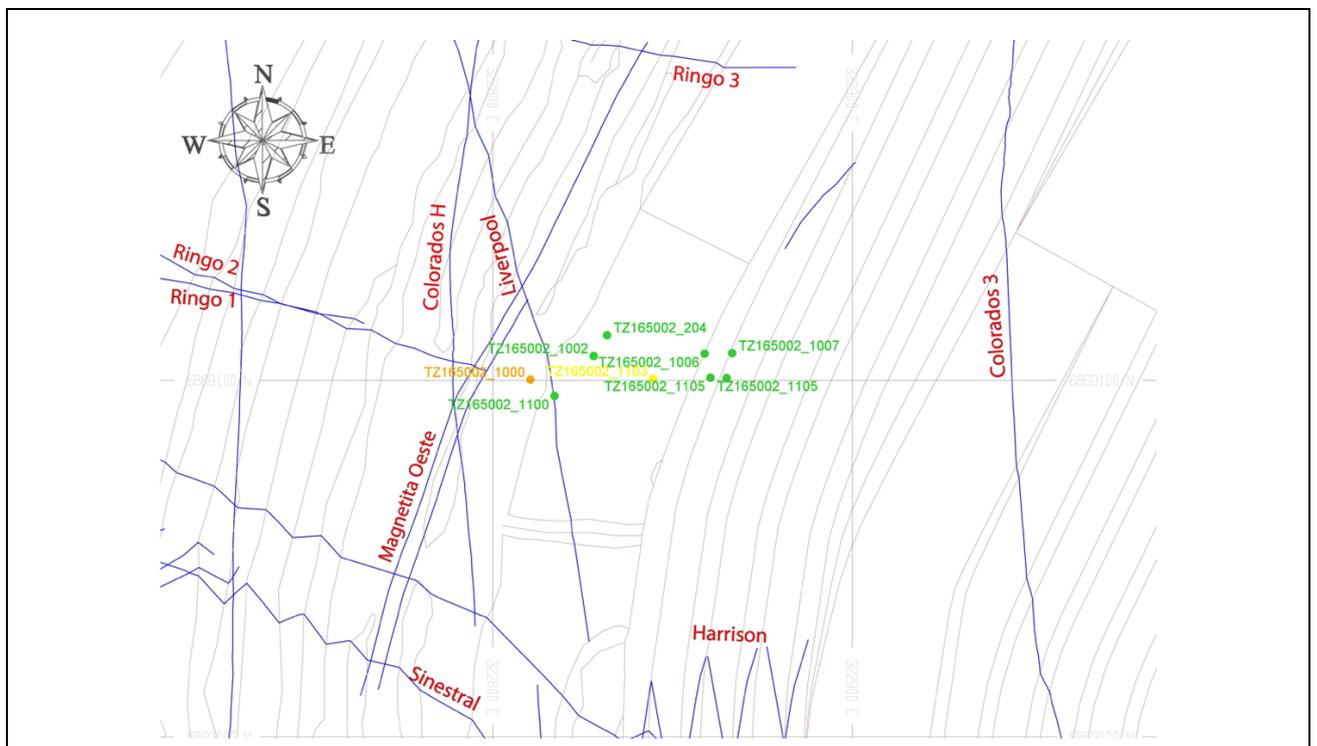


Figura 5.9: Vista en planta de la zona de muestreo TZ165002. En líneas azules se visualizan las fallas principales, y en círculos de colores los pozos muestreados y su respectiva reactividad.

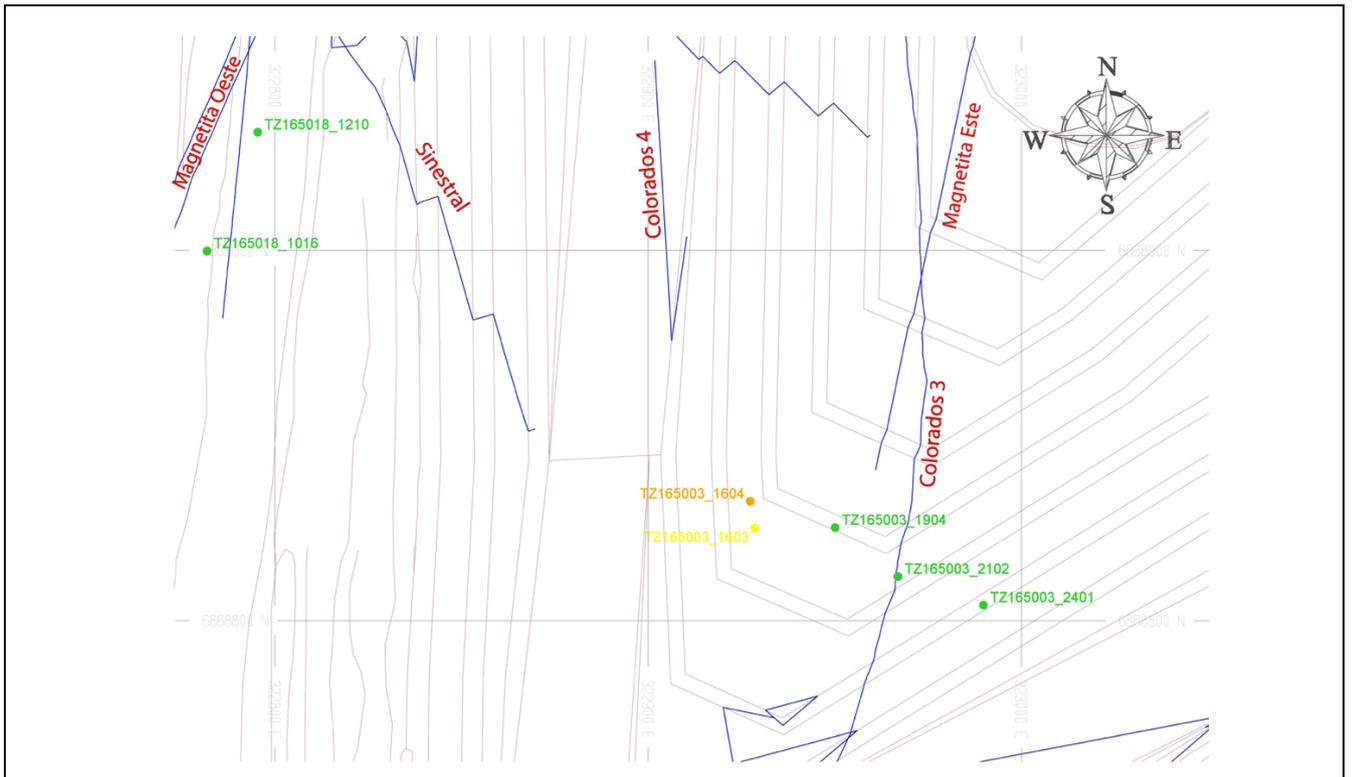


Figura 5.10: Vista en planta de la zona de muestreo TZ165003. En líneas azules se visualizan las fallas principales, y en círculos de colores los pozos muestreados y su respectiva reactividad.

En resumen, el análisis detallado de los eventos y observaciones pasadas relacionadas con la reactividad en Mina Los Colorados nos ha proporcionado una comprensión inicial de los posibles factores que contribuyen a la presencia de rocas reactivas en la zona. Sin embargo, para una evaluación más completa y precisa, se plantea la necesidad de generar una nueva zona de muestreo para analizar su reactividad. En este nuevo estudio, se integrará la información estructural en un modelo geológico 3D, lo que permitirá visualizar cómo las estructuras se intersectan con los pozos de tronadura en profundidad. Este enfoque ampliado brindará una mejor comprensión de la distribución espacial de las rocas reactivas y de las relaciones entre el fracturamiento del macizo rocoso y su reactividad.

6. NUEVO ESTUDIO DE REACTIVIDAD PARA MINA LOS COLORADOS

En este capítulo se presenta en detalle la metodología aplicada para llevar a cabo un nuevo estudio sobre potencial de reactividad del macizo rocoso. Se abarcan aspectos como la selección del área de estudio, el levantamiento en terreno, muestreo y análisis de reactividad.

6.1. Selección de área de estudio

El criterio mas relevante para definir la zona de estudio, son las condiciones geológicas y mineralógicas que generaron reactividad histórica en esta faena minera. A partir de esto, se consideró crítico estudiar la unidad geológica "Intrusivo Central", caracterizada por su alto contenido de pirita y anteriormente estudiada en términos de reactividad.

Luego, la elección de los bancos y polígonos de tronadura a estudiar dependió del avance de la mina al momento de la visita a terreno. De esta forma, se escogieron las siguientes zonas para trabajo en terreno y muestreo, que podrían reunir condiciones de macizo rocoso potencialmente reactivo:

1. Malla CA120169 (Fase V Sur, banco 120): Esta área (Figura 6.1) se identificó como la más adecuada para realizar el mapeo del banco. Al llegar a la faena, se estaban perforando los pozos de precorte, lo que nos brindó acceso a esta zona antes de que fuera completamente tronada. Además, se observó la presencia de agua escurriendo en el talud asociado, y en el interior de algunos pozos. Estos factores, junto con la identificación de Intrusivo Central con abundante pirita, categorizaron este sector como potencialmente reactivo.
2. Malla CA435135 (Fase VI Sur, banco 135): Esta zona había sido tronada recientemente al momento de la visita a la mina Los Colorados. Sin embargo, el equipo de muestreo aún tenía reservadas muestras de la mayoría de pozos tronados, incluida una zona de falla (Falla Magnetita Oeste) y la unidad Intrusivo Central. En base a estos antecedentes, se decidió analizar algunas de estas muestras e incluirlas en esta investigación. En la Figura 6.2 se observa la ubicación espacial de las zonas a estudiar sobre la topografía del rajo.

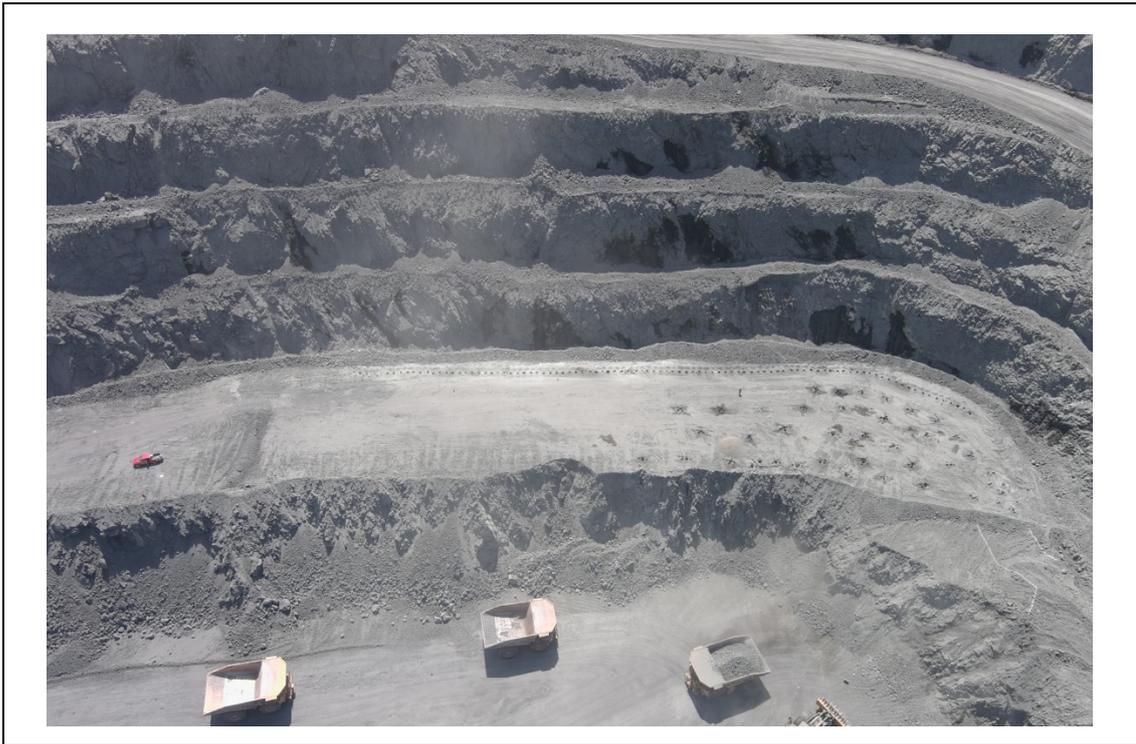


Figura 6.1: Fotografía aérea de la zona principal del estudio. La superficie perforada corresponde al banco 120. Se alcanzan a distinguir las paredes de los dos bancos superiores.

6.2. Recopilación de información escala mina

Con el fin de comprender adecuadamente la potencial reactividad del macizo rocoso en estudio, resulta fundamental contar con una amplia gama de información, antecedentes y modelos geológicos de la mina. Esta información se utilizará para contrastar y analizar las diferentes zonas potencialmente reactivas que serán mapeadas y estudiadas. Es importante tener en cuenta que la reactividad es un fenómeno que se manifiesta de manera específica en sectores puntuales de cada faena minera, por lo que resulta imprescindible realizar una exhaustiva evaluación de todas las variables para identificar las condiciones geológicas que condicionarían la reactividad en el sector. Este enfoque permitirá realizar correlaciones significativas entre los resultados de reactividad y los factores geológicos presentes en el rajo.

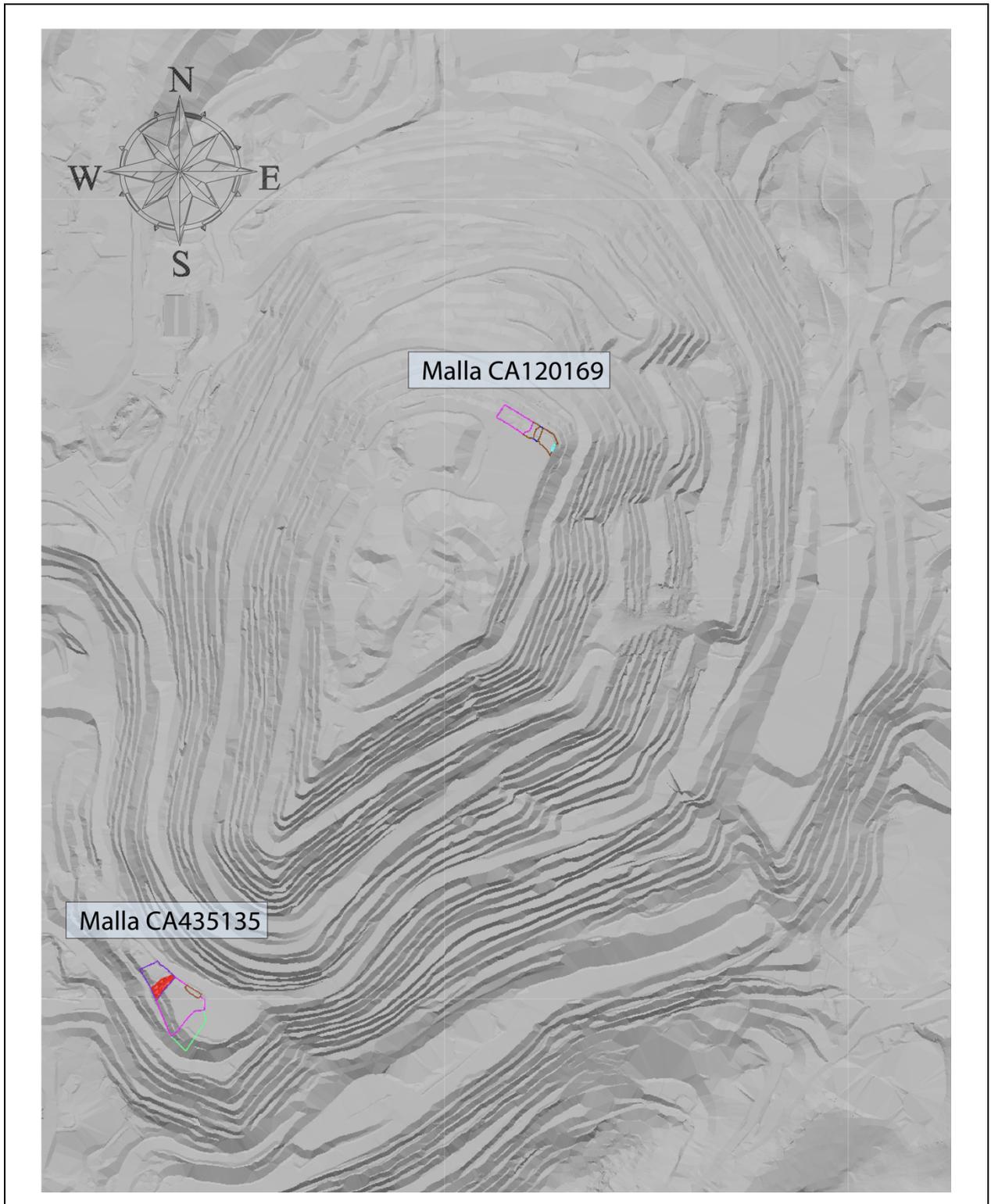


Figura 6.2: Vista en planta de las zonas a estudiar y la topografía del rajo.

Cabe destacar que gran parte de la información recopilada se encuentra en formato CAD (.dxf o .dwg), entre ellos datos topográficos, diseños de tronadura, modelos geológicos y estructurales (Figura 6.3). Con el fin de aprovechar al máximo esta información y visualizarla de manera integral, se utilizará el programa MinePlan 3D (anteriormente MineSight). Este software permite la creación de modelos tridimensionales que facilitan la visualización y el análisis de datos geológicos y estructurales. Al utilizar MinePlan 3D, se logrará una representación precisa y detallada de la información en un entorno tridimensional, lo cual será de gran utilidad para identificar patrones, correlaciones y relaciones espaciales que contribuirán a una mejor comprensión de las condiciones que conducen a la reactividad del macizo rocoso en estas zonas.

6.2.1. Planos del área de estudio

Se solicitaron los planos de tronadura asociados a las dos zonas seleccionadas para el estudio (Figuras 6.4 y 6.5). La utilización de estos planos resulta fundamental para el análisis detallado de la reactividad en el macizo rocoso, ya que permiten identificar la distribución espacial de los pozos de tronadura y su relación con las diferentes unidades litológicas y texturales presentes en el terreno. Estos datos serán de gran utilidad para establecer posibles patrones de reactividad y correlacionarlos con las características geológicas del área de estudio.

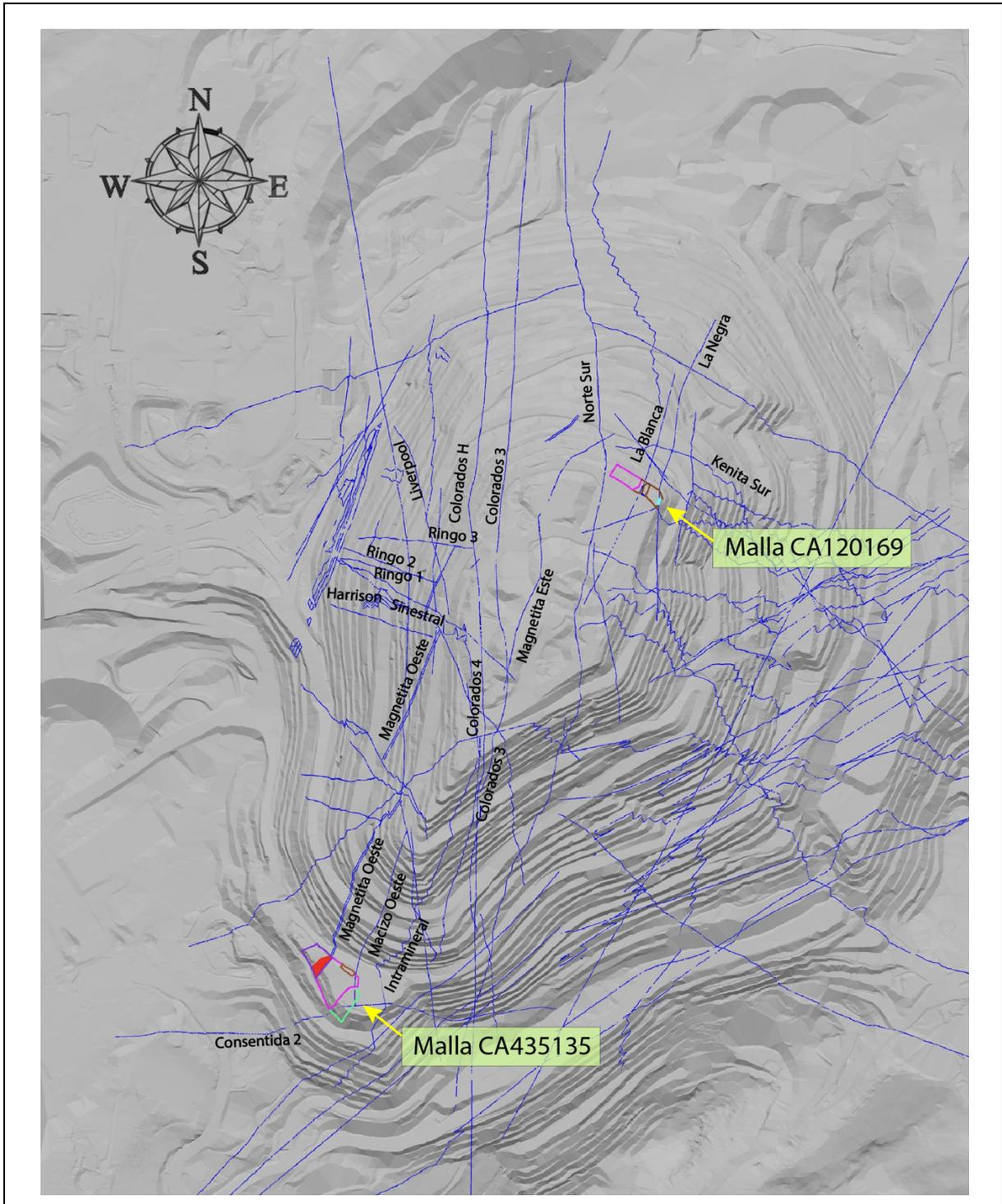


Figura 6.3: Modelo estructural de Mina Los Colorados. En líneas azules las fallas principales.

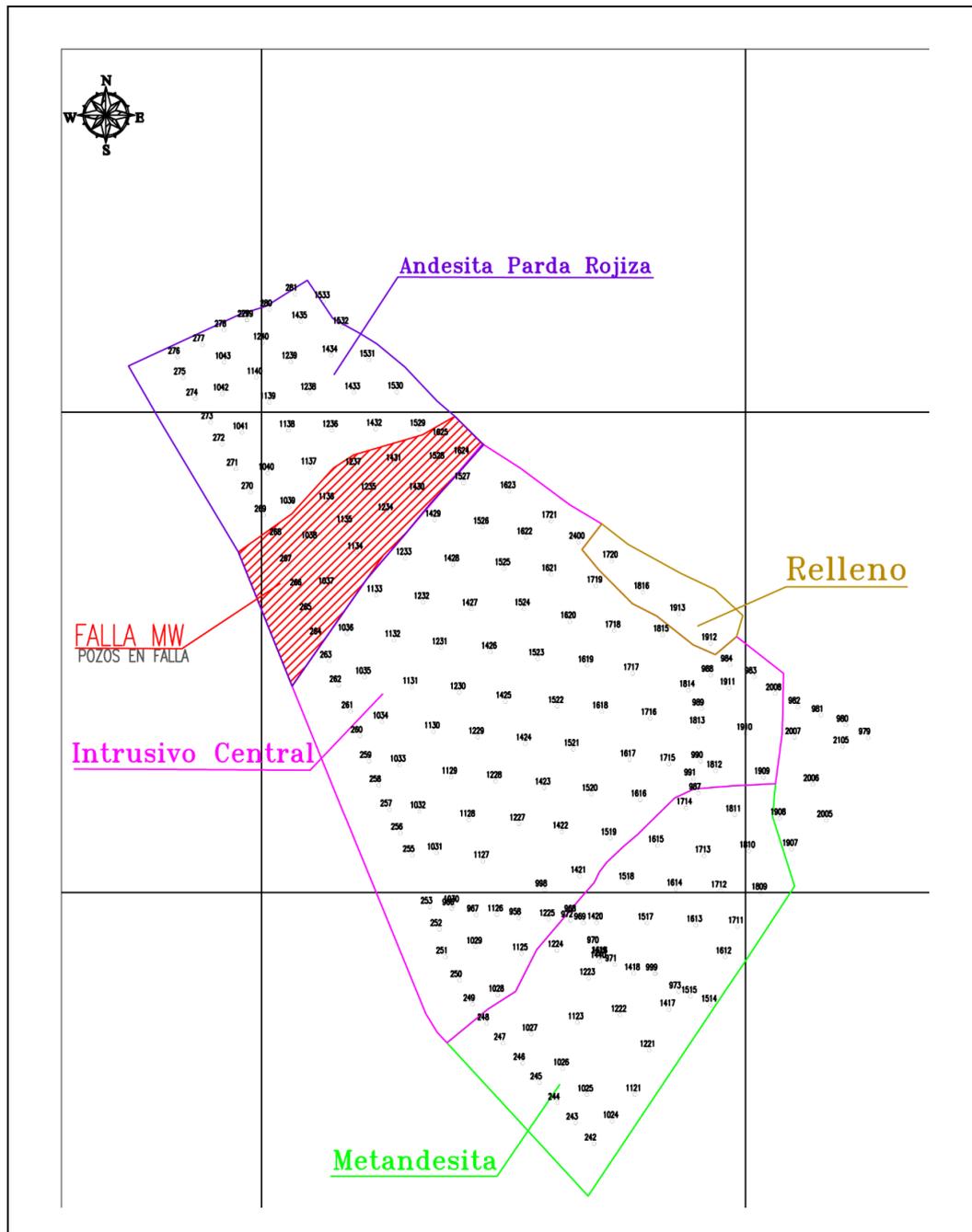


Figura 6.5: Plano de tronadura para la malla CA435135. Las líneas violetas limitan la Andesita Parda Rojiza (APR), las rojas a la zona de Falla Magnetita Oeste (MW), aquellas magenta al Intrusivo Central y las verde a la Metandesita. También hay una pequeña zona de relleno limitada por líneas café.

6.3. Levantamiento de terreno en unidad potencialmente reactiva

Este levantamiento consistió en un mapeo en detalle de la pared del banco asociada a la malla de perforación CA120169, que anteriormente se identificó como una unidad potencialmente reactiva por su contenido en pirita (Figura 6.6). Durante el mapeo, se empleó una cartilla especialmente diseñada que consideraba todas aquellas variables litológicas y estructurales que podrían influir en la reactividad del macizo rocoso.



Figura 6.6: Pozos de contorno (precorte) en la zona de Intrusivo Central del banco 120. Las manchas oscuras corresponden a agua fluyendo por las paredes.

6.3.1. Litología, mineralización y alteración

En la zona de estudio, se identifica principalmente una roca, de apariencia maciza y textura porfídica (Figura 6.7). Presenta una matriz microcristalina de color gris verdoso, acompañada de fenocristales de plagioclasas (30%) con forma subhedral a anhedral. No se observan cristales de cuarzo ni feldespatos potásicos. Se identificaron al menos tres tipos de alteración en este tipo de rocas. En primer lugar, se identificó una moderada a intensa silicificación en la matriz, lo que le confiere una alta dureza. En segundo lugar, se evidenció una alteración propilítica de

baja intensidad, manifestada por la presencia de epidota, clorita y actinolita. Por último, se observó una leve oxidación en forma de hematita y limonitas en las caras delimitadas por vetillas, otorgándoles un tono rojizo-amarillento.



Figura 6.7: Pórfido diorítico (Intrusivo Central) característico de la zona de estudio.

En cuanto a la mineralogía de sulfuros, la mayoría de estas rocas presenta fracturas o vetillas rellenas con pirita de hábito irregular entre un 1% y 3%. La calcopirita se encuentra en trazas, siempre asociada a la pirita. No se identificaron otros sulfuros de manera macroscópica. Además, es relevante mencionar la presencia de calcita y cuarzo en vetillas, con una abundancia cercana al 1%.

Según las características descritas, la roca corresponde a un pórfido diorítico puede ser asociada a la unidad litológica Intrusivo Central.

La presencia de fenocristales de feldespato potásico y plagioclasas, junto con la matriz microcristalina y la ausencia de porosidades significativas, contribuye a su resistencia y densidad. Las alteraciones propilíticas y la oxidación leve también podrían tener un impacto en la reactividad del macizo rocoso. Sin embargo, la presencia de pirita y calcita en vetillas son

aspectos claves a considerar, ya que pueden influir en la interacción química entre la roca y el nitrato de amonio presente en los explosivos.

La presencia de agua es un factor relevante en el fenómeno de reactividad del macizo rocoso en contacto con el explosivo, especialmente cuando se combina con una mineralogía potencialmente reactiva. El agua crea las condiciones necesarias para la solubilidad, oxidación y generación de soluciones ácidas, aspectos fundamentales en los procesos exotérmicos asociados a la reactividad. Se tomaron muestras de agua desde las paredes de la zona de estudio para calcular su pH (Figura 6.8), obteniéndose valores entre 6.5 y 6.6 (Figura 6.9).

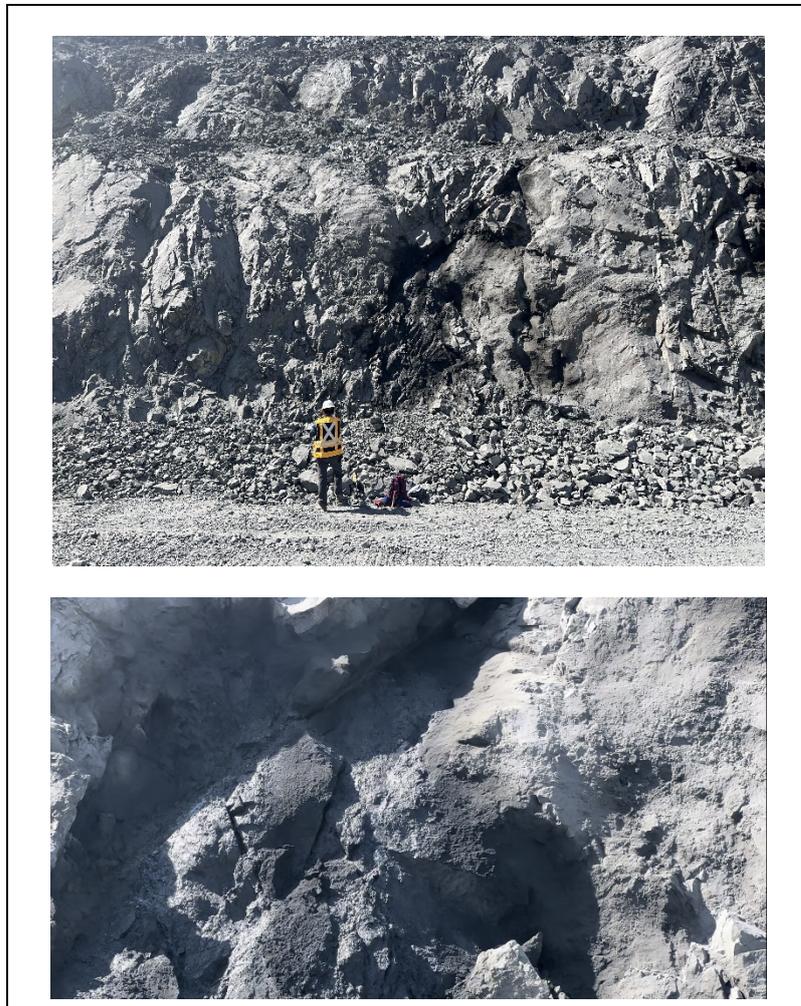


Figura 6.8: Zona de muestreo de agua.



Figura 6.9: Medición de pH en muestra de agua.

6.3.2. Estructuras

En la pared del banco analizado se identificaron cuatro familias de discontinuidades, representadas por una orientación preferencial identificada en terreno (Tabla 6.1). Para cada una de ellas, se realizaron mediciones de ciertos parámetros del criterio RMR, como el espaciado (en centímetros), la continuidad en el manto, la abertura, la frecuencia de fracturas por metro y su rugosidad.

Tabla 6.1: Características de las principales estructuras mapeadas.

| Orientación estructura | Tipo de estructura (falla principal, secundaria o diaclasa) | Parámetros RMR | | | | |
|------------------------|---|----------------|--------------------------|--------------------------|---|-----------|
| | | Espaciado | Continuidad (<1m a >20m) | Abertura (<0,1mm a >5mm) | Frecuencia de fracturas (fracturas por metro) | Rugosidad |
| N43°E / 64°E | Diaclasa+falla | 40 cm | 15m (M) | Muy cerrada | 2 a 3 | Rugosa |
| N31°W / 78°W | Diaclasa | 40-50 cm | 4-5m (M) | Muy cerrada | 2 a 3 | Rugosa |
| N62°E / 85°N | Diaclasa | 30-40 cm | 50 cm | Muy cerrada | 2 a 3 | Rugosa |
| N67°W / 59°S | Diaclasa | 30-40 cm | 50 cm | Muy cerrada | 2 a 3 | Rugosa |

Posteriormente, se procedió a caracterizar el relleno de las fracturas, incluyendo el tipo de relleno y su dureza (Tabla 6.2). La caracterización del relleno de las fracturas nos proporciona información valiosa sobre las características y propiedades de los materiales presentes en las discontinuidades. Esto es relevante para comprender la influencia de los rellenos en la reactividad del macizo rocoso, ya que en grandes cantidades podrían catalizar la reacción entre la roca y explosivo.

Luego, se evaluaron las condiciones generales del macizo rocoso, incluyendo el grado de meteorización y la dureza según el criterio ISRM. Un grado de meteorización elevado representa un factor relevante para la evaluación de la potencial reactividad del macizo. Por ejemplo, un pozo de tronadura que presente una roca altamente meteorizada facilitará la interacción entre los iones liberados de la estructura mineral y el nitrato de amonio durante la carga del pozo.

Finalmente, se determinó el Índice de Resistencia Geológica (GSI), un parámetro ampliamente utilizado para clasificar la calidad del macizo rocoso en función de su grado de fracturamiento, condición de las fracturas y presencia de agua, lo que define su resistencia y comportamiento frente a las tronaduras. Un macizo rocoso más fracturado promueve la permeabilidad tanto del agua como del oxígeno, lo que aumentaría la probabilidad de reacción con el explosivo.

Tabla 6.2: Características del relleno y condición del macizo rocoso.

| Relleno y condición del macizo | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------|--|--|
| Relleno | | | | Grado de meteorización (ISRM) | Dureza (ISRM) | Agua (Seco, ligeramente húmedo, húmedo, goteando, agua fluyendo) | GSI (Índice de resistencia geológica; 0-100) |
| Tipo de relleno | | Composición | Dureza del relleno | | | | |
| Fino o granular | Cementación (calcita, si o no) | | | | | | |
| Fino | Si, calcita en vetillas <<1% | Óxidos de Fe, arcillas y pirita | 2 | II | R6, roca muy dura | Agua fluyendo | 50-60 |

6.4. Mapeo y muestreo de detrito de perforación

Una vez completado el mapeo del banco, se procede a la etapa de mapeo y muestreo de rocas. Es importante recordar que uno de los objetivos del muestreo en esta investigación es llevar a cabo los ensayos de reactividad y *sleep time*. Para ello, se recomienda tomar muestras del detrito de perforación (*cutting* de perforación), que corresponde a la porción de roca triturada que queda alrededor del pozo de tronadura después de ser perforado. La información litológica de cada pozo se utilizará para la construcción del modelo tridimensional del sector en estudio.

6.4.1. Selección de muestras

En la selección de las muestras a analizar se siguen ciertos protocolos. Enaex recomienda tomar 12 muestras por zona potencialmente reactiva. Según los registros de mina Los Colorados, la unidad geológica Intrusivo Central ha presentado históricamente los mayores indicios de reactividad debido a su elevado contenido de pirita. Por esta razón, se tomó una mayor cantidad de muestras de esta unidad desde la malla CA120169. Por otro lado, la zona suroeste del rajo (malla CA435135) se ve afectada por la falla principal Magnetita Oeste, lo cual brinda una excelente oportunidad para comprender el papel de esta falla principal en la reactividad de la zona.

De este modo, se muestreó un total de 18 muestras (detalladas en la Tabla 6.3):

- 12 muestras del banco 120 (malla CA120169): consistió en 5 muestras de Intrusivo Central, 4 de Baja Ley, 2 de Brechoso y 1 de Diseminado.
- 6 muestras del banco 435 (malla CA435135): 2 muestras de Intrusivo Central, 2 de la Falla Magnetita Oeste y 2 de la unidad geológica Andesita Parda Rojiza.

Tabla 6.3: Detalle de las muestras recolectadas para este estudio.

| Código muestra | Pozo | Unidad | Fase | Banco | Control estructural |
|----------------|-------------|-------------------|------|-------|---------------------------------|
| CA120169-223 | 223 | Intrusivo central | V S | 120 | Fallas 2, 6 y 13 |
| CA120169-1109 | 1109 | Intrusivo central | V S | 120 | Fallas 2 y 8 |
| CA120169-1111 | 1111 | Intrusivo central | V S | 120 | Fallas 5 y 8 |
| CA120169-1211 | 1211 | Intrusivo central | V S | 120 | Fallas 9 y 13 |
| CA120169-1107 | 1107 | Baja ley | V S | 120 | Falla 11 y Falla Blanca |
| CA120169-1206 | 1206 | Intrusivo central | V S | 120 | Falla 12 y contacto IC-Baja ley |

| | | | | | |
|---------------|-------------|-------------------|------|-----|--------------------------------------|
| CA120169-203 | 203 | Diseminado | V S | 120 | Falla 8 y Falla La Negra |
| CA120169-1007 | 1007 | Brechoso | V S | 120 | Falla 1 y contacto Baja Ley-Brechoso |
| CA120169-1105 | 1105 | Brechoso | V S | 120 | Falla 1 y contacto Baja Ley-Brechoso |
| CA120169-1103 | 1103 | Baja ley | V S | 120 | - |
| CA120169-1104 | 1104 | Baja ley | V S | 120 | - |
| CA120169-210 | 210 | Baja ley | V S | 120 | - |
| CA435135-1129 | 1129 | Intrusivo central | VI S | 435 | |
| CA435135-1130 | 1130 | Intrusivo central | VI S | 435 | |
| CA435135-1134 | 1134 | Falla MW | VI S | 435 | Falla Magnetita Oeste |
| CA435135-265 | 265 | Falla MW | VI S | 435 | Falla Magnetita Oeste |
| CA435135-1043 | 1043 | APR | VI S | 435 | |
| CA435135-1531 | 1531 | APR | VI S | 435 | |

6.4.2. Método de muestreo

El muestreo de los pozos seleccionados se coordinó una vez finalizada la etapa de perforación. Durante la perforación, la maquinaria especializada genera los pozos de tronadura y alrededor de cada pozo depositan un cono compuesto por roca triturada (*cutting* de perforación).

Este tipo de muestra se prefiere debido a que representa la roca que queda en contacto con la columna de explosivos una vez cargada dentro del pozo. La Figura 6.10 muestra un esquema de un pozo de tronadura, donde el volumen verde corresponde a la altura del banco y el volumen rojo representa la porción de pasadura de la perforación.

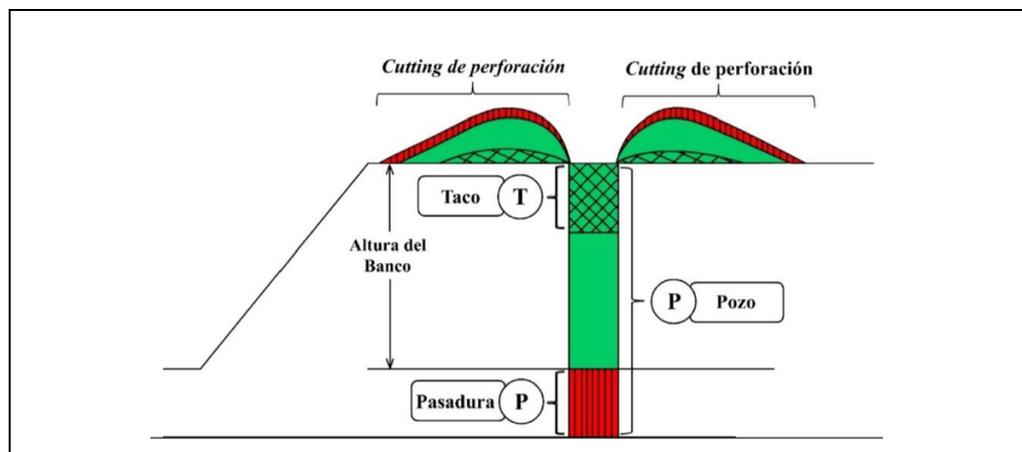


Figura 6.10: Esquema de pozo de tronadura y *cutting* de perforación

Lo ideal para lograr un muestreo efectivo es que la porción muestreada sea representativa de todo el largo del pozo de tronadura, lo cual implica considerar tanto la longitud como el ancho total del *cutting* de perforación. En el contexto de esta investigación, se extrajeron entre 2 y 3 kg de muestra por cada pozo.

6.4.3. Preparación mecánica

Una vez obtenidas las muestras, es necesario someterlas a ensayos de reactividad, es decir, analizar la capacidad de cada muestra para reaccionar al entrar en contacto con *prills* de nitrato de amonio. Sin embargo, la granulometría lograda durante la perforación es demasiado gruesa para este propósito. Por lo tanto, se requiere acondicionar las muestras extraídas del *cutting* para obtener una granulometría más fina y homogénea, eliminando vacíos y asegurando una superficie de contacto óptima entre las partículas de roca, y entre la roca y el nitrato durante el ensayo.

Las muestras de *cutting* se sometieron a tratamiento mecánico para obtener un tamaño de grano de 1500 micrones (1,5 mm). Este proceso se llevó a cabo en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Minas de la Universidad Católica del Norte (UCN). Además, se solicitó reducir aún más una porción de cada muestra hasta obtener una granulometría de 100 micrones (0,1 mm), con el objetivo de conservarlas para posibles análisis mineralógicos mediante DRX o QEMSCAN.

Una vez finalizada la preparación mecánica de las muestras, se transportaron a la planta de Enaex Río Loa, Calama, lugar donde se realizan los ensayos de reactividad y *sleep time*.

6.5. Resultados ensayos de reactividad

El análisis de reactividad tiene como objetivo identificar las áreas del macizo rocoso que son más propensas a reaccionar con los explosivos utilizados en la mina. Se puede conocer la capacidad de reacción de una muestra a través de ensayos en laboratorio, donde la roca preparada mecánicamente se pone en contacto con nitrato de amonio sobre una fuente de calor.

La Figura 6.8 corresponde al montaje y desarrollo del ensayo asociado a la muestra de Falla Magnetita Oeste (MW) CA435135-265. Del total de muestras, este ensayo en particular fue el

que alcanzó el valor de intensidad de reacción mas crítico ($T_{max}/T_{iRx}=3,3$), valor que refleja la baja temperatura a la que se evidenció el inicio de la reacción (60°C) y la alta temperatura alcanzada (195°C).

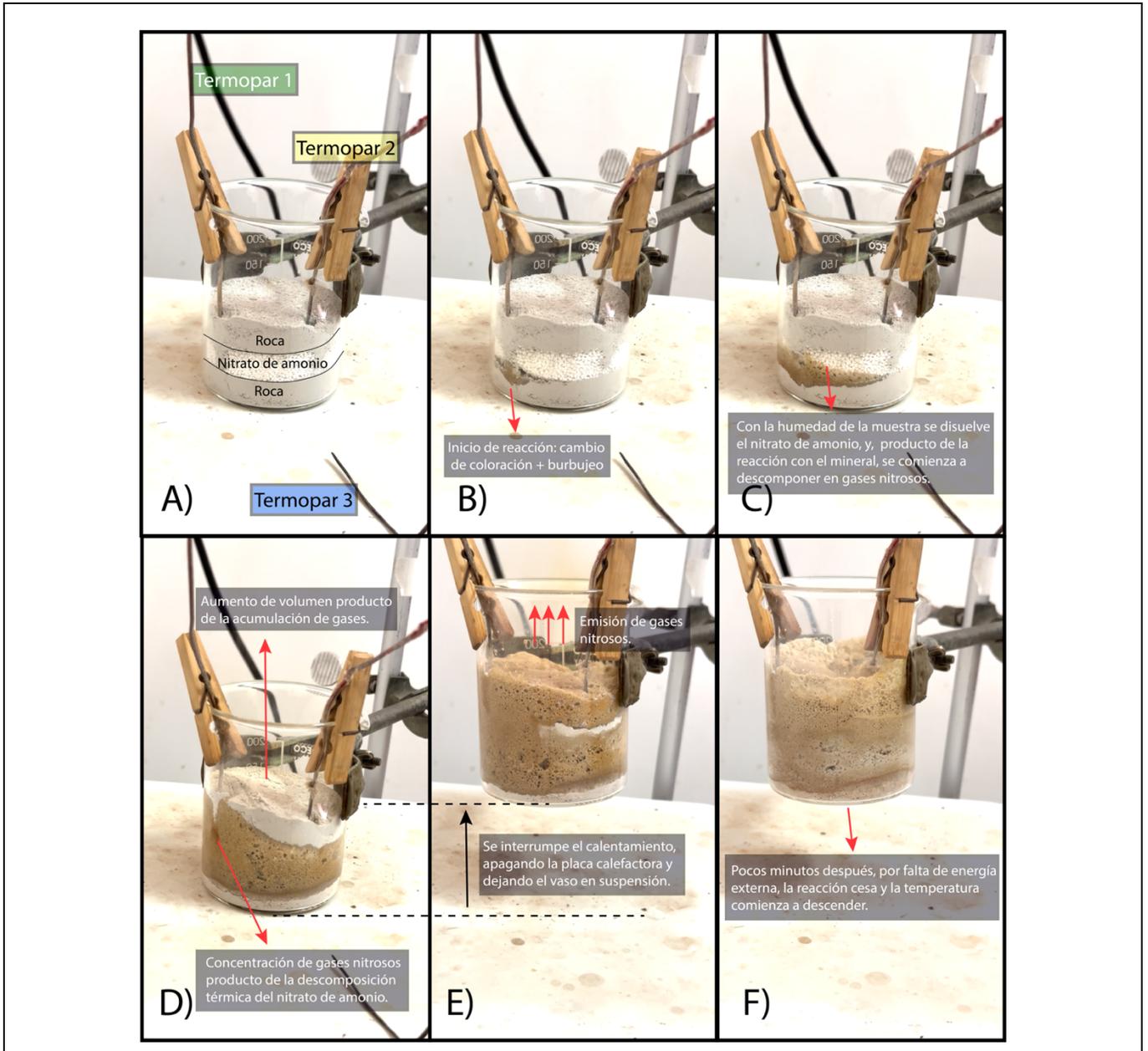


Figura 6.11: Ensayo de reactividad para la muestra CA435135-265. En orden cronológico: A) Identificación de termopares para medición de temperatura. B) Inicio de la reacción. C) Disolución y descomposición del nitrato de amonio. D) Concentración de gases nitrosos (solución roja) y aumento de volumen. E) Interrupción del calentamiento y emisión de gases. F) Término de la reacción y descenso de la temperatura.

A continuación, se explica el desarrollo del ensayo de reactividad para la muestra de MW CA435135-265:

- a) La primera imagen (Figura 6.11A) muestra el montaje del ensayo de reactividad. El nitrato de amonio en formato *prill* se dispone como una capa entre la muestra de roca triturada, simulando la disposición de un pozo de tronadura al ser cargado con el explosivo. Para la medición de temperatura se utilizan tres termopares, el primero registra la temperatura en el fondo del vaso de precipitado, el segundo termopar solamente llega hasta la interfaz roca-nitrato, y el tercero mide la temperatura directamente sobre la placa calefactora. Encendida la placa calefactora, se espera hasta que se visualicen indicios de reacción.
- b) En este ensayo, alcanzados los 60 °C (medido en el termopar 2) se observa un leve quiebre de pendiente en el gráfico tiempo vs temperatura, acompañado de un cambio de coloración de gris a pardo anaranjado y leve burbujeo que indican el comienzo de la reacción entre los minerales de la roca y el nitrato de amonio (Figura 6.11B).
- c) Durante este proceso, el nitrato de amonio se disuelve con la humedad presente en la muestra, y simultáneamente comienza a descomponerse en gases nitrosos como resultado de la reacción con minerales sulfurados (Figura 6.11C). Es importante destacar que la descomposición térmica del nitrato de amonio ocurre típicamente a temperaturas alrededor de los 170°C, pero en presencia de sulfuros, esta descomposición puede ocurrir a temperaturas más bajas, incluso tan bajas como 25°C.
- d) Mas avanzada la reacción, llega un punto en el que dentro del vaso de precipitado se concentran gases nitrosos producto de la descomposición térmica del nitrato de amonio (Figura 6.11D). La acumulación de estos gases también genera un evidente aumento de volumen.
- e) Luego, se interrumpe el calentamiento, apagando la placa calefactora y dejando el vaso de precipitado en suspensión para que no siga aportando calor al sistema (Figura 6.11E). En la parte superior de la imagen se observa la emisión de gases nitrosos, también llamados “humos rojos”.
- f) Pocos minutos después, se observa que la reacción cesa y la temperatura comienza a descender. Este comportamiento se denomina reacción no autosostenida (NAS), la reacción cesa por falta de energía externa. En otras palabras, la placa calefactora no suministra suficiente energía para mantener la reacción en curso, por lo tanto, cesa a pesar de que sigan presentes los componentes necesarios para la reacción (Figura 6.11F).

Los ensayos de reactividad realizados a las 18 muestras (Tabla 6.4) revelaron que el 100% de ellas, independiente de su litología, presentaron una reacción no autosostenida (NAS) siguiendo un patrón de reacción muy similar al descrito anteriormente. Es importante destacar que la probabilidad de que se observen signos de reacción en condiciones reales, específicamente en un pozo previamente categorizado como NAS en el ensayo de reactividad, es muy baja en comparación con las reacciones autosostenidas (AS). En las reacciones autosostenidas, la reacción continúa hasta que uno de los reactivos limitantes, ya sea el nitrato de amonio o los sulfuros, se agota por completo. Esto se debe a que, en una reacción autosostenida, la generación de energía en forma de calor supera la tasa de pérdida de calor, lo que permite que la reacción se mantenga de manera continua, incluso si se interrumpe el suministro de temperatura.

Tabla 6.4: Resultados de ensayos de reactividad por muestra.

| Código muestra | Pozo | Unidad | Tipo de reacción | Ti Rx (°C) | Tmáx Rx (°C) | Tmáx Rx/Ti Rx |
|----------------|------|-------------------|------------------|------------|--------------|---------------|
| CA120169-223 | 223 | Intrusivo central | NAS | 79,8 | 150,2 | 1,9 |
| CA120169-1109 | 1109 | Intrusivo central | NAS | 82,3 | 148,9 | 1,8 |
| CA120169-1111 | 1111 | Intrusivo central | NAS | 59,8 | 147,8 | 2,5 |
| CA120169-1211 | 1211 | Intrusivo central | NAS | 62,9 | 148,0 | 2,4 |
| CA120169-1107 | 1107 | Baja ley | NAS | 68,2 | 144,5 | 2,1 |
| CA120169-1206 | 1206 | Intrusivo central | NAS | 75,5 | 163,5 | 2,2 |
| CA120169-203 | 203 | Diseminado | NAS | 61,4 | 159,0 | 2,6 |
| CA120169-1007 | 1007 | Brechoso | NAS | 78,9 | 158,2 | 2,0 |
| CA120169-1105 | 1105 | Brechoso | NAS | 88,3 | 159,0 | 1,8 |
| CA120169-1103 | 1103 | Baja ley | NAS | 80,1 | 173,0 | 2,2 |
| CA120169-1104 | 1104 | Baja ley | NAS | 90,9 | 202,6 | 2,2 |
| CA120169-210 | 210 | Baja ley | NAS | 69,2 | 133,8 | 1,9 |
| CA435135-1129 | 1129 | Intrusivo central | NAS | 71,3 | 172,0 | 2,4 |
| CA435135-1130 | 1130 | Intrusivo central | NAS | 68,3 | 145,7 | 2,1 |
| CA435135-1134 | 1134 | Falla MW | NAS | 72,6 | 175,4 | 2,4 |
| CA435135-265 | 265 | Falla MW | NAS | 59,8 | 195,0 | 3,3 |
| CA435135-1043 | 1043 | APR | NAS | 74,8 | 145,1 | 1,9 |
| CA435135-1531 | 1531 | APR | NAS | 102,9 | 164,7 | 1,6 |

La Figura 6.12 muestra el gráfico tiempo vs temperatura obtenido para una muestra de Intrusivo Central, la Figura 6.13 para Baja Ley, la Figura 6.14 para Diseminado, Figura 6.15 para Brechoso, Figura 6.16 para Andesita Parda Rojiza (APR) y el gráfico de la Figura 6.17 evidencia la reactividad de la muestra de Falla Magnetita Oeste (MW) cuyo ensayo de reactividad se explicó a partir de la Figura 6.11. Todos los gráficos muestran un comportamiento no autosostenido (NAS) y se indican las temperaturas de inicio de reacción, momento en el que se retira la placa calefactora, y la temperatura máxima alcanzada.

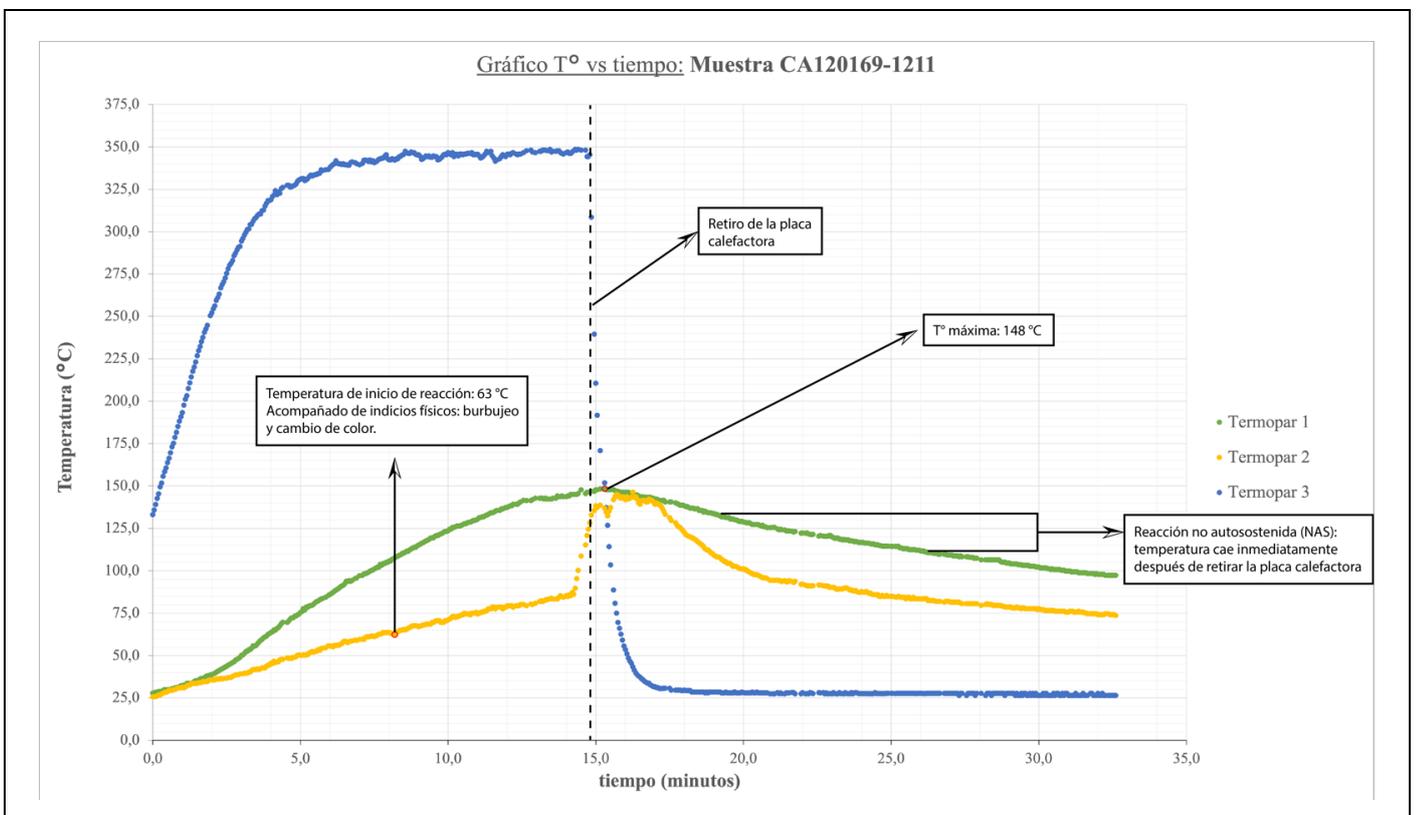


Figura 6.12: Gráfico tiempo vs temperatura para la muestra de Intrusivo Central CA120169-1211.

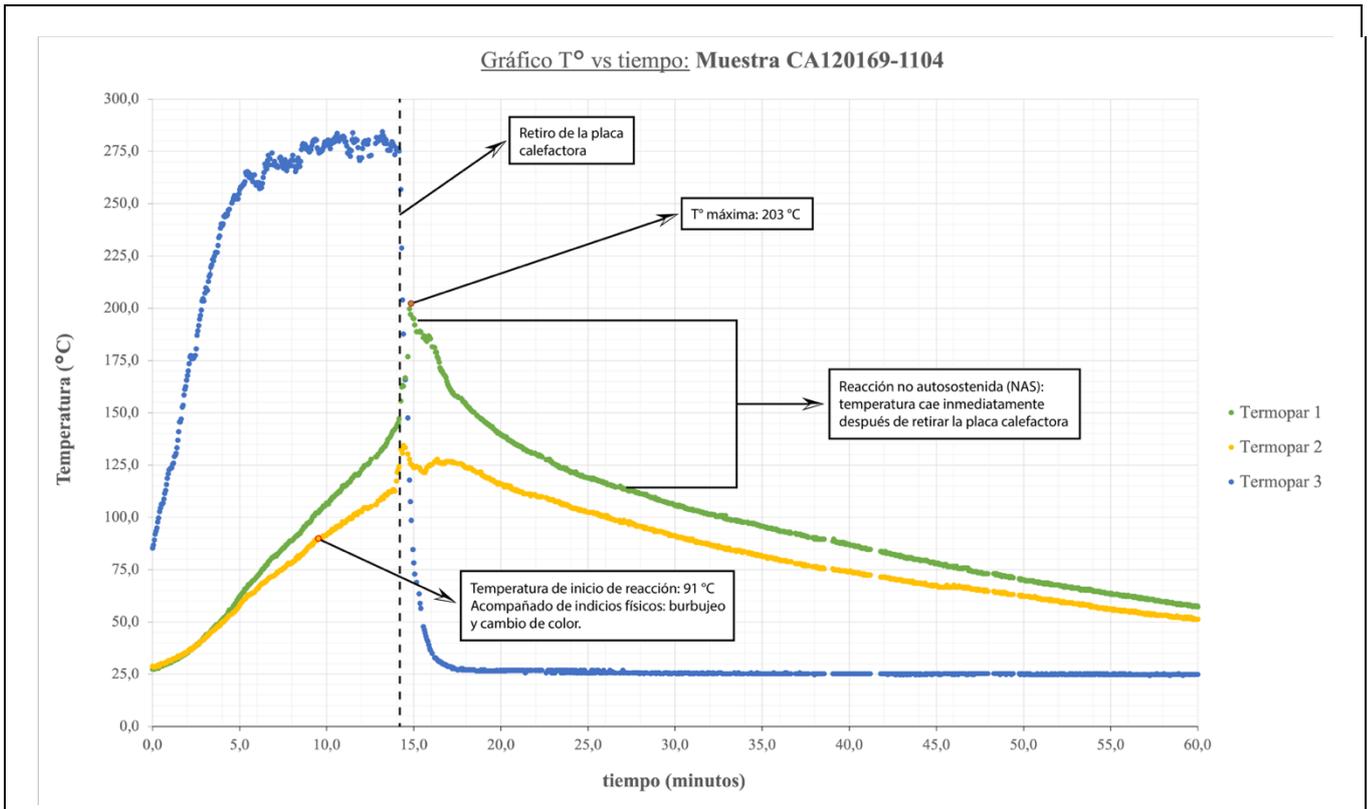


Figura 6.13: Gráfico tiempo vs temperatura para la muestra de Baja Ley CA120169-1104.

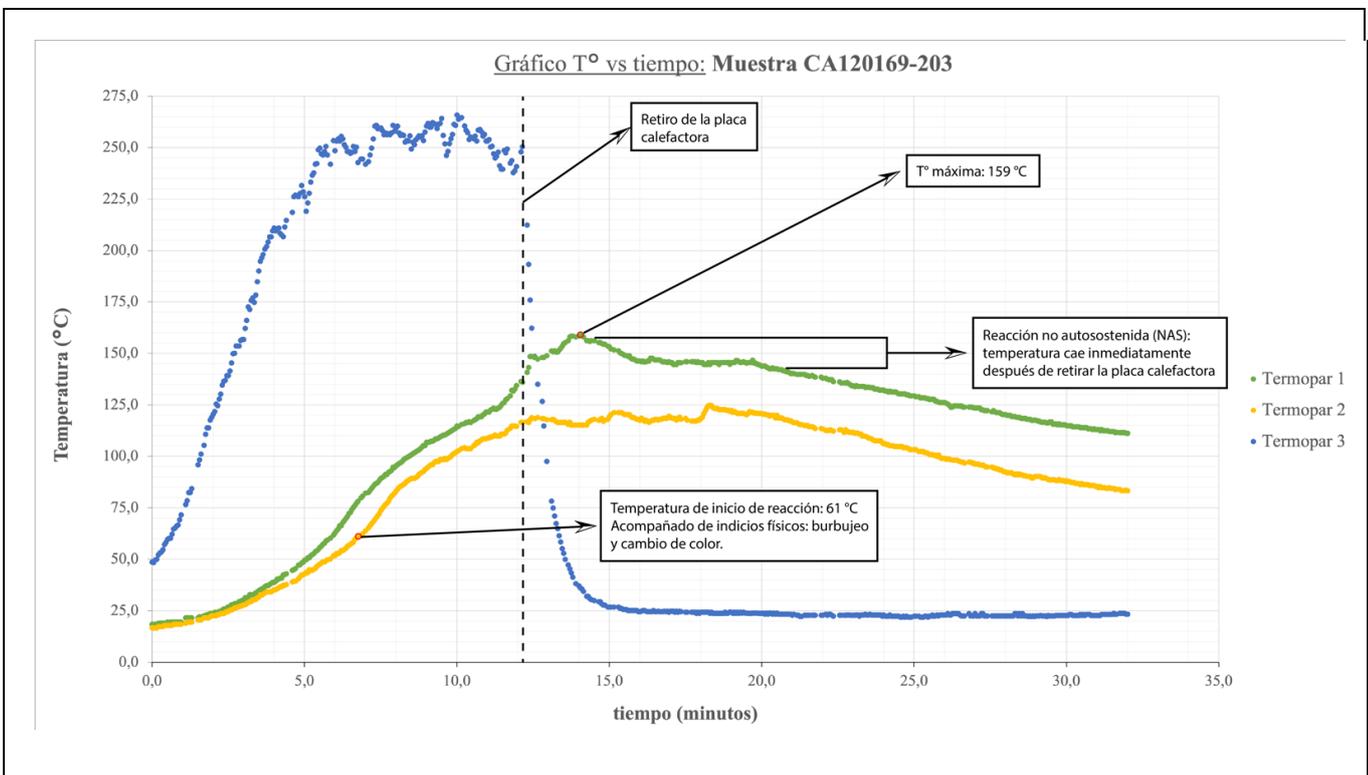


Figura 6.14: Gráfico tiempo vs temperatura para la muestra de Diseminado CA120169-203.

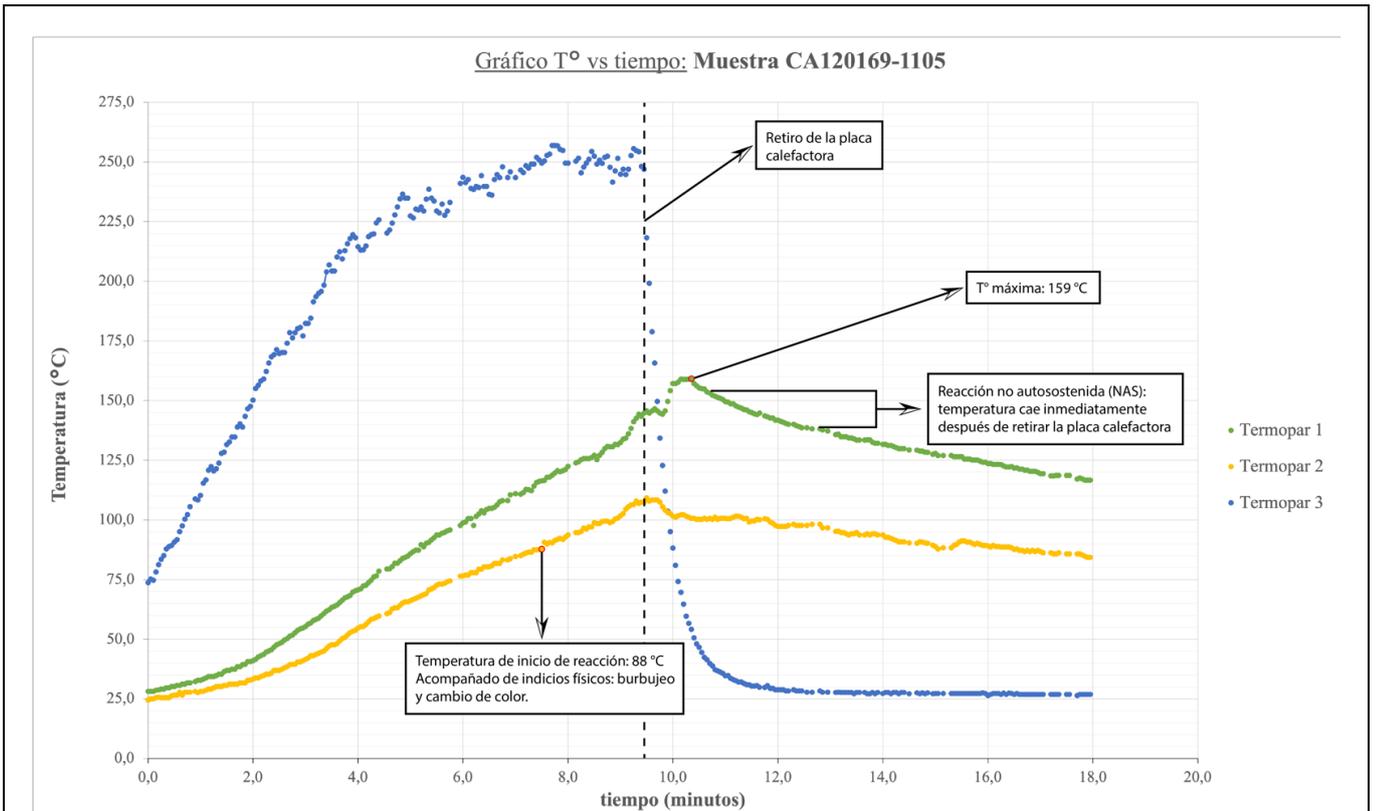


Figura 6.15: Gráfico tiempo vs temperatura para la muestra de Brechoso CA120169-11105.

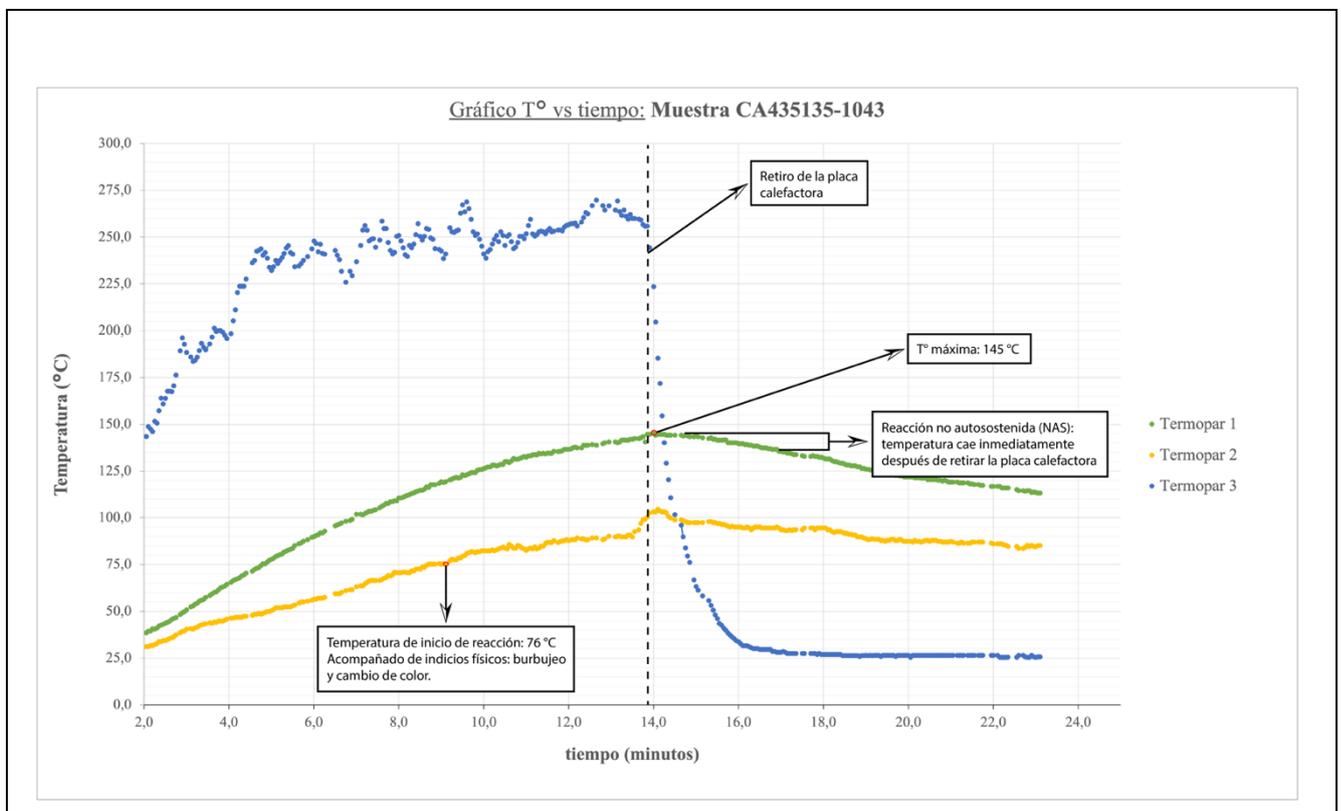


Figura 6.16: Gráfico tiempo vs temperatura para la muestra de APR CA435135-1043.

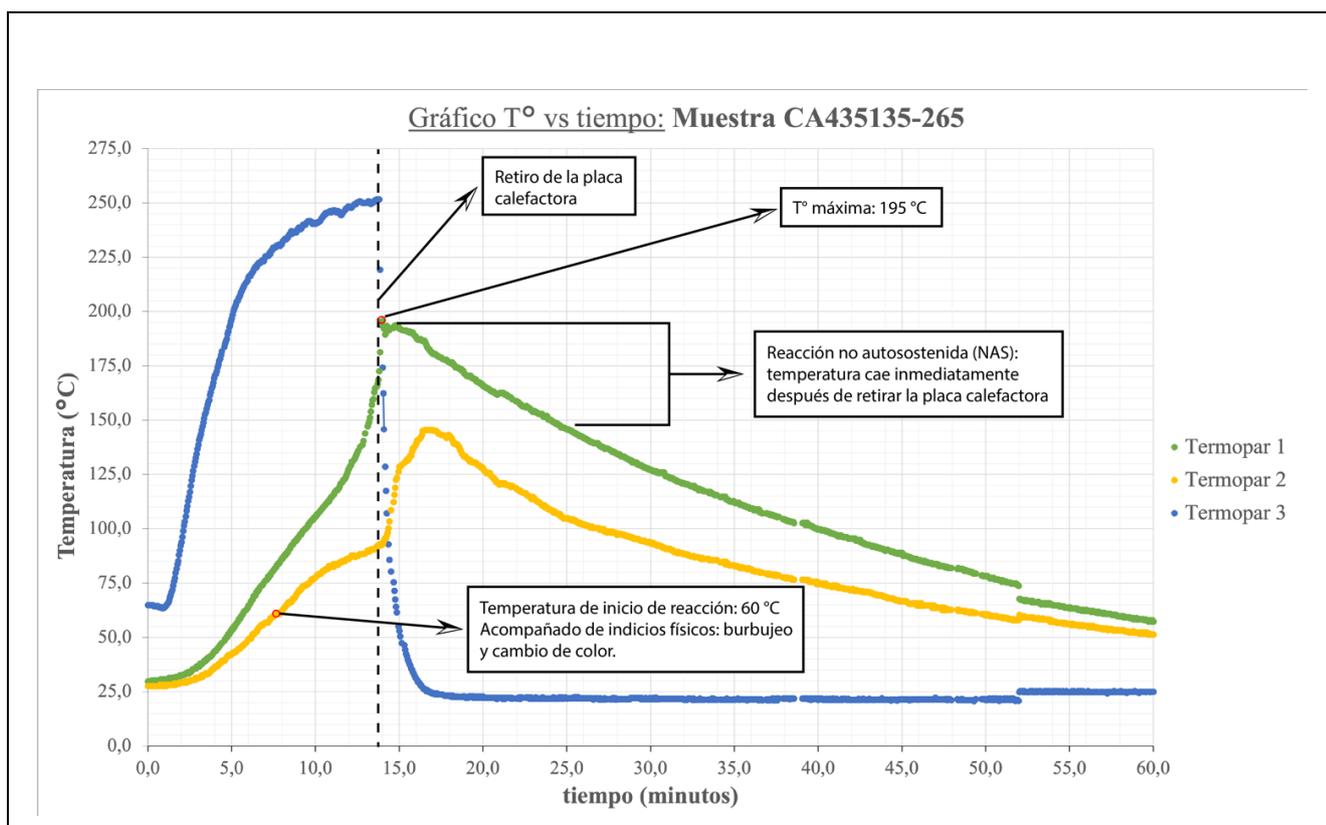


Figura 6.17: Gráfico tiempo vs temperatura para la muestra de Falla Magnetita Oeste CA435135-265.

Con el fin de brindar una mejor comprensión de los resultados de reactividad para las demás muestras, se detallan los resultados de los ensayos de reactividad por malla:

Resultados para las muestras de la malla CA435135

Del total de muestras (6), la muestra CA435135-265 (Falla Magnetita Oeste) reaccionó a la temperatura más baja, con una temperatura de inicio de reacción ($T_{i\text{ Rx}}$) de 59,8 °C. En la misma muestra se alcanzó la temperatura máxima mas elevada, con 195 °C (Tabla 6.5).

Tabla 6.5: Resultados de ensayos de reactividad para muestras proveniente de la malla CA435135.

| Código muestra | Pozo | Unidad | Tipo de reacción | Ti Rx (°C) | Tmáx Rx (°C) | Tmáx Rx/Ti Rx |
|----------------|------|-------------------|------------------|------------|--------------|---------------|
| CA435135-1129 | 1129 | Intrusivo central | NAS | 71,3 | 172,0 | 2,4 |
| CA435135-1130 | 1130 | Intrusivo central | NAS | 68,3 | 145,7 | 2,1 |
| CA435135-1134 | 1134 | Falla MW | NAS | 72,6 | 175,4 | 2,4 |
| CA435135-265 | 265 | Falla MW | NAS | 59,8 | 195,0 | 3,3 |
| CA435135-1043 | 1043 | APR | NAS | 74,8 | 145,1 | 1,9 |
| CA435135-1531 | 1531 | APR | NAS | 102,9 | 164,7 | 1,6 |

Por otro lado, la relación entre la temperatura máxima de reacción y la temperatura de inicio ($T_{máx}/T_i$), parámetro conocido como intensidad de la reacción (μRx), se mantuvo en el rango de criticidad baja ($1.0 \leq \mu\text{Rx} < 2.0$) para las muestras de APR, intermedia ($2.0 \leq \mu\text{Rx} < 3.0$) para el Intrusivo Central, y se alcanzó una intensidad de reacción alta en la Falla MW ($3.0 \leq \mu\text{Rx} < 4.5$). Estos resultados numéricos coinciden con las observaciones experimentales, indicando que en su mayoría fueron reacciones poco exotérmicas, con velocidades de reacción bajas a intermedias, y un burbujeo suave sin violencia. Sin embargo, la muestra CA435135-265 (Falla Magnetita Oeste), cuya reacción fue representada en la Figura 6.8, presentó una reacción un poco mas violeta, con bastante burbujeo y emisiones de gases nitrosos.

Para esta malla, la Figura 6.18 muestra que la zona comprendida entre la Falla Magnetita Oeste y la Falla Macizo Oeste presenta la intensidad de reacción más alta.

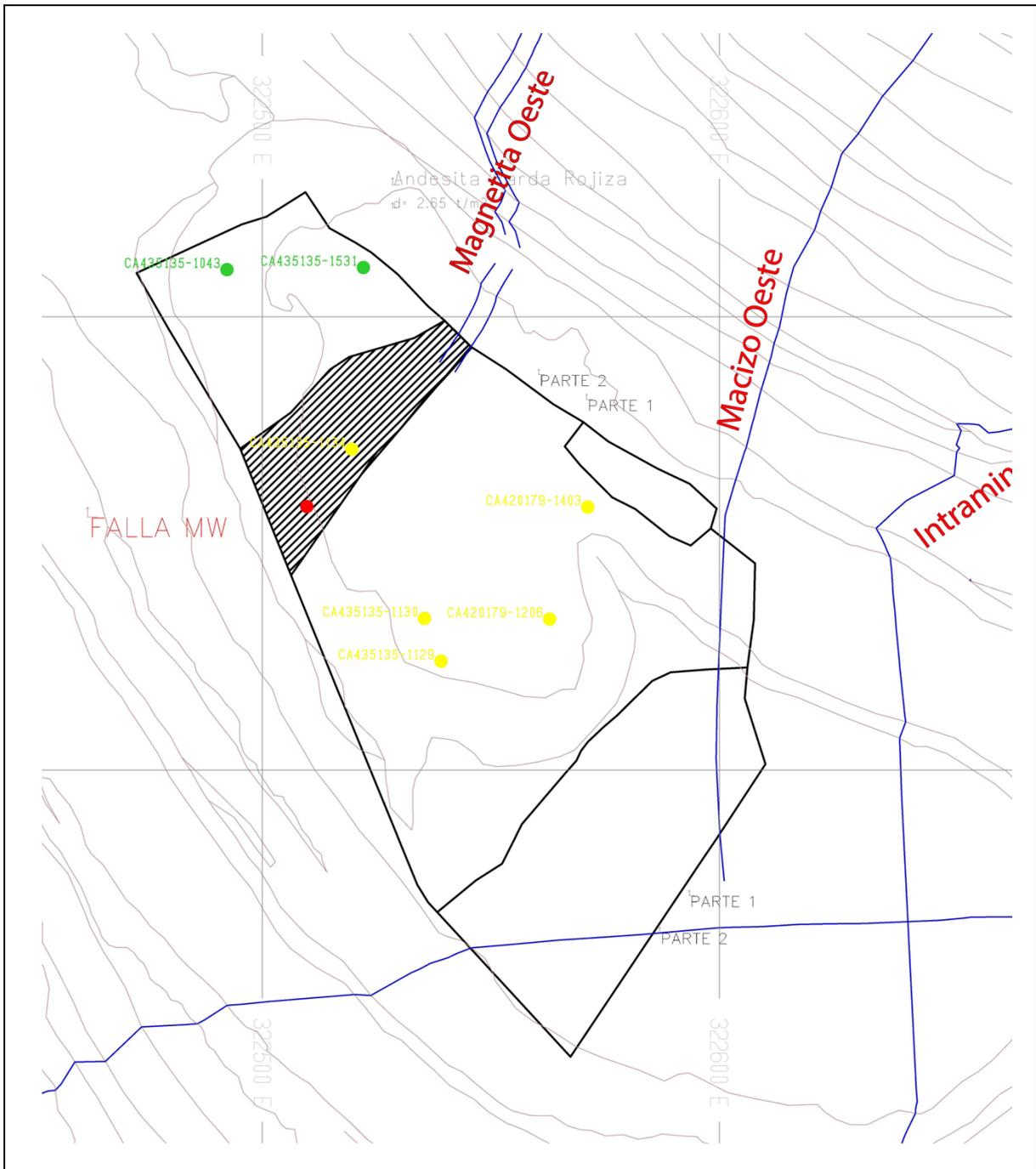


Figura 6.18: Vista en planta de malla 435135. En líneas azules las fallas principales de la zona. La zona achurada corresponde a la zona afectada por la falla magnetita oeste. En círculos se presentan la ubicación de las muestras y su respectivo resultado de reactividad; en verde intensidad baja, amarillo intensidad intermedia y rojo intensidad extrema.

Resultados para las muestras de la malla CA120169

Del total de muestras (12), la muestra CA120169-1111 (Intrusivo Central) y la muestra CA120169-203 (Diseminado) reaccionaron a las temperaturas más bajas, con una temperatura de inicio de reacción ($T_{i\text{ Rx}}$) de 59,8 °C y 61,4 °C, respectivamente (Tabla 6.6).

Tabla 6.6: Resultados de ensayos de reactividad para muestras proveniente de la malla CA120169.

| Código muestra | Pozo | Unidad | Tipo de reacción | Ti Rx (°C) | Tmáx Rx (°C) | Tmáx Rx/Ti Rx |
|----------------|------|-------------------|------------------|------------|--------------|---------------|
| CA120169-223 | 223 | Intrusivo central | NAS | 79,8 | 150,2 | 1,9 |
| CA120169-1109 | 1109 | Intrusivo central | NAS | 82,3 | 148,9 | 1,8 |
| CA120169-1111 | 1111 | Intrusivo central | NAS | 59,8 | 147,8 | 2,5 |
| CA120169-1211 | 1211 | Intrusivo central | NAS | 62,9 | 148,0 | 2,4 |
| CA120169-1107 | 1107 | Baja ley | NAS | 68,2 | 144,5 | 2,1 |
| CA120169-1206 | 1206 | Intrusivo central | NAS | 75,5 | 163,5 | 2,2 |
| CA120169-203 | 203 | Diseminado | NAS | 61,4 | 159,0 | 2,6 |
| CA120169-1007 | 1007 | Brechoso | NAS | 78,9 | 158,2 | 2,0 |
| CA120169-1105 | 1105 | Brechoso | NAS | 88,3 | 159,0 | 1,8 |
| CA120169-1103 | 1103 | Baja ley | NAS | 80,1 | 173,0 | 2,2 |
| CA120169-1104 | 1104 | Baja ley | NAS | 90,9 | 202,6 | 2,2 |
| CA120169-210 | 210 | Baja ley | NAS | 69,2 | 133,8 | 1,9 |

Las temperaturas más altas se alcanzaron en las muestras CA120169-1103 y CA120169-1104 de Baja Ley, las cuales presentaron una temperatura máxima de reacción ($T_{máx}$) de 173°C y 202,6 °C, respectivamente.

Por otro lado, la relación entre la temperatura máxima de reacción y la temperatura de inicio ($T_{máx}/T_i$), parámetro conocido como intensidad de la reacción (μRx), se mantuvo en el rango de criticidad baja ($1.0 \leq \mu\text{Rx} < 2.0$) a intermedia ($2.0 \leq \mu\text{Rx} < 3.0$). Estos resultados numéricos coinciden con las observaciones experimentales, indicando que las reacciones fueron poco exotérmicas, con velocidades de reacción bajas a intermedias, y un burbujeo suave sin violencia.

Obtenidos y analizados los resultados del análisis de reactividad, se procedió a ubicar los pozos muestreados junto a las estructuras mapeadas en el software MinePlan 3D. En la Figura 6.19 se representan los resultados finales para la malla CA120169. En esta figura se pueden visualizar las fallas principales, secundarias y diaclasas identificadas mediante el escáner, así como los resultados de reactividad para las 12 muestras de esta zona. Este primer modelo proporciona información importante sobre la distribución espacial de las estructuras geológicas y su posible influencia en la reactividad de las rocas. Aunque no se observa una correlación clara en la figura, el análisis detallado de estos datos puede revelar patrones o tendencias más sutiles que ayuden a comprender mejor el comportamiento reactivo de las rocas en esta zona.

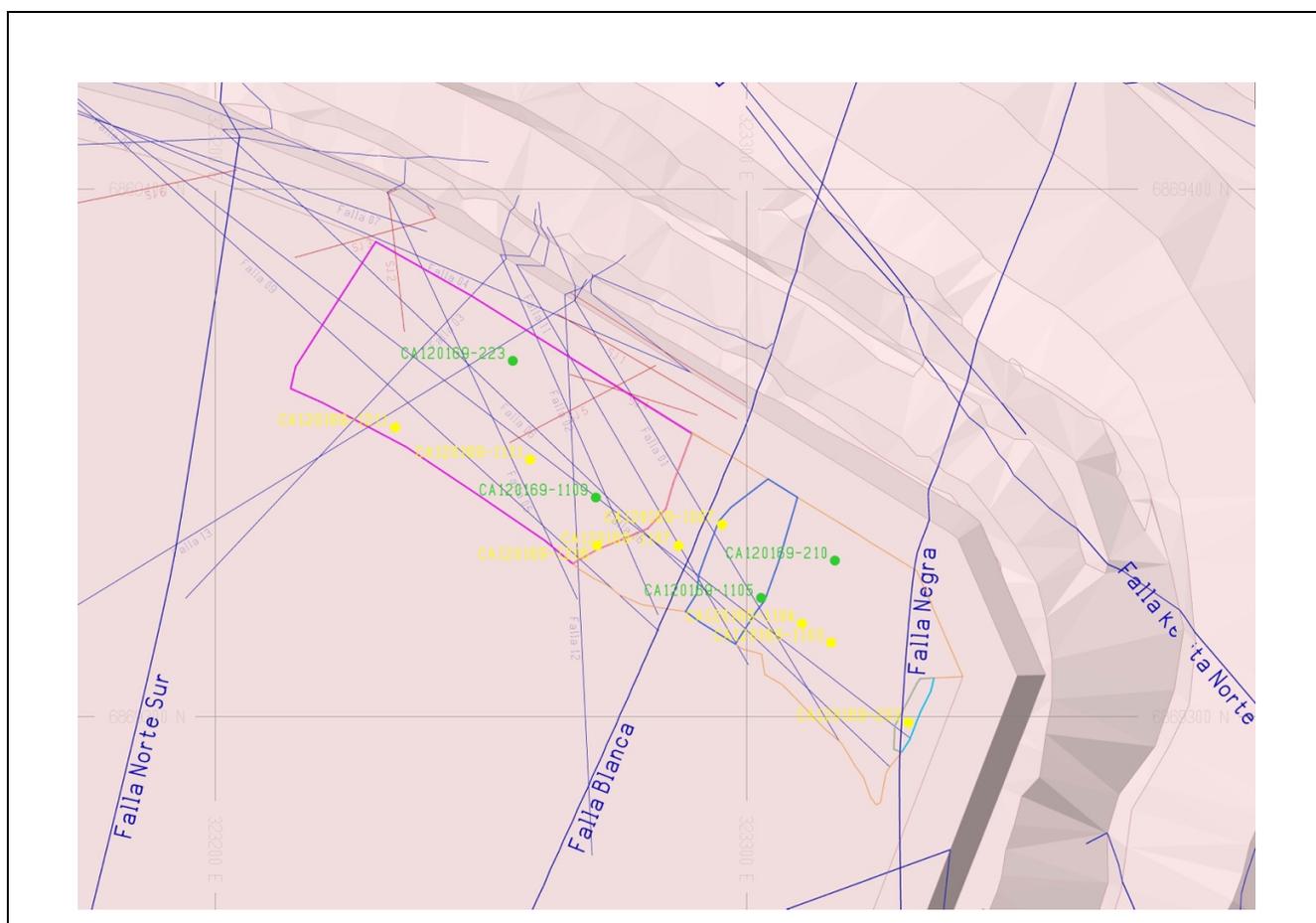


Figura 6.19: Vista en planta de malla CA120169 con información estructural y ubicación de pozos analizados.

Traza de fallas principales en azul, fallas obtenidas por escáner en líneas azules delgadas y diaclasas en líneas rojas. En círculos se presentan la ubicación de las muestras y su respectivo resultado de reactividad; en verde intensidad baja y amarillo intensidad intermedia.

6.6. Resultados ensayos *sleep time*

El ensayo *sleep time* se utiliza para estimar el tiempo que una muestra de roca puede permanecer sin reaccionar en contacto directo con el explosivo.

El "tiempo de residencia" corresponde al período de tiempo que los pozos de tronadura permanecen cargados antes de su detonación. La práctica de dejar los pozos cargados durante uno o varios días se conoce como "adelanto en el carguío" y permite a las mineras aprovechar al máximo sus equipos y controlar la producción al cargar los pozos uno o varios días antes para luego detonarlos de manera simultánea.

La recomendación de adelanto en zonas con alta abundancia de pirita, o condiciones potencialmente reactivas, se determina precisamente en base a los ensayos de *sleep time* en el laboratorio, donde se obtiene experimentalmente el número de días que la muestra "resiste" sin reaccionar.

En presencia de rocas reactivas, estos datos son muy útiles. Por ejemplo, si nos encontramos en una zona con abundante pirita y condiciones fisicoquímicas favorables para la reacción, es muy probable que la roca del pozo de tronadura reaccione poco tiempo después de cargarlo con explosivos. En este caso, se recomendaría un adelanto de pocas horas o incluso se podría prohibir el adelanto debido a la potencial reactividad de la zona al entrar en contacto con nitrato de amonio. Por otro lado, si nos encontramos en una zona sin mineralización metálica de sulfuros, o en zonas donde abundan los carbonatos y el pH no es ácido, es probable que los resultados de *sleep time* indiquen varios días, es decir, que no habría problemas para adelantar el carguío por 2 o más días.

En este estudio, ninguna de las 18 muestras presentó reacción autosostenida, lo cual es una condición necesaria para que los resultados de *sleep time* sean representativos y puedan ser utilizados como recomendación para el adelanto o el tipo de explosivo a utilizar.

A pesar de esto, se llevó a cabo el ensayo *sleep time* como método adicional para evaluar la reactividad de las muestras y tener una estimación del tiempo asociado a la reacción de cada una. Es importante recordar que, en el ensayo de reactividad realizado previamente, el sistema roca-nitrato de amonio se somete directamente a una fuente de calor (300°C), mientras que el

ensayo de *sleep time* se realiza a temperaturas reales de la mina, en este caso, a 30°C. A continuación, se presentan los resultados de este ensayo (Tabla 6.7).

Tabla 6.7: Resultados de ensayos *sleep time* para muestras proveniente de la malla CA120169.

| Código muestra | Pozo | Unidad | Tipo de reacción | Ti Rx (°C) | Tmáx Rx (°C) | Tmáx Rx/Ti Rx | ST Exp.* | ST Rec.** |
|----------------|------|-------------------|------------------|------------|--------------|---------------|----------|-----------|
| CA120169-223 | 223 | Intrusivo central | NAS | 79,8 | 150,2 | 1,9 | 6,5 | 1,6 |
| CA120169-1109 | 1109 | Intrusivo central | NAS | 82,3 | 148,9 | 1,8 | 6 | 1,5 |
| CA120169-1111 | 1111 | Intrusivo central | NAS | 59,8 | 147,8 | 2,5 | 6,5 | 1,6 |
| CA120169-1211 | 1211 | Intrusivo central | NAS | 62,9 | 148,0 | 2,4 | 5,5 | 1,4 |
| CA120169-1107 | 1107 | Baja ley | NAS | 68,2 | 144,5 | 2,1 | | |
| CA120169-1206 | 1206 | Intrusivo central | NAS | 75,5 | 163,5 | 2,2 | | |
| CA120169-203 | 203 | Diseminado | NAS | 61,4 | 159,0 | 2,6 | 7,5 | 1,9 |
| CA120169-1007 | 1007 | Brechoso | NAS | 78,9 | 158,2 | 2,0 | | |
| CA120169-1105 | 1105 | Brechoso | NAS | 88,3 | 159,0 | 1,8 | | |
| CA120169-1103 | 1103 | Baja ley | NAS | 80,1 | 173,0 | 2,2 | | |
| CA120169-1104 | 1104 | Baja ley | NAS | 90,9 | 202,6 | 2,2 | 6,5 | 1,6 |
| CA120169-210 | 210 | Baja ley | NAS | 69,2 | 133,8 | 1,9 | | |
| CA435135-1129 | 1129 | Intrusivo central | NAS | 71,3 | 172,0 | 2,4 | 6 | 1,25 |
| CA435135-1130 | 1130 | Intrusivo central | NAS | 68,3 | 145,7 | 2,1 | | |
| CA435135-1134 | 1134 | Falla MW | NAS | 72,6 | 175,4 | 2,4 | 8 | 2 |
| CA435135-265 | 265 | Falla MW | NAS | 59,8 | 195,0 | 3,3 | 6 | 1,5 |
| CA435135-1043 | 1043 | APR | NAS | 74,8 | 145,1 | 1,9 | | |
| CA435135-1531 | 1531 | APR | NAS | 102,9 | 164,7 | 1,6 | | |

*ST Exp.: *Sleep time* experimental; tiempo que se mantuvo experimentalmente la muestra sin reaccionar, a 30°C.

**ST Rec.: *Sleep time* para recomendación; tiempo máximo que se recomienda mantener el explosivo en contacto con la muestra de roca. Se obtiene dividiendo el *sleep time* experimental en 4 (factor de seguridad).

Los resultados indican que, del subconjunto de 9 muestras seleccionadas para *sleep time*, todas reaccionaron en contacto directo con el explosivo, aproximadamente 6-7 días después de iniciado el ensayo a 30°C (ST Exp.).

Si las muestras hubieran mostrado reacción autosostenida en el ensayo de reactividad, la recomendación para la minera habría sido que las muestras seleccionadas tienen la capacidad de reaccionar en un período de 1-2 días. Esto se debe a que el ensayo de *sleep time* realizado en el laboratorio no replica todas las condiciones presentes en la mina, y se utiliza un factor de seguridad de 4 para simular todas las variables composicionales y ambientales que contribuyen a la oxidación de los sulfuros.

6.7. Análisis de resultados

En este capítulo, se llevará a cabo un análisis de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos y se plantearán nuevas hipótesis basadas en el conocimiento actual sobre rocas reactivas y la información proporcionada hasta ahora en este informe.

En primer lugar, se analizan los resultados del ensayo de reactividad en laboratorio. Aunque ninguna de las muestras presentó reacción autosostenida ni alcanzó intensidades de reacción elevadas, se identificó la presencia de pirita y otros sulfuros en la unidad Intrusivo Central (IC). Sin embargo, es importante considerar que las condiciones de laboratorio pueden no ser completamente representativas de las condiciones reales en la mina. Una hipótesis que explorar es que las muestras podrían requerir un mayor grado de meteorización para liberar los productos de oxidación necesarios para la reacción. La oxidación de la pirita ocurre en presencia de oxígeno y agua. A medida que la pirita se expone al aire y al agua, las reacciones químicas pueden llevar a la formación de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y a la liberación de iones de hierro (Fe^{2+}) en solución. Ambos productos de su meteorización (ácido y iones de hierro) son los componentes que teóricamente pueden reaccionar exotérmicamente en contacto con nitrato de amonio. Otra posibilidad, es que la presencia de carbonatos podría estar desempeñando un papel en la inhibición o retardo de la reacción entre los sulfuros y los nitratos.

En cuanto a los resultados de las mallas CA120169 y CA435135, se observa una falta de correlación entre la ubicación y orientación de las estructuras identificadas y los resultados de los análisis de reactividad. Sin embargo, se destaca la zona entre la Falla Magnetita Oeste y la Falla Macizo Oeste como la de mayor intensidad de reacción dentro de la malla CA435135. Una hipótesis para considerar es que la presencia de estas fallas principales podría estar proporcionando condiciones propicias para la interacción entre los sulfuros y los agentes

oxidantes presentes en el medio, lo que potencialmente aumentaría la reactividad de las rocas en esa área específica.

Es importante tener en cuenta que las condiciones ambientales, como la temperatura, la humedad y el pH, desempeñan un papel fundamental en la reactividad de las rocas. Aunque en este estudio se realizaron los ensayos a una temperatura constante de 30°C, es necesario considerar que en el entorno real de la mina estas condiciones pueden variar de manera abrupta. Por ejemplo, la temperatura de los pozos estará influenciada por las condiciones climáticas al momento de la medición, lo que podría generar fluctuaciones significativas en la temperatura y acelerar posibles reacciones. Por lo tanto, se plantea la hipótesis de que las condiciones ambientales específicas en la mina podrían aumentar la velocidad de la reacción entre los sulfuros y los agentes oxidantes. En consecuencia, se requeriría la implementación de medidas de control y mitigación en caso de detectar cambios bruscos de temperatura en los pozos o la presencia de afloramientos de aguas ácidas.

Los ensayos de reactividad en laboratorio, incluyendo el análisis *sleep time*, han proporcionado resultados valiosos para evaluar la incompatibilidad química entre las rocas y el nitrato de amonio. Los ensayos determinaron que las muestras analizadas en este estudio resultaron no autosostenidas (NAS).

Se sabe que, al menos la unidad Intrusivo Central (IC), presenta cantidades considerables de pirita (entre 1% - 5% según el mapeo). Según AEISG (2017), estos valores son suficientes para desencadenar reacciones autocatalíticas, violentas y con emisiones de gases nitrosos. A partir de esto, se plantean dos hipótesis que podrían explicar por qué ninguna muestra presentó reacción autosostenida (AS) ni alcanzó intensidades de reacción elevadas:

A) A pesar de que las muestras contenían pirita y otros sulfuros, la roca no estaba lo suficientemente meteorizada ni alterada para liberar al medio los productos de oxidación, que es lo que finalmente reacciona con el nitrato de amonio. Esto implica que las fallas y estructuras identificadas en el mapeo y escáner de banco no influyeron en la oxigenación del macizo rocoso. El aporte de oxígeno es fundamental para iniciar la oxidación de los sulfuros, y se asume generalmente que al menos las zonas por donde pasan las fallas principales tendrían una oxigenación suficiente para oxidar los sulfuros, acidificar el medio

y permitir que los iones de Fe interactúen con el nitrato de amonio para generar el fenómeno de rocas reactivas.

- B) La presencia de carbonatos, debido a su capacidad neutralizante, puede retardar o inhibir la reacción entre los sulfuros y nitratos. En el mapeo de terreno se comprobó la presencia de carbonatos en el IC muestreado al probar la reacción con solución de HCl al 10%. Sin embargo, no se ha cuantificado la abundancia de estos minerales, la cual debería ser muy similar a la cantidad de sulfuros para lograr inhibir su reactividad.

Es fundamental resaltar la relevancia de las reacciones autosostenidas, ya que si se detecta una zona potencialmente reactiva en base a resultados autosostenidos en los ensayos de reactividad, existe la posibilidad de que esta zona cumpla con las condiciones necesarias para la ocurrencia de eventos tales como cambios de color en la superficie (como se observó en el estudio del año 2020), olor a azufre debido a la liberación de H_2S , presencia de pozos burbujeantes con carga explosiva y emisión de humos.

En resumen, los resultados obtenidos en los diferentes ensayos y estudios plantean nuevas interrogantes y posibles hipótesis. Se sugiere investigar la influencia de la meteorización y los carbonatos en la reactividad de las rocas, así como entender las condiciones específicas que las fallas aportarían al macizo rocoso en términos de su potencial reacción. Asimismo, se recomienda continuar evaluando el ensayo *sleep time* como una herramienta complementaria para estimar el tiempo de reacción en condiciones reales de la mina. Estas nuevas perspectivas podrían contribuir a una comprensión más completa de la reactividad de las rocas y proporcionar recomendaciones más precisas para la operación minera.

7. PAUTAS PARA GENERACIÓN DE MODELO DE MACIZO GEOREACTIVO 3D

7.1. Recopilación de información escala mina

El primer paso en la construcción del modelo georeactivo consiste en recopilar toda la información disponible sobre el macizo rocoso en la zona de interés a escala mina. Esto implica reunir datos geológicos, topográficos, hidrogeológicos, geotécnicos y cualquier otra información relevante que pueda influir en la reactividad del macizo. Para iniciar esta etapa, se utilizó la topografía del rajo y el modelo estructural de la mina como punto de partida.

Es fundamental para la construcción del modelo georeactivo incluir los modelos de mineralización y alteración, particularmente aquellos relacionados con la presencia de pirita y sulfuros de hierro y cobre, ya que son variables fundamentales que condicionan la reactividad del macizo rocoso con el nitrato de amonio. Si se dispone de un modelo de bloques de pirita, su incorporación resultaría especialmente valiosa para comprender la reactividad del macizo.

El propósito final de este modelo es integrar la mayor cantidad de información disponible de la mina en un enfoque georeactivo, y actualizarlo periódicamente a medida que se obtengan nuevos datos de mapeo o modelos a corto plazo. De esta manera, será posible generar nuevas zonificaciones que proporcionen información anticipada sobre la potencial reactividad de las futuras zonas a perforar, permitiendo gestionarlas con las debidas pautas de seguridad.

7.2. Levantamiento de información

El segundo paso en la generación del modelo georeactivo consiste en incorporar datos a escala banco o interrampa. Para esto, se llevó a cabo un mapeo geológico de detalle de la pared del polígono a tronar en la malla CA120169 de la Fase 5 Sur de la mina. El objetivo principal de este mapeo fue identificar los rasgos predominantes en términos estructurales y mineralógicos en esa sección específica. Además, se realizó un escaneo láser 3D para obtener una representación detallada de las estructuras y permitir su correlación en el modelo 3D final.

Es importante tener en cuenta que toda la información geológica incorporada en esta etapa tiene como objetivo ser relacionada con la potencial reactividad de la zona. Por lo tanto, resulta indispensable llevar a cabo las etapas de muestreo y realizar los ensayos de reactividad, tal como se ha explicado anteriormente. Estos resultados proporcionarán los datos necesarios para tener un estimado cuantitativo de la potencial reactividad del sector y su relación con las características geológicas presentes.

7.2.1. Escaneo láser

Para complementar la información registrada en terreno, se solicitó a Geomecánica acceso al equipo de escaneo láser que utilizan para actualizar los modelos estructurales y geotécnicos de la mina. El escáner láser Maptek (**Figura 7.1 y 7.2**) contiene una cámara panorámica interna de 147 megapíxeles que permite hacer un barrido continuo de la pared, capturando una nube de puntos de alta resolución que posteriormente se utiliza para generar el levantamiento en 3D.

El escaneo a escala banco proporcionó información detallada sobre las estructuras geológicas presentes en la zona de estudio (malla CA120169), permitiendo identificar fallas, fracturas, discontinuidades y diaclasas. La información obtenida del escáner 3D se interpretó en el programa PointStudio de Maptek, lo cual facilitó la consulta del rumbo y manto para cada estructura detectada en los cinco bancos escaneados.

La Figura 7.3 presenta los datos capturados por el escáner y posteriormente procesados en el software Maptek PointStudio. En el marco de esta investigación, se llevó a cabo un escaneo a escala interampa del talud, abarcando un total de 5 bancos, con especial atención a la zona muestreada correspondiente del banco 135.

Se procedió a identificar todas las estructuras, ya sean fallas o diaclasas, a lo largo del talud, lo que resultó en la identificación de 1298 estructuras (Figura 7.4). Estas estructuras se representaron con colores, donde las zonas rellenas por el mismo color corresponden a estructuras de la misma familia. Por ejemplo, en la Figura 7.5, todas las estructuras coloreadas en verde presentan la misma orientación.



Figura 7.1.: Escáner láser Maptek montado en su trípode, mientras es configurado por asistente geólogo de la mina.



Figura 7.2.: Pantalla del escáner láser Maptek. La pantalla muestra la pared del banco mientras está siendo escaneada.

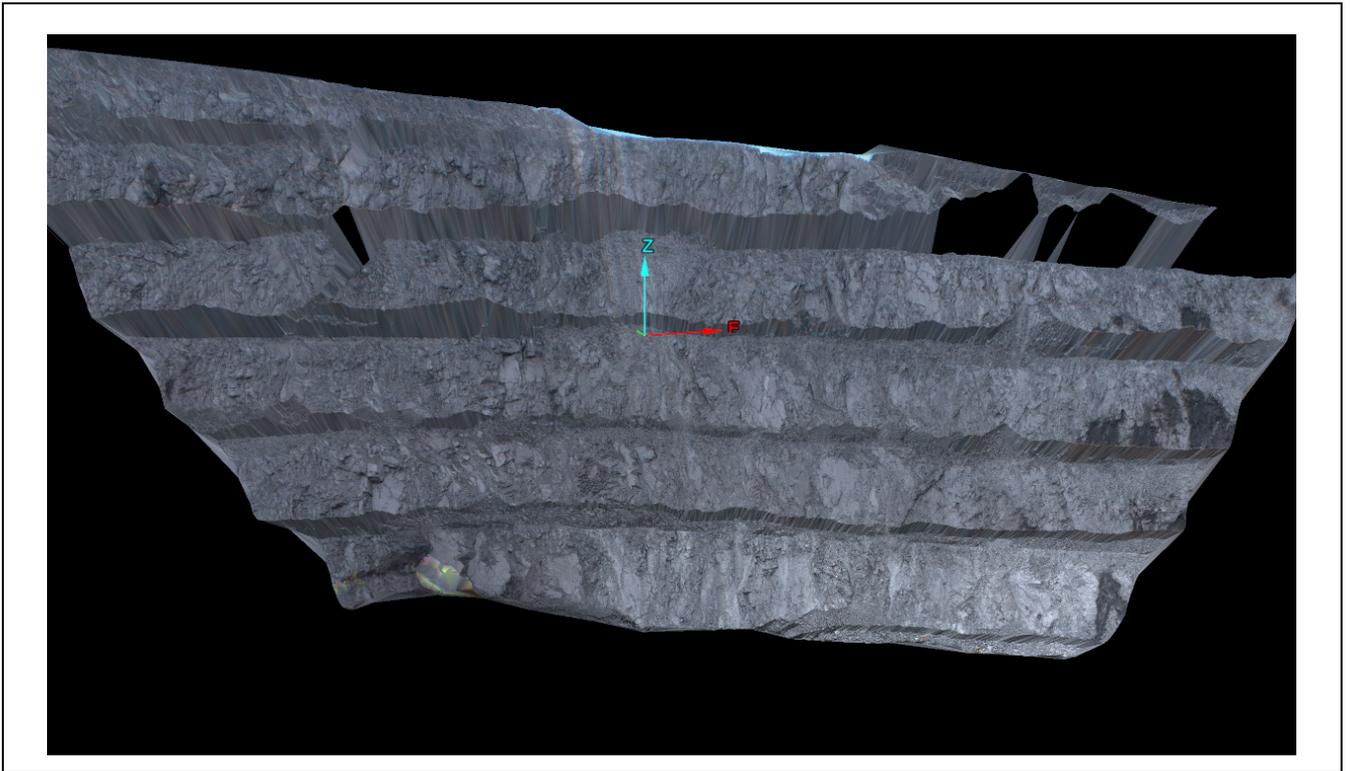


Figura 7.3: Escaneo visualizado en software Mapttek PointStudio.. El escaneo contempla 5 bancos, incluyendo la zona muestreada del banco 135.

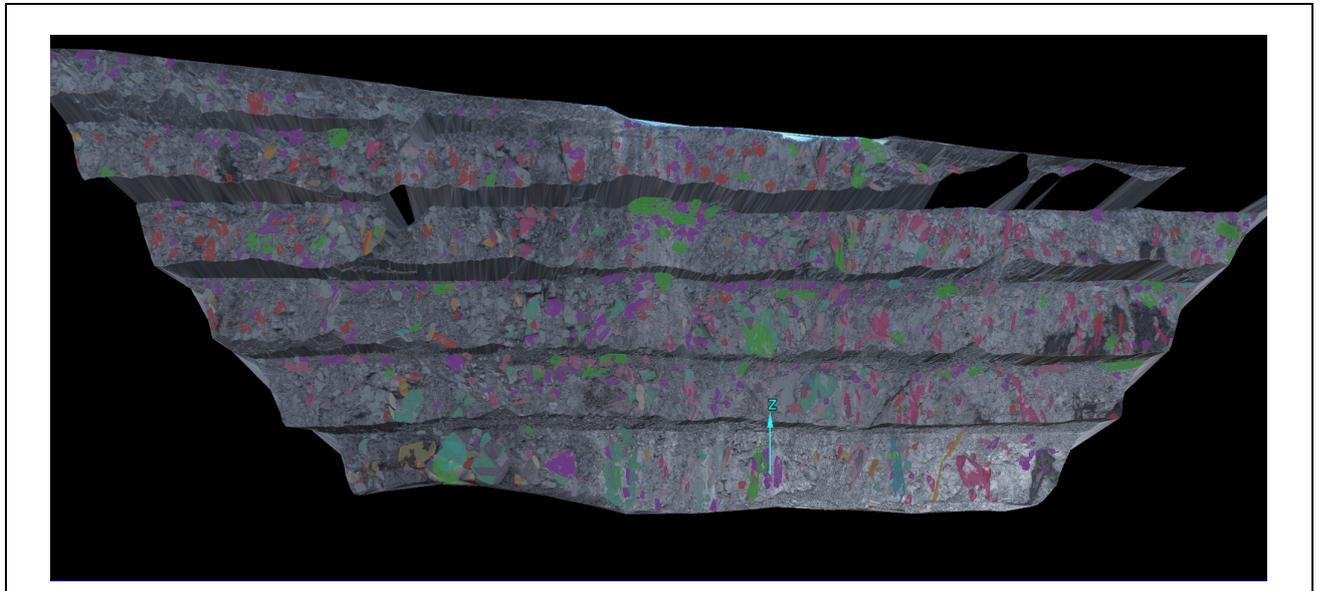


Figura 7.4: En colores, todas las estructuras identificadas en el software PointStudio. Las superficies con el mismo color corresponden a estructuras de la misma familia

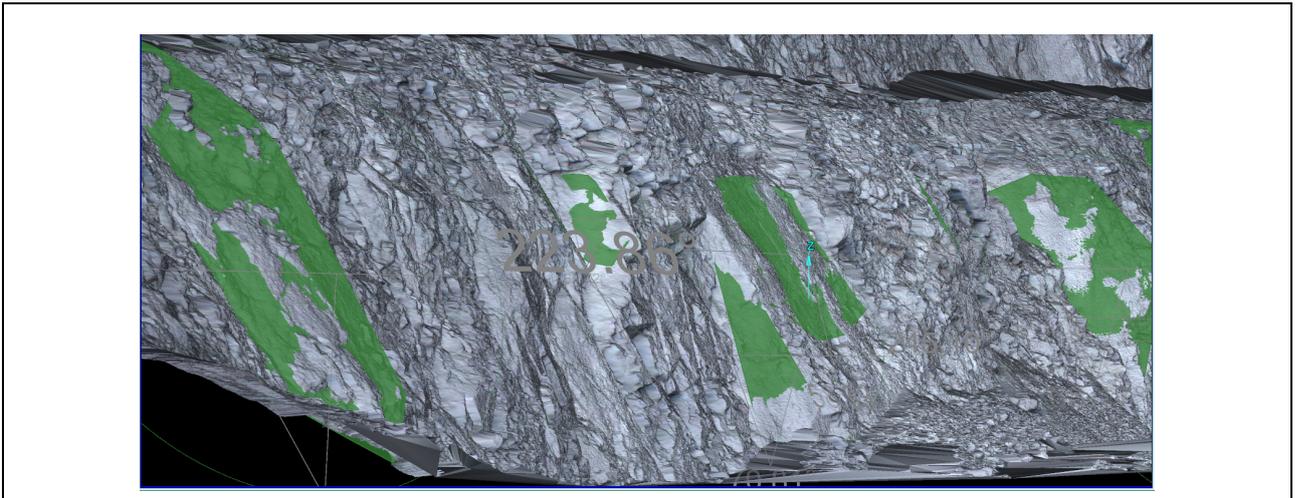


Figura 7.5: Detalle de uno de los bancos escaneados. En la imagen, todas las estructuras en verde presentan la misma orientación.

Luego, se cargó la información estructural al software MinePlan 3D (anteriormente MineSight). Para no sobrecargar el modelo de información, solamente se exportaron aquellas estructuras cuya traza pasaba por la zona donde se realizó el mapeo en terreno y muestreo para análisis de reactividad. De esta forma, las estructuras cargadas en el modelo se visualizan de la siguiente forma (Figura 7.6):

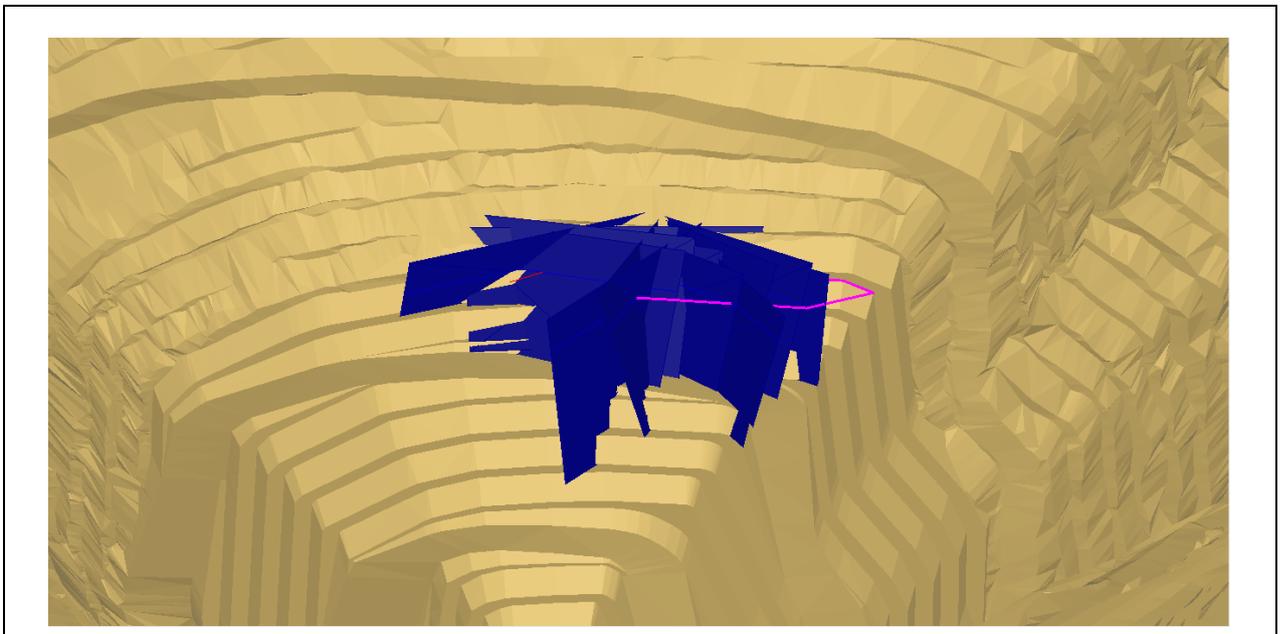


Figura 7.6: Vista en perspectiva de aquellas estructuras (en azul) cuya traza intersecta la malla de perforación estudiada (límites en magenta).

La información estructural de cada falla y diaclasa. identificada se presentan en las Tablas 7.1 y 7.2, respectivamente.

Tabla 7.1: Sistemas de fallas identificadas en la zona de estudio (malla CA120169).

| Falla | Rumbo | Manteo |
|-------|-------|--------|
| 1 | N31W | 81W |
| 2 | N23W | 72W |
| 3 | N43E | 71E |
| 4 | N67W | 59S |
| 5 | N25W | 71W |
| 6 | N46W | 63SW |
| 7 | N71W | 49S |
| 8 | N52W | 61SW |
| 9 | N58W | 55SW |
| 10 | N88E | 73N |
| 11 | N30W | 65SW |
| 12 | N3W | 72W |
| 13 | N58E | 83SE |

Tabla 7.2: Sistemas de diaclasas identificadas en la zona de estudio (malla CA120169).

| Joints | Rumbo | Manteo |
|--------|-------|--------|
| 1 | N59W | 35SW |
| 2 | N6W | 70W |
| 3 | N74E | 60S |
| 4 | N72W | 71SW |
| 5 | N62E | 88N |
| 6 | N78E | 82S |

Adicionalmente, se exportaron todas las estructuras y sus polos al programa DIPS (Figuras 7.7 y 7.8), con el cual se realiza un análisis estereométrico para identificar mecanismos de fallas controlados por estructuras tipo planar y en cuña (Figuras 7.9 y 7.10). Por ejemplo, se encontró que el 50,6% de las estructuras tienen condiciones de falla plana y el 79,2% de las combinaciones pueden generar cuñas.

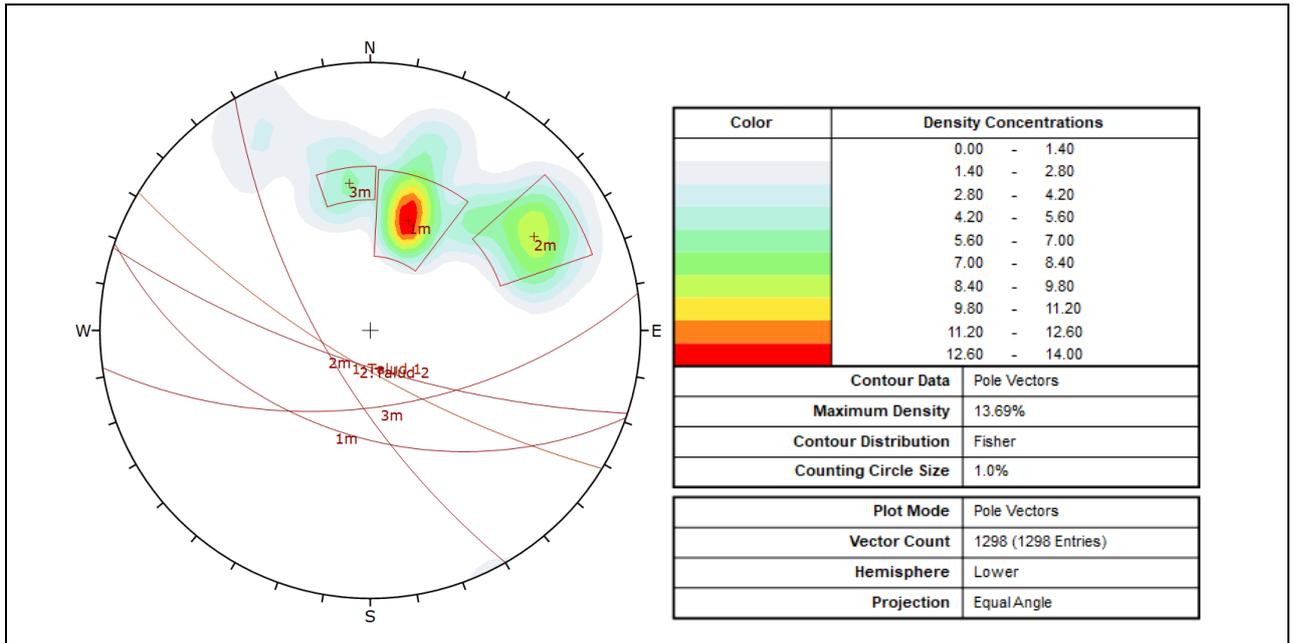


Figura 7.7.: Concentración de polos (visualización de contornos)

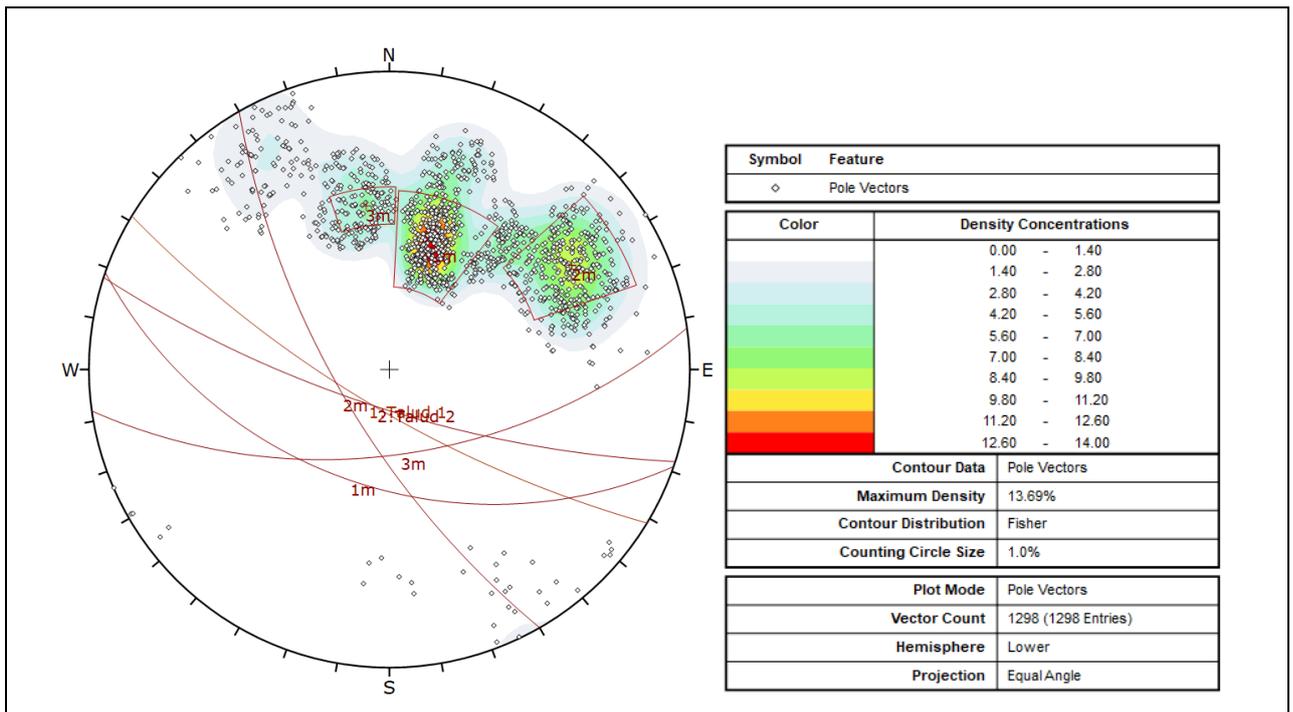


Figura 7.8.: Concentración de polos (estructuras representadas por polos)

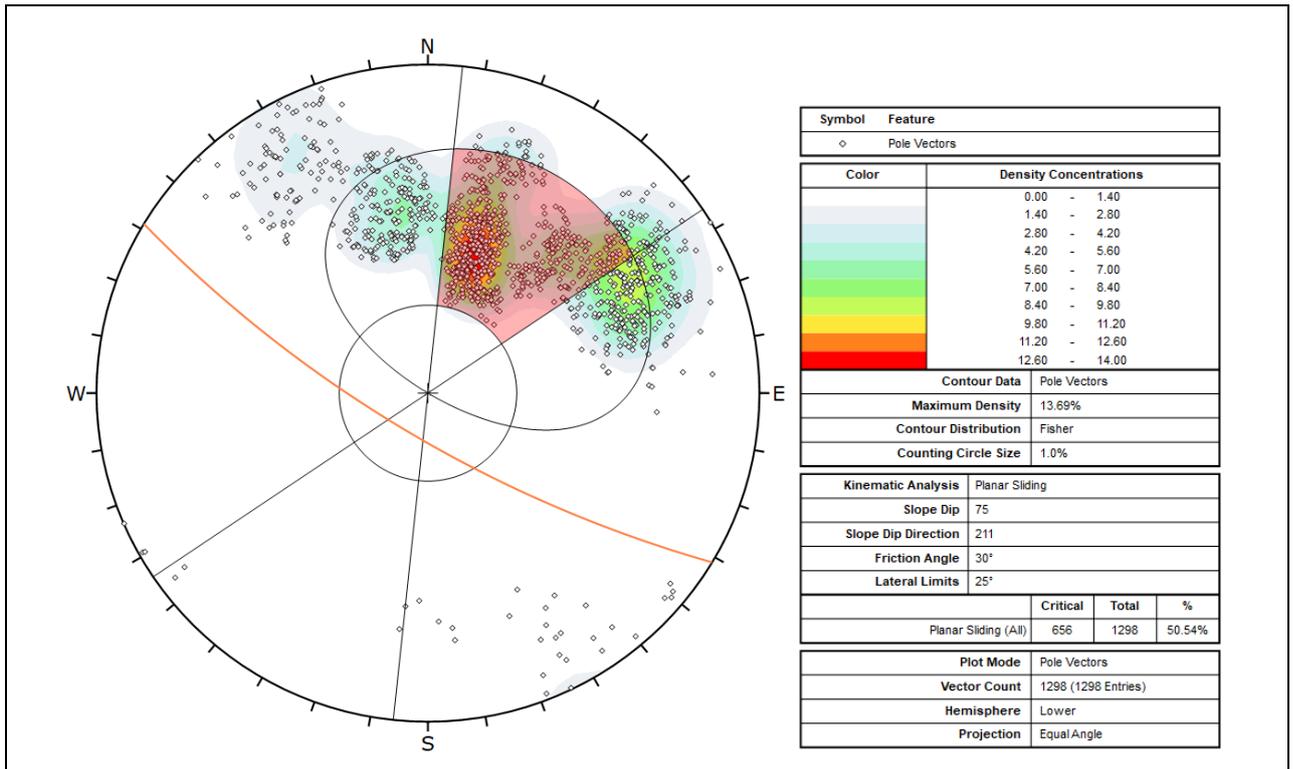


Figura 7.9.: Mecanismos de fallamiento planar.

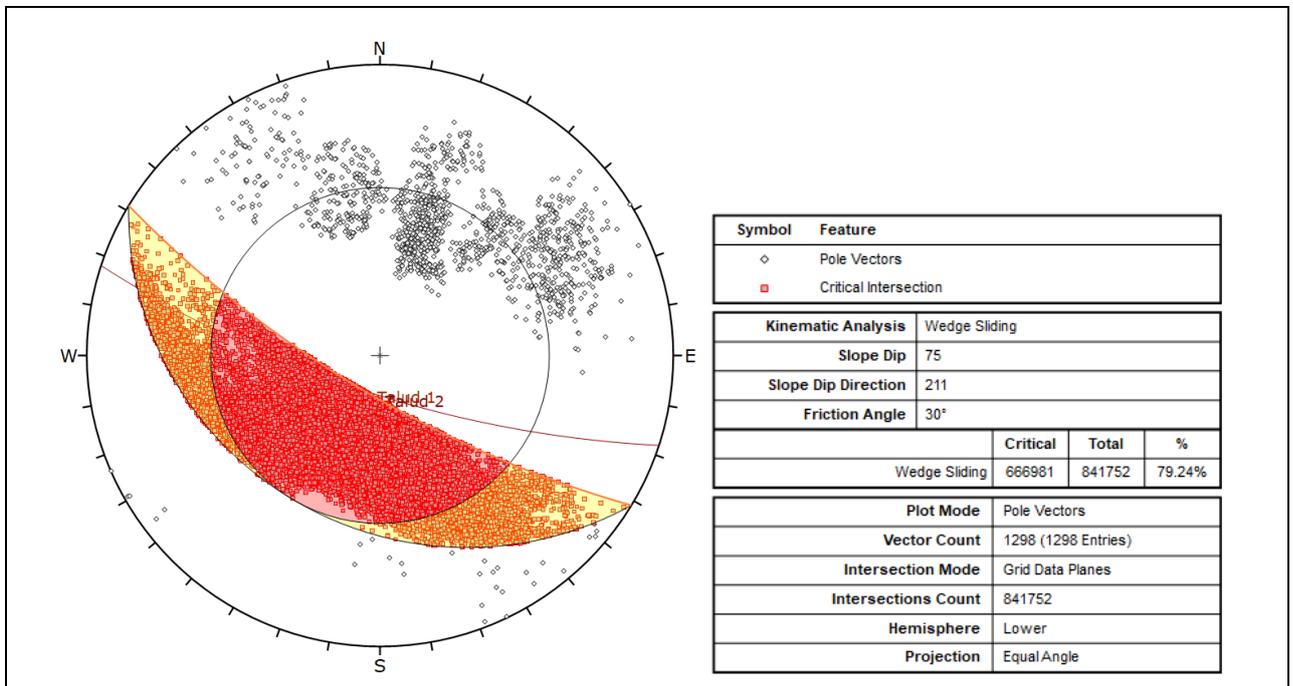


Figura 7.10.: Mecanismos de fallamiento en cuña.

7.3. Construcción del modelo

El modelo georeactivo 3D fue construido utilizando el software MinePlan 3D de Hexagon, que proporciona las herramientas necesarias para representar de manera precisa los sistemas estructurales, unidades geológicas, mineralógicas y otras características georeactivas identificadas en el macizo rocoso. Con la información obtenida de los análisis de reactividad, se busca definir las Unidades Georeactivas y establecer sus límites.

Graficamente, se representa por colores la intensidad de reacción que presentó cada muestra: verde para las muestras que tuvieron una intensidad de reacción baja y amarillo para las intermedias. En la Figura 7.11 se presenta la vista en planta del modelo para la zona potencialmente reactiva, que incluye la información estructural y límites litológicos junto a la información de reactividad de cada pozo. La traza de fallas principales se observa como líneas gruesas color azul, las fallas obtenidas por escáner en líneas azules delgadas y las diaclasas en líneas rojas.

Para la visualización en 3D del modelo, es necesario crear sólidos a partir de los límites litológicos que se presentan en la Figura 7.11. A la vez, los pozos de tronadura se representaron como tubos verticales, de forma de entender como interactúan con las estructuras en profundidad. En la Figura 7.12 se observa el modelo mirado en perspectiva tridimensional.

El muestreo de *cutting* de perforación utilizado para los ensayos de reactividad se realizó con el objetivo de representar el largo total del pozo de tronadura en profundidad. Al analizar nuestro modelo 3D, notamos que varios pozos son atravesados por una o más fallas. Esto implica que las muestras obtenidas del *cutting* de perforación ya contienen las características y condiciones proporcionadas por las fallas. Por ejemplo, si una falla tiene relleno mineral o alteración, parte de la muestra de roca extraída del pozo también presentará esas características. De manera similar, si una falla atraviesa un pozo de tronadura, la roca ya habrá experimentado procesos como oxidación o ingreso de oxígeno y agua, que influirían en la meteorización de los sulfuros. Por lo tanto, el tipo de muestreo utilizado es altamente representativo para los ensayos de reactividad y la construcción del modelo 3D.

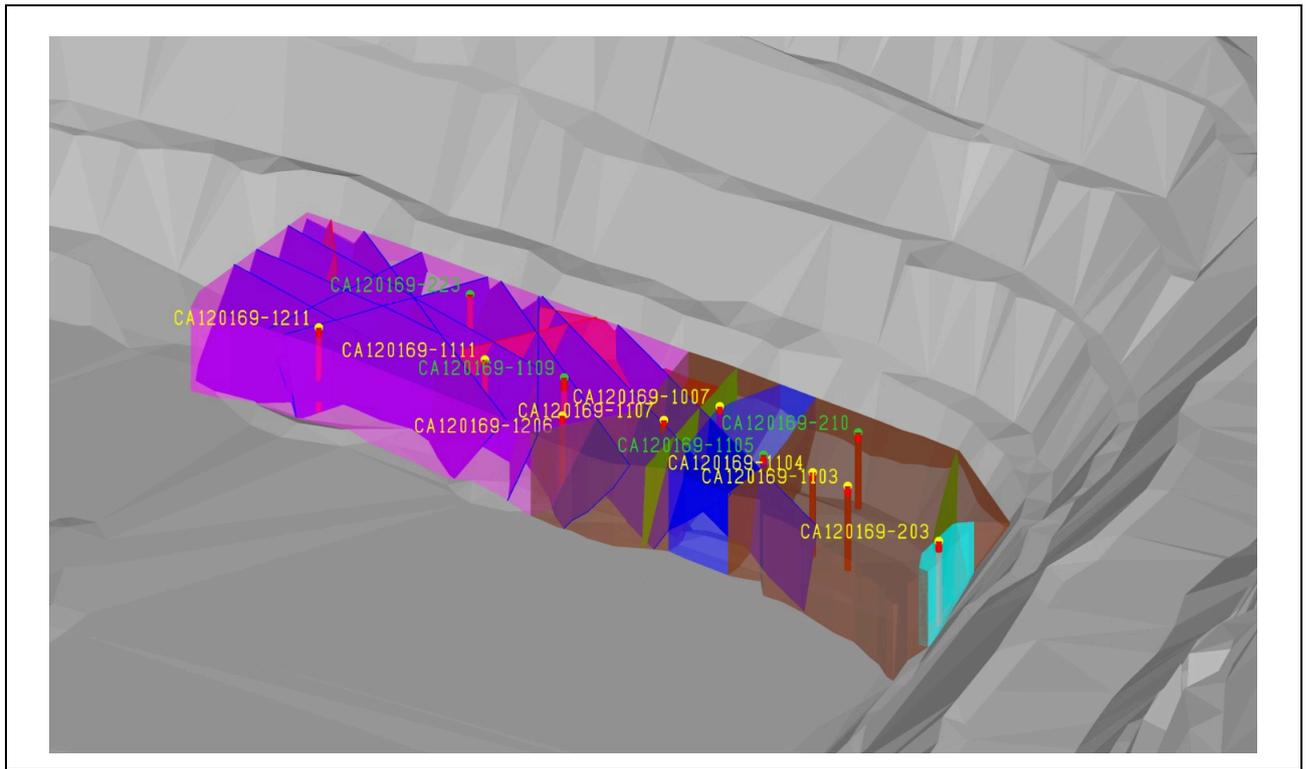


Figura 7.12.: Modelo georeactivo 3D de banco.

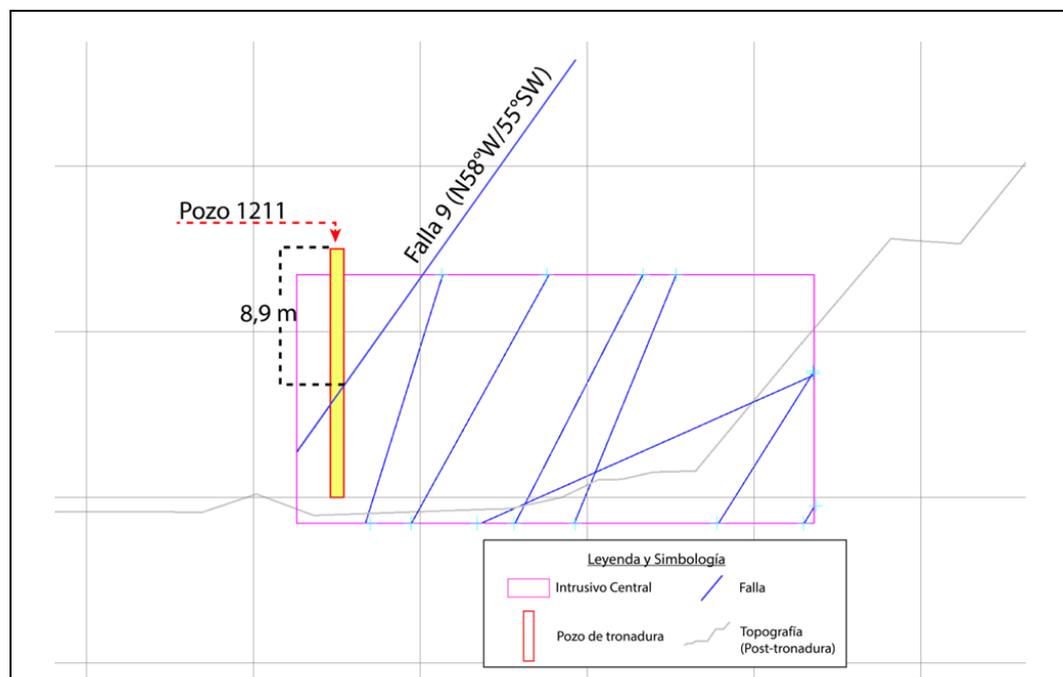


Figura 7.13: Perfil pozo 1211 en modelo georeactivo. Falla 9 a 8,9 m de la superficie.

En el Intrusivo Central, más hacia el este, el pozo 223 (Figura 7.14) es cortado a una profundidad de 12,2 m por la Falla 2 (N23°W/72°W). Sin embargo, la muestra CA120169-223 asociada a este pozo presentó una intensidad de reacción baja.

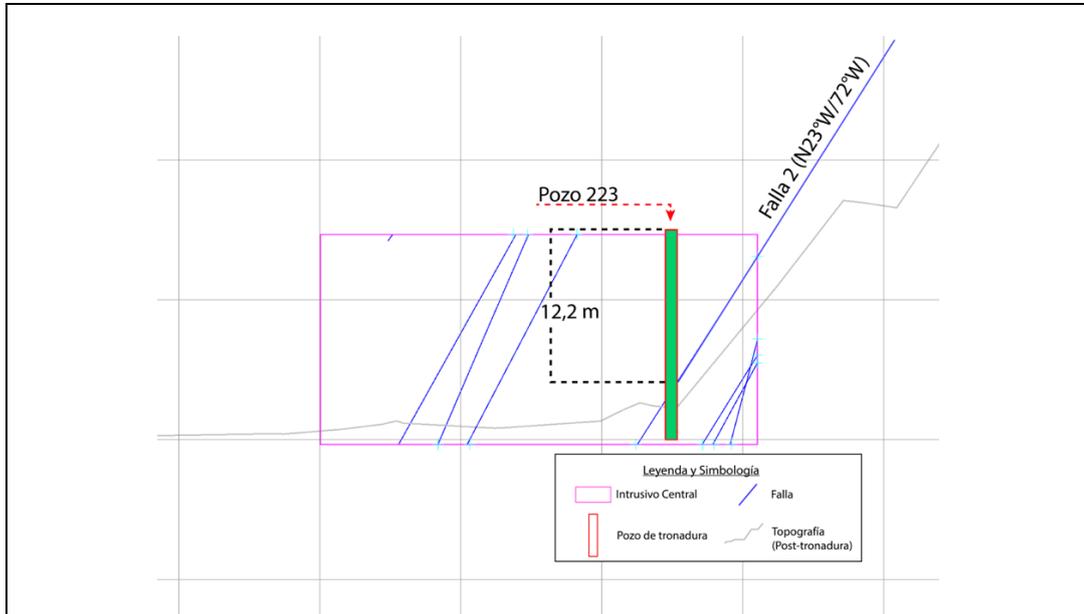


Figura 7.14: Perfil pozo 223 en modelo georeactivo. Falla 2 a 12,2 m de la superficie.

Continuando hacia el este en el Intrusivo Central, el pozo 1111 (Figura 7.15) es atravesado a una profundidad de 10 m por la Falla 6 (N46°W/63°SW). La muestra CA120169-1111 de este pozo mostró una reacción de intensidad intermedia al entrar en contacto con nitrato de amonio.

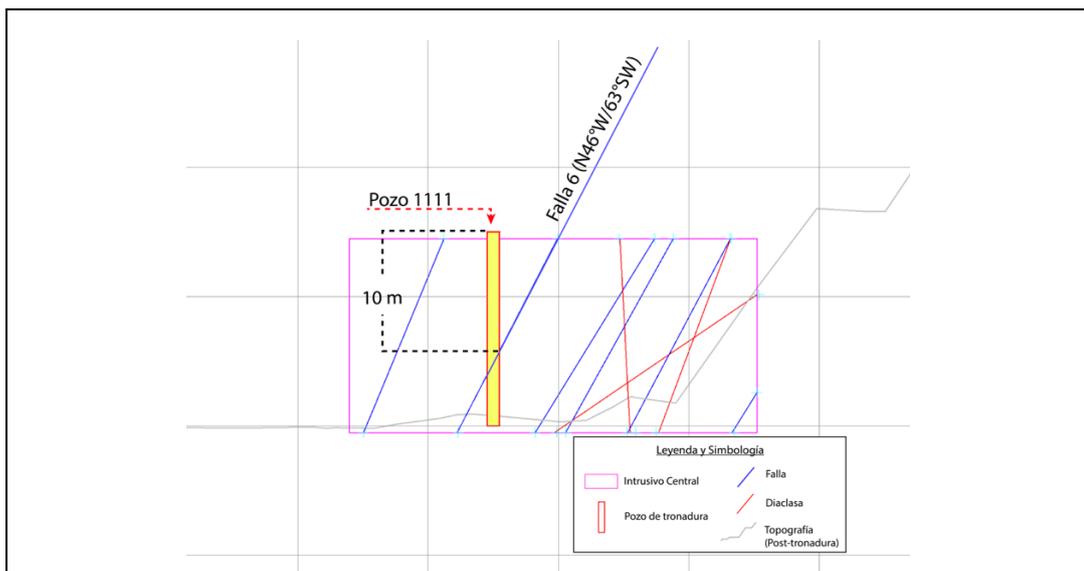


Figura 7.15: Perfil pozo 1111 en modelo georeactivo. Falla 6 a 10 m de la superficie.

Finalmente, el pozo 1107 (Figura 7.18), perforado en la unidad Baja Ley, es intersectado por la Falla 11 (N30°W/65°SW) apenas 1,2 metros debajo del collar. La muestra del *cutting* de perforación de este pozo (CA120169-1107) presentó una reacción no autosostenida con nitrato de amonio, con un parámetro de intensidad de reacción intermedia.

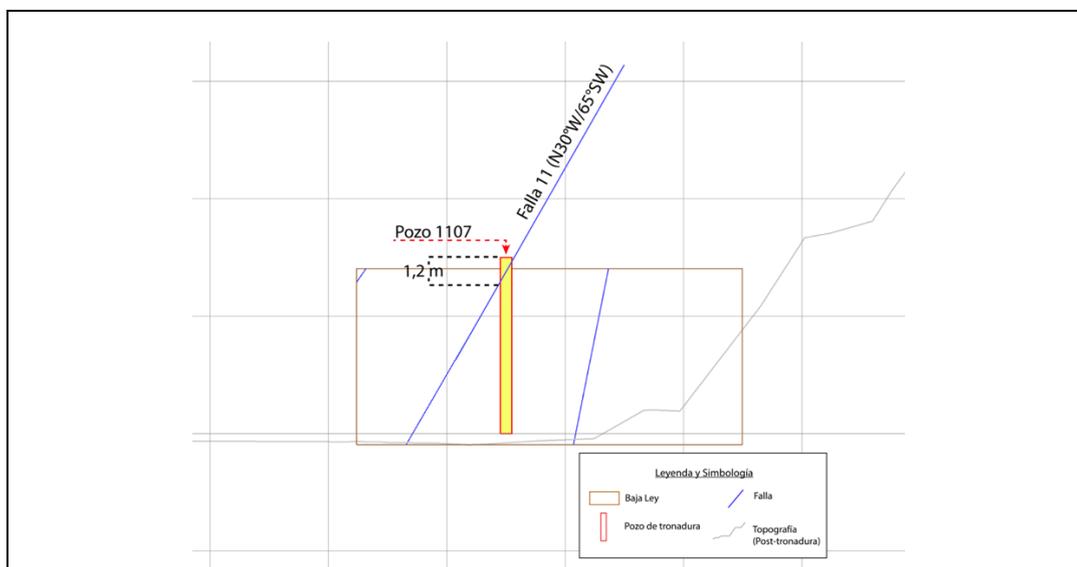


Figura 7.18: Perfil pozo 1107 en modelo georeactivo. Falla 11 a 1,2 m de la superficie.

7.4. Definición de unidades geológicas reactivas

Una vez que se han muestreado las zonas reactivas del macizo y se han realizado los análisis de reactividad y *sleep time* correspondientes, se recomienda realizar estudios mineralógicos detallados para lograr definir las Unidades Geológicas Reactivas o Georeactivas (UGR).

Para ello, se deben realizar ensayos mineralógicos específicos, como el análisis QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy) y el análisis DRX (Difracción de Rayos X), que permiten identificar las especies minerales presentes en las muestras recolectadas. Conocer la mineralogía de una roca es fundamental para entender su respuesta frente a los explosivos, ya que las características mineralógicas es la variable de mayor peso en el fenómeno de reactividad. Es importante destacar que la mineralogía puede variar considerablemente dentro de una misma zona del macizo rocoso, e incluso dentro de una misma unidad geológica pueden identificarse diferentes Unidades Georeactivas.

Las UGR son un concepto más avanzado que las zonas reactivas, ya que permiten definir unidades de roca homogéneas en función de todas sus características geológicas (mineralogía, alteración, estructuras, etc) y su reactividad.

Las UGR se definen como unidades geotécnicas que comparten una reactividad similar debido a condiciones fisicoquímicas y mineralógicas comunes. Esta correlación entre las propiedades geotécnicas y la reactividad del macizo rocoso permite identificar patrones y tendencias, lo que facilita la zonificación del macizo.

La disponibilidad de un modelo georeactivo permite realizar una zonificación del yacimiento o mina en función de su grado de reactividad frente al nitrato de amonio, lo que a su vez permite seleccionar el tipo de explosivo y adoptar prácticas operacionales de tronadura adecuadas según la potencialidad de reacción de cada unidad geológica reactiva (UGRx). Las UGR, que comparten una reactividad similar, facilitan la zonificación por reactividad en la mina, proporcionando una herramienta preventiva para la toma de decisiones y la implementación de medidas de control de los riesgos asociados a un potencial fenómeno de reactividad.

8. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL MODELO GEOREACTIVO

La creación del modelo georeactivo 3D, construido a partir de la información de modelos existentes en mina Los Colorados, levantamiento geológico de detalle y resultados de los ensayos de reactividad, permitió visualizar y analizar la distribución espacial de la reactividad en la zona de estudio y establecer relaciones y criterios georeactivos, que orienten a la toma de medidas preventivas en el control y manejo de potencial fenómeno de rocas reactivas.

El análisis del macizo rocoso en la zona de la malla CA120169 reveló un alto grado de fracturamiento, con numerosas fallas y diaclasas que cortan los pozos muestreados. Este fracturamiento contribuye a la oxigenación general de las rocas en la zona y puede aumentar la permeabilidad, permitiendo la interacción entre los minerales presentes y los explosivos utilizados durante la tronadura. Sin embargo, se observó que el alto fracturamiento local del macizo rocoso no parece ser el principal factor que contribuye a la reactividad en esta zona específica.

Es importante notar que todas las unidades litológicas, independientemente de la concentración de pirita, mostraron reacciones no autosostenidas de intensidades similares. Esto sugiere que la presencia de pirita por sí sola, en este caso de estudio, no es suficiente para desencadenar reacciones químicas peligrosas durante la tronadura. Se requiere muy probablemente de condiciones mineralógicas y fisicoquímicas adicionales, para potenciar un fenómeno de reactividad.

Otra posibilidad planteada es que la pirita u otras mineralogías reactivas no hayan alcanzado una meteorización suficiente para generar condiciones autosostenidas de reactividad. A diferencia del caso de estudio en el Intrusivo Central del año 2020, donde se observó una alteración evidente en el Intrusivo Central, en el actual estudio no se identificó una alteración pervasiva generalizada en terreno.

En la malla CA435135, se tomaron muestras de la Falla Magnetita Oeste, una de las principales estructuras de la mina Los Colorados. Sin embargo, estas muestras tampoco mostraron reacciones autosostenidas de riesgo mayor, sino que presentaron una reactividad no autosostenida de criticidad intermedia. Esto sugiere que, aunque las fallas principales pueden influir en la reactividad debido al fracturamiento en la zona de falla, que favorece la

permeabilidad del macizo rocoso (para el agua y/o oxígeno), no son el único factor condicionante. El paso de fallas principales es una condición importante a evaluar, y este estudio sugiere que el análisis de la mineralogía del relleno y densidad del fracturamiento es una variable relevante que debe ser estudiada en conjunto a la mineralogía metálica potencialmente reactiva en el macizo.

9. CONCLUSIONES

La reactividad de los MRRx es un fenómeno complejo que implica una interacción química entre los minerales y condiciones geoquímicas presentes en el macizo rocoso y el nitrato de amonio utilizado en los explosivos.

Se ha evidenciado que un macizo rocoso requiere la presencia de una abundante mineralogía reactiva, posiblemente en proceso de meteorización o con signos de alteración, para generar una incompatibilidad o reactividad intensa en contacto con el explosivo. Además, la sola presencia de pirita no garantiza la reacción, ya que otras especies minerales pueden potenciar o anular este fenómeno. Por lo tanto, es relevante conocer la mineralización asociada a estos sulfuros de hierro, como son los sulfatos de hierro, otros sulfuros y carbonatos, que pueden desempeñar un papel relevante en la activación o anulación de la reactividad del macizo rocoso con el nitrato de amonio.

Por otro lado, las fallas principales desempeñan un papel relevante en la generación del fenómeno de reactividad. Estas estructuras, además de actuar como vías preferenciales de permeabilidad o flujo subterráneo de agua y oxígeno hacia la roca, permitiendo una mayor infiltración de agua y oxígeno hacia la roca, pueden contener rellenos mineralógicos con capacidad de favorecer y/o acelerar la activación de una reacción exotérmica con el explosivo. La permeabilidad secundaria generada acelera el proceso de meteorización de minerales como la pirita, liberando sulfato ferroso y creando condiciones propicias para la reactividad con el nitrato de amonio presente en los explosivos. Estas condiciones específicas en las zonas cercanas a fallas principales contribuirían a la intensificación de la reactividad del macizo, en comparación con áreas más alejadas.

Estos hallazgos resaltan la complejidad de la reactividad de las rocas y subrayan la importancia de considerar múltiples factores en el análisis para determinar el potencial de reactividad de un macizo rocoso y su manejo en operaciones mineras. El modelo geológico 3D se presenta como una herramienta fundamental para comprender y visualizar espacialmente las potenciales zonas reactivas, base para finalmente definir Unidades Georeactivas (UGR).

Contar con un modelo georeactivo en cada mina en explotación, permite tomar medidas de control en el proceso de tronadura, como; selección del explosivo, tiempos de residencia de este en los pozos, prácticas operacionales y la integración de todas estas medidas al plan minero.

La implementación del concepto "macizo rocoso reactivo" abre la investigación del fenómeno de reactividad a todos aquellos elementos y condiciones que constituyen un macizo rocoso, y busca comprender cuáles son los más relevantes en la generación de reacciones de reactividad con el nitrato de amonio.

10. RECOMENDACIONES Y LIMITACIONES

Recomendaciones

1. Como primer paso en el manejo de potenciales fenómenos de reactividad del macizo rocoso con el explosivo, se debe considerar en etapas tempranas de la evaluación del depósito y su explotación y la construcción de un modelo georeactivo, de la misma forma que hoy se considera la construcción de modelos geotécnicos, mineralógico o hidrogeológicos.
2. Actualizar el modelo georeactivo durante el desarrollo del proyecto minero, es fundamental para el control de estos fenómenos reactivos.
3. Es fundamental asegurar la representatividad del muestreo para análisis de reactividad, dada la variabilidad inherente del macizo rocoso, pues, cambios litológico-mineralógicos importantes pueden ocurrir en tramos cortos. Por lo anterior, es crucial seguir una pauta para la toma de muestras que garantice un número y distribución representativa de la zona potencialmente reactiva.
4. Establecer procedimientos de perforación y carga de explosivos que minimicen el tiempo de contacto directo entre los explosivos y las zonas potencialmente reactivas del macizo rocoso.
5. Fomentar la colaboración entre el equipo de geotecnia, perforación y tronadura y geología en la implementación de medidas preventivas para mitigar los riesgos asociados a rocas reactivas. Esto implica una comunicación efectiva y una comprensión compartida de los riesgos y buenas prácticas.
6. Realizar investigaciones adicionales sobre la mineralogía reactiva de la faena y su influencia en la reactividad de los macizos rocosos. Esto puede incluir estudios de laboratorio más detallados y análisis mineralógicos específicos, para así comprender las interacciones químicas entre los minerales presentes y los explosivos utilizados.
7. Para siguientes estudios de reactividad, se sugiere abarcar todas las unidades geológicas dentro de cada dominio estructural, con el propósito de obtener una base de datos completa sobre cómo la combinación de composición mineralógica y densidad estructural afectaría en la reactividad. Se debe priorizar las unidades que alojen mineralización metálica de sulfuros o sulfatos de hierro, y, en caso de existir agua, realizar una zonificación basada en la acidez para un análisis integral del fenómeno.
8. Estas recomendaciones pueden servir como punto de partida para desarrollar un plan de gestión y prevención de macizos rocosos reactivos en las operaciones mineras. Sin

embargo, es importante adaptarlas a las condiciones y características específicas de cada mina y realizar un seguimiento constante de los avances investigativos en torno a esta temática.

Limitaciones

1. Generalización de los resultados: Los resultados y conclusiones obtenidos en este estudio se aplican específicamente a la mina y las condiciones estudiadas. Es importante tener en cuenta que cada mina y macizo rocoso puede tener características únicas, por lo que los resultados pueden no ser directamente extrapolables a otras operaciones mineras sin un análisis adicional.
2. Disponibilidad de antecedentes: El estudio depende de la disponibilidad y calidad de los datos geológicos, estructurales y de reactividad de la faena. Puede haber limitaciones en la cantidad de datos disponibles, especialmente en zonas del rajo con menos avance o donde no se cuenta con registros históricos completos.
3. Muestreo y seguimiento temporal: El muestreo de *cutting* suele realizarse en aquellas zonas ya perforadas próximas a tronar, lo que implica que la presencia o ausencia de rocas potencialmente reactivas en la faena dependerá también del momento en que se realice el estudio y respectivo muestreo. Es importante destacar que una faena donde un estudio puntual demuestre que no tiene rocas potencialmente reactivas actualmente, no implica que en alguna zona aún no explotada de la mina no pueda reunir las condiciones que gatillan el fenómeno. Por lo tanto, el estudio de reactividad debe ser rutinario y complementarse con el avance de la mina.
4. Ensayos de laboratorio: Aunque se han realizado ensayos de reactividad en laboratorio, es importante reconocer que estos ensayos pueden no capturar todas las condiciones y complejidades presentes en el macizo rocoso real. Las condiciones de laboratorio pueden diferir de las condiciones *in situ*, lo que puede afectar los resultados obtenidos.
5. Precisión del modelo: Aunque se ha desarrollado un modelo georeactivo 3D, existen incertidumbres inherentes a su construcción. Las interpretaciones geológicas y estructurales están sujetas a la interpretación del geólogo y a la calidad de los datos utilizados. Es posible que existan áreas donde la precisión del modelo pueda ser mejorada con información adicional.

11. REFERENCIAS

- ARÉVALO, C. & WELKNER, D. 2008. Geología del Área Carrizal bajo-Chacritas. Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 111:67 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- AUSTRALIAN EXPLOSIVES INDUSTRY AND SAFETY GROUP (AEISG). 2017. Code of Practice: Elevated Temperature and Reactive Ground. 59 pp. Brisbane
- BRIGGS, T. & KELSO, I. 2001. Ammonium Nitrate-Sulfide Reactivity at the Century Zn- Pb-Ag Mine, Northwest Queensland, Australia. *Exploration and Mining Geology*. Vol. **10**, N° 3: 177-190.
- CEMBRANO, J., GONZÁLEZ, G., ARANCIBIA, G., AHUMADA, I., OLIVARES, V., & HERRERA, V. 2005. Fault zone development and strain partitioning in an extensional strike-slip duplex: A case study from the Mesozoic Atacama fault system, Northern Chile. *Tectonophysics* Vol. **400**, N°1: 105-125.
- DESCOSTES, M., VITORGE, P., & BEAUCAIRE, C. 2004. Pyrite dissolution in acidic media. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. **68**, N°22: 4559-4569.
- E-MINING TECHNOLOGY (EMT). 2016. Estudio Geomecánico e Hidrogeológico Fase 6 Mina Los Colorados. Informe para CMP. Viña del Mar.
- LAGAS, G. 2016. Estudio de la química mineral de la piritita del Yacimiento Magnetita-Apatito de Los Colorados, III Región de Atacama, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Santiago de Chile. 127 p.
- MCCLENDON, J. 1999. The origin of life. *Earth-Science Reviews*, Vol. **47**, N°1-2: 71-93.
- MIRON, Y.; RUHE, T. & WATSON, R. 1979. Reactivity of ANFO with pyrite containing weathering products. US Bureau of Mines, Report of Investigations Vol **8373**: 24 pp. Washington.
- MUNIZAGA, R., & LAGOS, M. 2015. Antecedentes geológicos del yacimiento de magnetita-apatito Los Colorados, provincia del Huasco, Tercera Region de Atacama, Chile. XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena.
- MYCROFT, J., BANCROFT, G., MCINTYRE, N., & LORIMER, J. 1995. Spontaneous deposition of gold on pyrite from solutions containing Au (III) and Au (I) chlorides. Part I: A surface study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. **59**, N°16: 3351-3365.
- ORLANDI, C. 2006. Reactividad de minerales piritosos con explosivos en base a nitrato de amonio. Reporte para Enaex S.A.: 6pp. Santiago
- RUMBALL, J. 1991. The interaction of partially weathered sulphides in the Mt McRae shale formation with ammonium nitrate. Thesis submitted to the School of Mathematical and Physical Sciences, Murdoch University. 363 pp. Perth.

- SCHEUBER, E; GONZALEZ, G. 1999. Tectonics of the Jurassic-Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22°–26° S): A story of crustal deformation along a convergent plate boundary. *Tectonics*, Vol. **18**, N°5: 895-910.
- SILLITOE, R. 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, Vol. **38**, N°7:787-812.
- THIELE, R., & PINCHEIRA, M. 1987. Tectónica transpresiva v movimiento de desgarre en el segmento sur de la Zona de Falla Atacama, Chile. *Andean Geology*, N°**31**: 77-94.
- WÄCHTERSCHÄUSER, G. 2000. Life as we don't know it. *Science*, Vol. **289**, N°5483: 1307-1308.