



**UNIVERSIDAD
DE ATACAMA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y MINERALÓGICA
DE GANGAS EN RIPIOS ANTIGUOS DE MINA SUR Y
ANÁLISIS DE SUS IMPLICANCIAS
GEOMETALÚRGICAS EN LOS PROCESOS DE
LIXIVIACIÓN, DIVISIÓN CHUQUICAMATA**

“Memoria presentada en conformidad a los requisitos para obtener el título de Geólogo”

Profesor guía: Dr. Karl Riveros Jensen

Tutor: Sr. Carlos Barrios Barraza

Joaquín Esteban Alejandro Guerrero Mancilla

Copiapó, Chile 2025

**Dedicado a mi madre y mi mami.
Linda y Norma, gracias por todo el amor y apoyo que me han brindado.**

AGRADECIMIENTOS

A mi familia en Vallenar, quienes han sido mi apoyo incondicional a lo largo de todo este proceso, dándome la fuerza y el aliento que he necesitado para llegar hasta aquí. En especial a mi madre, que siempre ha estado a mi lado, brindándome no solo su amor, sino también una fe inquebrantable en mis capacidades, inspirándome a seguir adelante en los momentos más difíciles. Gracias, mamá, por tu amor incondicional, por cada palabra de ánimo y por enseñarme a nunca rendirme. A mi mami, que con su sabiduría y consejos siempre ha sabido guiarme, mostrándome un camino claro por el que transitar. Cada vez que he necesitado orientación o un abrazo reconfortante, ha estado ahí, llenándome de amor y dándome el impulso necesario para seguir luchando por mis metas. A mis hermanos, que son un pilar fundamental en mi vida, aunque no siempre lo exprese, su compañía y cariño han sido clave en mi crecimiento y saber que están ahí me ha dado una fuerza extra en cada paso del camino. A mi tía Natalia, quien no solo me ha manifestado su apoyo en cada etapa de mi vida, sino que ha sido una presencia constante y significativa en mis logros, y a su pareja, mi compadre Esteban, que en los inicios de mi carrera me brindó ayuda en más de una ocasión, algo que siempre recordaré con gratitud y a sus dos hijas, Emily y Maylen, mis ahijadas, que me regalan valiosos momentos e inspiración. Ellas me recuerdan la importancia de seguir adelante y ser un buen ejemplo.

A mis tíos, Wilfredo, Soledad y Novelia, por abrirme las puertas de su hogar y permitirme completar esta etapa tan importante en mi vida. Agradezco todas las risas y los buenos momentos que me hicieron pasar cuando más lo necesitaba, haciéndome sentir como en casa. Su generosidad y apoyo fueron fundamentales para poder enfocarme y finalizar mi memoria.

A Madhelyne, mi polola, que siempre me ha apoyado y escuchado a lo largo de etapas importantísimas en mi vida. Su compañía en mi proceso universitario ha sido invaluable para que pudiera seguir adelante en los momentos más difíciles, siempre haciéndome feliz. Agradezco todo el amor que me das, tu comprensión y por estar a mi lado. Por esto y mucho más, te amo.

A todo el equipo de la Superintendencia de Geología, gracias por su apoyo y

enseñanzas a lo largo de este proceso. Agradezco especialmente a mi tutor, Carlos Barrios, por su paciencia y dedicación, brindándome siempre su guía y conocimientos, que fueron muy importantes para mi crecimiento profesional.

A mis compañeros y amigos, por su compañía y apoyo, al estar en cada etapa de este camino. Pasamos períodos difíciles entre todos para poder llegar a esta instancia, pero con apoyo mutuo, se pudo completar el recorrido. Agradezco los momentos invaluableles que compartimos.

A los funcionarios del Departamento de Geología, no solo por la realización de este trabajo, sino por todo los conocimientos y enseñanzas que me impartieron, así como su apoyo a lo largo de mi paso por la Universidad de Atacama.

RESUMEN

Actualmente en la División Chuquicamata de Codelco, la Gerencia de Extracción y Lixiviación (GEL) procesa minerales oxidados que se extraen de un stock de rípios antiguos y se mezclan en una proporción de 70% de Rípio Verde procedentes de Mina Sur y 30% de Rípio Rojo de Chuquicamata para formar las pilas de lixiviación. En este contexto, esta investigación surge ante la problemática de que los rípios generados después del proceso de lixiviación en pilas presentan inestabilidad estructural por un aumento de humedad, lo que dificulta su compactación y disposición en los botaderos, afectando la eficiencia del proceso, algo que empezó a ocurrir después del cambio del stock de rípios RAMS 1 al RAMS 2. Por ello, el principal objetivo de este trabajo es realizar una caracterización geológica y mineralógica de las gangas en los Rípios Antiguos de Mina Sur (RAMS), así como un análisis de sus implicancias geometalúrgicas en los procesos de lixiviación en pilas de la GEL. Para esto, se llevaron a cabo análisis estadísticos de humedad, granulometría y composición mineralógica con el objetivo de identificar la causa de la situación actual en el procesamiento de los rípios. Con los hallazgos de estos análisis, se definieron unidades geológicas (UG) de estimación para los minerales cuarzo, plagioclasa, feldespato K y actinolita, siendo este último el principal representante de los anfíboles en los RAMS. Estas definiciones se basaron en cuantificaciones de mediciones NIR y con estas se confeccionaron modelos de bloques relacionados a estos minerales. Los resultados de los análisis de las implicancias en la lixiviación, indican que el cuarzo, la plagioclasa y el feldespato K no muestran conexión con la retención de humedad, sin embargo, se destaca su rol en la estabilidad estructural de las pilas. Por otro lado, la muscovita y la alunita componentes importantes del Rípio Rojo, presentaron correlaciones negativas con la humedad de las pilas después de la lixiviación. En contraste, la actinolita o los anfíboles en general, muestran una relación significativa con la retención de humedad tanto en los stocks como en las pilas post-lixiviación, por lo que se toman como los principales causantes de la situación actual. Este estudio permite concluir que la caracterización de las gangas es fundamental para optimizar los procesos de lixiviación.

Palabras clave: Minerales de ganga - Lixiviación en pilas - Rípios - Unidades Geológicas - División Chuquicamata.

ABSTRACT

Currently at Codelco's Chuquicamata Division, the Gerencia de Extracción y Lixiviación (GEL) processes oxide ores that are extracted from a stock of old tails of leaching and mixed in a proportion of 70% Ripio Verde from Mina Sur and 30% Ripio Rojo from Chuquicamata to form the leaching heaps. In this context, this research arises due to the problem that the tails generated after the heap leaching process present structural instability due to an increase in humidity, which hinders their compaction and disposal in the dumps, affecting the efficiency of the process, something that began to occur after the change from RAMS 1 to RAMS 2 tails stock. Therefore, in this work, the main objective was to carry out a geological and mineralogical characterization of the gangue in the old tails of leaching of the Mina Sur (RAMS), as well as an analysis of its geometallurgical implications in the heap leaching processes of the GEL. Statistical analyses of moisture, granulometry and mineralogical composition were carried out with the objective of identifying the cause of the current situation in the processing of the tails of leaching. With the findings of these analyses, Geological Units (UG) of estimation were defined for the minerals quartz, plagioclase, K-feldspar and actinolite, the latter being the main representative of amphiboles in the RAMS. These definitions were based on quantifications of NIR measurements and block models related to these minerals were constructed. The results of the analysis of leaching implications indicate that quartz, plagioclase and K-feldspar show no connection with moisture retention, however, their role in the structural stability of the piles is highlighted. On the other hand, muscovite and alunite, important components of the Ripio Rojo, presented negative correlations with heap moisture after leaching. In contrast, actinolite or amphiboles in general, show a significant relationship with moisture retention in both stocks and post-leach heaps, so they are taken as the main causes of the current situation. This study leads to the conclusion that the characterization of gangue is fundamental to optimize leaching processes.

Key words: Gangue ores - Heap leaching - Tails - Geological Units - Chuquicamata Division.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problema de investigación	1
1.2. Hipótesis	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Ubicación y accesos	4
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	6
2.1. Antecedentes de explotación Chuquicamata y Mina Sur	6
2.2. Minerales de ganga	7
2.3. Los silicatos, conceptos y aspectos importantes	8
2.3.1. Nesosilicatos	9
2.3.2. Sorosilicatos	9
2.3.3. Ciclosilicatos	9
2.3.4. Inosilicatos	10
2.3.5. Filosilicatos	10
2.3.6. Tectosilicatos	11
2.4. Meteorización química	11
2.4.1. Oxidación	12
2.4.2. Hidrólisis	12
2.4.3. Disolución de minerales	12
2.4.4. Susceptibilidad de los silicatos a la meteorización química	14
2.5. Cinética de los silicatos	15
2.6. Lixiviación	18

2.6.1. Procesos de lixiviación en Chuquicamata (GEL).....	19
2.7. Problemas asociados a la ganga en la lixiviación.....	21
2.8. Mineralogía Mina Sur.....	23
3. CAPÍTULO III: MARCO GEOLÓGICO	25
3.1. Geología del distrito Chuquicamata.....	25
3.1.1. Unidades estratificadas.....	26
3.1.2. Unidades intrusivas	29
3.2. Geología local del yacimiento Chuquicamata.....	32
3.2.1. Pórfido Este	32
3.2.2. Pórfido Oeste.....	32
3.2.3. Pórfido Banco.....	33
3.3. Estructuras.....	34
3.3.1. Falla Oeste	35
3.4. Alteración y mineralización hipógena	36
3.4.1. Eventos tempranos de alteración con asociaciones de baja pirita	36
3.4.2. Eventos tardíos de alteración con asociaciones altas de pirita	40
3.5. Alteración supérgena	42
3.5.1. Zona de óxidos.....	42
3.6. Mina Sur.....	43
3.6.1. Unidades litológicas de rocas del basamento presentes en Mina Sur	44
3.6.2. Unidades litológicas de gravas presentes en Mina Sur.....	46
3.6.3. Unidades geológicas de Mina Sur.....	49
3.7. Geología de los Ripios	53
4. CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE TRABAJO	56
4.1. Definición del límite espacial.....	56
4.2. Recopilación de información	56

4.2.1. Exploración de datos para identificación de problemas en la GEL.....	56
4.3. Estrategia de muestreo.....	58
4.4. Medición y cuantificación de Espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR)...	59
4.4.1. Espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR).....	59
4.4.2. Equipo y herramientas de medición.....	61
4.4.3. Proceso de medición.....	63
4.4.4. Modelos quimiométricos	65
4.4.5. Análisis estadístico de los modelos quimiométricos.....	66
4.4.6. Cuantificación de mediciones	66
4.5. Elaboración de bases de datos.....	67
4.6. Definición de Unidades geológicas (UG)	68
4.7. Comprobación de la definición de UG	69
4.8. Estimación por el método inverso a la distancia	69
4.9. Validación de los modelos	70
4.9.1. Análisis de deriva.....	70
4.10. Revisión de Terreno	70
4.11. Análisis de bases de datos de pilas post-lixiviación	71
4.12. Análisis químico de pilas post-lixiviación.....	71
5. CAPÍTULO V: RESULTADOS	72
5.1. Evolución de humedad de los ripios en stock.....	72
5.2. Evolución del porcentaje de finos de los ripios en stock.....	74
5.2.1. Composición del material fino de los ripios en stock.....	76
5.3. Evolución de arcillas de los ripios en stock	78
5.4. Análisis mineralógico de los ripios en stock.....	80
5.5. Modelos quimiométricos	81

5.5.1. Modelo quimiométrico de cuarzo	81
5.5.2. Modelo quimiométrico de plagioclasa	83
5.5.3. Modelo quimiométrico de feldespato K	84
5.5.4. Modelo quimiométrico de actinolita	85
5.6. Definición de UG	86
5.6.1. UG de cuarzo	86
5.6.2. UG de plagioclasa.....	90
5.6.3. UG de feldespato K	93
5.6.4. UG de actinolita	96
5.7. Modelos de estimación	99
5.7.1. Modelos de cuarzo	100
5.7.2. Modelos de plagioclasa	102
5.7.3. Modelos de feldespato K	104
5.7.4. Modelos de actinolita	106
5.8. Validación de los modelos de estimación.....	107
5.8.1. Validación por promedio de muestras en bloques de estimación.....	107
5.8.2. Análisis de deriva	111
5.9. Información de terreno	114
5.10. Relación de la actinolita y la humedad en los rípios en stock.....	115
5.11. Evolución de porcentajes de material fino y humedad en pilas post-lixivación	116
5.12. Análisis químicos de pilas post-lixivación	117
5.12.1. Arcillas VS Humedad	117
5.12.2. Minerales modelados VS humedad	120
5.12.3. Elementos VS humedad	122

6. CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN.....	124
6.1. Implicancias de la presencia de finos y arcillas en el aumento de la humedad	124
6.2. Minerales modelados, contenido y zonas importantes	126
6.2.1. Distribución y control de las unidades geológicas de cuarzo	126
6.2.2. Distribución y control de las unidades geológicas de plagioclasa.....	127
6.2.3. Distribución y control de las unidades geológicas de feldespato K	127
6.2.4. Distribución y control de las unidades geológicas de actinolita	128
6.3. Implicancias de los minerales modelados en la lixiviación	128
6.3.1. Implicancia de los minerales cuarzo, plagioclasa y Feldespato K en la lixiviación.....	129
6.3.2. Implicancia del mineral actinolita en la lixiviación	130
6.4. Elementos en pilas post-lixiviación	132
7. CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	133
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136
9. ANEXOS.....	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Fotografías del material residual post-lixiviación que evidencian los problemas actuales de inestabilidad estructural.	3
Figura 1.2. Mapa de ubicación y acceso a Chuquicamata. Tomado de García (2013).....	5
Figura 1.3. Imagen satelital de la División Chuquicamata con Chuquicamata Rajo, Mina Sur Rajo (explotado), y stocks RAMS 1 (explotado) y RAMS 2 ubicados. Elaborado en Google Earth Pro.....	5
Figura 2.1. Comparación entre la disposición de los ripios antes y después de la fase ENMS. Las líneas de color rojo y verde indican la ubicación inicial de los Ripios Chuquicamata y Ripios Mina Sur, respectivamente. Los cuerpos sólidos en rojo y verde representan la disposición después de la fase ENMS. Tomado de CODELCO (2016).....	7
Figura 2.2. Esquema de la distribución espacial de cationes y aniones. Tomado de Ibáñez et al. (2011).	8
Figura 2.3. Uniones entre tetraedros. (A) Oxígenos compartidos entre tetraedros. (B) Oxígenos unidos por cationes. Modificado de Ibáñez et al. (2011).....	8
Figura 2.4. Disposición de los tetraedros en los nesosilicatos. Tomado de Ibáñez et al. (2011).....	9
Figura 2.5. Disposición de los tetraedros en los sorosilicatos. Tomado de Ibáñez et al. (2011).....	9
Figura 2.6. Esquema de los anillos de tetraedros. (A) ciclosilicatos de base Si_3O_9 . (B) ciclosilicatos de base Si_4O_{12} . (C) ciclosilicatos de base Si_6O_{18} . Modificado de Ibáñez et al. (2011).....	10
Figura 2.7. Esquema de la disposición de tetraedros. (A) inosilicatos del grupo de los piroxenos. (B) inosilicatos del grupo de los anfíboles. Modificado de Ibáñez et al. (2011).	10
Figura 2.8. Disposición de tetraedros en una hoja tetraédrica. Tomado de Ibáñez et al. (2011).....	11
Figura 2.9. Esquema de la disposición de tetraedros en los tectosilicatos. Tomado de Ibáñez et al. (2011).....	11
Figura 2.10. Orden de susceptibilidad a la meteorización de los silicatos más comunes, siguiendo la serie de reacción de Bowen. Tomado de Tarbuck et al. (2005).	15

Figura 2.11. Esquema que muestra la estructura de una pila. Tomado de López (2012).	20
Figura 2.12. Modelo de UG de ripios. (A) sección cota 2.760. (B) sección 2.300 E. (C) sección -1.000 N. Extraído del modelo RAMS 2.	24
Figura 3.1. Síntesis geológica de las formaciones rocosas expuestas cerca del distrito Chuquicamata, con énfasis en el mismo, marcado en el recuadro azul. Incluyendo la ubicación del yacimiento Chuquicamata, Mina Sur y el stock RAMS 2. Modificado de Tomlinson <i>et al.</i> (2018).....	31
Figura 3.2. Fotografías de la litología del Pórfido Chuqui. Tomado de Demané (2015).	33
Figura 3.3. Fallas principales de la mina Chuquicamata. Tomado de Collado et al. (2005).	35
Figura 3.4. Sección geológica esquemática donde se puede ver la distribución de las alteraciones hidrotermales con su mineralización. Tomada de Cordova et al. (2010). ...	42
Figura 3.5. Descripción del yacimiento exótico de Chuquicamata. Modificado de Münchmeyer (1996).....	44
Figura 3.6. Perfil esquemático típico NE-SW antiguo de Mina Sur que representa la litología. Las relaciones de contacto y posiciones estratigráficas están idealizadas. Modificado de Astengo (2002).	48
Figura 3.7. Perfil esquemático típico NE-SW antiguo de Mina Sur, mostrando las unidades geológicas. Modificado de Astengo (2002).....	53
Figura 4.1. Vista en planta de los sólidos CADEMI. Los sólidos de la izquierda corresponden al RAMS 1 y los de la derecha al RAMS 2.	57
Figura 4.2. RAMS 2 con las diferentes campañas de perforación, resaltado en el cuadro azul, la zona de explotación actual. Modificado de CODELCO (2023).....	58
Figura 4.3. Espectro electromagnético. Tomado de Casal (2013).	59
Figura 4.4. Ejemplo de curvas espectrales de 173 muestras. Tomado de Andrade y Celis (2021).	60
Figura 4.5. Fotografías del equipo NIR Spectral Evolution oreXpress modelo SM-3500.	61
Figura 4.6. Fotografías de la benchtop reflectance probe o sonda de reflectancia de mesa.	

La fotografía de la izquierda muestra su posición de lectura, mientras que la derecha muestra el espacio donde se ubica la muestra y el orificio por el cual el equipo emite luz.61

Figura 4.7. Fotografías de las herramientas utilizadas en el proceso de medición NIR con escala. (A) Pala JIS. (B) Espátula.62

Figura 4.8. Fotografías de las herramientas utilizadas en el proceso de medición NIR con escala. (A) Base portamuestras. (B) Portamuestras. (C) Disco metálico de laboratorio. 63

Figura 4.9. Fotografías del notebook utilizado en la medición.....63

Figura 4.10. Fotografía del blanco de referencia utilizado para calibrar el equipo NIR.64

Figura 5.1. Gráfico de evolución de la humedad en el Ripio Verde (RAMS), con una banda de aceptación en rojo de 7.0%. Incluye una flecha que indica la tendencia de los datos, después del comienzo de los problemas en la lixiviación. Elaborado en Excel. ...72

Figura 5.2. Gráfico de evolución de la humedad en la carga a buzón (Mezcla). Incluye una flecha que indica la tendencia de los datos, después del comienzo de los problemas en la lixiviación. Elaborado en Excel.73

Figura 5.3. Gráfico de evolución de la humedad en el Ripio Rojo. Incluye una flecha que indica la tendencia de los datos, después del comienzo de los problemas en la lixiviación. Elaborado en Excel.73

Figura 5.4. Gráfico de evolución del porcentaje de finos en el Ripio Verde. Incluye una flecha que indica la tendencia de los datos, después de las fechas en las que aumenta la humedad en los RAMS. Elaborado en Excel.74

Figura 5.5. Gráfico de evolución del porcentaje de finos en la carga a buzón (Mezcla). Incluye una flecha que indica la tendencia de los datos, después de las fechas en las que aumenta la humedad en los RAMS. Elaborado en Excel.75

Figura 5.6. Gráfico de evolución del porcentaje de finos en el Ripio Rojo. Incluye una flecha que indica la tendencia de los datos, después de las fechas en las que aumenta la humedad en los RAMS. Elaborado en Excel.75

Figura 5.7. Gráfico de la Composición general de la porción de fina del Ripio Verde. Elaborado en Excel.76

Figura 5.8. Gráfico de la Composición general de la porción de fina del Ripio Mezcla. Elaborado en Excel.77

Figura 5.9. Gráfico de la composición general de la porción de fina del Ripio Rojo. Elaborado en Excel.	77
Figura 5.10. Gráfico de evolución de los porcentajes de caolinita (wt%) extraídos por la pala en RAMS 1 y 2. Elaborado en Excel.....	78
Figura 5.11. Gráfico de evolución de los porcentajes de clorita (wt%) extraídos por la pala en RAMS 1 y 2. Elaborado en Excel.....	78
Figura 5.12. Gráfico de evolución de los porcentajes de illita (wt%) extraídos por la pala en RAMS 1 y 2. Elaborado en Excel.	79
Figura 5.13. Gráfico de evolución de los porcentajes de muscovita (wt%) extraídos por la pala en el RAMS 2. Elaborado en Excel.....	79
Figura 5.14. Gráfico Actual V/S Predicted del modelo quimiométrico de cuarzo. Elaborado en GRAMS IQ.....	82
Figura 5.15. Gráfico Actual V/S Predicted del modelo quimiométrico de plagioclasa. Elaborado en GRAMS IQ.....	83
Figura 5.16. Gráfico Actual V/S Predicted del modelo quimiométrico de feldespato K. Elaborado en GRAMS IQ.....	84
Figura 5.17. Gráfico Actual V/S Predicted del modelo quimiométrico de actinolita. Elaborado en GRAMS IQ.....	85
Figura 5.18. Diagrama de árbol de decisión con el cuarzo como “target”. Elaborado en Orange Data Mining.....	87
Figura 5.19. Gráfico de probabilidad lognormal en el que se identifican por separado las UG de cuarzo. Elaborado gracias a Maptek Vulcan.	88
Figura 5.20. Histogramas para las UG de cuarzo. La curva en azul ilustra una curva gaussiana que sirve como referencia para analizar el patrón de las barras. (A) Ilustra la UG_QZ 1. (B) Ilustra la UG_QZ 2. (C) Ilustra la UG_QZ 3. (D) Ilustra la UG_QZ 4...	89
Figura 5.21. Diagrama de árbol de decisión con la plagioclasa como “target”. Elaborado en Orange Data Mining.....	90
Figura 5.22. Gráfico de probabilidad lognormal en el que se identifican por separado las UG de plagioclasa. Elaborado gracias a Maptek Vulcan.....	91
Figura 5.23. Histogramas para las UG de plagioclasa. La curva en azul ilustra una curva gaussiana que sirve como referencia para analizar el patrón de las barras. (A) Ilustra la	

UG_PLG 1. (B) Ilustra la UG_PLG 2. (C) Ilustra la UG_PLG 3. (D) Ilustra la UG_PLG 4.....	93
Figura 5.24. Diagrama de árbol de decisión con el feldespató K como “target”. Elaborado en Orange Data Mining.....	93
Figura 5.25. Gráfico de probabilidad lognormal en el que se identifican por separado las UG de feldespató K. Elaborado gracias a Maptek Vulcan.....	95
Figura 5.26. Histogramas para las UG de feldespató K. La curva en azul ilustra una curva gaussiana que sirve como referencia para analizar el patrón de las barras. (A) Ilustra la UG_FLK 1. (B) Ilustra la UG_FLK 2. (C) Ilustra la UG_FLK 3.....	96
Figura 5.27. Diagrama de árbol de decisión con la actinolita como “target”. Hecho en Orange Data Mining.....	96
Figura 5.28. Gráfico de probabilidad lognormal en el que se identifican por separado las UG de actinolita. Elaborado gracias a Maptek Vulcan.....	98
Figura 5.29. Histogramas para las UG de actinolita. La curva en azul ilustra una curva gaussiana que sirve como referencia para analizar el patrón de las barras. (A) Ilustra la UG_ACT 1. (B) Ilustra la UG_ACT 2. (C) Ilustra la UG_ACT 3. (D) Ilustra la UG_ACT 4.....	99
Figura 5.30. Modelo de UG de cuarzo. (A) sección cota 2,760. (B) sección 2,300E. (C) sección -1,000N.....	100
Figura 5.31. Modelo de estimación de cuarzo. (A) sección cota 2,760. (B) sección 2,300E. (C) sección -1,000N.....	101
Figura 5.32. Modelo de UG de plagioclasa. (A) sección cota 2,760. (B) sección 2,300 E. (C) sección -1,000N.....	102
Figura 5.33. Modelo de estimación de plagioclasa. (A) sección cota 2,760. (B) sección 2,300E. (C) sección -1,000N.....	103
Figura 5.34. Modelo de UG de feldespató K. (A) sección cota 2,760. (B) sección 2,300E. (C) sección -1,000N.....	104
Figura 5.35. Modelo de estimación de feldespató K. (A) sección cota 2,760. (B) sección 2,300E. (C) sección -1,000N.....	105
Figura 5.36. Modelo de UG de actinolita. (A) sección cota 2,760. (B) sección 2,300E. (C) sección -1,000N.....	106

Figura 5.37. Modelo de estimación de actinolita. (A) sección cota 2,760. (B) sección 2,300E. (C) sección -1,000N.....	107
Figura 5.38. Gráficos de dispersión que muestran la relación entre el promedio de porcentajes de cuarzo de las muestras por espacio de bloque y el cuarzo estimado, separados por UG. El R^2 representa el coeficiente de correlación.....	108
Figura 5.39. Gráficos de dispersión que muestran la relación entre el promedio de porcentajes de plagioclasa de las muestras por espacio de bloque y la plagioclasa estimada, separados por UG. El R^2 representa el coeficiente de correlación.....	109
Figura 5.40. Gráficos de dispersión que muestran la relación entre el promedio de porcentajes de feldespato K de las muestras por espacio de bloque y el feldespato K estimado, separados por UG. El R^2 representa el coeficiente de correlación.	110
Figura 5.41. Gráficos de dispersión que muestran la relación entre el promedio de porcentajes de actinolita de las muestras por espacio de bloque y la actinolita estimada, separados por UG. El R^2 representa el coeficiente de correlación.....	111
Figura 5.42. Fotografía que muestra la zona limítrofe entre áreas con diferentes niveles de humedad en los ripios del RAMS 2. La línea segmentada de color rojo indica, de manera aproximada, el límite entre ambas zonas.....	114
Figura 5.43. Gráfico combinado que compara el tonelaje de material extraído por UG de actinolita y su humedad entre marzo de 2023 y octubre de 2024. El tonelaje se representa como un gráfico de datos 100% apilados y la humedad como un gráfico de líneas.....	115
Figura 5.44. Gráfico de líneas que compara la actinolita estimada y la humedad del material extraído de los ripios entre marzo de 2023 y octubre de 2024.	116
Figura 5.45. Gráfico de evolución del porcentaje de finos de la granulometría de cola y humedad en pilas ya lixiviadas. Elaborado en Excel.	117
Figura 5.46. Gráficos de dispersión de arcillas en comparación con la humedad de las pilas post-lixivación. El gráfico superior corresponde al de la clorita VS la humedad y el inferior al de caolinita VS humedad. El R^2 representa el coeficiente de correlación. Elaborados en Excel.....	118
Figura 5.47. Gráficos de dispersión de arcillas en comparación con la humedad de las pilas post-lixivación. El gráfico superior corresponde al de la alunita VS la humedad y el inferior al de muscovita/sericita VS humedad. El R^2 representa el coeficiente de	

correlación. Elaborados en Excel.....	119
Figura 5.48. Gráficos de dispersión de minerales modelados en comparación con la humedad de las pilas post-lixiviación. El gráfico superior corresponde al de cuarzo VS humedad y el inferior al de plagioclasa VS humedad. El R^2 representa el coeficiente de correlación. Elaborados en Excel.....	120
Figura 5.49. Gráficos de dispersión de minerales modelados en comparación con la humedad de las pilas post-lixiviación. El gráfico superior corresponde al de feldespato K VS la humedad y el inferior al de anfíboles VS humedad. El R^2 representa el coeficiente de correlación. Elaborados en Excel.	121
Figura 5.50. Gráfico de dispersión de la ley de Ca en comparación con la humedad de las pilas post-lixiviación. El R^2 representa el coeficiente de correlación. Elaborado en Excel.	122
Figura 5.51. Gráficos de dispersión de las leyes de K y Mg en comparación con la humedad de las pilas post-lixiviación. El gráfico superior representa el de potasio y el inferior el de magnesio. El R^2 representa el coeficiente de correlación. Elaborado en Excel.	123
Figura 9.1. Análisis de deriva en la estimación de la UG de cuarzo 1 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_cuarzo” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_CUARZO” a la base de datos.	147
Figura 9.2. Análisis de deriva en la estimación de la UG de cuarzo 2 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_cuarzo” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_CUARZO” a la base de datos.	148
Figura 9.3. Análisis de deriva en la estimación de la UG de cuarzo 3 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_cuarzo” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_CUARZO” a la base de datos.	149
Figura 9.4. Análisis de deriva en la estimación de la UG de cuarzo 4 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_cuarzo” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_CUARZO” a la base de datos.	150
Figura 9.5. Análisis de deriva en la estimación de la UG de plagioclasa 1 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_plagioclasa” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_PLAGIO” a la base de datos.	151

Figura 9.6. Análisis de deriva en la estimación de la UG de plagioclasa 2 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_plagioclasa” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_PLAGIO” a la base de datos.	152
Figura 9.7. Análisis de deriva en la estimación de la UG de plagioclasa 3 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_plagioclasa” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_PLAGIO” a la base de datos.	153
Figura 9.8. Análisis de deriva en la estimación de la UG de plagioclasa 4 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_plagioclasa” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_PLAGIO” a la base de datos.	154
Figura 9.9. Análisis de deriva en la estimación de la UG de feldespato K 1 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_feldespatok” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_FELDES” a la base de datos.	155
Figura 9.10. Análisis de deriva en la estimación de la UG de feldespato K 2 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_feldespatok” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_FELDES” a la base de datos.	156
Figura 9.11. Análisis de deriva en la estimación de la UG de feldespato K 3 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_feldespatok” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_FELDES” a la base de datos.	157
Figura 9.12. Análisis de deriva en la estimación de la UG de actinolita 1 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_actinolita” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_ACTINO” a la base de datos.	158
Figura 9.13. Análisis de deriva en la estimación de la UG de actinolita 2 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_actinolita” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_ACTINO” a la base de datos.	159
Figura 9.14. Análisis de deriva en la estimación de la UG de actinolita 3 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_actinolita” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_ACTINO” a la base de datos.	160
Figura 9.15. Análisis de deriva en la estimación de la UG de actinolita 4 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_actinolita” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_ACTINO” a la base de datos.	161
Figura 9.16. Gráficos de dispersión que muestran la relación entre las leyes de Si, Al y	

Fe y los niveles de humedad en las pilas post-lixiviación. (A) corresponde al silicio. (B) corresponde al aluminio. (C) corresponde al hierro. El R^2 representa el coeficiente de correlación. Elaborado en Excel. 164

Figura 9.17. Gráficos de dispersión que muestran la relación entre las leyes de Cu, S, Na y Mn y los niveles de humedad en las pilas post-lixiviación. (A) corresponde al cobre. (B) corresponde al azufre. (C) corresponde al sodio. (D) corresponde al manganeso. El R^2 representa el coeficiente de correlación. Elaborado en Excel..... 165

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Principales minerales formadores de rocas con sus reacciones. Modificado de Eby (2016).....	14
Tabla 2.2. Órdenes de reacción para algunos silicatos. Modificado de Crundwell (2014).	18
Tabla 2.3. Reactividad relativa de algunos minerales de ganga importantes en condiciones de lixiviación en pilas. Modificado de Chetty (2018).....	22
Tabla 2.4. Número de UG asignado a cada ripio.	23
Tabla 3.1. Tabla resumen con el criterio de asignación de UG. Tomada de Demané et al. (2023).	55
Tabla 4.1. Especificaciones de Spectral Evolution oreXpress modelo SM-3500.....	62
Tabla 4.2. Criterios asociados a la desviación residual predictiva (RPD), basado en Malley et al. (2004).	66
Tabla 5.1. Resultados de análisis QEMSCAN a muestras de ripios, los cuales se muestran en porcentaje en peso (wt%).	80
Tabla 5.2. Resultados estadísticos del modelo quimiométrico de cuarzo.....	82
Tabla 5.3. Resultados estadísticos del modelo quimiométrico de plagioclasa.....	83
Tabla 5.4. Resultados estadísticos del modelo quimiométrico de feldespato K.	84
Tabla 5.5. Resultados estadísticos del modelo quimiométrico de actinolita.....	86
Tabla 5.6. Definiciones de las UG de cuarzo.	88
Tabla 5.7. Definiciones de las UG de plagioclasa.....	91
Tabla 5.8. Definiciones de las UG de feldespato K.	94
Tabla 5.9. Definiciones de las UG de actinolita.....	97
Tabla 9.1. Análisis DRX de la porción fina de muestras de ripios.	146
Tabla 9.2. Análisis modal TESCAN de muestras de pilas post-lixiviación. Los valores se muestran en porcentaje.....	162
Tabla 9.3. Análisis FRX de muestras de pilas post-lixiviación. Los valores se muestran en porcentaje.	163

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Problema de investigación

El cobre es esencial para el desarrollo de la sociedad actual, requiriéndose aumentar la producción de este elemento en los principales yacimientos tanto en Chile como a nivel mundial. Al ir agotándose los depósitos ricos en cobre, se ve la necesidad de minar sectores dentro de los yacimientos con más baja ley y minerales más complejos de tratar para poder mantener la producción de cobre fino o extraer cobre de material ya tratado previamente. La oportunidad económica que permite la explotación y beneficio de los minerales, bajo las condiciones mencionadas, se ve reducida al aumentar los costos operacionales (Northey *et al.*, 2014).

En la actualidad, la Gerencia de Extracción y Lixiviación (GEL) perteneciente a la División Chuquicamata de la empresa CODELCO, está llevando a cabo el proyecto "Lixiviación de ripios y recursos artificiales". En este proyecto, se han adaptado los recursos disponibles de la Planta de Tratamientos de Minerales en Pila (PTMP) para tratar minerales previamente lixiviados en bateas que cumplen con una granulometría adecuada. Por lo tanto, se han excluido los procesos de reducción de tamaño y clasificación.

La GEL se encarga principalmente del procesamiento de minerales oxidados. Estos minerales se extraen de un depósito (stock) y se mezclan en una proporción de 70/30, combinando Ripio verde de Mina Sur y Ripio Rojo de Chuquicamata, respectivamente, para luego ser trasladados a las pilas de lixiviación. Terminado el proceso de lixiviación, el material que queda como residuo es llevado a botaderos (Aravena, 2020).

Este procesamiento de los ripios está presentando un problema importante en la actualidad, que es la inestabilidad estructural de los ripios post-lixiviación, impidiendo una buena cohesión y forma en el material, dificultando su compactación y disposición en los botaderos (Figura 1.1). Esto se debe principalmente a la alta humedad residual que retienen las pilas después del proceso. Esta situación comenzó a ocurrir aproximadamente en marzo de 2023, cuando se cambió del stock RAMS 1 al RAMS 2 y todavía persiste (Superintendencia Ingeniería de Procesos, 2024).

Dentro de los antecedentes que pueden afectar el proceso de lixiviación, la aglomeración es importante, ya que, en esta etapa, un exceso de agua genera glómeros inestables que afectan el drenaje, y la falta de agua produce glómeros débiles que se compactan al ser regados en las pilas, causando canalizaciones en la lixiviación (Aravena, 2020). Asimismo, la presencia de arcillas y minerales de granulometría fina, contribuyen a la retención de humedad en distintos segmentos del proceso de lixiviación (Bouffard, 2008).

Por otra parte, durante el procesamiento de material en la lixiviación, algunos minerales de ganga pueden generar inconvenientes. En particular, los nesosilicatos, ciclo y sorosilicatos al poder disolverse fácilmente (Chetty, 2018), pueden formar gel de sílice, el cual dificulta la lixiviación, reduciendo la permeabilidad de las pilas y afectando negativamente la extracción con disolvente, el intercambio iónico y la electrólisis (Terry, 1983). Además, los inosilicatos, filo y tectosilicatos, aunque generalmente insolubles, pueden formar fases minerales secundarias que de igual manera impactan la eficiencia del proceso.

En Koizhanova *et al.* (2023) se demostró mediante estudios de lixiviación que los compuestos de silicato de calcio y magnesio aumentaban en gran medida el consumo de ácido. También en Jansen y Taylor (2003) se evidenció que minerales como las plagioclasas cálcicas, los anfíboles, las montmorillonitas y los piroxenos consumen altas cantidades de ácido en el proceso de lixiviación en pilas.

A pesar de la relevancia de estos factores, la caracterización, la comprensión detallada de las gangas de los stocks y su impacto en los procesos metalúrgicos de lixiviación, aún no han sido abordadas de manera exhaustiva. Esta situación dificulta la planificación adecuada y reduce la eficiencia global del proceso.



Figura 1.1. Fotografías del material residual post-lixiviación que evidencian los problemas actuales de inestabilidad estructural.

1.2. Hipótesis

El aumento en la retención de humedad de las pilas de lixiviación puede ser provocado por distintas causas dentro de las que se barajan; rípios de entrada con un alto porcentaje de finos, posibles incrementos en los porcentajes de arcillas, y cambios mineralógicos relacionados a otras gangas que afecten el proceso. Por esto, se plantea que, mediante el estudio de las distintas variables relacionadas al problema en el procesamiento de los rípios, a través de análisis estadísticos y, la caracterización y modelado de las gangas que se encuentran dentro de los stocks que está procesando la GEL, será posible identificar relaciones entre las propiedades de las gangas y el rendimiento de los procesos metalúrgicos de lixiviación en pilas; lo que permitirá predecir su actuar, posibilitando la mejora de la eficiencia y la calidad de la extracción de cobre.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Caracterizar geológica y mineralógicamente gangas en Rípios Antiguos de Mina Sur con base en lecturas de espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) de sondajes y analizar sus implicancias geometalúrgicas en los procesos de lixiviación en pilas.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Identificar las gangas que se podrían relacionar al problema de inestabilidad estructural de los rípios post-lixiviación.
2. Cuantificar los contenidos de dichas gangas en las distintas muestras de sondajes del RAMS 2 para generar unidades geológicas (UG) de estimación mediante el uso de *machine learning* y construir modelos de bloques relacionados a estas.
3. Estudiar los efectos de las gangas en los procesos de lixiviación en pilas de la GEL, con el fin de entender cómo estas influyen en la retención de humedad en las pilas.

1.4. Ubicación y accesos

La División Chuquicamata perteneciente al Distrito Norte de CODELCO, se encuentra ubicada en la precordillera de la Región de Antofagasta, en la provincia del Loa, 15 km al norte de la comuna de Calama, a 230 km de la ciudad de Antofagasta y a 1.650 km de la ciudad de Santiago. Las coordenadas UTM aproximadas de la división son 7.532.960 m N y 508.360 m E con una altura de aproximadamente 2.800 m s.n.m. (Figura 1.2 y Figura 1.3). Desde la ciudad de Calama, para poder acceder a la división, se debe utilizar la ruta 24 recorriéndola hacia el norte por alrededor de 18 km hasta llegar a la puerta de acceso (puerta N°2) del complejo Chuquicamata. En la Figura 1.3, se puede observar la distribución espacial del rajo de Chuquicamata y Mina Sur, en conjunto con los stocks de rípio (RAMS), pertenecientes a la división.

El clima del sector en que se encuentra el yacimiento es catalogado como desértico frío, destacándose por su escasez de precipitaciones, las cuales no suelen superar los 75 mm al año. El promedio anual de temperaturas se sitúa en los 11,2°C, sin embargo, la amplitud térmica es considerable, alcanzando mínimas de hasta -15°C en invierno y máximas por encima de los 30°C en verano (Centro de información de Recursos Naturales y Sistema de información territorial, 2021).



Figura 1.2. Mapa de ubicación y acceso a Chuquicamata. Tomado de García (2013).



Figura 1.3. Imagen satelital de la División Chuquicamata con Chuquicamata Rajo, Mina Sur Rajo (explotado), y stocks RAMS 1 (explotado) y RAMS 2 ubicados. Elaborado en Google Earth Pro.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de explotación Chuquicamata y Mina Sur

El yacimiento Chuquicamata comenzó a operar en 1915, localizado entre la Quebrada Chuquicamata y los cerros Chuquicamata al este. Inicialmente, el depósito tenía 3.500 m de longitud y anchos que fluctuaban entre 100 y 400 m. En el rajo en un principio se extrajeron minerales oxidados (atacamita-brochantita) con leyes superiores a 1.5% de CuT, procesados en la planta de lixiviación en bateas, proceso que también se utilizó para tratar los minerales de Mina Sur. Para 1960, se habían procesado 407 millones de toneladas de mineral dejando ripios con un 0,27% de CuT.

La mineralización mixta de la zona límite entre la Zona de oxidación y la Zona de enriquecimiento supérgeno empezó a extraerse en los años 30 y se procesó de igual manera en la planta de bateas, llegando a procesar hacia 1960, unos 39 millones de toneladas de mixtos oxidados que generaron ripios con leyes de hasta el 1% de CuT, los cuales fueron reprocesados en la planta concentradora que se construyó para procesar sulfuros primarios y secundarios.

Se continuó procesando minerales oxidados de Chuquicamata hasta 1986 momento en el cual la planta se enfocó en los minerales de Mina Sur.

Para 2001, se habían procesado aproximadamente 1.900 Mton de mineral en Chuquicamata de los cuales, 1.200 Mton eran sulfuros que generaron relaves depositados en el Tranque Talabre con una ley de 0,2% de CuT y 0,08% de Mo, además, 550 Mton correspondían a Ripios de Chuquicamata con una ley promedio de 0,25% de CuT, depositado en el botadero de Ripios. En cuanto al material de Mina Sur, su procesamiento produjo alrededor de 130 Mton de Ripios de Mina Sur con una ley residual de 0,44% de CuT.

A partir de los años 2000, mediante los estudios, “Reconstitución Histórica Botaderos RAMS y Determinación Zonas Compactación y Leyes” (Mintec, 2000), “Estimación de Recursos III” (Superintendencia de Geología, 2001) y “Estimación de Recursos IV” (Superintendencia de Geología, 2002), se buscó caracterizar geológicamente los botaderos

de rípios, buscando su identificación como recursos lixiviables de baja ley. La disposición de los botaderos cambió con el desarrollo de la fase Expansión Norte Mina Sur (ENMS), siendo desplazados principalmente hacia el sur de su ubicación original, formando los stocks de rípios RAMS 1 y RAMS 2 (CODELCO, 2016), algo que se puede observar en la Figura 2.1.

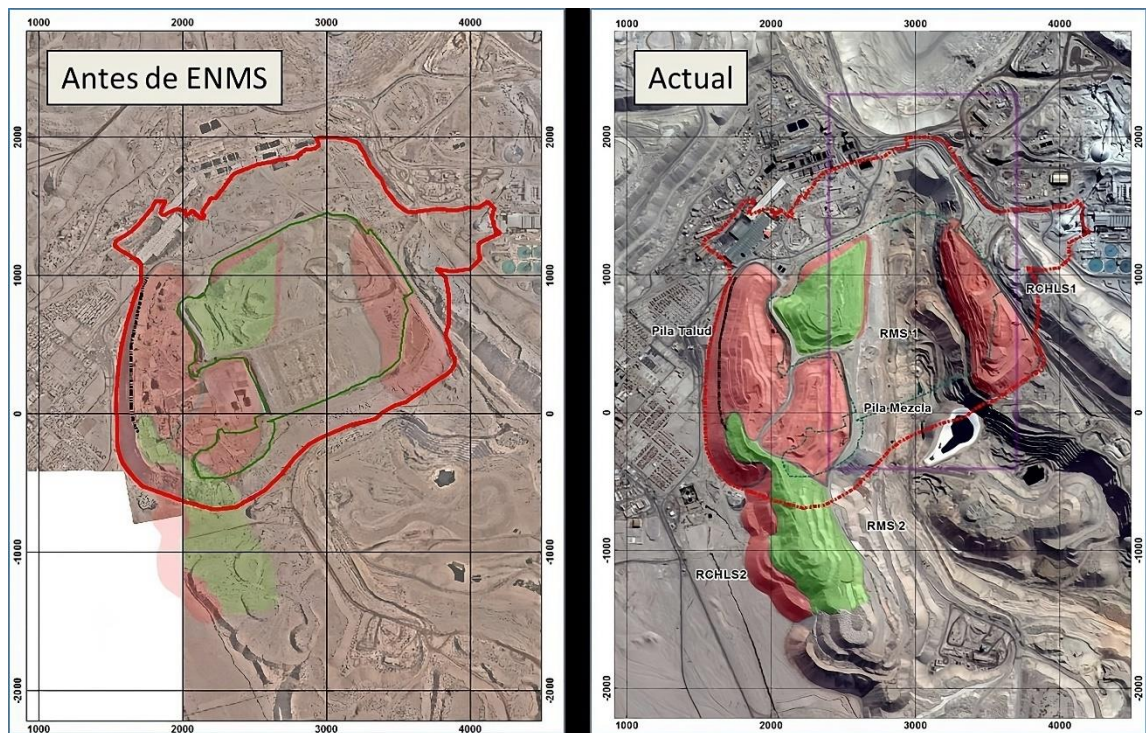


Figura 2.1. Comparación entre la disposición de los rípios antes y después de la fase ENMS. Las líneas de color rojo y verde indican la ubicación inicial de los Rípios Chuquicamata y Rípios Mina Sur, respectivamente. Los cuerpos sólidos en rojo y verde representan la disposición después de la fase ENMS. Tomado de CODELCO (2016).

2.2. Minerales de ganga

Los minerales de ganga son aquellos que acompañan a la mena pero que no presentan un valor económico. En sí estos minerales en los yacimientos porfíricos de cobre están conformados por más de un 95% de sílice o diversos silicatos. La sílice también es importante mencionar que constituye más del 98% de la composición sólida de la corteza terrestre. Dentro de los minerales de gangas también se pueden encontrar minerales no silicatados importantes, como la calcita, dolomita, yeso y halita (Muñoz, 2022).

2.3. Los silicatos, conceptos y aspectos importantes

Los silicatos como se mencionó anteriormente representan la mayor parte de los minerales de ganga y entre estos los más relevantes serían los feldespatos, olivinos, micas, piroxenos, anfíboles, cuarzo y los minerales de arcilla (Muñoz, 2022).

Son silicatos los minerales que tienen como unidad básica fundamental el tetraedro de silicio (SiO_4)⁴⁻, compuesto por un catión de silicio (Si^{4+}) enlazado a cuatro aniones de oxígeno (O^{2-}), los cuales se disponen alrededor del silicio en las direcciones de los vértices de un tetraedro (Ibáñez *et al.*, 2011). La distribución de cationes y aniones se puede ver en la Figura 2.2.

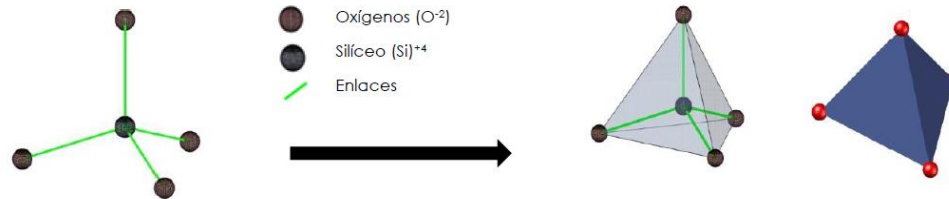


Figura 2.2. Esquema de la distribución espacial de cationes y aniones. Tomado de Ibáñez *et al.* (2011).

Los tetraedros de silicio pueden unirse compartiendo oxígenos, formando puentes y dando lugar a la polimerización (Muñoz, 2022), o enlazarse mediante cationes, generando nuevos óxidos distintos a los del tetraedro O-Si (Ibáñez *et al.*, 2011), lo que origina la diversidad estructural de los silicatos. Estas dos posibilidades se observan en la Figura 2.3

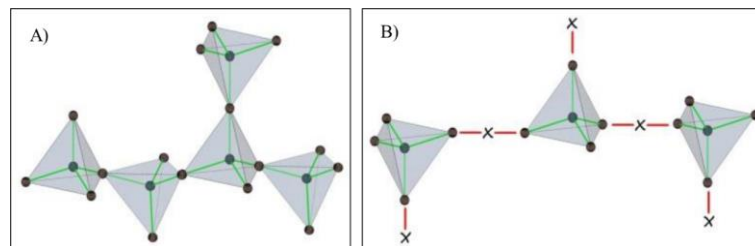


Figura 2.3. Uniones entre tetraedros. (A) Oxígenos compartidos entre tetraedros. (B) Oxígenos unidos por cationes. Modificado de Ibáñez *et al.* (2011).

Los silicatos pueden ser divididos en seis subclases en base a su estructura interna; nesosilicatos, sorosilicatos, ciclosilicatos, inosilicatos, filosilicatos y tectosilicatos (Klein y Hurlbut, 1997).

2.3.1. Nesosilicatos

Son aquellos silicatos con una relación Si:O de 1:4 (SiO_4), en los que los tetraedros se encuentran unidos por puentes de cationes metálicos, sin tetraedros que compartan oxígenos (Figura 2.4). Estos silicatos incluyen a los minerales del grupo de la fenaquita, del olivino, de los granates, del circón, de la humita y al grupo Al_2SiO_5 (Klein y Hurlbut, 1997).

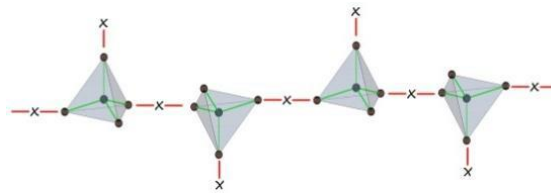


Figura 2.4. Disposición de los tetraedros en los nesosilicatos. Tomado de Ibáñez *et al.* (2011).

2.3.2. Sorosilicatos

Los sorosilicatos poseen una relación Si:O de 2:7 (Si_2O_7) y están formados por grupos tetraédricos dobles, independientes, donde dos tetraedros SiO_4 comparten uno de los oxígenos de un vértice (Figura 2.5). Bastantes minerales se asocian a esta subclase, destacando entre éstos los pertenecientes al grupo de la epidota (Klein y Hurlbut, 1997).

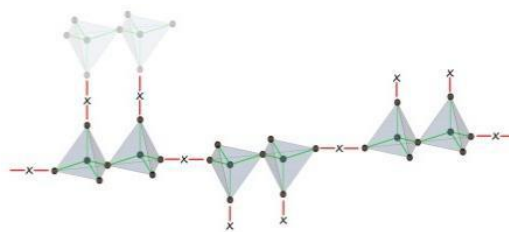


Figura 2.5. Disposición de los tetraedros en los sorosilicatos. Tomado de Ibáñez *et al.* (2011).

2.3.3. Ciclosilicatos

Los ciclosilicatos consisten en anillos de tetraedros SiO_4 que se encuentran enlazados, con una relación Si:O de 1:3 y presentan tres configuraciones cíclicas cerradas (Figura 2.6). Algunos ejemplos de minerales son la benitoíta para la base Si_3O_9 , la pagodita de base Si_4O_{12} y la turmalina de base Si_6O_{18} (Klein y Hurlbut, 1997).

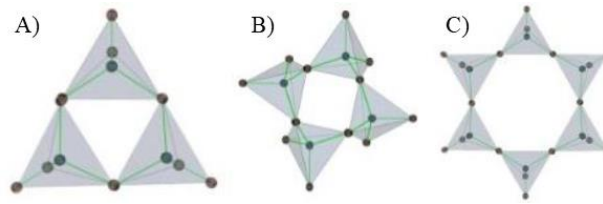


Figura 2.6. Esquema de los anillos de tetraedros. (A) ciclosilicatos de base Si_3O_9 . (B) ciclosilicatos de base Si_4O_{12} . (C) ciclosilicatos de base Si_6O_{18} . Modificado de Ibáñez *et al.* (2011).

2.3.4. Inosilicatos

En los inosilicatos, los tetraedros SiO_4 se encuentran unidos entre sí, formando cadenas simples (grupo de los piroxenos) o dobles (grupo de los anfíboles), estructuras visibles en la Figura 2.7. La relación Si:O en los de cadena simple es 1:3 y en los de cadenas dobles es de 4:11 (Klein y Hurlbut, 1997). Un ejemplo de piroxeno es el diópsido ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) y uno de anfíbol es la actinolita ($\text{Ca}_2(\text{Mg, Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$).

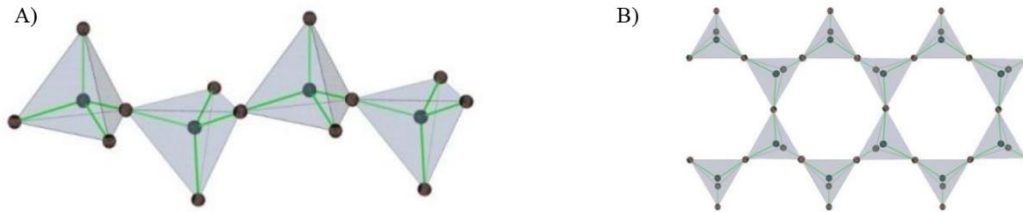


Figura 2.7. Esquema de la disposición de tetraedros. (A) inosilicatos del grupo de los piroxenos. (B) inosilicatos del grupo de los anfíboles. Modificado de Ibáñez *et al.* (2011).

2.3.5. Filosilicatos

Los filosilicatos se forman por la unión de tetraedros que constituyen anillos hexagonales, formando hojas o láminas (Figura 2.8). Tres de los cuatro oxígenos de cada tetraedro se comparten con tetraedros adyacentes, lo que resulta en una relación Si:O de 2:5 (Klein y Hurlbut, 1997). La estructura general de los minerales filosilicatados está constituida por bloques básicos que incluyen capas tetraédricas T y capas octaédricas O en su composición (Brigatti *et al.*, 2006). Los grupos de minerales pertenecientes a los filosilicatos son; el grupo de las serpentinas, el de los talcos/pirofilitas, el de las micas, el de las cloritas y el de los minerales arcillosos (Deer *et al.*, 2013).

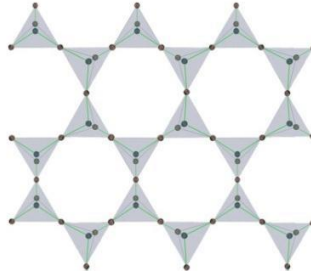


Figura 2.8. Disposición de tetraedros en una hoja tetraédrica. Tomado de Ibáñez *et al.* (2011).

2.3.6. Tectosilicatos

Los tectosilicatos son minerales caracterizados por formarse alrededor de un armazón tridimensional de tetraedros SiO_4 enlazados (Figura 2.9). En estos minerales todos los iones de oxígeno de cada tetraedro están compartidos con tetraedros vecinos, lo que resulta en una estructura con enlaces fuertes y una relación Si:O de 1:2. Algunos minerales importantes correspondiente a esta subclase son; el cuarzo, la ortosa y las plagioclasas (Klein y Hurlbut, 1997).

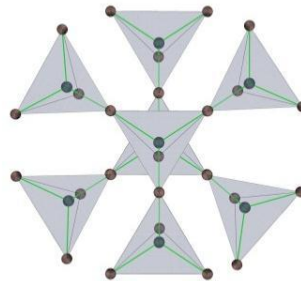


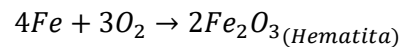
Figura 2.9. Esquema de la disposición de tetraedros en los tectosilicatos. Tomado de Ibáñez *et al.* (2011).

2.4. Meteorización química

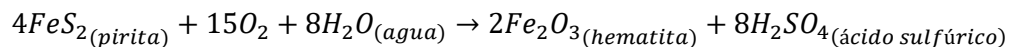
La meteorización química involucra los complejos procesos que alteran tanto los componentes de las rocas como las estructuras internas de los minerales, provocando su descomposición (Tarbuck *et al.*, 2005). Esta se produce mediante interacciones entre agua, gases y partículas sólidas (Eby, 2016). Los principales procesos de meteorización química que son la oxidación, la hidrólisis y la disolución, transforman los constituyentes de las rocas en minerales nuevos o los liberan al entorno. El agua es uno de los agentes más importantes para estos, ya que participa activamente en las reacciones químicas cumpliendo un papel crucial (Tarbuck *et al.*, 2005).

2.4.1. Oxidación

La oxidación se produce comúnmente cuando el oxígeno tiene interacción con minerales que contienen elementos en estado de oxidación más bajos, como el hierro (Fe) y el azufre (S), pero en sí, la oxidación ocurre cuando un compuesto o radical pierde electrones, sin necesariamente la presencia de oxígeno. La oxidación juega un papel importante en la descomposición de minerales ferromagnesianos como el piroxeno, el olivino y la hornblenda (Tarbuck *et al.*, 2005; Eby, 2016). Un ejemplo clásico de oxidación, es la reacción que ocurre con el hierro cuando entra en contacto con oxígeno que se puede ver acelerada en adición de agua.

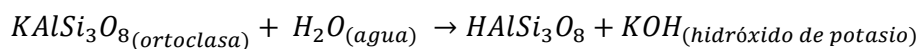


Otro ejemplo es la oxidación de la pirita que interactúa con oxígeno y agua formando hematita y ácido sulfúrico.



2.4.2. Hidrólisis

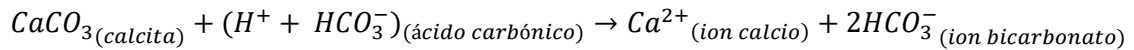
El proceso de hidrólisis consiste básicamente en cualquier reacción entre una sustancia y el agua. Cuando estos componentes reaccionan, algunas moléculas de agua se disocian en iones hidrógeno (H^+) e hidroxilo (OH^-). Los iones H^+ pueden sustituir a otros iones positivos en la estructura del mineral, modificando su ordenamiento original, provocando su descomposición. En la naturaleza el agua contiene por lo general otras sustancias que contribuyen con más iones H^+ , acelerando el proceso. El grupo de los silicatos se descompone principalmente mediante este proceso (Tarbuck *et al.*, 2005). Un ejemplo sería la hidrólisis de ortoclasa:



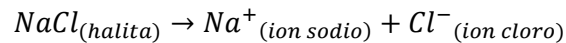
2.4.3. Disolución de minerales

En los minerales, la disolución es el tipo de descomposición más simple imaginable, permitiendo la separación de sus elementos químicos constituyentes. Aunque la mayoría

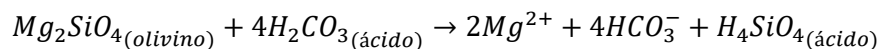
de los minerales son esencialmente insolubles en agua pura, la presencia incluso de cantidades muy pequeñas de ácido incrementa considerablemente la capacidad corrosiva del agua. Un ejemplo de lo anterior es cuando la calcita es atacada, incluso por una solución débilmente ácida (Tarbuck *et al.*, 2005):



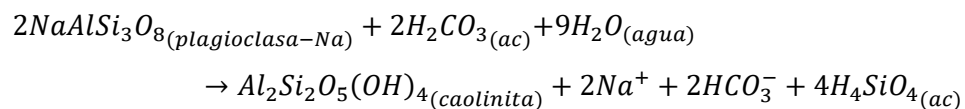
El proceso de disolución puede manifestarse por una reacción congruente o incongruente. La disolución congruente se refiere a la disolución directa de un mineral en sus iones constituyentes y no se forman nuevas fases (Crundwell, 2014). Esta realiza una disolución completa de minerales como la halita (NaCl) y la anhidrita (CaSO₄). Como ejemplo se tiene la disolución de halita en agua:



La disolución congruente por ácidos se produce cuando un mineral se disuelve mediante un ataque de ácido. En el entorno natural, este ácido generalmente proviene del suelo y es producido por procesos orgánicos, sin embargo, para simplificar, comúnmente se usa ácido carbónico para escribir ecuaciones de disolución ácida. Los silicatos como el olivino, piroxeno y anfíbol, así como los minerales de carbonato, suelen disolverse de esta forma de disolución congruente. Un ejemplo, es la disolución de olivino por ácido que se expresa de la siguiente forma:



La disolución incongruente por ácidos ocurre cuando un mineral se descompone en iones en solución y uno o más sólidos secundarios de composición diferente. La mayoría de minerales de silicato experimentan disolución incongruente. Un ejemplo típico es la descomposición química del feldespato (Eby, 2016).



En la Tabla 2.1, se puede observar los principales minerales formadores de roca y el tipo de reacción que producen.

Tabla 2.1. Principales minerales formadores de rocas con sus reacciones. Modificado de Eby (2016).

Mineral	Fórmula química	Roca común de ocurrencia	Reacción
Olivino	$(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_4$	Ígnea	Oxidación de Fe y Disolución congruente por ácidos.
Piroxenos	$(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$	Ígnea	
Anfíboles	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Ígnea Metamórfica	
Plagioclasa	$(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$	Ígnea Metamórfica	Disolución incongruente por ácidos.
Feldespatos K	KAlSi_3O_8	Ígnea Metamórfica Sedimentaria	
Biotita	$\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$	Metamórfica Ígnea	
Muscovita	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Metamórfica Ígnea	Disolución incongruente por ácidos.
Cuarzo	SiO_2	Ígnea Metamórfica	Resistente a la disolución.

2.4.4. Susceptibilidad de los silicatos a la meteorización química

La meteorización química en silicatos ha demostrado seguir un patrón inverso a la serie de reacción de Bowen, la cual ordena a los minerales según su secuencia de cristalización a partir de magmas (White y Buss 2014). Por lo tanto, el orden de meteorización química de los minerales es el mismo que su orden de cristalización (Figura 2.10). En base a la litología también se observa un control importante, ya que las rocas de silicatos se pueden dividir de forma amplia entre las rocas máficas, que son las más reactivas como por ejemplo los basaltos y las litologías félsicas, que son menos reactivas, como los granitos

y las metapelitas. Esto ocurre porque las rocas máficas contienen minerales con una mayor proporción de Ca y Mg, esenciales para la formación de carbonatos, que son altamente reactivos. Aunque estos elementos también están presentes en las rocas félsicas, lo están en una proporción mucho menor (West *et al.*, 2005).

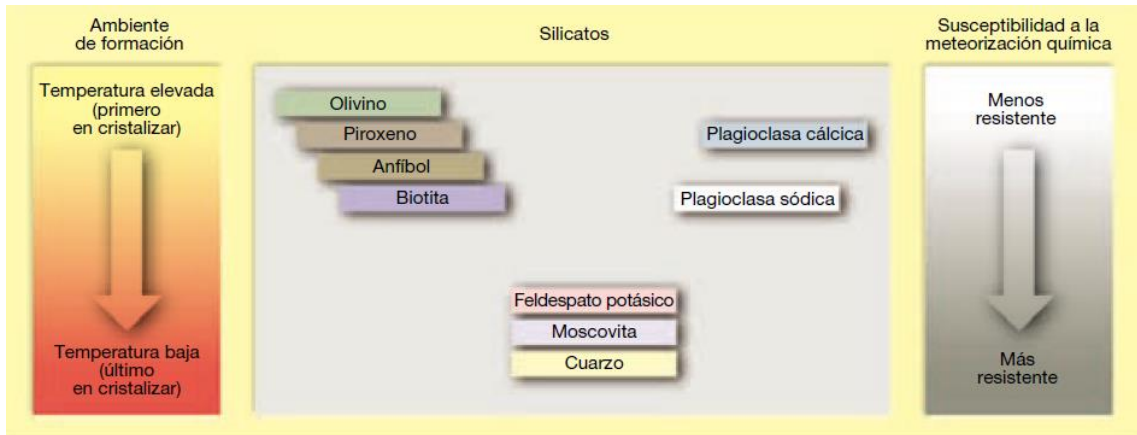


Figura 2.10. Orden de susceptibilidad a la meteorización de los silicatos más comunes, siguiendo la serie de reacción de Bowen. Tomado de Tarbuck *et al.* (2005).

2.5. Cinética de los silicatos

En el trabajo de Terry (1983), se determinó que la acción de los ácidos sobre un silicato produce uno de los siguientes resultados:

- Ruptura completa de la estructura del silicato en conjunto con la disolución de los cationes metálicos y la sílice (disolución congruente). Esto puede llevar a la formación de un gel de sílice debido a la fácil polimerización de la sílice en soluciones acuosas.
- Descomposición parcial de la estructura del silicato, lo que lleva a la disolución de los cationes y deja un residuo silíceo (disolución incongruente).
- Ninguna reacción.

En general los silicatos pueden disolverse de manera congruente, manteniendo la proporción de cationes metálicos y sílice, o también de manera incongruente, favoreciendo la disolución de cationes sobre la sílice. Tanto en la disolución congruente como en la incongruente, la naturaleza del catión metálico es importante, ya que las

energías del enlace metal-oxígeno juegan un papel en la determinación del grado de liberación del catión (Chetty, 2018).

En términos globales, las tasas de disolución se ven afectadas por la concentración del reactivo en la solución y la temperatura (Crundwell, 2013). Esta dependencia se expresa matemáticamente de la siguiente manera para una reacción irreversible:

$$\text{Tasa de disolución: } K [C]^n \exp(-E_A/RT)$$

Donde:

[C]: Actividad o concentración de un reactivo.

K: Constante de velocidad $[\text{mol}(\text{mol}/\text{m}^3)^{-n}/(\text{m}^2\text{s})]$.

n: Orden de la reacción.

E_A : energía de activación (kJ/mol).

R: Constante de los gases (kJ/mol/K).

T: Temperatura.

El parámetro clave en la interpretación de la cinética de reacción es el orden de reacción. Este parámetro indica como las tasas de reacción dependen de la concentración del reactivo. Por ejemplo, si el valor de n es uno y el reactivo es H^+ , la reacción se clasifica como de primer orden en relación con H^+ (Crundwell, 2014).

En Brantley (2008) se analizó la tasa de disolución de minerales de silicatos basándose en la siguiente ecuación:

$$\text{Tasa: } K_H[\text{H}^+]^n + K_{OH}[\text{OH}^-]^m$$

Donde:

K_H : Constante de velocidad de la reacción de disolución con ácido.

K_{OH} : Constante de velocidad de la reacción de disolución con hidróxido.

$[\text{H}^+]$ y $[\text{OH}^-]$: Representan la concentración o actividad de los iones H^+ y OH^- , respectivamente.

En base a la ecuación anterior en Crundwell (2014), se propone un mecanismo de disolución para los silicatos y se determinó que la expresión para la tasa empírica de la reacción es la siguiente:

$$\text{Tasa: } K_H[\text{H}^+]^{0.5 \pm 0.1} + K_{\text{OH}}[\text{OH}^-]^{0.5 \pm 0.1}$$

Esta expresión parece aplicarse a todos los silicatos excepto a los nesosilicatos. El mecanismo propuesto se basa principalmente en:

- En soluciones ácidas: los átomos metálicos que reaccionan con el agua para formar cationes solvatados y los grupos silicato son atacados por H^+ para formar aniones hidratados.
- En soluciones alcalinas: los átomos metálicos que reaccionan con los iones hidróxido se hidrolizan permitiendo la formación de cationes hidrolizados y los grupos de silicatos reaccionan con el agua para formar aniones hidratados.
- El lugar de ruptura del enlace es doble:
 - A) Entre el grupo silicato y la red sólida.
 - B) Entre el átomo de metal y la red sólida.

Desde el punto de vista cinético, el orden de reacción para la mayoría de los silicatos se aproxima a 0.5 (Crundwell, 2014). En la Tabla 2.2 se muestra el orden de reacción de algunos silicatos.

Tabla 2.2. Órdenes de reacción para algunos silicatos. Modificado de Crundwell (2014).

Grupo de silicatos	Mineral	n, orden de reacción con respecto a H ⁺	n, orden de reacción con respecto a OH ⁻
Nesosilicatos	Forsterita	0,37	-
Tectosilicatos	Cuarzo	0,31	0,41
	Feldespato K	0,5	0,82
	Albita	0,40-0,46	0,38-0,57
	Oligoclasa	0,46	-
Filosilicatos	Flogopita	0,4	-
	Muscovita	0,14	-
	Biotita	0,36	-
	Caolinita	0,13	1,02
	Clorita	0,5	-
Inosilicatos	Hornblenda	0,37	-
	Wollastonita	0,4	-
Sorosilicatos	Epidota	0,34	-

2.6. Lixiviación

La lixiviación es un proceso complejo de disolución que necesita que los reactantes, típicamente en solución acuosa, entren en contacto con las partículas de los minerales objetivos para que estos últimos puedan disolverse. Esto puede lograrse mediante la disolución completa de la fase sólida o la penetración de las moléculas reactantes a través de la ganga parcialmente reaccionada o no reaccionada en las partículas de mineral. La primera opción sería irrealizable debido a su lentitud y coste elevado, mientras que la segunda depende de la capacidad del agente lixivante para penetrar la estructura porosa de la roca (Rossi, 1990).

El proceso implica la disolución selectiva de metales valiosos de una mena mediante una solución acuosa, lo que genera una solución rica en metal (PLS) y un residuo insoluble

sin valor (ripio). Esta disolución puede ser parcial o total, y a veces se utiliza un agente oxidante o reductor para mejorar la extracción del metal de interés.

2.6.1. Procesos de lixiviación en Chuquicamata (GEL)

Los procesos de lixiviación en la GEL empiezan con el transporte de la mezcla 70/30 de Ripio Verde y Ripio Rojo respectivamente hacia un buzón de traspaso. El material posterior a eso, desciende hacia una serie de correas transportadoras que tienen como destino el sector de almacenamiento o acopio, por el cual el material cae a otras correas transportadoras que llegan a otros buzones de traspaso consecutivamente hasta finalmente llegar a tres tambores aglomeradores, en los que se adiciona agua y ácido sulfúrico concentrado. Los glómeros que se forman por este último proceso son llevados a un puente apilador que permite la formación de la pila.

Luego en las pilas el material se riega con soluciones lixiviantes para obtener el PLS que es sometido al proceso de extracción por solvente y por último a la electroobtención (Aravena, 2020).

2.6.1.1. Aglomeración

El proceso de aglomeración implica la adhesión de partículas finas, tanto entre ellas como con partículas gruesas, mediante la incorporación de agua y ácido sulfúrico concentrado, lo que genera glómeros con una calidad mecánica adecuada, evitando que las partículas finas se separen de las gruesas. El objetivo de este proceso es obtener un lecho mineral uniforme y permeable, algo esencial para el proceso posterior de lixiviación en pilas, donde la solución debe filtrarse de manera eficiente a través de todas las partículas de mineral. En este proceso para aglomerar minerales con alto contenido de finos, se utilizan tambores rotatorios cilíndricos con una longitud de 2,5 a 3,5 veces su diámetro, que giran a una velocidad baja, por un tiempo corto de alrededor de un minuto.

Es importante destacar que en cuanto a la cantidad de agua que se añade en este proceso, un exceso de agua genera glómeros inestables y muy plásticos que se deforman y compactan al cargarse en la pila, afectando el drenaje de la misma. Sin embargo, la falta de agua produce glómeros débiles y esponjosos, resultando en una baja densidad del

mineral y una gran compactación durante el riego en la pila, lo que podría causar canalizaciones durante la lixiviación (Aravena, 2020).

2.6.1.2. Lixiviación en pilas

Es un método que se emplea principalmente para tratar minerales oxidados y mixtos que consiste en colocar el mineral previamente aglomerado en pilas o montículos, donde una solución lixivante se vierte de manera uniforme y lenta a través de un sistema de riego. La solución se infiltra a través de la pila hasta llegar a su base y en el trayecto extrae el cobre y otras impurezas del mineral. En la base, el sistema de drenaje recoge la solución, que luego es sacada fuera del área de las pilas, a través de un sistema de evacuación.

Las pilas se cargan sobre un material granular llamado cover, colocado sobre una geomembrana impermeable sobre la que también se suelen colocar las tuberías del sistema de drenaje (Figura 2.11). El cover drena y sostiene el sistema de drenaje, actuando como un filtro, además su diseño evita que las partículas perforen la geomembrana bajo la presión de la propia pila, impidiendo la infiltración de soluciones al suelo (Aravena, 2020). En el yacimiento Chuquicamata cuando el material termina la lixiviación se envía a los botaderos de rípios.

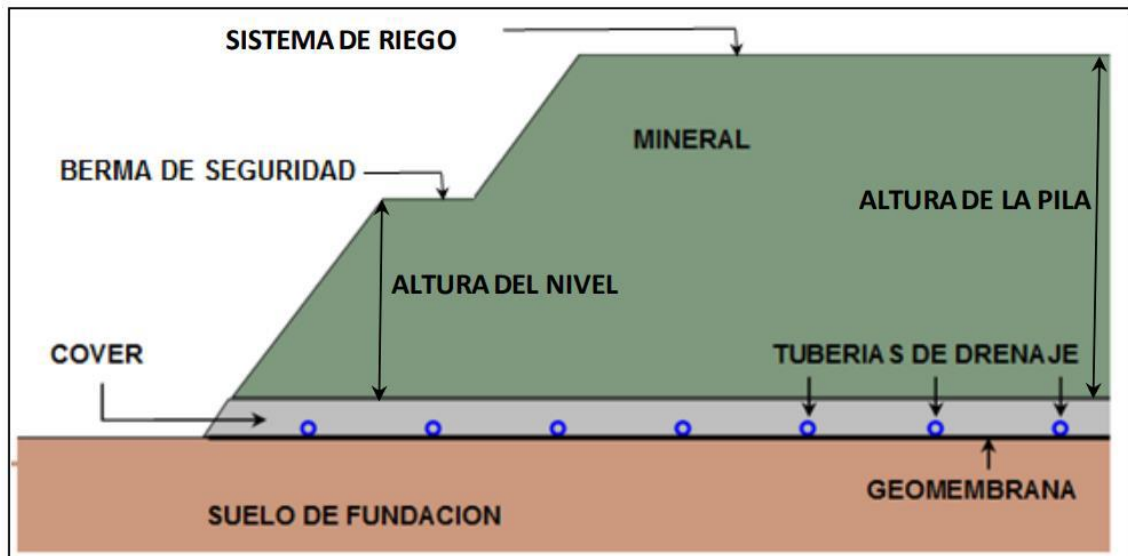


Figura 2.11. Esquema que muestra la estructura de una pila. Tomado de López (2012).

2.7. Problemas asociados a la ganga en la lixiviación

En general uno de los problemas más importantes asociados a las gangas es el recubrimiento que en ocasiones provocan estos minerales, dificultando la liberación y el acceso a las partículas de minerales de Cu que están encapsuladas (Chetty, 2018).

Otro problema importante es la reactividad de la ganga, que puede provocar mayor consumo de ácido. En el trabajo de Snäll y Liljefors (2000), se demostró que a menor tamaño de grano aumentaba la reactividad de los minerales, esto provocado por una mayor exposición de superficie de material accesible al ácido. Además, es importante que la cantidad de finos y arcillas tengan un seguimiento, ya que estos pueden provocar, por sus características inherentes, retención de humedad en el proceso de aglomerado y otras etapas del proceso de lixiviación (Bouffard, 2008).

Los neso, ciclo y sorosilicatos son en gran medida solubles lo que da como resultado una disolución congruente (Chetty, 2018). Estas reacciones pueden formar gel de sílice, como se mencionó anteriormente, el cual puede complicar el proceso de lixiviación, reduciendo considerablemente la filtrabilidad de la suspensión y aumentando el consumo de agua de lavado para obtener recuperaciones satisfactorias de la filtración. En la lixiviación en pilas, puede obstruir las partículas del mineral objetivo, dando como resultado una cinética de lixiviación y recuperación poco eficientes. Además, puede afectar negativamente la extracción con disolvente, el intercambio iónico y la electrólisis. Es crucial predecir la disolución de la sílice para tomar precauciones y evitar la gelatinización (Terry, 1983).

Los ino, filo y tectosilicatos son en gran medida insolubles, pero con el tiempo, se produce una disolución incongruente, lo que resulta en la liberación de cationes metálicos y un residuo silíceo restante que puede afectar a la lixiviación (Chetty, 2018).

Los minerales de ganga predominantes en entornos de pórfidos son principalmente los aluminio-silicatos que contienen Fe-Ca-Na-K como plagioclasa, biotita, clorita, anfíboles y epidota. La disolución de algunos de estos minerales es de vital importancia para abrir poros, pero es un proceso complejo con numerosas reacciones secundarias que pueden afectar de manera negativa la recuperación de cobre y/o los costos operativos. Estos efectos adversos vienen con un alto consumo de ácido, la liberación de elementos no

deseados y/o la reducción de la permeabilidad y el drenaje de las pilas debido a precipitaciones de fases secundarias (Owen *et al.*, 2024).

En el trabajo de Koizhanova *et al.* (2023) se estudió el proceso de lixiviación en cuatro yacimientos de cobre, donde se realizó una comparación entre los consumos de ácido de cada yacimiento, lo que mostró que los compuestos de silicato de calcio y magnesio aumentaban el consumo de ácido sulfúrico. En Jansen y Taylor (2003) se estudian los problemas relacionados con la ganga en la lixiviación en pilas de óxidos de cobre y se destaca que minerales como la plagioclasa cálcica, los anfíboles, las montmorillonitas y los piroxenos, generan un gran consumo de ácido.

En la Tabla 2.3, se muestra la reactividad de algunos minerales de ganga muy comunes en los yacimientos de cobre en las condiciones de lixiviación en pilas.

Tabla 2.3. Reactividad relativa de algunos minerales de ganga importantes en condiciones de lixiviación en pilas. Modificado de Chetty (2018).

Solubilidad de minerales	
Altamente Soluble:	
biotita:	$(H,K)_2(Mg,Fe)_2Al_2(SiO_4)_3 + 10H^+ = 2K^+ + 2Al^{+++} + 3H_4SiO_4 + 2(Fe,Mg)^{++}$
Moderadamente soluble:	
clorita:	$(Fe,Mg)_3[(Si,Al)_2O_3](OH)_4 + 6H^+ = 3(Mg,Fe)^{++} + H_4SiO_4 + Al^{+++} + H_2O$
epidota:	$Ca_2Al_2O(Al,Fe)OH[Si_2O_7][SiO_4] + 13H^+ = 2Ca^{++} + 2Al^{+++} + (Al,Fe)^{+++} + 3H_4SiO_4 + H_2O$
piroxeno:	$Ca(Mg,Fe)(SiO_3)_2 + 4H^+ + 2H_2O = Ca^{++} + 2H_4SiO_4 + Mg^{++}$
anfíboles:	$Ca_2(Mg,Fe)_4Al[Si_7AlO_{22}](OH)_2 + 18H^+ + 4H_2O = 2Ca^{++} + 4Mg^{++} + 2Al^{+++} + 7H_4SiO_4$
anortita:	$CaAl_2Si_2O_8 + 10H^+ = 2Ca^{++} + 2Al^{+++} + 2H_4SiO_4$
Pobrementemente soluble:	
Muscovita, albita, feldespato-K; cuarzo, arcillas, anhidrita	

Otro aspecto importante es la precipitación de yeso en el proceso de lixiviación, ya que la precipitación no controlada de este mineral puede causar hinchamiento, pérdida de permeabilidad en el lecho de lixiviación y eliminación del Cu solubilizado (Ausburn y Baum, 2014). La disolución de minerales con solubilidad que varía de moderada a alta, como la epidota, esfena, actinolita y anortita, liberan Ca en solución, lo que favorece la formación de yeso. Por lo que puede ser beneficioso para el proceso recuperar Ca de la solución durante una fase temprana de curado del mineral utilizando un ácido más

concentrado (Owen *et al.*, 2024).

2.8. Mineralogía Mina Sur

En la actualidad la Gerencia de extracción y lixiviación se encarga de procesar minerales oxidados que son sacados desde stocks y son mezclados en una proporción de 70% de Ripio Verde procedente de Mina Sur y 30% de Ripio Rojo de Chuquicamata. El Ripio Verde es rico en cobre y posee una ley de aproximadamente 0.35%, pero poseen una alta humedad, pudiendo llegar al 12%, por esto es que se realiza la mezcla con el Ripio Rojo, el cual tiene mucho menor porcentaje de humedad, lo que ayuda a estabilizar los niveles de este parámetro. Esto permite que el material tenga una mejor estabilidad en procesos posteriores.

El mineral de los stocks en general se compone de óxidos de cobre negro y óxidos mixtos, que son mineraloides y compuestos de composición variable, difíciles de identificar. Además, tienen una cinética de disolución lenta en los procesos tradicionales de lixiviación, están asociados con minerales polimetálicos refractarios al ácido sulfúrico, poseen colores oscuros y una mineralogía compleja (Aravena, 2020).

Las unidades geológicas de los stocks de rípios se identifican en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Número de UG asignado a cada ripio. Modificado de Demané *et al.* (2023).

Tipo	UG
Ripio Verde	50
Ripio Rojo	51
Ripio Mezcla	52
Ripio Mezcla Débil	53

Las UG de los rípios se muestran en la Figura 2.12, en base a las secciones más representativas del modelo RAMS 2.

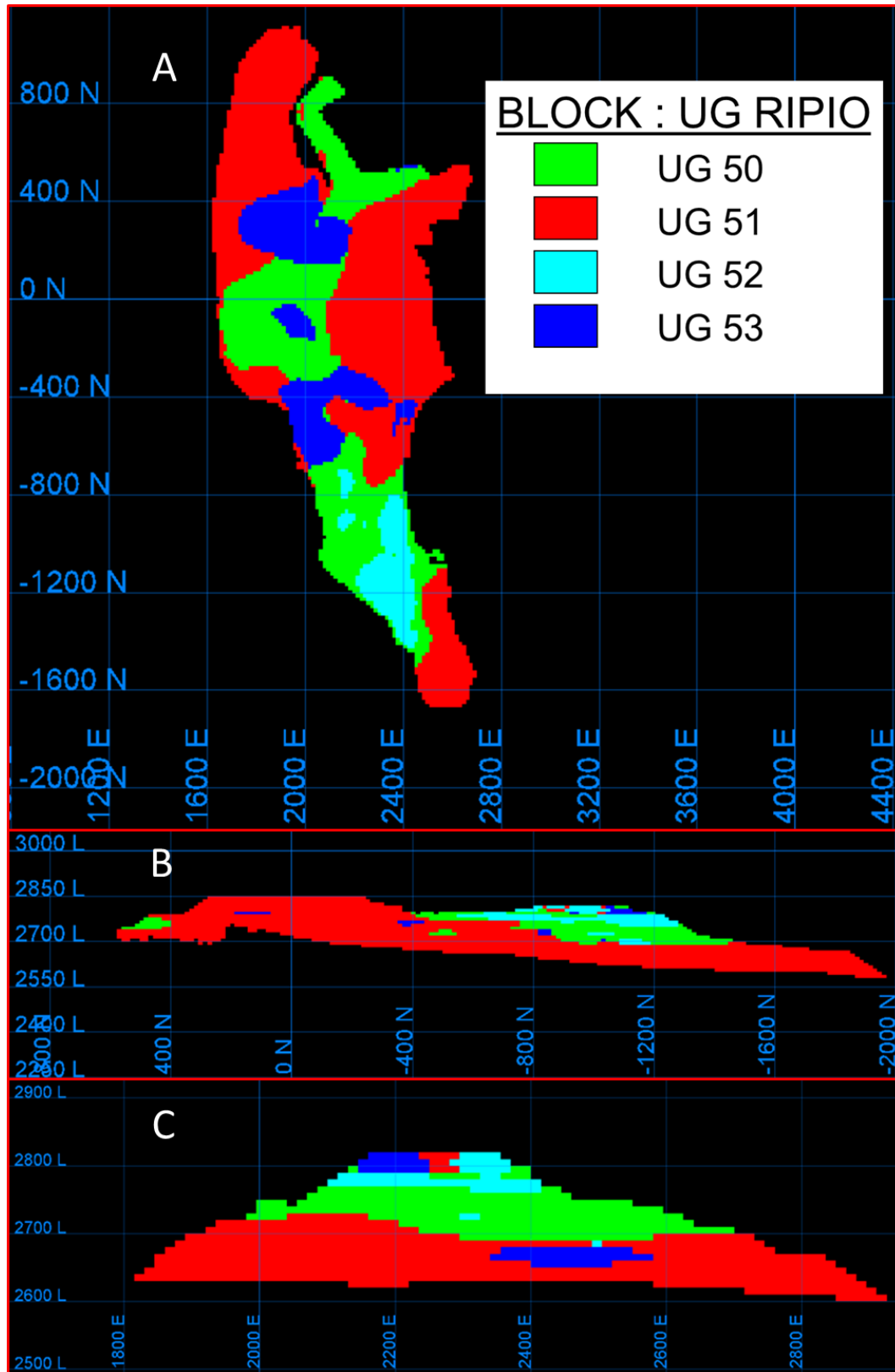


Figura 2.12. Modelo de UG de ripios. (A) sección cota 2.760. (B) sección 2.300 E. (C) sección -1.000 N. Extraído del modelo RAMS 2.

3. CAPÍTULO III: MARCO GEOLÓGICO

3.1. Geología del distrito Chuquicamata

La geología del distrito Chuquicamata se caracteriza por la predominancia de rocas intrusivas y la presencia de fallas regionales importantes, junto con formaciones volcánicas y sedimentarias. Estas constituyen unidades geológicas que abarcan desde el Paleozoico hasta el Cuaternario, aunque de manera discontinua. El Sistema de Fallas Domeyko, que incluye la Falla Oeste de Chuquicamata, divide el área en dos dominios distintos uno occidental y otro oriental (Maksaev *et al.*, 1994). El dominio occidental está constituido por rocas metamórficas y plutones del Paleozoico, así como volcanitas del Triásico, sedimentitas marinas y continentales del Jurásico y Cretácico Inferior, y finalmente, volcanitas y sedimentitas rojas del Cretácico Superior al Eoceno. Estas unidades geológicas se disponen en franjas de orientación norte-sur, siguiendo patrones estructurales definidos, además, cortando transversalmente estas formaciones, se identifican tres unidades intrusivas: el Complejo Intrusivo Montecristo, la Diorita Los Picos y el Complejo Intrusivo Fortuna, todas con edades comprendidas entre el Paleoceno y el Oligoceno inferior (Pardo y Rivera, 1999). El dominio oriental principalmente se encuentra formado por rocas volcánicas e intrusivas estériles entre el Paleozoico-Triásico (Maksaev *et al.*, 1994).

Los depósitos del distrito Chuquicamata están situados al norte de la ciudad de Calama, abarcando una franja de aproximadamente 30 km de largo por 10 km de ancho, con una orientación predominante hacia el N-NE. Estos yacimientos forman parte de una extensa banda de pórfidos cupríferos que se extiende desde el Eoceno Medio hasta el Oligoceno inferior (45-31 Ma) en el norte de Chile. Esta banda se extiende a lo largo de unos 1.400 km en la Precordillera y la Cordillera de Domeyko, abarcando latitudes desde 18°S hasta 31°S (Sillitoe y Perelló 2005). El distrito Chuquicamata abarca las minas en funcionamiento de Chuquicamata, Radomiro Tomic y Ministro Hales, donde las formas de intrusión geológica y los procesos hidrotermales responsables de la formación de los yacimientos minerales tienen un fuerte control estructural (Camus, 2003). Las litologías cercanas al distrito Chuquicamata, se pueden observar en la Figura 3.1 y las más importantes son detalladas a continuación:

3.1.1. Unidades estratificadas

3.1.1.1. Formación Tuina (Triásico medio-Triásico superior temprano)

La Formación Tuina corresponde a una sucesión de rocas volcánicas y sedimentarias clásticas agrupadas en tres miembros uno sedimentario y dos volcánicos por Raczyński (1963), pero en el trabajo desarrollado por Tomlinson *et al.* (2018) solo se reconocieron cuatro litofacies; andesitas y dacitas, tobas, conglomerados y areniscas, y brechas volcanosedimentarias. La formación tiene espesores que varían entre los 500 m y los 3.000 m. Esta unidad en el Cerro Quetena sobreyace concordantemente a la Formación Quetena. En la pampa Grama y los cerrillos de Cere; la unidad sobreyace, en inconformidad, al Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata y en la falda occidental de los cerros de Paqui subyace, discordantemente, a la Formación Quebrada Mala (Tomlinson *et al.*, 2018). Por datación U-Pb en circón, en su área tipo se le asigna una edad entre 253-233 Ma (Henríquez *et al.*, 2014) y entre 304-273 Ma en Tomlinson *et al.* (2018).

3.1.1.2. Formación Calama (Oligoceno inferior-Mioceno inferior)

La Formación Calama es una secuencia sedimentaria continental de origen aluvial que aflora en el curso medio del río Loa (Naranjo y Paskoff, 1981), corresponde a una sucesión de conglomerados polimícticos medianamente consolidados dividido en dos miembros: uno inferior llamado Topater conformado por conglomerados de guijarro grueso, conglomerados de bolón muy grueso y areniscas gruesas con guijarros, de color amarillo pardo; y un miembro superior denominado Chorrillos, constituido por conglomerados de guijarro muy grueso con un color gris verdoso oscuro. La formación se apoya en discordancia angular y de erosión sobre la Formación Icanche, y subyace, en discordancia angular, a la Formación Jalquinche (Tomlinson *et al.*, 2018). Se le asigna una edad entre Oligoceno inferior - Mioceno inferior gracias a distintas dataciones radiométricas (Tomlinson *et al.*, 2010).

3.1.1.3. Depósitos aluviales del Mioceno inferior-Mioceno superior temprano

Es una unidad de gravas mediana a bien consolidadas, que se extiende por la parte occidental y oriental del distrito Chuquicamata, en la parte occidental, se compone de una

ortobrecha de guijarro grueso a bolón medio que tiene un color marrón verdoso claro y con una estratificación maciza mal definida, además de estar bien consolidada, y para la parte más oriental se compone de gravas de guijarro fino a guijarro muy grueso, bien consolidadas y cementadas, además de conglomerados de guijarro fino. La unidad sobreyace a rocas mesozoicas y a la Formación Calama de manera discordante, y engrana en forma lateral a la Formación Jalquinche. Se le otorgo una edad entre el Mioceno inferior-Mioceno superior temprano gracias a las relaciones de contacto (Tomlinson *et al.*, 2018).

3.1.1.4. Depósitos aluviales del Mioceno superior-Plioceno superior

Es una unidad de gravas no consolidadas, en la Carta Calama realizada por Tomlinson *et al.* (2018), se encuentran en la mitad NW y en menor cantidad en los extremos NE y SE. En general la unidad se conforma por gravas de guijarro grueso a bolón fino que no se encuentran consolidadas y poseen intercalaciones subordinadas de cenizas volcánicas, también la unidad sobreyace a los Depósitos aluviales del Mioceno Inferior-Mioceno Superior temprano y engrana en forma lateral con las formaciones Chiquinaputo y Opache. Se le asigna la edad entre Mioceno superior - Plioceno superior por dataciones radiométricas y relaciones de contacto (Tomlinson *et al.*, 2018).

3.1.1.5. Depósitos aluviales del Pleistoceno-Holoceno medio

Esta unidad, pobremente consolidada, corresponde a gravas y ripios polimícticos, con una menor proporción de arenas y de guijarro. Estos se distribuyen en forma de extensos abanicos aluviales, los cuales disecan a los Depósitos aluviales del Mioceno superior-Plioceno superior y a la Formación Opache, y al mismo tiempo, se encuentran disecados por los Depósitos aluviales activos del Holoceno superior. Además, engranan lateralmente con la Formación Chiuchiu (Blanco y Tomlinson, 2009). Las relaciones estratigráficas señalan una edad pleistocena-holocena media. También una datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en biotita indicó una edad de $1,07 \pm 0,07$ Ma, confirmando su pertenencia al Pleistoceno (Tomlinson *et al.*, 2018).

3.1.1.6. Depósitos aluviales activos (Holoceno superior)

Estos depósitos no consolidados, están constituidos por arena gruesa a media y grava fina, además de arena media con clastos tamaño guijarro fino y guijarros gruesos angulosos. Se distribuyen en bastantes zonas como una red de estrechos cauces aluviales de actividad efímera. Cortan a los Depósitos aluviales inactivos del Pleistoceno-Holoceno medio y a los Depósitos salinos. Por sus relaciones estratigráficas, se les designa una edad del Holoceno superior (Tomlinson *et al.*, 2018).

3.1.1.7. Depósitos salinos (Pleistoceno-Holoceno)

Es una unidad de depósitos evaporíticos que fueron acumulados en depresiones con drenaje endorreico, están constituidos mayormente por halita, con un crecimiento poligonal sobre acumulaciones de material coluvial, que incluyen arena, limo y gravilla, además, se presentan depósitos de halita blanca en costras delgadas y uniformes. Estos depósitos también contienen sulfatos de sodio como tenardita, mirabilita y glauberita (Boric *et al.*, 1984), en la actualidad se encuentran parcial o totalmente cubiertos por depósitos antrópicos asociados a la industria minera (Tomlinson *et al.*, 2018).

3.1.1.8. Depósitos y cubiertas antrópicas (Holoceno superior)

En esta unidad se incluyen todos los depósitos o acumulaciones que resultan de la intervención humana, la cual se divide en tres; los desmontes de mina que se compone de fragmentos de roca triturada, que varían en tamaño desde guijarros muy gruesos hasta guijarros gruesos, provenientes de los yacimientos minerales de Chuquicamata, Mina Sur, Ministro Alejandro Hales, Radomiro Tomic y Quetena, además los depósitos de relave que están constituidos de sedimentos clásticos de tamaño entre limo y arena fina, que vienen de los procesos de flotación de los minerales sulfurados del yacimiento de Chuquicamata, y los depósitos de desechos domiciliarios que son la acumulación de los desechos sólidos domésticos (Tomlinson *et al.*, 2018).

3.1.2. Unidades intrusivas

3.1.2.1. Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata (Carbonífero superior-Pérmico)

El complejo aflora en los cerros de Chuquicamata siendo constituido por rocas plutónicas y metaplutónicas asociadas, que tienen una composición diorítica-gabroica a granítica. Está separado en tres unidades; el Granito Mesa que está constituido de monzogranitos y metagranitos, otra una unidad compuesta en su mayoría de dioritas y metadioritas anfibolíticas y la unidad Tonalita Cere, compuesta principalmente por tonalitas y granodioritas subordinadas. El Granito Mesa se encuentra intruido por las dioritas y metadioritas del mismo complejo (Tomlinson *et al.*, 2001) y cubierto por la Formación Tuina, también las dioritas y metadioritas están intruidas por diques y stocks micrograníticos y riolíticos del Pérmico superior, y cuerpos hipabisales del Complejo Intrusivo Elena, además la Tonalita Cere está intruida por stocks y diques del Pérmico superior. Se interpreta mediante las relaciones de contacto y dataciones radiométricas que el Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata tiene una edad entre Carbonífero superior – Pérmico (Tomlinson *et al.*, 2018).

3.1.2.2. Complejo Intrusivo Elena (Triásico Medio-Triásico Superior)

El Complejo Intrusivo Elena aflora en los cerros de Chuquicamata y Paqui, la pampa Grama, los morros Los Cerrillos y en los rajos de Chuquicamata, Radomiro Tomic, Mina Sur y Mina Ministro Alejandro Hales. Está constituido por cuatro litofacies; una de granodioritas (Granodiorita Este), una de granitos, otra de micromonzodioritas y andesitas hipabisales, y por último una de dacitas, riolitas y microgranodioritas hipabisales, todas en conjunto forman un *cluster* de actividad magmática triásica (Tomlinson y Cornejo, 2012). El complejo intruye al Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata y a la Formación Tuina, además es intruido por los complejos intrusivos del Eoceno-Oligoceno; Los picos, Fortuna, Miranda, Ministro Alejandro Hales y Chuquicamata (Rivera *et al.*, 2012; Zentilli *et al.*, 2018). Mediante dataciones radiométricas de U-Pb se llegó a que el Complejo Intrusivo Elena tiene una edad entre los 239 y 222 Ma (Tomlinson *et al.*, 2018).

3.1.2.3. Complejo Granodiorítico Fortuna (Eoceno medio-Eoceno tardío)

El Complejo Granodiorítico Fortuna aflora en el borde occidental del distrito Chuquicamata. Este se divide en cuatro unidades intrusivas, las cuales son en orden de edad decreciente; Granodiorita Antena, Granodiorita Fiesta, Granitos aplíticos Tetera y Pórfidos granodioríticos San Lorenzo (Tomlinson *et al.*, 2001), los tres últimos son contemporáneos, en base a sus relaciones de contacto. Su constitución es principalmente granodiorítica y subordinadamente granítica y monzodiorítica cuarcífera, sus máficos principales son la hornblenda y la biotita. El complejo en el sector de los cerros Quetena y Genoveva, intruye a las formaciones Moctezuma, Tuina y Collahuasi (Barra *et al.*, 2013), también a lo largo de sus márgenes norte, occidental y sur, intruye al Complejo Monzodiorítico-Monzonítico Los Picos, y es importante que el complejo está seccionado al E por la Falla Oeste. Según dataciones radiométricas de U-Pb, K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ se le asigna una edad entre 40-37 Ma (Tomlinson *et al.*, 2018).

3.1.2.4. Complejo Intrusivo Chuquicamata (Eoceno tardío-Oligoceno temprano; 36-33 Ma)

El complejo aflora desde la mina Radomiro Tomic por el norte hasta la mina Chuquicamata por el sur y está constituido por rocas intrusivas de composición generalmente granodiorítica, pero que varían desde monzodiorita cuarcífera a monzogranito y monzonita cuarcífera, que albergan y están vinculadas a la formación de depósitos minerales de cobre y molibdeno en Chuquicamata y Radomiro Tomic (Tomlinson *et al.*, 2018), además este complejo tiene forma de dique subvertical de rumbo NNE de alrededor de 14 km de largo con un ancho de 0,7 a 2 km y posee una inclinación fuerte hacia el oeste. Se encuentra cubierto por gravas aluviales del Mioceno-Plioceno, además está en contacto por el lado de la Falla Oeste con el Complejo Granodiorítico Fortuna y está en contacto con el Complejo Intrusivo Elena por el este y el oeste (Rivera *et al.*, 2012). El complejo está datado con una edad entre el Eoceno tardío y Oligoceno temprano con edades entre 36 y 33 Ma (Tomlinson *et al.*, 2018), este se divide en tres pórfidos los cuales son; los Pórfidos Este, Oeste y Banco (Ossandón *et al.*, 2001), estos serán descritos con más detalle en la geología local del yacimiento Chuquicamata.

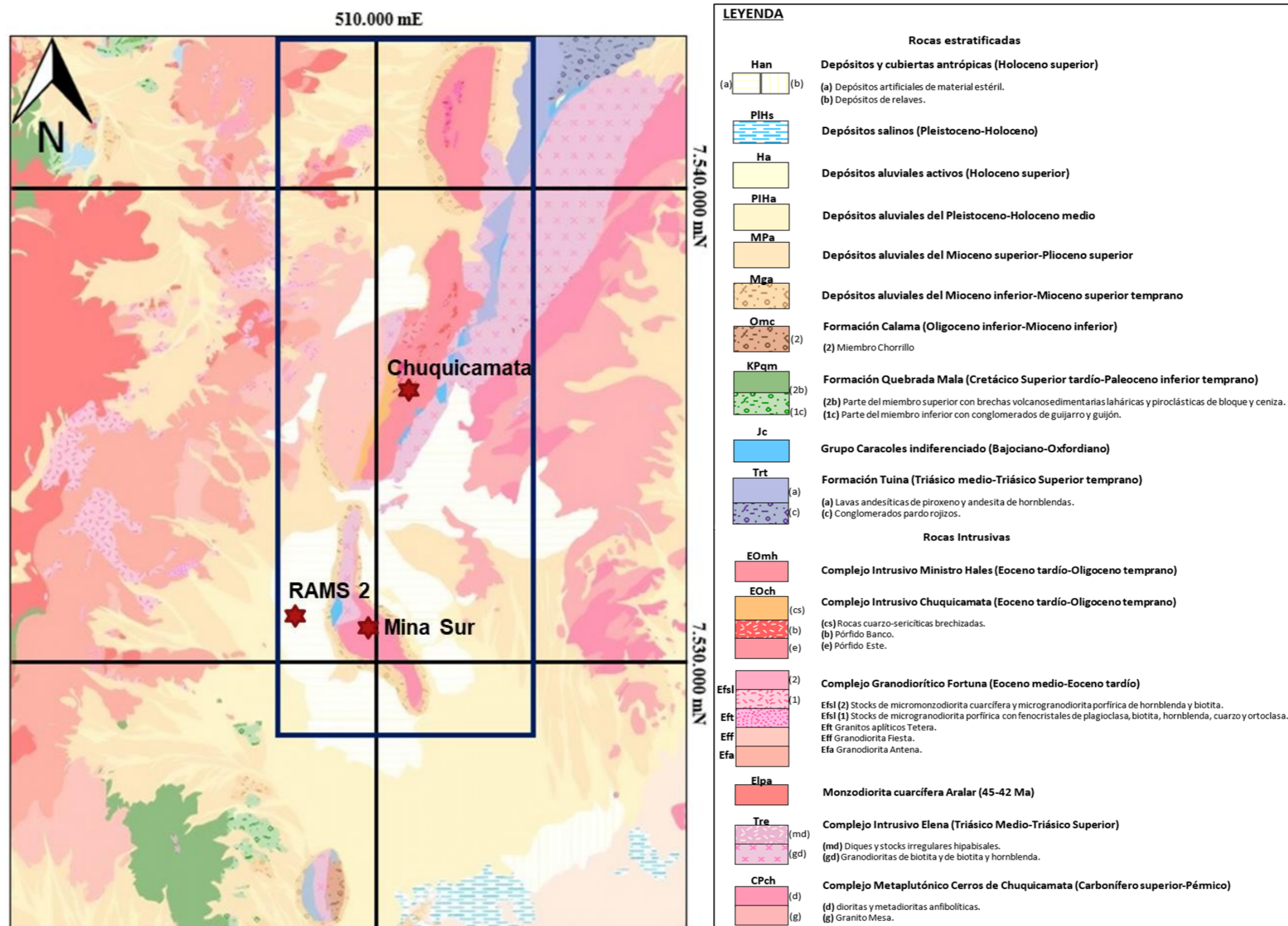


Figura 3.1. Síntesis geológica de las formaciones rocosas expuestas cerca del distrito Chuquicamata, con énfasis en el mismo, marcado en el recuadro azul. Incluyendo la ubicación del yacimiento Chuquicamata, Mina Sur y el stock RAMS 2. Modificado de Tomlinson *et al.* (2018).

3.2. Geología local del yacimiento Chuquicamata

Las unidades principales del yacimiento Chuquicamata son los Pórfidos Este, Oeste y Banco pertenecientes al Complejo Intrusivo Chuquicamata el cual fue descrito anteriormente, este está relacionado directamente con la génesis de mineralización de cobre y molibdeno del yacimiento Chuquicamata, también el complejo es conocido como “Pórfido Chuqui”, nombre que viene desde sus primeras descripciones hechas por López (1939). Este complejo es importante, ya que muestra el tipo de fragmentos de roca que puede incluir el Ripio Rojo. Las descripciones de los pórfidos se detallan a continuación:

3.2.1. Pórfido Este

El Pórfido Este es el que más predomina dentro del Complejo Intrusivo Chuquicamata constituyendo cerca del 80% de la roca expuesta en la mina Chuquicamata y los otros pórfidos del complejo son menores en tamaño y edad (Tomlinson *et al.*, 2018). Su litología principal son granodioritas que contienen en su mayoría biotita y en menor medida hornblenda, tienen un color que varía entre gris rosado claro a blanquecino, presentan un aspecto hipidiomórfico inequigranular con granos de tamaño medio a grueso, además la presencia de abundantes fenocristales que representan más del 65% de la roca le confiere una textura porfírica “apretada”, los fenocristales de plagioclasa son los más abundantes y se presentan en cristales euhedrales a subhedrales (Arnott, 2003). Como minerales accesorios principalmente se encuentra la magnetita, el esfeno y el zircón. Mediante la datación radiométrica U-Pb en zircón por el método SHRIMP se obtuvo una edad de $35,2 \pm 0,4$ Ma (Ballard *et al.*, 2001), otra de $36,2 \pm 0,4$ Ma (Proffett y Dilles, 2007) y por el método LA-ICP-MS una edad de $34,5 \pm 0,3$ Ma (Campbell *et al.*, 2006). En la Figura 3.2 se observa una muestra del Pórfido Este.

3.2.2. Pórfido Oeste

El Pórfido Oeste se encuentra en la parte norte de la mina Chuquicamata e intruye en tres puntos al Pórfido Este, es mineralógica y químicamente similar al pórfido oriental, pero con una masa fundamental aplítica de grano más fino (Rivera *et al.*, 2012). Está principalmente compuesto por microgranito y microgranodiorita de un color rosado claro, este posee una textura hipidiomórfica inequigranular porfírica abierta, posee de un 15 a

un 30% de fenocristales que principalmente son fenocristales de plagioclasa euhedrales, megacristales poikilíticos y zonados de ortoclasa perfitica, y ojos de cuarzo redondeados, su matriz fina está compuesta principalmente por cuarzo, ortoclasa, plagioclasa y biotita en menor proporción (Arnott, 2003). En Chuquicamata se han informado edades de U-Pb para circón con el método SHRIMP de $34,0 \pm 0,3$ Ma y con el método LA-ICP-MS de $33,6 \pm 0,2$ Ma (Ballard *et al.*, 2001). En la Figura 3.2 se observa un ejemplo de muestra.

3.2.3. Pórfido Banco

El Pórfido Banco se presenta como una sucesión de stocks filonianos, que son de forma irregular y discontinua, siguiendo un rumbo preferente NNE, estos afloran en la parte norte y noreste del rajo de la mina Chuquicamata e intruyen al Pórfido Este (Lindsay, 1997). La unidad se conforma por microgranitos a micromonzodioritas cuarcíferas de biotita, que tienen un color gris medio, poseen una textura hipidiomórfica inequigranular porfírica abierta, con alrededor del 30% de fenocristales que incluyen, plagioclasa euhedrales a subhedrales, megacristales poikilíticos de ortoclasa perfitica, ojos de cuarzo redondeados a alargados y biotita (Arnott, 2003), además de escasos fenocristales de hornblenda (Aracena, 1981). Se informan edades U-Pb en circón para el Pórfido Banco de $34,1 \pm 0,3$ millones de años mediante el método SHRIMP y $33,1 \pm 0,3$ millones de años mediante el método LA-ICP-MS (Ballard *et al.*, 2001). En la Figura 3.2 se observa un ejemplo de muestra.

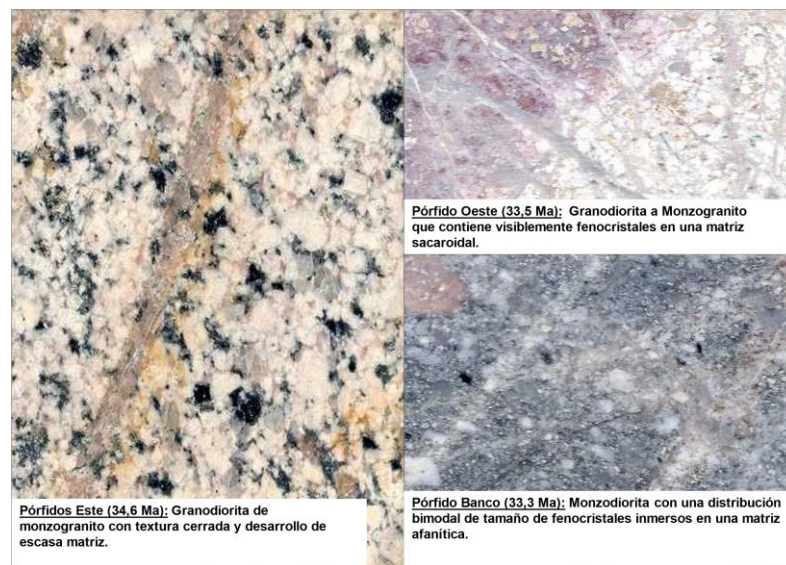


Figura 3.2. Fotografías de la litología del Pórfido Chuqui. Tomado de Demané (2015).

3.3. Estructuras

Dentro del ámbito regional el elemento estructural de mayor relevancia es el Sistema de Falla Precordillerana (Lindsay *et al.*, 1995) se encuentra relacionado con depósitos cupríferos importantes en la región y tiene una extensión de alrededor de 2.000 km, componiéndose de varios segmentos de fallas regionales (Tomlinson *et al.*, 1994), el segmento que se encuentra en la región de Antofagasta es conocido como el Sistema de Falla de Domeyko (Maksaev y Zentilli, 1988).

En el Distrito Chuquicamata, las dos ramificaciones principales del Sistema de Falla de Domeyko, son la Falla Oeste y la Falla Mesabi. Estas fallas delimitan el Depósito Porfídico Chuquicamata por su lado oeste y este, respectivamente (Aguilar, 2008).

El cuerpo cuprífero del yacimiento Chuquicamata posee alteraciones hidrotermales y mineralización que tienen un fuerte control estructural y esto se debe principalmente a que el intrusivo hipabisal y sus procesos hidrotermales asociados tuvieron lugar en una región activa de una zona de falla transcurrente dextral en el Sistema de Falla de Domeyko, el cuerpo mineralizado después fue cortado en su parte oeste por la Falla Oeste, la estructura más importante visible en el yacimiento, apreciable en la Figura 3.3.

Los aspectos estructurales más destacados del yacimiento Chuquicamata, según los análisis estructurales realizados por Lindsay *et al.* (1995), Reutter *et al.* (1996), así como Collado *et al.* (2005), se resumen a continuación mediante la Figura 3.3. De todas estas estructuras, es importante conocer la Falla Oeste, debido a que es clave en la mineralización del yacimiento Chuquicamata, desde donde proviene el Ripio Rojo.

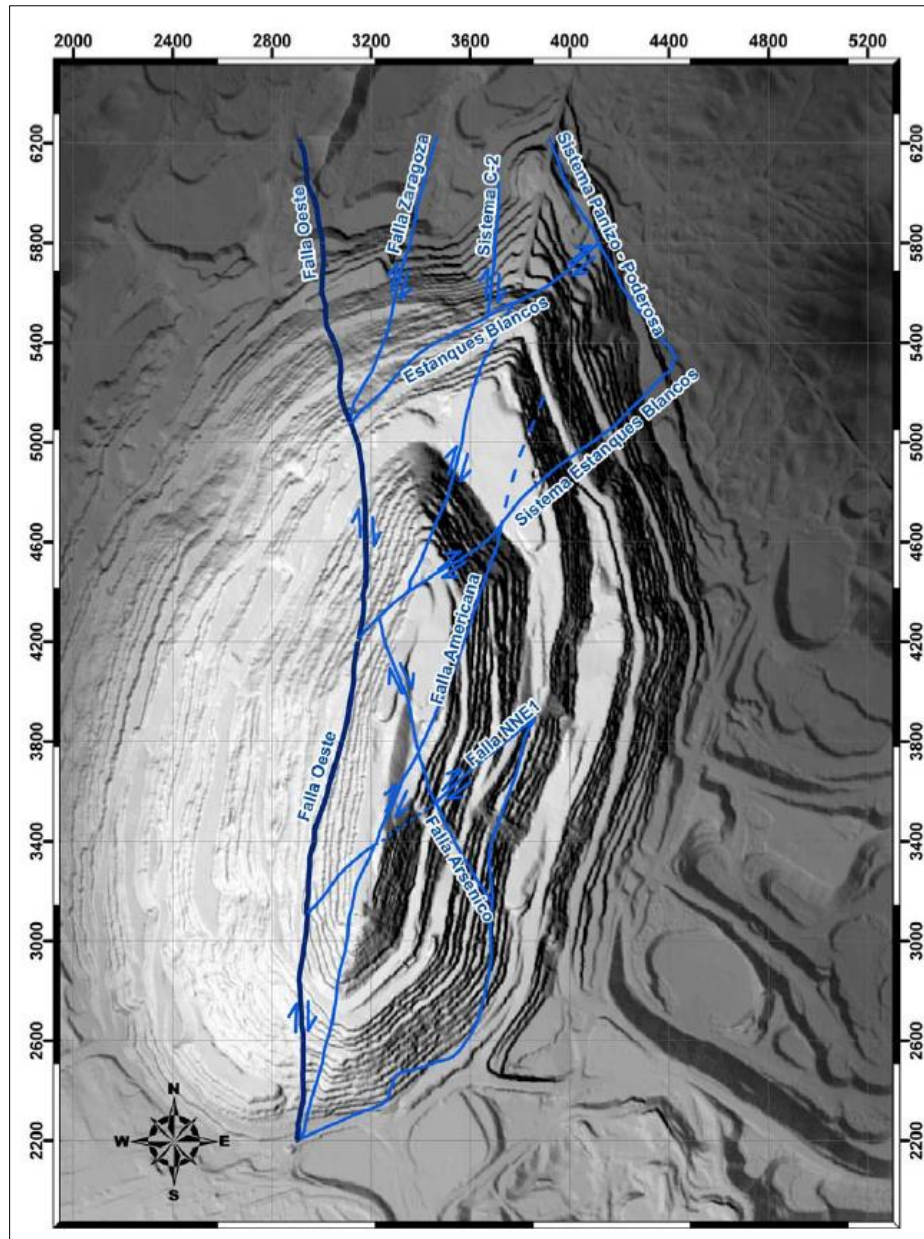


Figura 3.3. Fallas principales de la mina Chuquicamata. Tomado de Collado et al. (2005).

3.3.1. Falla Oeste

La estructura más destacada del depósito, con una orientación que va desde N-S hasta NNE y un ángulo de inclinación que oscila entre los 75° y 80° hacia el oeste, disminuyendo ligeramente en profundidad (Collado *et al.*, 2005). La falla se formó post-mineralización indicando un desplazamiento sinistral (Tomlinson y Blanco, 1997), esta falla trunca al Pórfido Chuqui y a la mineralización temprana, poniéndolos en contacto con la Granodiorita Fortuna estéril. La Falla Oeste tuvo su periodo de mayor

desplazamiento entre el Oligoceno Inferior alto – Mioceno Inferior en el sentido sinistral (Dilles, 1997).

Los datos de perforación profunda revelan simetrías mineralógicas de ley y alteración entre los límites este y oeste del depósito, lo que indica que la falla post-mineral está desplazada hacia el oeste con respecto al centro de la mineralización hipógena, minimizando la pérdida de mineral.

La Falla Oeste, por otro lado, muestra una divergencia angular con respecto al eje principal de alteración y mineralización del depósito, indicando que controla principalmente eventos tardíos de mineralización como sericita, pirita y enargita, mientras que afecta los eventos principales más tempranos. (Collado *et al.*, 2005).

3.4. Alteración y mineralización hipógena

Los eventos de alteración hipógena son clasificados en dos categorías; los eventos tempranos de baja sulfuración, que se caracterizan por tener bajos niveles de pirita, y los eventos tardíos de alta sulfuración, que presentan abundante pirita y asociaciones de mena (División Codelco Norte, 2009). Estas alteraciones en general son importantes para este trabajo, ya que se pueden encontrar en el Ripio Rojo y afectan a las rocas cercanas al yacimiento, incluyendo parte de Mina Sur.

Se ha observado que la introducción de cobre al sistema hidrotermal fue en gran medida controlado por los eventos tempranos de mineralización y alteración, sin embargo, las concentraciones más altas de cobre hipógeno se encuentran en áreas con alteración cuarzo-sericítica tardía, la cual también obliteró las asociaciones de alteración temprana (División Codelco Norte, 2009). En la Figura 3.4 se muestra la distribución de las alteraciones del yacimiento.

3.4.1. Eventos tempranos de alteración con asociaciones de baja pirita

3.4.1.1. Potásico de Fondo (PF)

Esta es una alteración temprana, en la que se observa un reemplazo selectivo de los minerales máficos presentes en el Pórfido Chuqui por biotita secundaria, además las plagioclasas tienden a estar parcial y selectivamente alteradas a feldespato potásico,

sericita y/o arcillas. Existe también Biotita y feldespato potásico que ocurren en escasas microvetillas con cuarzo, calcita y sulfuros. Una particularidad notable de este tipo de alteración es que la textura original del Pórfido Chuqui se conserva de manera evidente, también es importante que la magnetita que poseía la roca original se encuentra hematitizada o destruida (Siña *et al.*, 2005).

La mineralización relacionada a esta alteración se encuentra principalmente en forma diseminada y en menor medida en microvetillas, además posee una concentración total de sulfuro menor al 1%, en su expresión hipógena, la calcopirita es el sulfuro principal que se puede presentar en asociaciones de calcopirita \pm bornita o calcopirita \pm pirita, otros sulfuros como digenita, covelina, calcosina, blenda y molibdenita están presentes en cantidades muy pequeñas. Las leyes de cobre que posee el Potásico de Fondo son bajas en un rango entre el 0,2 a 0,5%, incluso en áreas con cierto grado de enriquecimiento (Siña *et al.*, 2005).

El Potásico de Fondo representa el primer evento de alteración y mineralización, encontrándose extensamente distribuido en los sectores este y norte del yacimiento, no obstante, en algunas otras áreas se identifican vestigios que sugieren que la alteración se encontraba presente en toda la extensión del yacimiento, pero esta fue cubierta y obliterada por alteraciones posteriores. La edad del evento de alteración Potásica de Fondo se estima en 33,4 y 24 Ma (Reynolds *et al.*, 1998; Arnott, 2003), esta edad coincide con la cristalización de los pórfidos Oeste y Banco, lo que sugiere una posible relación genética entre estos pórfidos y la alteración Potásica de Fondo (Siña *et al.*, 2005).

3.4.1.2. Alteración Clorítica (CMH)

La alteración Clorítica ocurre en los márgenes del depósito, coincidiendo con la disminución de las leyes de cobre, que son menores a 0,3% de cobre total, es caracterizada por ser selectiva de los máficos primarios o secundarios y por la presencia de vetillas de clorita, marca el fin del Potásico de Fondo con presencia de magnetita primaria preservada. Se le puso el nombre CMH por la cloritización selectiva de máficos y/o magnetita primaria preservada y/o hornblenda primaria fresca, presente en la alteración, también en esta puede encontrarse albitización selectiva de las plagioclasas y microvetillas de calcita y ankerita, en cualquier caso, la textura original de la roca que fue afectada por

la alteración siempre queda preservada. Posee una concentración total de sulfuros menor a 0,6% en volumen y su mineralización principalmente se encuentra diseminada con la asociación pirita \pm calcopirita, también es frecuente la aparición de hematita especular tardía, en vetillas (Siña *et al.*, 2005).

3.4.1.3. Feldespato Potásico – Cuarzo de Grano Fino (K-Sil)

La alteración K-Sil consiste en un reemplazo moderado a intenso de feldespatos y biotita por feldespato potásico secundario, que en algunos casos se asocia con albita secundaria. En la zona hipógena del depósito, es habitual la ocurrencia notable de anhidrita diseminada y en vetillas, en el K-Sil. La textura original de la roca está parcial o totalmente destruida y obliterada, adoptando un color gris distintivo. La mineralización vinculada a la alteración K-sil tiende a encontrarse principalmente en vetillas y microvetillas, y suele ser significativa tanto en cantidad como en aporte de cobre, con una concentración total de sulfuros superior al 1%, pero su distribución es irregular. Las asociaciones minerales características consisten en bornita con \pm digenita \pm covelina, o bien, calcopirita con \pm covelina \pm bornita \pm digenita. La ley de cobre que se asocia al K-Sil normalmente es alta, variando entre 0,8% y 2% de cobre total (Siña *et al.*, 2005).

Se pueden distinguir dos tipos de alteración dentro del K-Sil según Proffett (2003); uno que está controlada fuertemente por fracturas, manifestándose como halos de vetillas de sulfuros, con una intensa destrucción de la textura original de la roca, una alta concentración total de sulfuros y una ley de cobre total alta, y otro tipo que es más pervasivo pero menos destructivo en términos de textura, presentándose como zonas difusas e irregulares, con una concentración total de sulfuros y una ley de cobre total solo ligeramente superiores a las del Potásico de Fondo.

3.4.1.4. Vetas y Vetillas de Cuarzo-Molibdenita

Estas vetas y vetillas ocurren en el eje central del depósito, mostrando una mineralización de cuarzo-molibdenita que se presenta en grandes cantidades como “vetas azules” y “vetillas bandeadas”, tipo B. Este evento se encuentra con una parcial coincidencia espacial con la alteración cuarzo-sericítica tardía que es parte de los eventos con asociación de alta pirita que se explicará más adelante, pero las vetillas tipo D de alta pirita

cortan a las de cuarzo-molibdenita, definiendo claramente como más tempranas las vetillas de alta pirita, además el evento de cuarzo-molibdenita es levemente más antiguo que la Sericita Gris-Verde temprana (Siña *et al.*, 2005).

El evento de Vetas y Vetillas de Cuarzo-Molibdenita presenta altas concentraciones de Mo (0,1 - 0,2% Mo), sin embargo, muestra una baja concentración de cobre (< 0,6% CuT). Es importante destacar que el evento es el más importante en cuanto al aporte de molibdeno al sistema del depósito (Ossandón *et al.*, 2001).

3.4.1.5. Sericita Gris-Verde temprana (SGV)

La alteración Sericita Gris-Verde se distingue por el reemplazo de los minerales del Pórfido Chuqui por agregados de sericita y cuarzo, además presenta una intensa obliteración de la textura original. Este tipo de alteración puede presentarse en forma masiva, irregular o como halos de vetillas tempranas (Siña *et al.*, 2005). La sericita temprana se distingue por un color característico gris verdoso y por ser evidentemente más gruesa que las que ocurren en las alteraciones más tardías. Este es el principal evento mineralizador presentando una mineralización finamente diseminada y abundante dentro del halo, en las asociaciones minerales está ausente la pirita, siendo estas, bornita + calcopirita ± digenita ± covelina (Córdova *et al.*, 2010). En una datación Ar-Ar en sericita que se encuentra relacionada a este evento de alteración se obtuvo una edad de 31,8 Ma (Siña *et al.*, 2005).

La estrecha asociación espacial entre la SGV y el K-Sil, así como entre la SGV y las Vetas de Cuarzo-Molibdenita, ha llevado a integrar estos elementos en el evento Potásico Intenso. Además de su proximidad espacial, el K-Sil y la SGV comparten características como una intensa alteración de la textura y similares asociaciones de sulfuros de alta ley de cobre total (Siña *et al.*, 2005).

3.4.1.6. Vetillas de Calcopirita con Halos Sericíticos

Las vetillas se encuentran en varias zonas del depósito con una disposición marginal a los cuerpos que conforman el evento Potásico Intenso, estas se encuentran formadas por calcopirita masiva y halos cuarzo-sericíticos de color gris claro, dentro de las cuales se encuentra calcopirita dispersa, además las vetillas también pueden tener pirita subordinada

que en bajas cantidades o ausente. Poseen más del 1% del volumen en sulfuros, con leyes que oscilan entre el 0,7% a 0,8% de cobre total (Siña *et al.*, 2005).

En cuanto a su temporalidad es el evento más tardío incluido dentro de los eventos de baja pirita, ya que estas vetillas cortan a todos los tipos de mineralización y alteración anteriormente mencionados (Siña *et al.*, 2005).

3.4.2. Eventos tardíos de alteración con asociaciones altas de pirita

3.4.2.1. Alteración Cuarzo Sericita Pervasiva (QSP)

La zona en la se puede observar la alteración Cuarzo Sericita Pervasiva es principalmente en la mitad occidental del yacimiento de Chuquicamata, próxima a la Falla Oeste. Esta última corta y expone directamente la zona potásica del depósito, donde se encuentran minerales con altas concentraciones de pirita y sulfuros de cobre (Córdova, 2010). La alteración consiste principalmente en agregados de sericita, cuarzo y pirita, los cuales, obliteran la textura original del Pórfido Chuqui, reemplazando fuertemente a los feldespatos y a la biotita. Los análisis de difracción de rayos X indican que la sericita está compuesta por un agregado de illita y muscovita. Además, se presentan en cantidades menores, arcillas del tipo caolinita, que reemplaza principalmente a las plagioclasas y aparecen también escasas vetillas de alunita-cuarzo (Siña *et al.*, 2005).

A esta fase fílica tardía, se le asocian varios pulsos de mineralización sulfurada que reflejan una evolución de asociaciones de alta pirita, que se superponen progresivamente tanto en el tiempo como en el espacio, según el aumento gradual de su estado de sulfuración: pirita - calcopirita, pirita - bornita, pirita - digenita, pirita - enargita (\pm blenda \pm tenantita) y pirita-covelina, además el ciclo incluye un evento tardío y marginal, con un foco particular en áreas cercanas a la Falla Oeste, donde se forman vetillas estériles de pirita. Todas las asociaciones se presentan en vetillas tipo D y diseminadas, con la pirita como sulfuro principal (Córdova *et al.*, 2010). El evento de pirita-enargita es crucial, ya que representa la principal fuente de arsénico del sistema. Este se localiza principalmente en las fallas Zaragoza y Americana, pero también se extiende hasta la zona central del yacimiento (Siña *et al.*, 2005).

Los eventos de alteración cuarzo-sericítica tardía, con su mineralización de alta pirita asociada, muestran relaciones de corte con los eventos tempranos de baja pirita, que permiten indicar que el evento cuarzo-sericítico es posterior, ya que este último corta y oblitera las asociaciones minerales más tempranas. También existen dataciones radiométricas Ar-Ar en sericitas de este evento tardío que señalan que posee una edad de 31,1 Ma (Reynolds *et al.*, 1998; Arnott, 2003).

3.4.2.2. Zona de Transición (ZT)

La Zona de Transición muestra una superposición de la alteración Cuarzo Sericita Pervasiva sobre las alteraciones más tempranas, como la alteración Potásica de Fondo. Esta zona contiene un máximo de 80% de la alteración QSP y un mínimo del 20% de la alteración PF. En otras palabras, es una región donde se encuentran tanto texturas obliteradas como conservadas. Principalmente esta zona se delimitó para el propósito de modelado de las alteraciones (García, 2013).

3.4.2.3. Alteración Potásico Intenso Relicto (PIR)

En espacios con alteración cuarzo-sericítica tardía, es posible identificar texturas “fantasmas” de alteraciones tempranas como K-Sil o SGV, a veces incluso como halos alrededor de vetillas tempranas, con altas cantidades de sulfuros finamente diseminados, lo que sugiere la existencia previa de una mineralización temprana de alta ley asociada a la alteración Potásica Intensa (Córdova *et al.*, 2010). La textura fantasma está constituida por sericita con una foliación dúctil o simplemente se identifica por mostrar la textura de la roca destruida, junto con una mineralización de cobre finamente diseminada en forma de sulfuros (Proffett, 2003).

En estas áreas, se encuentra una concentración elevada de sulfuros de cobre, mayor al 1%, que corresponden principalmente a digenita, bornita o covelina asociadas con pirita, con leyes de cobre que varían entre 1,4-1,5% o incluso más concentración de cobre total, lo que indica que el cobre original introducido por los eventos tempranos experimentó poca removilización. A las zonas que posean todas las anteriores características y que sean relativamente continuas se les denomina Potásico Intenso Relicto o PIR (Siña *et al.*, 2005).

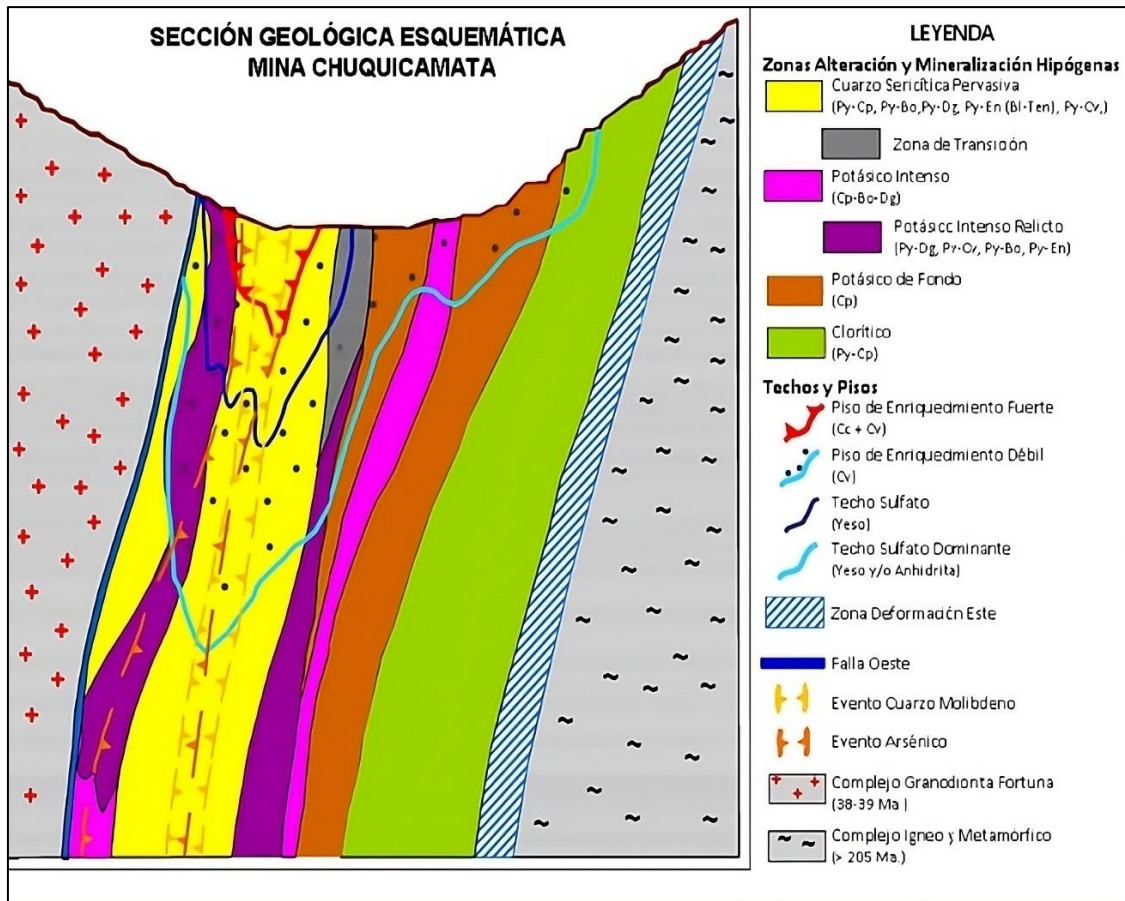


Figura 3.4. Sección geológica esquemática donde se puede ver la distribución de las alteraciones hidrotermales con su mineralización. Tomada de Cordova *et al.* (2010).

3.5. Alteración supérgena

En Chuquicamata, la actividad supérgena provocó significativos cambios en la parte superior del yacimiento, resultando en amplias zonas lixiviadas, oxidadas, zonas con enriquecimiento secundario y lixiviación total o parcial de los sulfatos de calcio. Estudios de datación radiométricas K-Ar realizados en alunitas supérgenas dentro de estas áreas indican que los procesos supergénicos en Chuquicamata tuvieron lugar entre los 19 y 15 Ma (Sillitoe y McKee, 1996; Cordova et al., 2010).

3.5.1. Zona de óxidos

Esta zona ya se encuentra explotada prácticamente en su totalidad, pero principalmente contenía antlerita, brochantita, atacamita, crisocola y copper pitch. Esta se concentraba fundamentalmente en la zona norte del yacimiento. La alteración hipógena que afectaba

esta zona corresponde a alteración cuarzo-sericita tardía, superpuesta a la alteración Potásico de Fondo (Ossandón *et al.*, 2001).

3.6. Mina Sur

El cuerpo principal de este yacimiento, que actualmente está agotado, se encuentra a unos 2 km al sur del pórfido cuprífero Chuquicamata. Está conectado a Chuquicamata por un paleocanal en el sustrato rocoso, que se prolonga desde el rajo de Chuquicamata hacia el sur-sureste, alcanzando una distancia de 4,7 km bajo la cubierta de gravas de los depósitos aluviales del Mioceno Inferior-Mioceno Superior temprano y del Mioceno Superior-Plioceno Superior, descendiendo hacia el sur desde Chuquicamata y hacia el este desde el Complejo Granodiorítico Fortuna.

El cuerpo mineralizado con óxidos de cobre, era subhorizontal, lenticular y estaba suavemente inclinado al sur (3 a 5°S). Dos tercios estaban emplazados en el sustrato rocoso compuesto por metadioritas anfibolíticas, granitos y diques máficos del Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata del Carbonífero-Pérmico, y un tercio en gravas miocenas-pliocenas. Un cuarto del cuerpo presentaba alteración argílica supérgena, principalmente en las gravas y en menor medida en el sustrato rocoso. La alteración se encontraba predominantemente en la parte central del cuerpo, entre el tercio y los dos tercios superiores.

El origen del yacimiento está relacionado con el flujo lateral de fluidos supérgenos cupríferos ácidos provenientes de la zona de oxidación/lixiviación del cuerpo mineralizado de Chuquicamata, que precipitaron minerales como atacamita, crisocola, “copper pitch” y yeso debido a la interacción con los silicatos de las gravas y rocas del sustrato, y la evaporación en un ambiente desértico (Tomlinson *et al.*, 2018). Esto lo convierte en un yacimiento secundario tipo exótico (Figura 3.5).

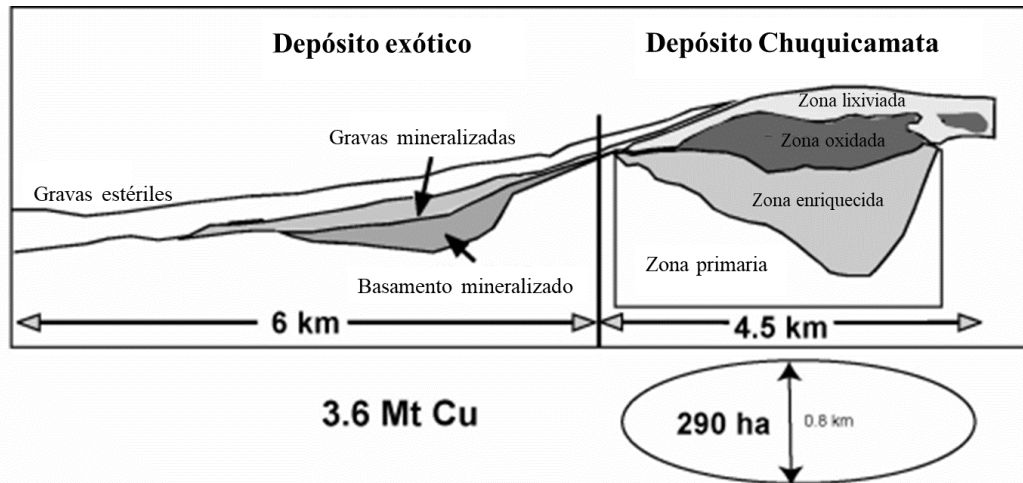


Figura 3.5. Descripción del yacimiento exótico de Chuquicamata. Modificado de Münchmeyer (1996).

El yacimiento fue lixiviado, pero los ripios resultantes de este proceso, fueron llevados a stock y todavía poseen una alta cantidad de cobre.

A pesar de que ya se encuentra agotado es importante conocer las litologías que estuvieron presentes en Mina Sur. Estas incluyen en su parte intrusiva rocas del Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata y de la Granodiorita Este (Complejo Intrusivo Elena), las cuales están cubiertas por gravas de la Formación Calama (Astengo, 2002). En la Figura 3.6 se observa una sección esquemática de Mina Sur que muestra la distribución de las unidades litológicas.

3.6.1. Unidades litológicas de rocas del basamento presentes en Mina Sur

3.6.1.1. Dioritas (Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata)

Corresponden a dioritas de un color gris medio a oscuro, con una textura hipidiomórfica, granular. Estas constituyeron cerca del 10 al 15% de la litología presente en el basamento de Mina Sur. Ubicadas en los sectores centro-norte del yacimiento, donde son intruidas por un cuerpo granodiorítico. También apareciendo en afloramientos aislados de poca envergadura en la extensión sureste. Contienen minerales de anfíbola, plagioclasa y cuarzo, además de esporádicamente piroxeno y apatito como minerales accesorios.

En cuanto, a los minerales de alteración, estos comprenden a la sericita, clorita, epidota y calcita. La mineralización de óxidos de cobre se asocia a zonas cercanas al contacto con las gravas, en fracturas y en forma diseminada (Astengo, 2002).

3.6.1.2. Anfibolitas (Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata)

En el área de Mina Sur, son las rocas más abundantes, conformando entre el 55 y 60% del total del basamento, con un área estimada de 1,2 km². Estas fueron separadas por su textura y granulometría, en dos unidades, nombradas Anfibolita de Grano Grueso y Anfibolita de Grano Fino (Marín, 1973), diferenciación que se relaciona con su mineralización.

Las Anfibolitas de Grano Grueso constituyen el 35% de las anfibolitas y el 25% del total de las rocas del sector, poseen un color gris medio a oscuro, con una textura granular a porfídica. Principalmente estaban localizadas en la zona centro-sur y en el basamento central, con abundantes granos de anfíbola (>3,5 mm), en su mayoría de hornblenda, conformando más del 50% de la roca. También presentan minerales como la plagioclasa (30%), cuarzo (3%) y esfeno como accesorio.

Las Anfibolitas de Grano Fino representan el 65 % de las anfibolitas y el 45% de las rocas del basamento, distribuyéndose por todo el yacimiento, especialmente en el flanco noroccidental, donde son intruidas por granodioritas. Poseen un color gris medio a oscuro y una textura equigranular a ligeramente porfídica. Presentan cristales de anfíbol de entre 1,5 a 3 mm, que son principalmente hornblenda y tremolita-actinolita (50%), parcialmente alterados a clorita-epidota. Los demás minerales son la plagioclasa (35-40%), escasa cantidad de cuarzo y apatito, y pocos minerales opacos, destacando dentro de estos, la magnetita (Astengo, 2002).

3.6.1.3. Granito Mesa (Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata)

Estas rocas se ubican en el centro y sur del basamento de Mina Sur, como cuerpos aislados de forma irregular, especialmente hacia el sur. Son de color rosado, con grano medio a fino y casi sin ferromagnesianos. Al microscopio, presentan una textura granular (aplítica) y equigranular, con granos entre 0,7 a 1 mm. Sus principales minerales son cuarzo (40%), feldespatos potásicos (25-30%), plagioclasa (20-25%), además de muscovita y opacos en menor cantidad. Como minerales accesorios están el apatito y el esfeno, y los de alteración incluyen sericita, clorita, epidota y calcita (Astengo, 2002).

3.6.1.4. Granodiorita Este (Complejo Intrusivo Elena)

Esta unidad aflora en Mina Sur, comprendiendo alrededor del 20% del basamento, con un área de 0,5km². Se encuentra en el centro-norte del basamento como cuerpos irregulares de grano grueso y color blanquecino, con textura ligeramente gnéisica. Al microscopio, presenta una textura hipidiomórfica. Estas rocas están formadas por plagioclasa alterada a sericita (40%), cuarzo (25%), ortoclasa (15%), biotita (10%) y como accesorios apatita, esfeno, zircon y magnetita. La alteración incluye clorita, sericita, epidota y calcita (Astengo, 2002).

3.6.2. Unidades litológicas de gravas presentes en Mina Sur

Las gravas de Mina Sur fueron incluidas en la Formación Calama por Marinovic y Lahsen (1984), definidas como Grava Fortuna y Grava Exótica por Munchmeyer y Urqueta (1974). En Astengo (2002) se identificó otra grava en Mina Sur, denominada Grava Arenosa, incluyéndose junto con las demás en la Formación Calama.

3.6.2.1. Grava Fortuna

Este depósito de gravas medianamente consolidado se extiende desde el centro-norte hasta el sur del yacimiento, con dirección de aporte desde el noroeste, donde aflora el Complejo Granodiorítico Fortuna. Sobreyace en contacto de no conformidad al basamento, engrana lateralmente con la unidad Grava Exótica y subyace concordantemente a la unidad Grava Arenosa.

La grava es monomítica, clasto-soportada de estratificación pobre y granulometría decreciente. Contiene entre 60-70% de clastos (diámetro >0,5 cm), de los cuales el 90% son de granodiorita Fortuna (promedio 0,5 a 400 cm). La matriz (diámetro <0,5 cm) varía entre 30 y 45% con un 2% de finos, de moderada a mala clasificación. El cemento, variable entre 1-15%, incluye sales, arcillas y en la base presenta óxidos de cobre, fierro y abundante yeso. Su base, en contacto con el basamento, contiene mineralización de óxidos de cobre, que es la mena principal.

3.6.2.2. Grava Exótica

Este depósito de gravas medianamente consolidado, se distribuye en el sector noreste del rajo. Esta sobreyace en contacto de no conformidad con el basamento, engrana lateralmente con la unidad Grava Fortuna y subyace la unidad Grava Arenosa. Esta es una grava polimíctica de clasificación moderada, de clasto-soportada a matriz-soportada, con estratificación paralela y compactación media. Contiene entre un 45-50% de clastos (diámetro >0,5 cm), su tamaño promedio es de 3 cm y varía entre 0,5 a 20 cm, estos poseen una composición litológica muy variable, que incluye fragmentos de pórfidos, rocas graníticas y metamórficas.

La matriz (diámetro <0,5 cm) varía entre 50 y 55%, que posee arena gruesa (50%), arena fina (35%), limo (10%) y gravilla (5%) y un 2% de finos. El cemento, de 3-15%, incluye óxidos de cobre en la base, donde se encuentra la mineralización principal de cobre.

3.6.2.3. Grava Arenosa

La Grava arenosa es un depósito de gravas medianamente consolidado, ubicado en el sur y sureste del rajo en la parte superior de las gravas, con una posible extensión fuera de los límites. Esta unidad sobreyace concordantemente a la Grava Fortuna y Grava Exótica, con un contacto transicional, en tanto su techo es la superficie de erosión. Contiene un 40-45% de clastos polimícticos, subangulares y poco alterados, con tamaños modales entre 5 a 10 cm.

La matriz (diámetro <0,5 cm) varía del 55 a 60% con un 2% de finos, compuesta de arena fina a muy gruesa. Cemento en general escaso, entre 3 y 5%, compuesto por sales no diferenciadas y yeso. Estas no presentan mineralización.

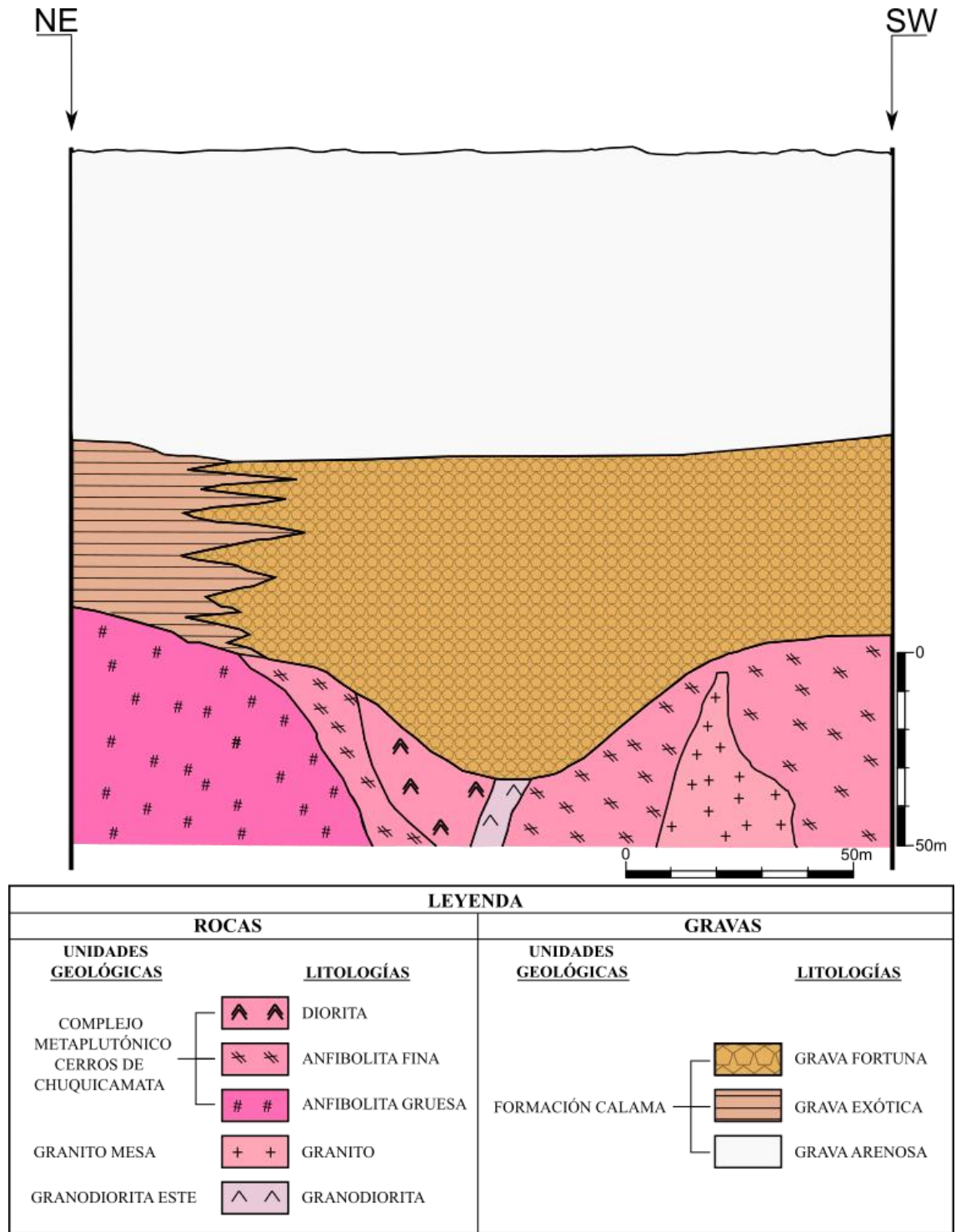


Figura 3.6. Perfil esquemático típico NE-SW antiguo de Mina Sur que representa la litología. Las relaciones de contacto y posiciones estratigráficas están idealizadas. Modificado de Astengo (2002).

3.6.3. Unidades geológicas de Mina Sur

Considerando que el yacimiento presentaba zonación de los parámetros geológicos en sentido horizontal y vertical, que tienen una relación directa con la variabilidad de las leyes y la recuperación de cobre de los distintos materiales que se procesaban, se definieron unidades geológicas en Astengo (2002), basadas en el tipo de mineralización, la alteración y la calidad física de la roca. El último parámetro es un concepto geometalúrgico que pondera el material que es tratado en los procesos metalúrgicos, asignándole una puntuación de 1 (muy bueno) a 5 (muy malo). La disposición de las unidades definidas se aprecia en la Figura 3.7, las cuales se detallan a continuación:

3.6.3.1. Unidades geológicas del basamento

3.6.3.1.1. Rocas máficas (RMA)

Esta unidad incluye a las rocas melanocráticas del tipo anfibolitas, dioritas y metadioritas del basamento ígneo-metamórfico que poseen una mineralización de cobre principal de crisocola-wad en vetillas con más de 1 mm de espesor y en microfracturas, con un contenido promedio de 1,18% CuT (cobre total) y 0,97% CuS (cobre soluble). La calidad física es 1 en rocas frescas y 2 en rocas con alteración moderada (Astengo, 2002).

3.6.3.1.2. Rocas graníticas (RGR)

La unidad corresponde a rocas graníticas, leucocráticas y de grano medio, parte de las unidades regionales Granito Mesa y Granodiorita Este. El contenido de cobre en esta unidad es más bajo que en la RMA, alcanzando un promedio de 0,76% CuT y 0,59% CuS. Los feldespatos cálcicos de las rocas máficas las hacen más reactivas a soluciones ricas en cobre, a diferencia de los feldespatos sódicos del granito y la granodiorita de esta unidad. La calidad física que se le asigna es de 1, al no presentar alteración (Astengo, 2002).

3.6.3.1.3. Rocas alteradas (RAL)

Corresponde a rocas máficas y graníticas con alteración intensa, de principalmente arcillización de plagioclasas y que presentan ocasionalmente, impregnación de óxidos de

cobre. El cobre en esta unidad tiene un promedio de 0,96% CuT y 0,61% CuS. Esta Subyace y está en contacto lateral con las gravas intensamente alteradas. La calidad física varía entre 2 y 5, según el estado de alteración (Astengo, 2002).

3.6.3.1.4. Rocas estériles (RES)

Esta unidad no considera la unidad litológica, sino que la distribución de la mineralización, la que es de carácter exótico, con morfología mantiforme en la unidad de grava y relleno de vetillas en la roca de base. Incluye a todas las rocas del basamento sin mineralización de cobre. Estas rocas no participan en la extracción por lo que no se les asigna calidad física (Astengo, 2002).

3.6.3.2. Unidades geológicas de gravas

3.6.3.2.1. Grava estéril (GES)

Gravas indiferenciadas no compactadas y sin valor económico (0,08% CuT y 0,02% CuS), clasificadas como lastre. Rodean el paquete de gravas mineralizadas y en ocasiones aparecen entre capas de gravas mineralizadas en el sur del yacimiento. Al ser estériles, no se les asigna una calidad física (Astengo, 2002).

3.6.3.2.2. Grava terrosa (GTE)

Gravas de matriz terrosa o limosa, con tonalidad gris ocre y con bajo nivel de compactación. Contienen baja mineralización de cobre (0,3%-0,4% CuT) y un promedio de 0,38% CuT y 0,22% CuS. La mineralización se presenta principalmente en forma de pequeñas “pecas” de atacamita, wad y óxidos de hierro, también puede presentar clastos con crisocola, que provienen de aguas arriba producto de la erosión. Esta unidad se encuentra estratigráficamente en el nivel superior del manto de gravas mineralizadas, y en la zona central y sur del yacimiento se encuentra sobre la Grava Semiterrosa. Su baja compactación afecta la percolabilidad en los procesos de lixiviación disminuyendo la recuperación de cobre. La calidad física asignada es de 4 (Astengo, 2002).

3.6.3.2.3. Grava semiterrosa (GST)

Grava de moderada compactación, que puede incluir mayor mineralización que la Grava Terrosa, mostrando una leve cementación. Contiene principalmente crisocola-wad y atacamita. Esta unidad aparece como una transición entre la Grava Terrosa y las gravas frescas mineralizadas. El contenido promedio de cobre es de 0,80% CuT y 0,60% CuS. La unidad presenta una potencia de 10 m con un aumento gradual hacia el sur, alcanzando entre 25 y 30 metros. Se le asigna una calidad física de 3 (Astengo, 2002).

3.6.3.2.4. Grava chocolatada

Grava gris pardo (“chocolatado”) con alto contenido de hidróxidos de hierro, atacamita y wad, que poseen un promedio de 1,52% CuT y 1,30% CuS. Su baja compactación y arcillas ferruginosas reducen la percolabilidad en los procesos de lixiviación. Esta se encuentra en el borde occidental de las gravas mineralizadas, con una potencia de 6 a 30 m. La calidad física que se le asigna es de 3 (Astengo, 2002).

3.6.3.2.5. Grava argilizada (GAL)

Grava con intensa alteración argílica y de color gris blanquecino a amarillento, con alta presencia de minerales de arcilla y sericita que reemplazaron a los minerales de los clastos constituyentes. Principalmente la mineralización de cobre se presenta en forma de “copper wad” y su contenido promedio de cobre es de 0,95% CuT y 0,62% CuS. Debido al contenido de arcillas presenta alta impregnación y baja percolabilidad, limitando la recuperación de cobre. Esta unidad de unos 40 m de potencia, se ubica mayormente en la parte media del yacimiento y se le asignó una calidad física de 5 (Astengo, 2002).

3.6.3.2.6. Grava de transición (GTR)

Esta unidad corresponde a la transición entre la Grava Argilizada y la Grava Fresca Fortuna. Posee características similares a la GAL, pero con menos arcillas. Su mineralización principal es “copper wad”, con leyes de cobre de 2,57% CuT y 1,27% CuS. Se encuentra predominantemente en los bordes laterales de la grava argilizada, con una potencia de 1 a 20 m. En Mina Sur, se desarrolla en el borde occidental del cuerpo alterado,

presentando un menor desarrollo en el borde oriental. Por su contenido alto de finos y arcillas, tiene una calidad física de 4 a 5 (Astengo, 2002).

3.6.3.2.7. Grava fresca Fortuna

Esta unidad es de gran importancia en Mina Sur por su abundancia y contenido de cobre. Compuesta mayormente de clastos de Granodiorita Fortuna que representan el 80% de su composición y el 20% restante lo componen rocas metamórficas (anfíbolita gruesa-fina y metadiorita) y granito. Presenta un empaquetamiento clasto soportado y ocasionalmente matriz soportado, sus clastos varían de 2 cm a 2 m de diámetro con buena esfericidad y bordes redondeados. Su matriz es escasa, conformada por arena gruesa. La relación clasto-matriz, en general es 70/30, respectivamente. Está bien compactada y muestra una buena cementación, este último compuesto formado por crisocola y yeso. Su asociación mineralógica típica es crisocola-wad y posee en promedio un 2,10% CuT y 1,90% CuS. La crisocola rellena espacios y fracturas, mientras que el “copper wad” se presenta en pátinas sobre la cara de los clastos. Esta unidad en Mina Sur es continua, con una potencia de 20 a 50 m que disminuye hacia el sur. La calidad física que se le asigna es de 1 (Astengo, 2002).

3.6.3.2.8. Grava fresca Exótica

La unidad está compuesta por clastos subangulosos a subredondeados, de variadas litologías, como pórfidos, granitos, granodioritas y en menor proporción rocas del basamento, con moderada a buena clasificación y con un empaquetamiento de matriz soportada, cuya relación clasto-matriz es 40/60. Los clastos tienen diámetros de 2 a 5 cm envueltos en una matriz arenosa. La mineralización que posee es en promedio de 2,58% CuT y 2,38% CuS, y consiste principalmente en crisocola y “copper wad”. Los modos de ocurrencia de la crisocola son como relleno de intersticios y cementante, mientras que el “copper wad” se encuentra en forma de pátinas recubriendo parcialmente los clastos. Se encuentra en el flanco oriental del yacimiento, con un espesor de 10 a 35 m. La calidad física de la unidad varía entre 2 y 3, aunque puede alcanzar el valor 1 en zonas bien cementadas y compactadas (Astengo, 2002).

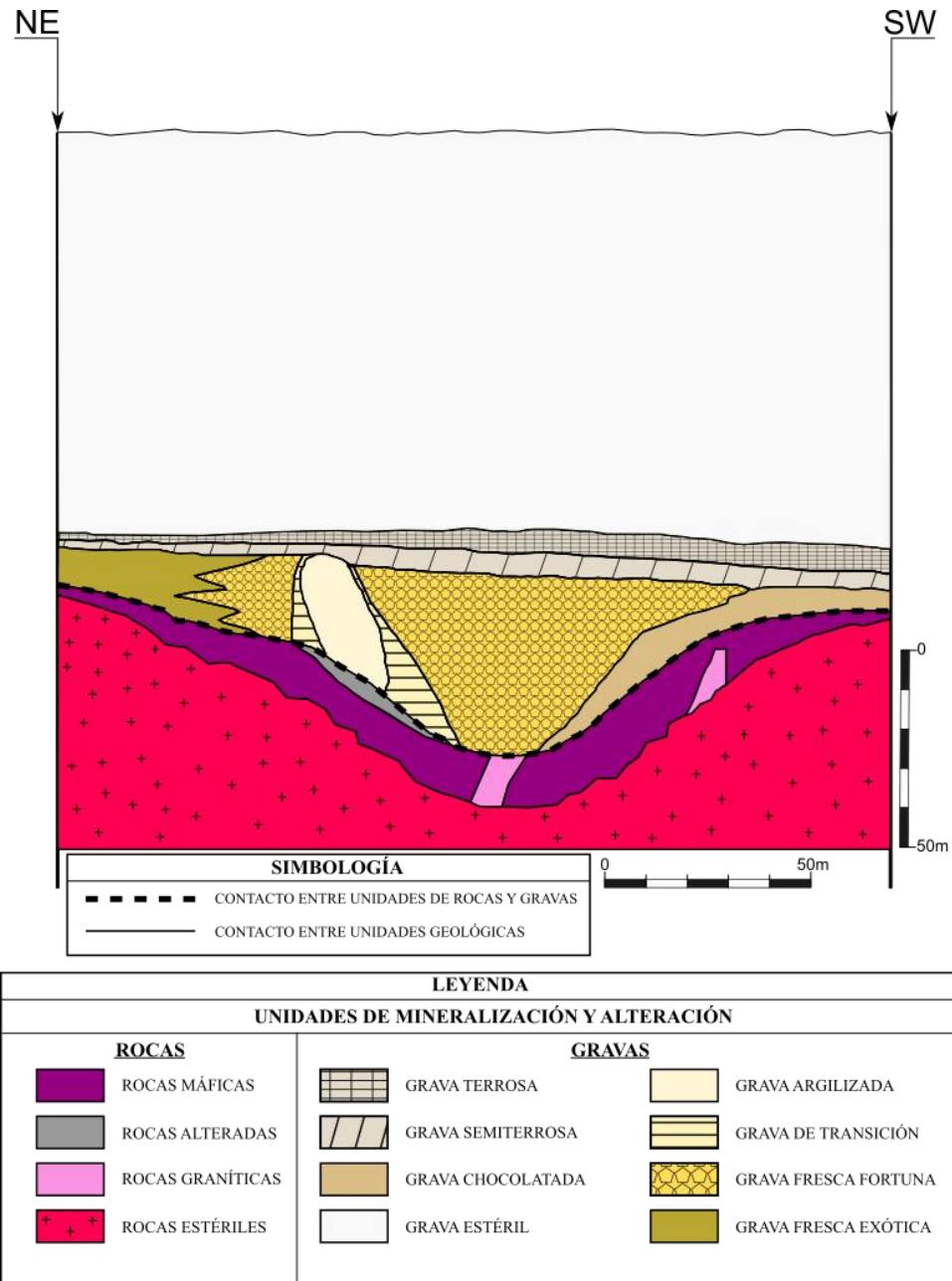


Figura 3.7. Perfil esquemático típico NE-SW antiguo de Mina Sur, mostrando las unidades geológicas. Modificado de Astengo (2002).

3.7. Geología de los Ripios

Se ha definido como “Ripios” a un gran acumulado de minerales lixiviados ubicado entre las minas Chuquicamata, Expansión Norte Mina Sur (ENMS) y Mina Sur. Antes de la explotación de ENMS, estos depósitos medían aproximadamente 2,5 km de largo en su eje mayor (NNE-SSW) y 1,5 km de ancho en su eje menor. Los materiales fueron

depositados sobre sedimentos compuestos por gravas de diferentes grados de compactación y consolidación de la Formación Calama. En forma original los Rípios Chuquicamata estaban en la base con un espesor que varía de 10 metros en el norte a 130 metros en el sur.

Los Rípios Antiguos Mina Sur se ubicaban en capas adicionales sobre los Rípios de Chuquicamata en la zona central norte. En general los Rípios Chuquicamata y los Rípios Mina Sur son residuos de minerales de óxidos resultantes del proceso de lixiviación en bateas. Los Rípios estaban subdivididos según el estado de tratamiento (re-lixiviación) en el que se encontraban, la subdivisión era la siguiente:

- Rípios Chuquicamata No Lixiviados: Son aquellos Rípios Chuquicamata que no fueron sometidos a una re-lixiviación en parcelas, por lo que mantienen los niveles de concentración de cobre originales al momento de salir del proceso de lixiviación en bateas y ser depositados en el botadero. Estos materiales principalmente se ubican en las zonas norte y central. La ley promedio estimada que poseen es de 0,15% de CuT.
- Rípios Chuquicamata lixiviados: Corresponden a los rípios que fueron sometidos a la re-lixiviación bajo las parcelas y comprendían más del 60% de la superficie total de los rípios. La ley promedio estimada de estos rípios es de 0,07% de CuT.
- Rípios Antiguos Mina Sur (RAMS): Son mayormente materiales que provienen de la explotación de Mina Sur y estaban originalmente sobrepuestos a los Rípios Chuquicamata. La ley promedio estimada de estos materiales es de 0,45% de CuT y 0,35% de CuS (CODELCO, 2016).

Gracias a sondajes del año 2015 y 2016 se estudiaron muestras de rípios correspondientes a Rípios Chuquicamata (RCH) y Rípios Antiguos Mina Sur (RAMS). Se denominaron Ripio Rojo a los RCH y Ripio Verde a los RAMS. Además, se identificaron zonas de transición que componen al Ripio Mezcla que corresponden a mezclas de Ripio Rojo y Ripio Verde en diferentes proporciones. Estas unidades se clasificaron en diferentes unidades geológicas (UG), según su composición y/o procedencia, las cuales son; Ripio Verde, Ripio Rojo y Zonas de Mezcla (Ripio Mezcla).

- **Ripio Rojo:** Este material proviene de la mina Chuquicamata, está compuesto casi completamente por fragmentos del Pórfido Este. Presenta una fuerte alteración cuarzo-sericítica y un alto contenido de limonitas, principalmente hematita. En general, los rípios están altamente lixiviados y, en ocasiones, contienen mineralización de limonitas y arcillas con cobre.
- **Ripio Verde:** Corresponde a material de Mina Sur formado principalmente por fragmentos de andesitas y granodioritas en diferentes proporciones, con alteraciones predominantes de tipo clorítica o clorítica-sericítica y una alta presencia de limonita en forma de goethita. La mineralización en esta unidad incluye crisocola, arcillas con cobre, sulfatos de hierro-cobre y atacamita subordinada.
- **Zonas de mezcla (Ripio Mezcla):** Este material posee proporciones variables de Ripio Verde y Rojo, con alteraciones y limonitas que cambian según el material que predomine. La mineralización es parecida a la que posee el Ripio Verde (CODELCO, 2016). Estos rípios se dividen en Ripio Mezcla y Ripio Mezcla Débil dependiendo del porcentaje de la variación de los componentes (CODELCO, 2023), algo que se ve mejor en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Tabla resumen con el criterio de asignación de UG. Tomada de Demané *et al.* (2023).

% Lit. Mina Sur	% Ley Cut	UG		
75 - 100	> 0.3	Ripio Verde	RV	50
25 - 75	> 0.3	Ripio Mezcla	RM	52
10 - 25	0.2 - 0.3	Ripio Mezcla Débil	RMD	53
0 - 10	< 0.2	Ripio Rojo	RR	51

En cuanto a mineralización de sulfuros, en los RAMS son muy escasos y son principalmente pequeñas cantidades de pirita y calcosina, asociados en su mayoría a los Ripio Rojo (CODELCO, 2016).

4. CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE TRABAJO

Antes de presentar la metodología, es importante destacar que este trabajo a partir de esta sección, sigue la notación numérica norteamericana (comas para los miles y puntos para los decimales), para mantener coherencia con el formato de los datos en los softwares empleados.

4.1. Definición del límite espacial

La definición del límite espacial en los stocks, corresponde al espacio que ocupa el modelo del RAMS 2, ya que actualmente es la zona que se encuentra en explotación y la que ha presentado problemas importantes relacionados a la inestabilidad estructural de las pilas post-lixiviación, formadas de los ripios excavados.

4.2. Recopilación de información

Primero que todo se realizó un trabajo de recopilación de información existente de la geología general de Chuquicamata y Mina Sur, incluyendo las litologías, estructuras y alteraciones. Además, se revisaron estudios sobre la mineralogía de las gangas, los métodos de caracterización y modelamiento mineralógico, así como, sobre los procesos metalúrgicos que se aplican en la extracción de cobre en el yacimiento Chuquicamata y la Mina Sur. Se incluyó también material referente a las mediciones NIR que es el método utilizado para la medición de gangas en este trabajo.

4.2.1. Exploración de datos para identificación de problemas en la GEL

Primero dentro de las bases de datos históricas (del año 2018 al 2024) se buscó información relevante para el incremento de la inestabilidad estructural de los ripios (humedades y perfiles granulométricos).

Luego, el análisis principalmente se centró en encontrar relaciones entre la humedad, el porcentaje de finos, las arcillas y las demás gangas asociadas a los ripios de los RAMS. Para esto se actualizaron las bases de datos correspondientes a la humedad y al porcentaje de finos con información más reciente, además de realizar análisis DRX (difracción de rayos X) a la porción fina de 29 muestras de ripios (Anexos, Tabla 9.1). En cuanto a las

arcillas de los ripios, no existía una base de datos como tal, por lo que se creó una enfocada en las principales arcillas presentes en los stocks de ripio, que son la caolinita, clorita, illita y muscovita. Esta base se elaboró mediante el proceso de cubicación de los modelos del RAMS 1 y RAMS 2, a partir de los CADEMI de los años 2022, 2023 y 2024, que son cuerpos sólidos modelados por la empresa, que representan el material extraído por la pala desde los RAMS (Figura 4.1). Para realizar el procedimiento estos sólidos fueron importados como triangulaciones al software Maptek Vulcan 12.0.1. Este proceso de cubicación permitió obtener el volumen, el tonelaje, la ley y el porcentaje de lo que cargo la pala de extracción. Ambos modelos de los RAMS poseían las estimaciones de caolinita, clorita e illita, pero los datos de muscovita solo estaban presentes en el RAMS 2. Con la información recopilada, se confeccionaron gráficos de evolución de las variables (humedad, porcentaje de finos y principales arcillas) en los RAMS para evaluar las tendencias generales y compararlas entre sí.

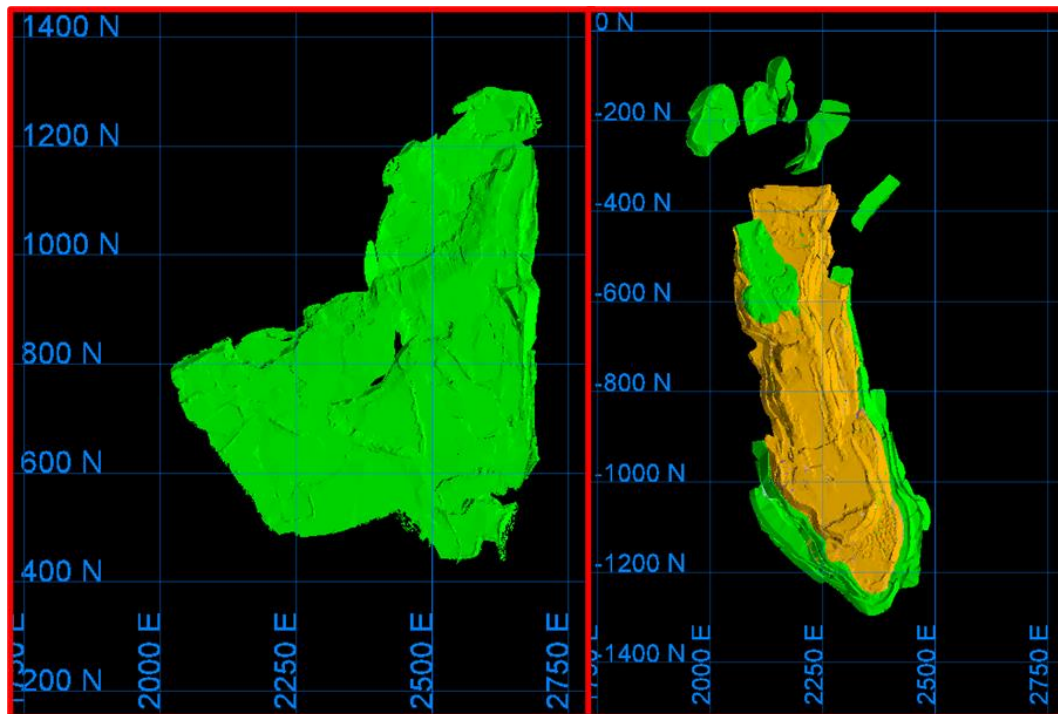


Figura 4.1. Vista en planta de los sólidos CADEMI. Los sólidos de la izquierda corresponden al RAMS 1 y los de la derecha al RAMS 2.

Por último, para la revisión en general de los demás minerales de ganga, se utilizaron mediciones QEMSCAN (evaluación cuantitativa de materiales mediante microscopio

electrónico de barrido) más actuales de los rípios, buscando diferencias importantes en los porcentajes de minerales.

4.3. Estrategia de muestreo

Para la definición de UG y estimación posterior, se determinó la utilización de las mediciones NIR de las muestras de los sondajes de aire reverso de la campaña 2022/2023, debido a que la mayor densidad de sondajes que se encuentran en la zona actual de explotación, pertenece a esta campaña, como se puede apreciar en la Figura 4.2.

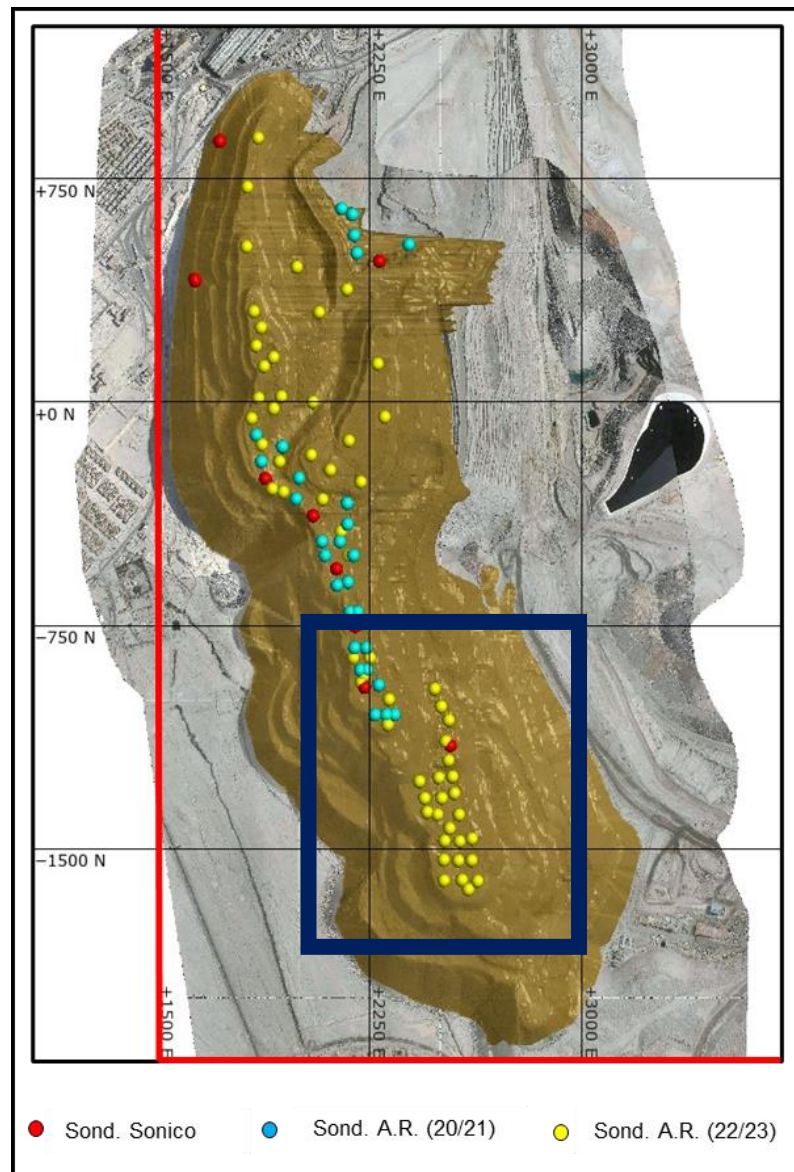


Figura 4.2. RAMS 2 con las diferentes campañas de perforación, resaltado en el cuadro azul, la zona de explotación actual. Modificado de CODELCO (2023).

4.4. Medición y cuantificación de Espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR)

4.4.1. Espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR)

La región del espectro electromagnético conocida como infrarrojo (IR) está ubicada entre el límite de la región visible y la región de microondas (Figura 4.3), esta área además se puede subdividir en secciones distintas según el rango de longitudes de onda que se considere (Burns y Ciurczak, 1992). En concreto, la región que maneja la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético se extiende desde los 750 a los 2,500 nm (Osborne, 2000).

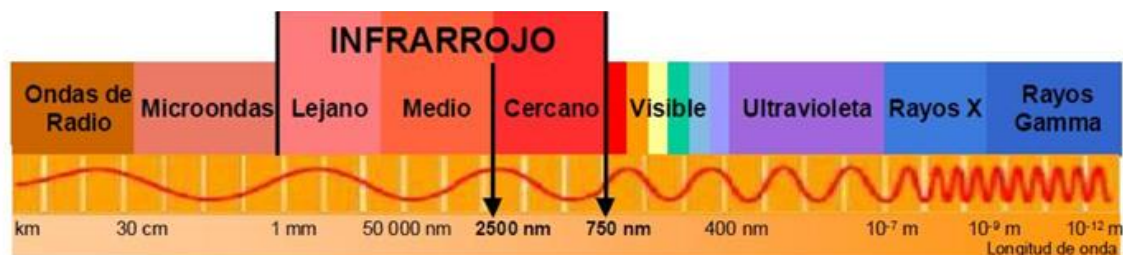


Figura 4.3. Espectro electromagnético. Tomado de Casal (2013).

La tecnología NIR se fundamenta en la interacción que existe entre la radiación electromagnética infrarroja y la muestra, lo que provoca cambios en la vibración de las moléculas de esta última. El espectro vibracional de una molécula es una propiedad física única y característica de la misma, por lo que, la absorción de radiación será variable dependiendo de los enlaces presentes en las moléculas, los cuales son fundamentalmente C-H , N-H_2 , O-H y C=O (Burns y Ciurczak, 1992). Entre los cuales los enlaces CH y OH están relacionados principalmente con minerales arcillosos (Quintana y Martínez, 2021). En la Figura 4.4 se observan ejemplos de curvas espectrales, asociadas a distintas muestras.

Su uso generalizado se debe principalmente a su capacidad para poder realizar análisis cualitativos y cuantitativos de múltiples componentes en muestras, con una preparación mínima. Además, esta metodología es no destructiva, rápida, no requiere el uso de reactivos químicos, reduce los errores del operador y necesita menos mano de obra que los métodos tradicionales de laboratorio, sin embargo, es importante tener en cuenta que

es un método secundario, lo que significa que debe ser calibrado por otras metodologías y sus resultados no son tan exactos como los métodos primarios (Rein, 2007).

En la espectroscopia NIR, la identificación de minerales se lleva a cabo comparando el espectro de la muestra con los espectros de referencia de análisis de minerales individuales (Jara, 2023). Los datos de referencia para la cuantificación de un mineral están integrados en un solo modelo quimiométrico que es una representación matemática creada a partir de muestras de un mismo tipo de producto o de productos relacionados. Este se elabora mediante la recopilación de datos espectrales de un conjunto de muestras.

Una vez que se han recopilado y analizado adecuadamente un número suficiente de muestras, se elabora un modelo matemático que describe la relación entre las características espectrales específicas y las propiedades de interés de las muestras. Este modelo quimiométrico permite medir de una manera bastante rápida la misma propiedad en una nueva muestra al aplicar el modelo a su espectro (Aguilera, 2018).

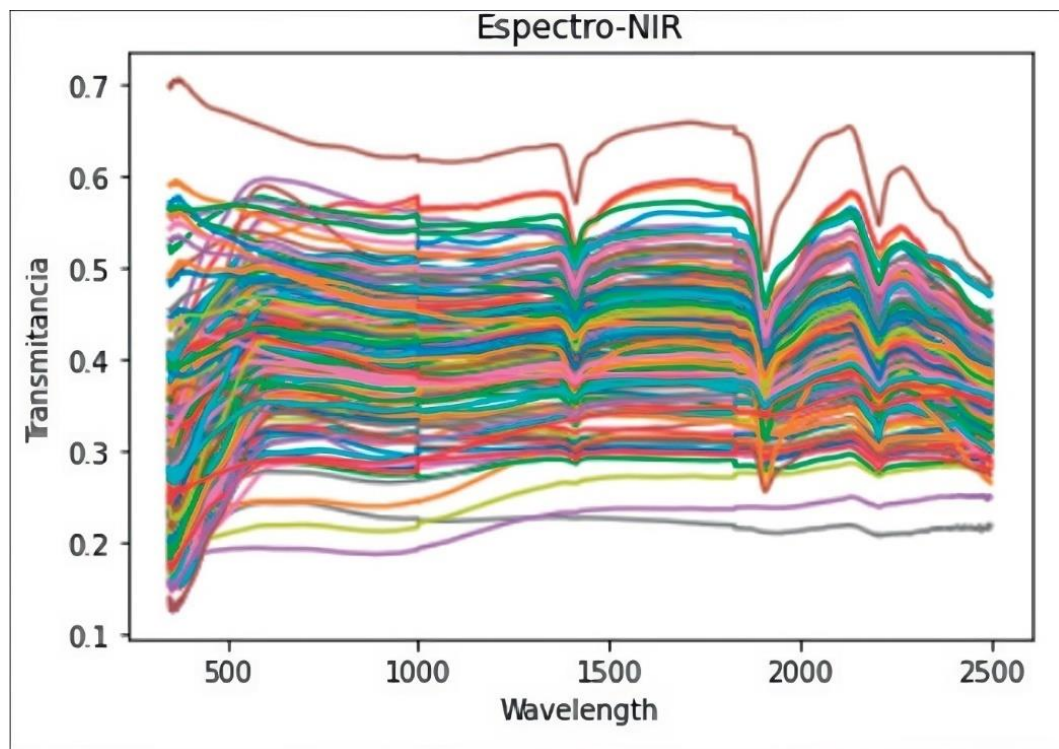


Figura 4.4. Ejemplo de curvas espectrales de 173 muestras. Tomado de Andrade y Celis (2021).

4.4.2. Equipo y herramientas de medición

El equipo utilizado para la medición NIR es el Spectral Evolution oreXpress modelo SM-3500 (Figura 4.5), un espectrómetro apto tanto para su uso en trabajo de campo como para laboratorio, parte de sus especificaciones se pueden ver en la Tabla 4.1. Este dispositivo era utilizado con una *benchtop reflectance probe* o sonda de reflectancia de mesa, mostrada en la Figura 4.6.



Figura 4.5. Fotografías del equipo NIR Spectral Evolution oreXpress modelo SM-3500.



Figura 4.6. Fotografías de la benchtop reflectance probe o sonda de reflectancia de mesa. La fotografía de la izquierda muestra su posición de lectura, mientras que la derecha muestra el espacio donde se ubica la muestra y el orificio por el cual el equipo emite luz.

Tabla 4.1. Especificaciones de Spectral Evolution oreXpress modelo SM-3500.

Rango espectral	350–2500nm
Resolución espectral	3.5nm (350-1000nm) 10nm @ 1500nm 7nm @2100nm
Luz perdida	0.10%
Velocidad mínima de escaneo	100 milisegundos
Reproducibilidad de longitud de onda	0.1nm
Precisión de longitud de onda	±0.5 ancho de banda
Interfaz de comunicaciones	USB, Bluetooth
Software compatible	DARWin SP Data Acquisition

Las herramientas utilizadas en los procesos de medición fueron; notebook, espátula, pala JIS (tamaño necesario de muestra), portamuestras, base del portamuestras y discos metálicos de laboratorio. Todas estas son mostradas en la Figura 4.7, 4.8 y 4.9.

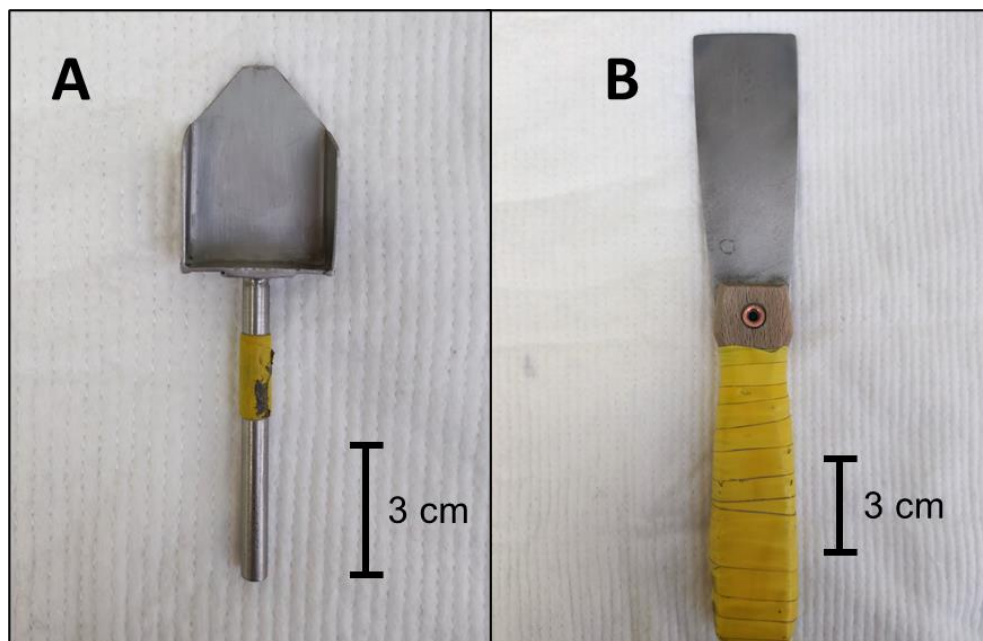


Figura 4.7. Fotografías de las herramientas utilizadas en el proceso de medición NIR con escala. (A) Pala JIS. (B) Espátula.

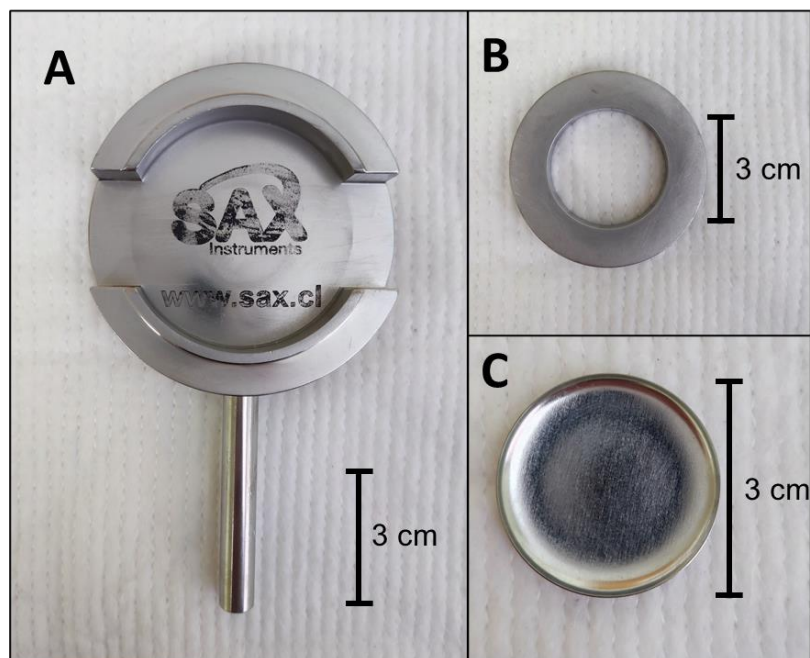


Figura 4.8. Fotografías de las herramientas utilizadas en el proceso de medición NIR con escala. (A) Base portamuestras. (B) Portamuestras. (C) Disco metálico de laboratorio.



Figura 4.9. Fotografías del notebook utilizado en la medición.

4.4.3. Proceso de medición

Las muestras de los sondajes son recibidas en sobres que contienen material pulverizado, con una granulometría fina que pasa por la malla 100 ($150\ \mu\text{m}$), lo que es necesario para su uso en el equipo NIR. Cada sobre está etiquetado con su respectivo sondaje, lins (número de identificación) y el metraje que representa. También cada sondaje que llega se encuentra acompañado de una lista detallada que permite confirmar los datos de cada sobre.

Las mediciones NIR se realizaron mediante el software DARWin SP V1.5, para esto el equipo de medición se conecta al notebook mediante una entrada USB y para poder conectarlo con el programa, se debe utilizar la opción “Instrument control”. Posteriormente en el programa se deben configurar 3 parámetros:

- Avg. Time (tiempo promedio): 30
- Measurement: Reflect/transmit
- Optic: Probe (Benchtop)

Para poder comenzar las mediciones en el programa se debe indicar la ubicación en la que se guardarán los archivos, utilizando el apartado “set scan/file title”, en este también se especifica el nombre del archivo que se guardará. Al empezar cada día se realiza una calibración, tomando una medición del blanco de referencia (Figura 4.10) mediante la opción “Ref” y también una verificación de la calibración con la medición de una muestra que contiene un espectrograma ya conocido, utilizando la opción “tgt”, comprobando con estos datos la calidad de la medición. Es importante que para cada lectura en el programa se debe presionar “single measurement plot” generando un espacio donde se visualizará el espectro. Luego de realizada la medición se debe comprobar de manera breve el espectro obtenido y posteriormente cerrarlo, volviendo a repetir este proceso para los siguientes análisis.



Figura 4.10. Fotografía del blanco de referencia utilizado para calibrar el equipo NIR.

Para la medición de las muestras primero se deben limpiar todas las herramientas con un paño limpio, luego introducir un disco metálico pequeño limpio en el portamuestras, para seguidamente abrir el sobre que contiene el material a medir de manera delicada para evitar el exceso de polución y con la pala JIS retirar la cantidad necesaria para llenar el porta muestras. Después se debe compactar el material en el portamuestras con la ayuda de la espátula hasta que se vea una superficie homogénea, se debe limpiar el exceso de material que queda en la periferia del instrumento para evitar errores de medición.

El portamuestras se introduce en su base para ser llevado bajo el benchtop, luego se debe encender la luz de este y en el programa presionar la opción “tgt”, comenzando el proceso de medición. Se observa el espectro obtenido del análisis y luego se apaga la luz del benchtop.

La muestra es retirada del equipo, desechándola en una bolsa, luego se quita el disco metálico del portamuestras, depositándola en otra bolsa diferente. Por último, se limpian nuevamente todas las herramientas utilizadas y el área de trabajo para evitar la contaminación cruzada. Los pasos se repiten para cada una de las muestras y se realiza cada 5 análisis una medición del blanco de referencia con la opción “ref” para calibrar nuevamente el equipo.

4.4.4. Modelos quimiométricos

Para poder cuantificar minerales de ganga de las mediciones NIR se desarrollaron modelos quimiométricos para los rípios. Los constituyentes que fueron modelados son los minerales identificados en los primeros análisis. Para esto se utilizaron un total de 309 mediciones DRX (difracción de rayos X) de muestras de los sondajes de aire reverso 10851, 10852, 10900 y 10925 correspondientes a una parte de la campaña de sondajes de aire reverso 2022/2023, como método químico de referencia. Además, se emplearon las mediciones NIR correspondientes a cada una de las muestras medidas por DRX. Los modelos fueron realizados con el software GRAMS IQ, en el cual se deben subir los datos reales medidos. Este software genera una relación entre las curvas espectrales de las mediciones NIR y el análisis del método químico primario que en este caso son las mediciones DRX, permitiendo la realización de modelos predictivos de los constituyentes. Los modelos son calculados por el programa utilizando cierto número de “Factores” que

en simples palabras son el número de componentes o variables latentes que utiliza el programa para realizar la predicción.

El programa, luego de analizar los datos, entregó un modelo preliminar, que se fue modificando seleccionando “outliers”, que son muestras muy alejadas de la predicción, eliminándolas del cálculo del modelo para mejorar los resultados.

4.4.5. Análisis estadístico de los modelos quimiométricos

Los resultados de los modelos se analizaron estadísticamente calculando el SEP (error estándar de predicción), que se define como la raíz cuadrada del promedio de la diferencia entre el valor de referencia y el predicho por el programa. Además, se calculó el RPD (desviación residual predictiva) que es un estadístico adimensional que realiza una evaluación rápida del modelo de calibración de espectroscopia NIR y se define como la relación entre la desviación estándar del método químico de referencia y el error estándar de predicción (SEP) (Fearn, 2002). Mientras menor sea el valor del SEP y mayor sea el valor del RPD, más confianza tendrá el modelo quimiométrico. Estos valores se calcularon realizando Test aleatorios a las muestras con los resultados del modelo. El valor del RPD está asociado a diferentes criterios que se pueden ver en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Criterios asociados a la desviación residual predictiva (RPD), basado en Malley *et al.* (2004).

Valor	Criterio
RPD>4	Excelente
3<RPD<4	Logrado
2.25<RPD<3	Aceptable
1.75<RPD<2.25	Moderadamente aceptable
RPD<1.75	No utilizable

4.4.6. Cuantificación de mediciones

Los archivos generados por el programa Darwin SP V1.5 tienen un formato .SEP, los cuales deben ser transformados a .SPC, para lo que se utiliza el software SEP to SPC converter.

Los archivos .SPC obtenidos deben ser cargados en el programa IQ Predict en conjunto con el archivo del modelo quimiométrico .cal del mineral que se desee cuantificar. Al

utilizar el programa, los resultados son arrojados en un archivo Excel, con el porcentaje en peso del mineral analizado y el valor de la distancia de Mahalanobis, este último valor permite ver cuánto es que se asemeja la variable medida a la información contenida en el modelo. La distancia de Mahalanobis tiene asociado un criterio que indica que las mediciones que tengan valores menores o iguales a 3 son confiables, mientras que las mayores a 3 no son confiables. En general, la espectroscopía NIR no es adecuada para cuantificar concentraciones menores a 0.05% en peso. Aunque el programa puede identificar que la curva del espectrograma tiene valores por debajo de ese umbral, pero no puede cuantificarlos, quedando por debajo del límite de cuantificación. Esto ocurre cuando no hay una cuantificación, pero la distancia de Mahalanobis es menor a 3.

4.5. Elaboración de bases de datos

Para la creación de una base de datos para la definición de UG y la posterior estimación, se utilizó una base de datos existente que contenía sondajes medidos con el equipo NIR de la campaña de sondajes de aire reverso 2022/2023 que incluía el nombre del sondaje y el metraje correspondiente a cada muestra, así como las cuantificaciones de los porcentajes de illita, caolinita, clorita y muscovita. A esta base de datos se le añadieron las cuantificaciones de los minerales a estimar, obtenidas gracias a los modelos quimiométricos confeccionados, eliminando los datos que tuvieran una distancia de Mahalanobis mayor a tres. Es importante señalar que algunas muestras estaban por debajo del límite de cuantificación y se les asignó un valor estándar de 0.01%. Además, en la base, se incluyó la unidad geológica de los ripios (50, 51, 52 y 53) y el porcentaje de CuT (cobre total), CuS (cobre soluble), Fe, Ca, Mg y Mn correspondiente a cada muestra.

La base de datos original contiene un total de 4,280 muestras y fue dividida en sub-bases de datos, cada una representando a un mineral específico a estimar. Esto se hizo porque cada mineral tiene cuantificaciones diferentes y se eliminaron algunos datos debido a que las cuantificaciones asociadas a las muestras tenían una distancia de Mahalanobis mayor a tres.

Las bases de datos divididas fueron importadas a Maptek Vulcan 12.0.1 en formato CSV, en conjunto con los datos de los collares de los sondajes y la trayectoria del sondaje, luego estas fueron compositadas con el método “run length” cada un metro.

4.6. Definición de Unidades geológicas (UG)

Las unidades geológicas permiten identificar y diferenciar zonas con características similares dentro del depósito. En este trabajo las UG fueron identificadas con el método tradicional basado en parámetros exclusivamente geológicos, analizando principalmente la mineralogía y sus elementos constituyentes.

Para poder definir unidades geológicas en los ripios del RAMS 2 se utilizó la base de datos para estimación, correspondiente a los sondajes de aire reverso de la campaña 2022/2023, la cual fue ingresada en el programa Orange Data Mining 3.36.2. Este software permite relacionar las variables seleccionadas como “categorización” de la base de datos para identificar una variable determinada como “target” que sería el objetivo de análisis.

En este caso el “target” fueron los porcentajes de los minerales de ganga a estimar, por otro lado, las variables utilizadas como “categorización” fueron los porcentajes de CuT (cobre total), CuS (cobre soluble), Fe, Ca, Mg y Mn, y las razones existentes entre estos. Posteriormente se generaron diagramas de árbol de decisión, diferentes para cada mineral seleccionado como “target”.

Estos diagramas muestran los quiebres estadísticos entre las variables, dividiéndose en nodos. Cada nodo divide la base de datos en dos conjuntos diferentes que no se superponen, esta división se realiza basándose en una o más condiciones de una de las variables de “categorización” y para cada nueva división por debajo de otra, toma en cuenta la condición del nodo anterior. Además, a cada conjunto se le asigna un valor aproximado del “target”.

Para cargar las definiciones de UG al modelo del RAMS 2 y las bases de datos en Maptek Vulcan, primero se debió añadir la variable correspondiente a ambos de tipo “interger” con un valor por defecto de “-99”. Después se utilizaron scripts, los cuales son instrucciones en lenguaje de programación, para poder añadir la información a las variables creadas.

4.7. Comprobación de la definición de UG

Para comprobar si es que las definiciones de UG fueron buenas, se utilizó el apartado “statistics” de Maptek Vulcan, en el que a partir de las bases de datos compositadas se realizaron gráficos de probabilidad lognormal. Estos gráficos están diseñados para ayudar a determinar si los datos provienen de una distribución lognormal de 2 parámetros y si las líneas de probabilidad no se cruzan, esto sugiere que los conjuntos de datos de las diferentes UG siguen distribuciones distintas, lo cual es un buen indicador de que las unidades geológicas están correctamente definidas. Además, se utilizó el programa Minitab para realizar histogramas que permitan estudiar la distribución de los valores de los minerales a estimar por UG.

4.8. Estimación por el método inverso a la distancia

La estimación de gangas en el RAMS 2 se realizó mediante el método inverso a la distancia, el cual es un método clásico, pero que se acerca más a un método geoestadístico, debido a la cantidad de información que procesa. Este método define los recursos mediante un factor de ponderación para cada muestra basándose en la distancia desde la muestra hasta el punto o bloque mineralizado (Cancino, 2015).

Para estimar en Maptek Vulcan 12.0.1 se crearon archivos de estimación .bef que poseen un nivel por cada UG definida. Para cada mineral se realizaron 4 pasos de estimación por inverso a la distancia al cuadrado, el primero con un eje mayor de 30m, el segundo con un eje mayor de 60m, el tercero con un eje mayor de 120m y el último con un eje mayor de 1,000m, para poder estimar todo el modelo de bloques del RAMS 2. La estimación de cada uno de los pasos está limitada por el elipsoide utilizado y el paso siguiente estima la parte que no pudo estimar el paso anterior, sin modificar los valores de esta última.

Posteriormente se crean archivos de estimación .ber que ocupan los archivos .bef para realizar cada uno de los pasos de estimación en cada una de las UG. Estos fueron ejecutados en Maptek Vulcan 12.0.1 para comenzar el proceso. El resultado son modelos de bloques del contenido mineral representado en wt%, que exhiben zonas dentro del yacimiento con diferentes rangos del mineral.

4.9. Validación de los modelos

Para validar los modelos, se creó una nueva variable para cada mineral estimado en el modelo del RAMS 2. Estas variables se utilizaron para realizar una estimación con el método inverso a la distancia, pero con potencia 0 y ejes de búsqueda que no superaran el espacio de un bloque. Como resultado, el cálculo de los bloques dentro del modelo se basa en el promedio de las muestras dentro de cada bloque, sin asignar una ponderación diferente a las muestras por distancia, representando así únicamente los valores de las muestras. Esto se realizó para comparar el promedio de las muestras de la base de datos con la estimación de los bloques calculados con el método inverso a la distancia al cuadrado correspondientes a dichas muestras, utilizando gráficos de dispersión.

4.9.1. Análisis de deriva

El análisis de deriva se realizó en el software Maptek Vulcan 12.0.1, utilizando la herramienta “Database Drift Analyser”. Este análisis implica la verificación de los modelos de estimación generados para los minerales estimados, mediante la evaluación de su comportamiento en los ejes X, Y, Z, estudiándolos de manera visual con gráficos.

En el programa se compara la deriva de la base de datos con la del modelo de bloques donde se estimaron los porcentajes de los minerales, en este caso se realizó solo con los datos que se generaron hasta la tercera pasada de estimación. Si las gráficas muestran similitudes en forma y límites, se considera que el modelo es válido. Además de validar el modelo de forma visual y estadística, los gráficos de deriva son útiles para representar en dos dimensiones el comportamiento de una variable a medida que se avanza en alguna dirección.

4.10. Revisión de Terreno

Se llevó a cabo una revisión en terreno con el objetivo de identificar las áreas de los rípios que presentan los mayores porcentajes de humedad. Esta inspección se realizó con el propósito de establecer una posible relación entre los niveles de humedad observados y alguno de los minerales de ganga que se modelaron.

4.11. Análisis de bases de datos de pilas post-lixiviación

El estudio de las pilas lixiviadas comenzó con un análisis de las bases de datos de los perfiles granulométricos de la carga de cola, que corresponde a la granulometría del material residual luego de la lixiviación. También se analizó la humedad de este material antes de ser dispuesto en los botaderos.

4.12. Análisis químico de pilas post-lixiviación

Se enviaron a análisis Tescan muestras de pilas que ya han pasado por el proceso de lixiviación para determinar el porcentaje mineral que las compone. A partir de los análisis modales (Anexos, Tabla 9.2), se confeccionaron gráficos de dispersión que comparan los distintos minerales de ganga importantes en este estudio con el porcentaje de humedad reflejado en cada muestra. Adicionalmente, se realizó un análisis FRX (fluorescencia de rayos X) a las mismas muestras para conocer las leyes de los elementos constituyentes principales (Anexos, Tabla 9.3), con el fin de realizar la misma comparación con la humedad. Las pilas muestreadas en este caso fueron la 33N, 35N, 36N y 37N, es importante mencionar que las pilas son muestreadas en tres zonas; el sector norte, central y sur de la pila, por lo que se enviaron tres muestras de cada pila, aunque no se dispone del análisis de la parte central de la pila 33N ni de la parte norte de la pila 35N.

5. CAPÍTULO V: RESULTADOS

5.1. Evolución de humedad de los rípios en stock

Para conseguir la evolución de la humedad en los rípios se actualizaron los datos históricos de los rípios, quedando con registros desde febrero de 2018 hasta octubre de 2024, además de añadir información correspondiente a lluvias obtenidas desde la página web Meteochile. Con esto se conformó un gráfico para observar la evolución de la humedad en cada uno de los siguientes rípios; Rípio Verde, Rípio Rojo y carga a buzón (Mezcla) que son enviados a la preparación de las pilas de lixiviación (Figura 5.1, 5.2 y 5.3). En el gráfico del Rípio Verde se añadió una banda de aceptación de humedad que indica un límite alto de humedad en los rípios.

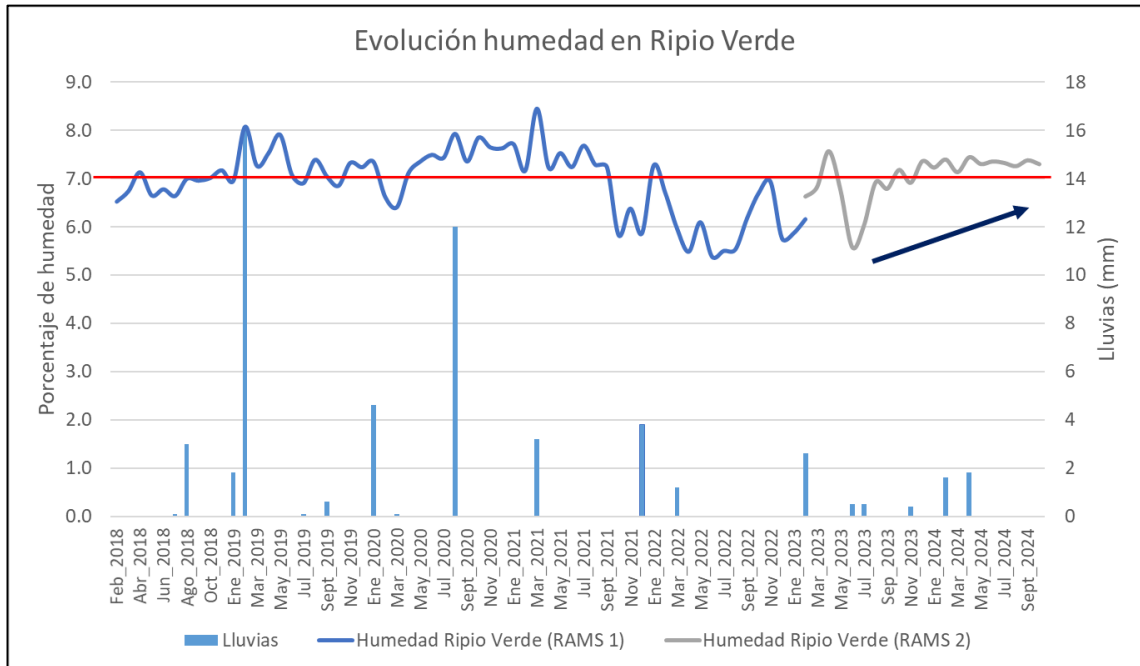


Figura 5.1. Gráfico de evolución de la humedad en el Rípio Verde (RAMS), con una banda de aceptación en rojo de 7.0%. Incluye una flecha que indica la tendencia de los datos, después del comienzo de los problemas en la lixiviación. Elaborado en Excel.

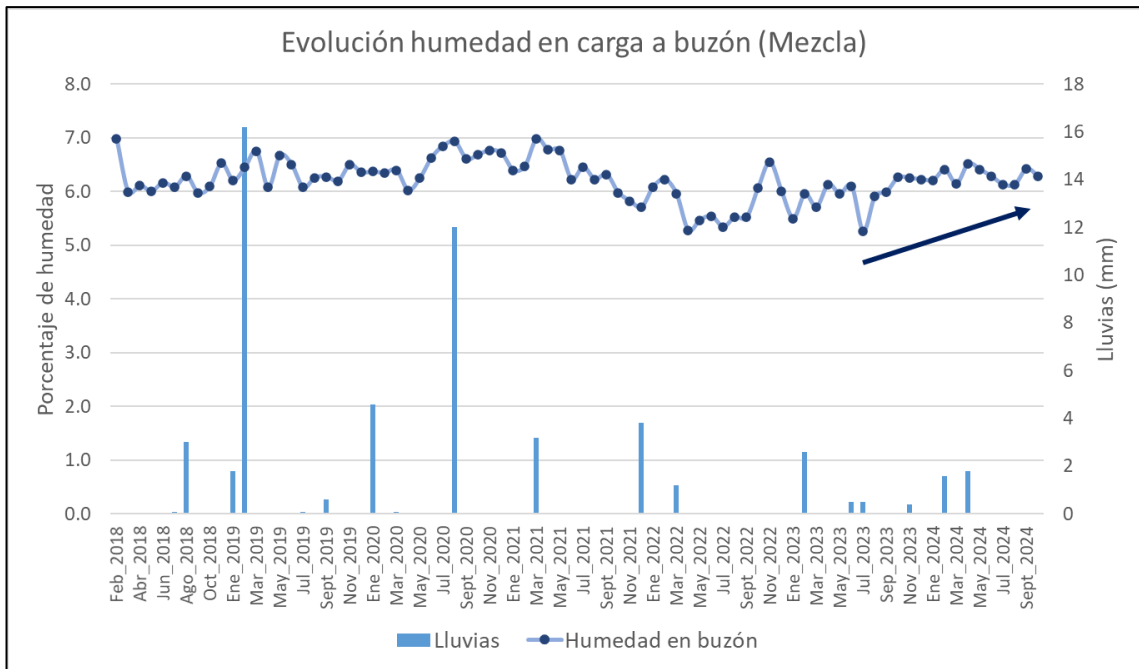


Figura 5.2. Gráfico de evolución de la humedad en la carga a buzón (Mezcla). Incluye una flecha que indica la tendencia de los datos, después del comienzo de los problemas en la lixiviación. Elaborado en Excel.

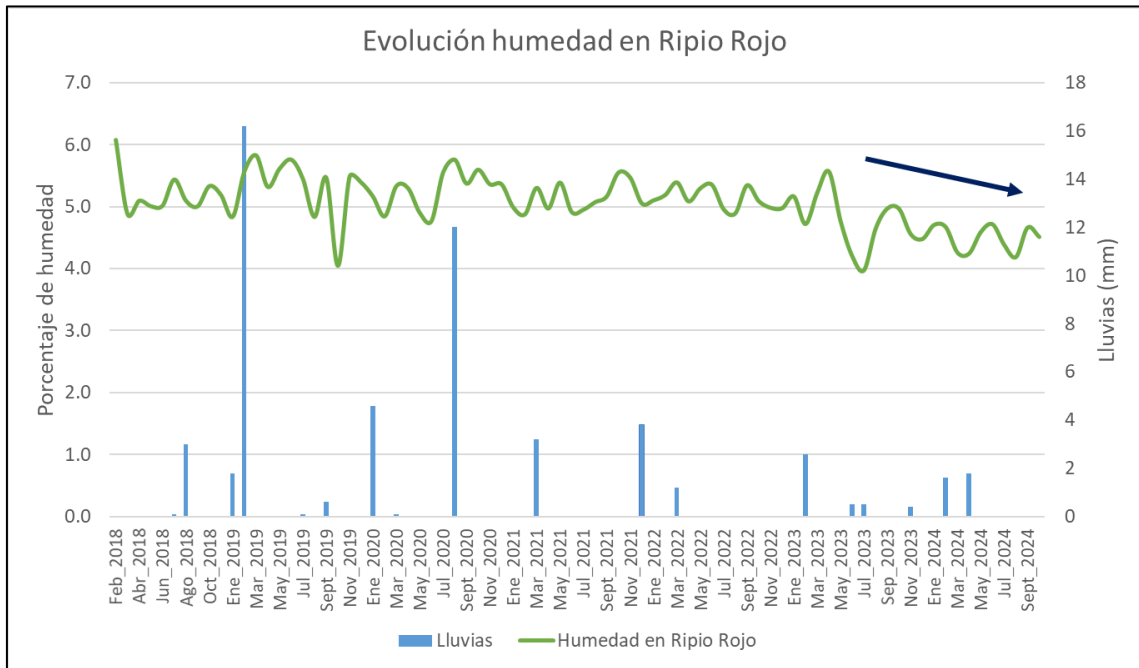


Figura 5.3. Gráfico de evolución de la humedad en el Ripio Rojo. Incluye una flecha que indica la tendencia de los datos, después del comienzo de los problemas en la lixiviación. Elaborado en Excel.

En los gráficos de Ripio Verde y carga a buzón, se puede ver una tendencia general al aumento de humedad en fechas cercanas al comienzo de los problemas en la GEL. En

cuanto al gráfico del Ripio Rojo, los porcentajes generales de humedad tienden a disminuir en esas fechas, al contrario que los anteriores rипios.

Los datos relacionados a lluvias poseen buena relación con los picos de humedad del Ripio Verde, pero en el caso del Ripio Rojo y la carga a buzón, estos datos no muestran una conexión significativa.

5.2. Evolución del porcentaje de finos de los rипios en stock

La base de datos histórica de los perfiles granulométricos fue actualizada con registros nuevos, quedando con información desde agosto de 2018 hasta agosto de 2024, además de calcular el porcentaje de finos, que en este caso se midió como el material que pasa la malla de tamiz #100 (<150 μm). Con estos datos se confeccionaron los gráficos de evolución del porcentaje de finos para cada rипio analizado en el apartado anterior (Figura 5.4, 5.5 y 5.6).

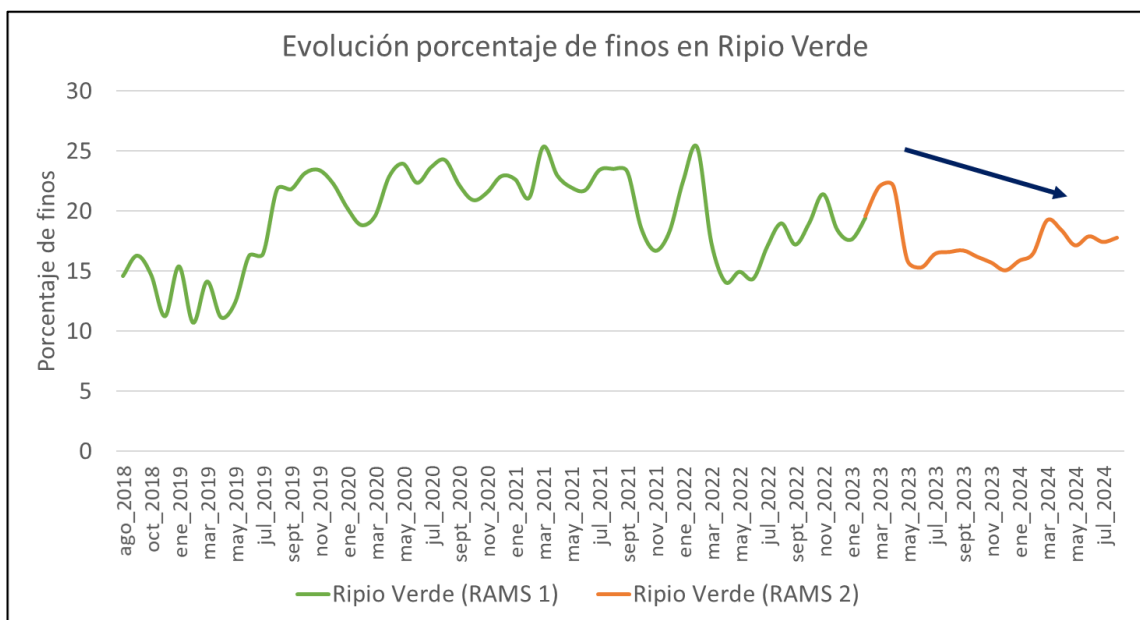


Figura 5.4. Gráfico de evolución del porcentaje de finos en el Ripio Verde. Incluye una flecha que indica la tendencia de los datos, después de las fechas en las que aumenta la humedad en los RAMS. Elaborado en Excel.

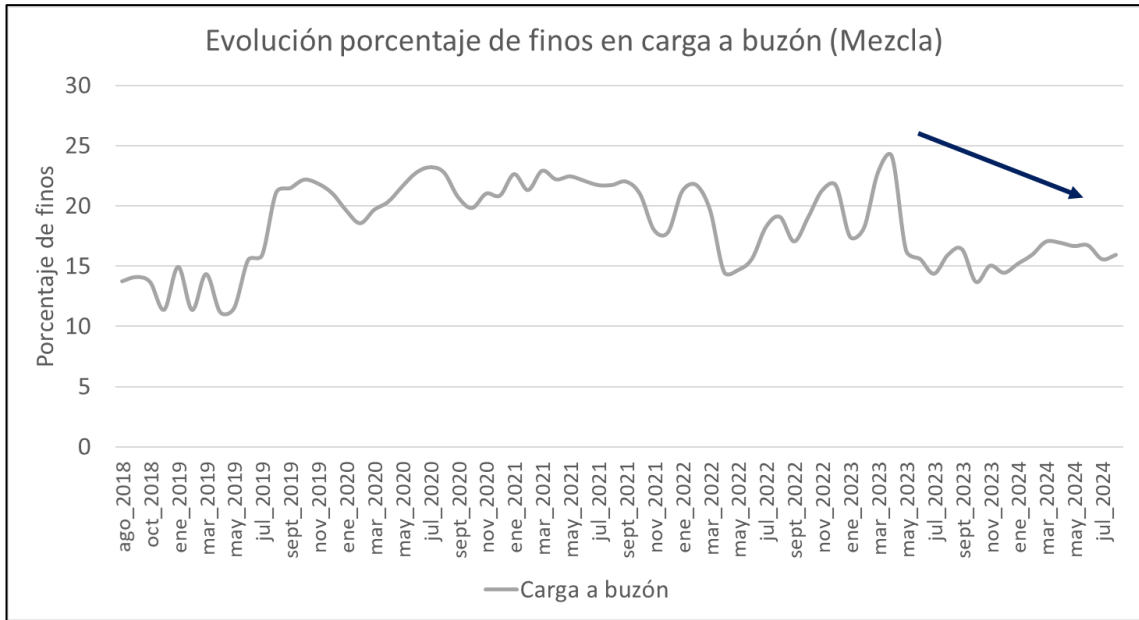


Figura 5.5. Gráfico de evolución del porcentaje de finos en la carga a buzón (Mezcla). Incluye una flecha que indica la tendencia de los datos, después de las fechas en las que aumenta la humedad en los RAMS. Elaborado en Excel.

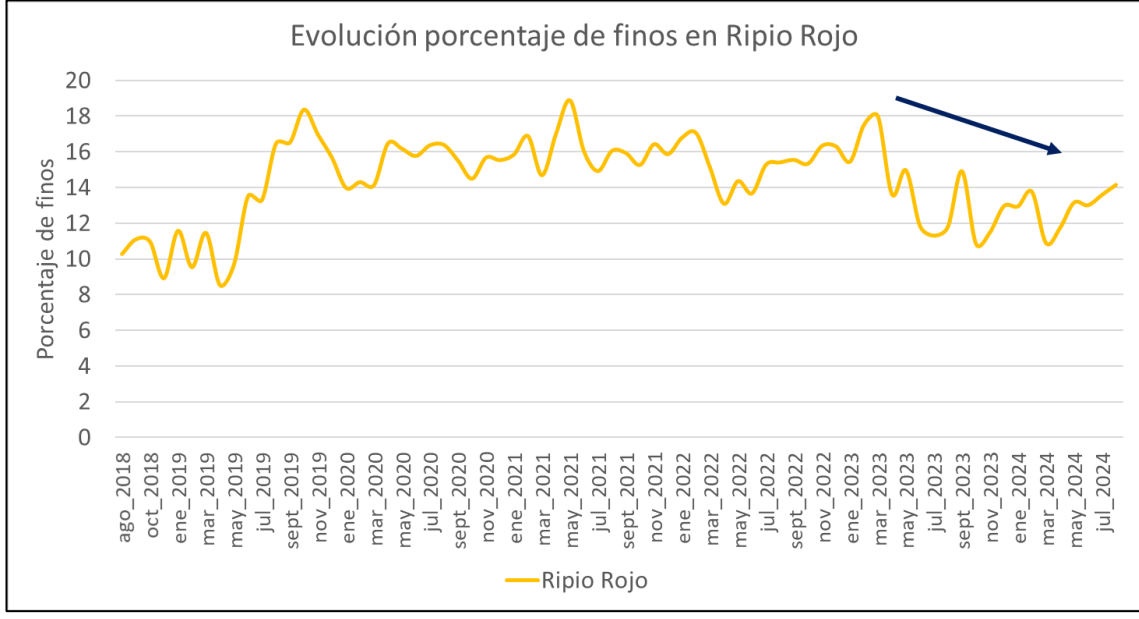


Figura 5.6. Gráfico de evolución del porcentaje de finos en el Ripio Rojo. Incluye una flecha que indica la tendencia de los datos, después de las fechas en las que aumenta la humedad en los RAMS. Elaborado en Excel.

Los gráficos muestran que el porcentaje de finos tiende a disminuir en todos los rípios estudiados, después de las fechas en que la humedad comienza a aumentar, lo que indica una relación inversa entre ambas variables.

5.2.1. Composición del material fino de los rípios en stock

Se envió a análisis DRX la porción de material fino (<150 µm) de 29 muestras de los rípios, de las cuales 11 eran de Ripio Verde, 13 eran de Ripio Mezcla y 5 eran de Ripio Rojo. Con los análisis se confeccionaron gráficos para observar la composición general que tienen los finos de cada uno de los rípios (Figura 5.7, 5.8 y 5.9).

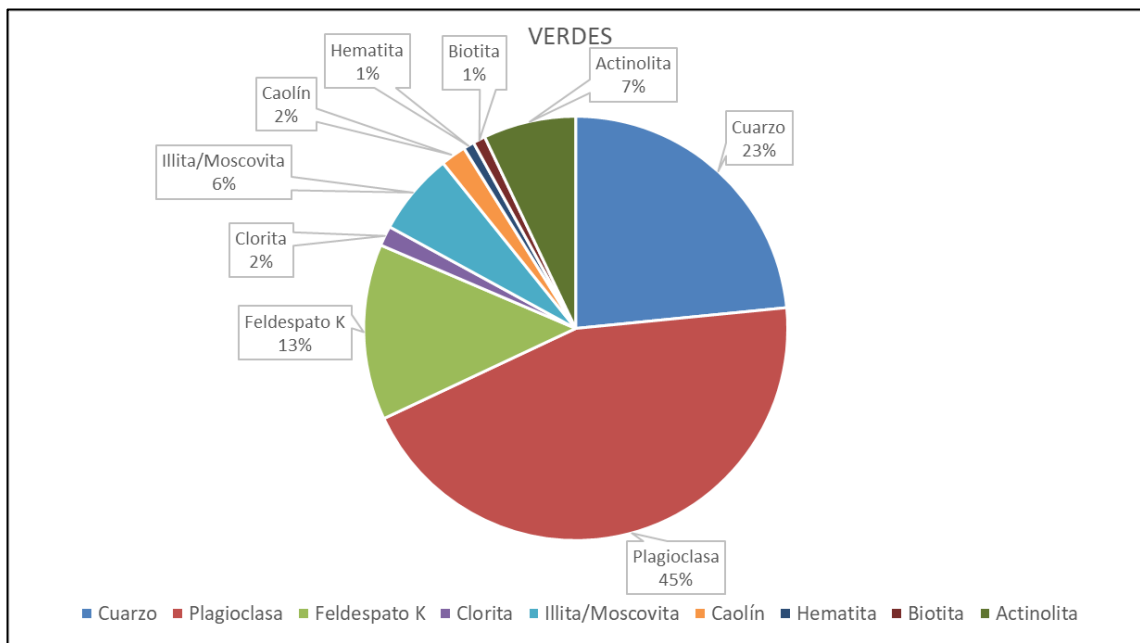


Figura 5.7. Gráfico de la Composición general de la porción de fina del Ripio Verde. Elaborado en Excel.

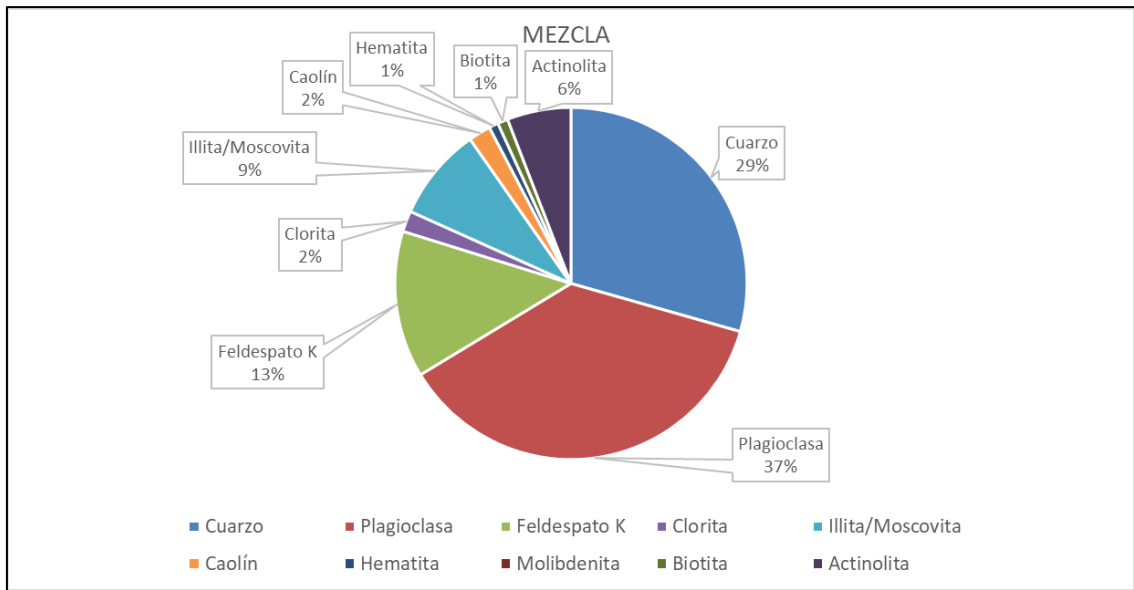


Figura 5.8. Gráfico de la Composición general de la porción de fina del Ripio Mezcla. Elaborado en Excel.

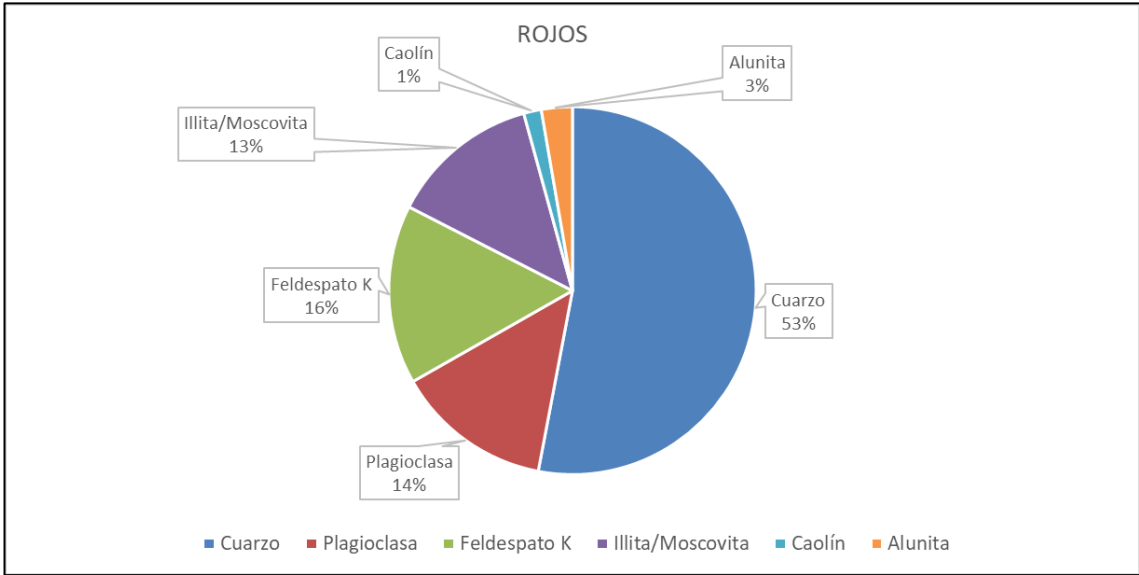


Figura 5.9. Gráfico de la composición general de la porción de fina del Ripio Rojo. Elaborado en Excel.

Es importante añadir que en algunas de las muestras de Ripio Verde y Mezcla se encontraron porcentajes variables de bassanita, un sulfato de calcio hemidratado, no se ve reflejado en los gráficos de la composición general porque no se encuentra en todas las muestras.

5.3. Evolución de arcillas de los rípios en stock

Los datos obtenidos de las cubicaciones de los modelos de los RAMS permitieron hacer gráficos para comparar los porcentajes de caolinita, clorita e illita de forma histórica (Figuras 5.10, 5.11 y 5.12). Es importante destacar que los datos del RAMS 1 poseen una mayor incertidumbre, ya que el modelo fue confeccionado con una menor cantidad de datos que los del RAMS 2.

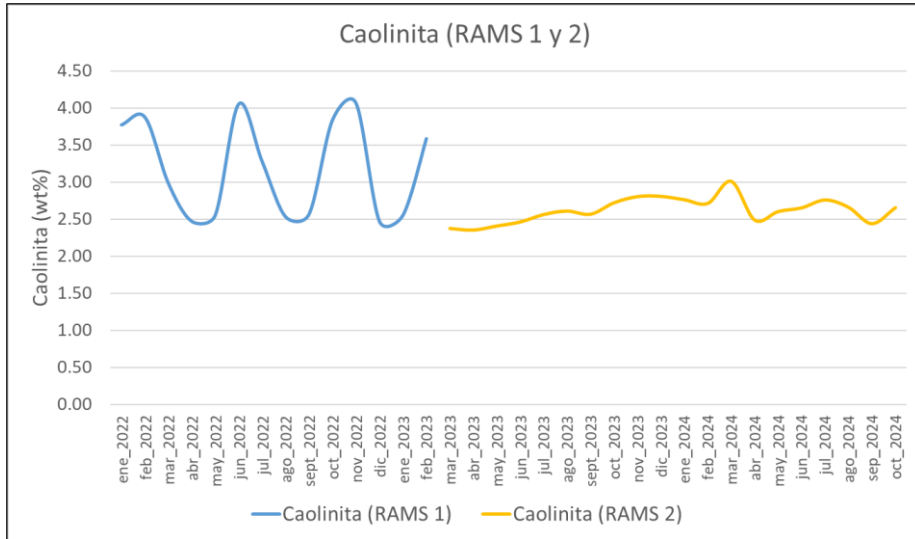


Figura 5.10. Gráfico de evolución de los porcentajes de caolinita (wt%) extráidos por la pala en RAMS 1 y 2. Elaborado en Excel.

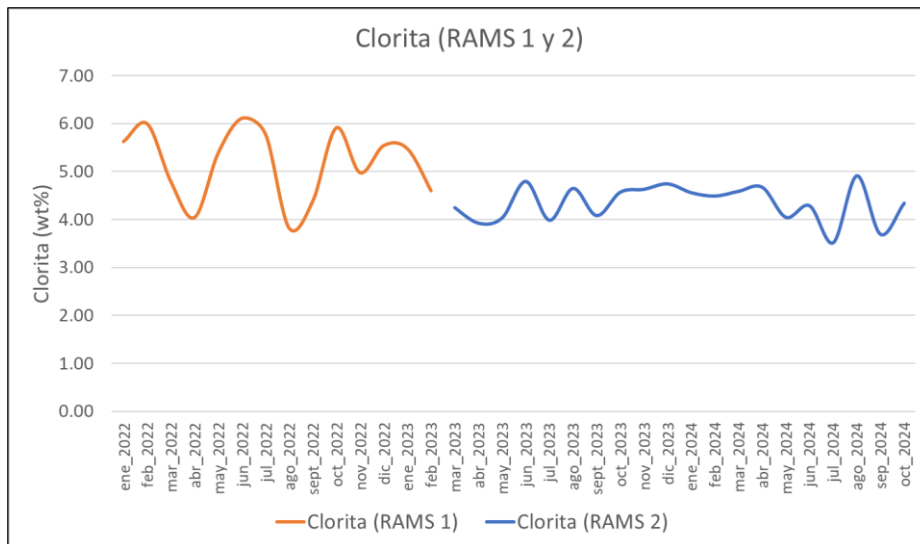


Figura 5.11. Gráfico de evolución de los porcentajes de clorita (wt%) extráidos por la pala en RAMS 1 y 2. Elaborado en Excel.

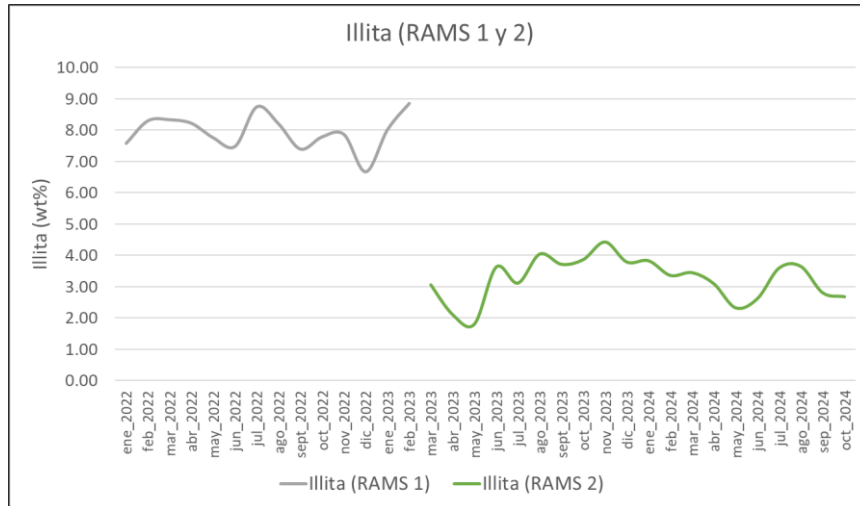


Figura 5.12. Gráfico de evolución de los porcentajes de illita (wt%) extráidos por la pala en RAMS 1 y 2. Elaborado en Excel.

Los gráficos muestran una tendencia general a disminuir los porcentajes de las arcillas, al pasar del stock RAMS 1 al RAMS 2, mostrando poca relación con los aumentos de humedad que se presentan actualmente. También se realizaron cubicaciones para la muscovita, pero solo se tenía la estimación de este mineral en el modelo de bloques del RAMS 2, por lo que no se tiene información de este en el tiempo de explotación del RAMS 1. El gráfico de la evolución de la muscovita (Figura 5.13), muestra importantes fluctuaciones en sus porcentajes con un aumento en fechas cercanas a noviembre de 2023, pero aun así hay una disminución significativa en los últimos porcentajes.

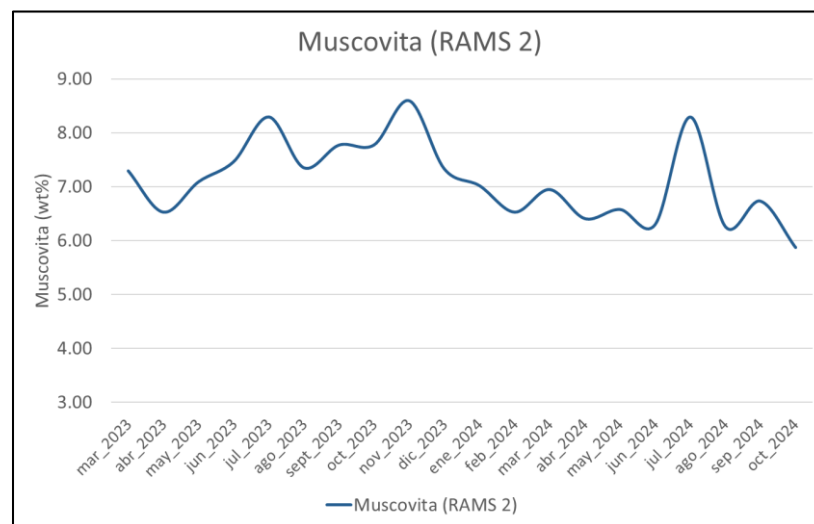


Figura 5.13. Gráfico de evolución de los porcentajes de muscovita (wt%) extráidos por la pala en el RAMS 2. Elaborado en Excel.

5.4. Análisis mineralógico de los rípios en stock

Tabla 5.1. Resultados de análisis QEMSCAN a muestras de rípios, los cuales se muestran en porcentaje del total de la muestra.

Composición mineralógica											
Grupo Mineral	Mezcla Roca		Mezcla Grava		Ripio rojo		Rams_1		Rams_2		
Cuarzo	23.37	56.30	27.37	63.87	50.97	76.00	24.88	61.17	23.04	56.62	Minerales Principales formadores de roca
Plagioclasa	26.48		26.82		7.45		26.98		24.96		
Feldespato K	5.93		8.73		15.61		9.03		7.78		
Alunita	0.52		0.95		1.97		0.27		0.85		
Anfibol	14.10	24.32	7.93	17.77	0.08	0.20	9.67	19.23	11.19	21.27	Minerales Ferromagnesianos
Piroxeno	0.16		0.31		0.00		0.21		0.36		
Clorita	6.48		5.86		0.12		6.35		6.80		
Epidota	3.58		3.67		0.00		3.01		2.92		
Ilmenita	0.60	1.43	0.36	1.10	0.01	0.17	0.47	1.22	0.45	1.03	Minerales Secundarios
Titanita	0.49		0.48		0.00		0.37		0.33		
Rutilo/Anatasa	0.19		0.13		0.13		0.11		0.10		
Apatito	0.07		0.07		0.00		0.16		0.06		
Titanomagnetita	0.03		0.04		0.00		0.03		0.03		
Circon	0.02		0.00		0.01		0.08		0.02		
Baritina	0.01		0.00		0.02		0.00		0.03		
Allanita-(Ce)	0.01		0.01		0.00		0.00		0.01		
Muscovita/illita	11.40	15.58	11.50	15.52	20.00	23.07	10.53	15.52	10.23	16.25	Minerales Finos
Biotita/flogopita	0.88		1.29		0.19		1.34		1.77		
Arcillas Al	0.56		0.52		0.68		1.17		0.98		
Hematita/Magnetita	2.42		1.60		0.69		2.08		2.96		
Jarosita	0.30		0.53		1.50		0.37		0.21		
Silicato Fe	0.01		0.05		0.01		0.00		0.05		
Anhidrita/Yeso	0.01		0.03		0.00		0.02		0.06		
Clorita-Cu	0.83		2.23		0.53		1.52		0.02		
Crisocola	0.30	0.51		0.14	1.11	0.21					
Arcillas Cu	0.76	0.24		0.05	0.42	0.17					
Brocantita/Antlerita	0.00	0.06		0.00	0.00	0.13					
Pseudomalaquita	0.28	0.14		0.11	0.13	0.00					
Limonita(Cu)	0.04	0.02		0.04	0.05	0.07					
Pitch(Cu)	0.01	0.02		0.00	0.02	0.05					
Calcosina/digenita	0.09	0.12	0.10	0.20	0.01	0.19	0.00	0.00	0.15	1.41	Menas Sulfuradas
Pirita	0.03		0.10		0.10		0.00		0.72		
Bornita	0.00		0.00		0.00		0.00		0.46		
Calcopirita	0.00		0.00		0.08		0.00		0.06		
Enargita/Tennantita	0.00		0.00		0.00		0.00		0.03		

Los análisis QEMSCAN relacionados a muestras de los diferentes ripios (Tabla 5.1), presentan diferencias significativas entre la mezcla con comportamiento de roca y aquella con un comportamiento de grava. En particular, se observó una menor cantidad de minerales formadores de roca en los ripios mezcla con origen de roca (mayor proporción de material tratado de unidades de roca mineralizada de Mina Sur) que en los con origen de grava (mayor proporción de material tratado de unidades de grava mineralizadas de Mina Sur), estos minerales son importantes, por su aporte en la estabilidad estructural de la pila. También se encontraron diferencias en los minerales ferromagnesianos, específicamente en el porcentaje de anfíboles, donde la mezcla con origen de roca presenta casi el doble que la mezcla de grava.

Estas variaciones también pueden observarse de manera similar entre el RAMS 1 y el RAMS 2, donde este último, posee menor cantidad de minerales formadores de rocas y más anfíboles. En cuanto al Ripio Rojo, se puede notar que, a pesar de tener una cantidad importante de “minerales finos”, están conformados principalmente por minerales formadores de roca. Esto demuestra que los formadores de roca son cruciales para la estabilidad estructural de la pila, que es la razón principal por la cual estos ripios (Ripio Rojo) se usan en la mezcla. Además, estos “minerales finos”, no necesariamente son de granulometría muy fina, ya que, como se muestra en la Figura 5.6, actualmente los finos del Ripio Rojo rondan solo entre 10-14%.

En cuanto a los otros componentes, no se encontraron diferencias significativas entre los ripios.

5.5. Modelos quimiométricos

Basado en los resultados del análisis QEMSCAN, se realizaron modelos quimiométricos para cuarzo, plagioclasa, feldespato K y actinolita, esta última representa a los anfíboles.

5.5.1. Modelo quimiométrico de cuarzo

En el caso del modelo de cuarzo, la Figura 5.14 muestra el gráfico Actual V/S Predicted, el cual representa la relación entre los datos reales medidos por DRX y las predicciones generadas por el programa. En este gráfico también se puede apreciar un coeficiente de correlación que es de aproximadamente 94%.

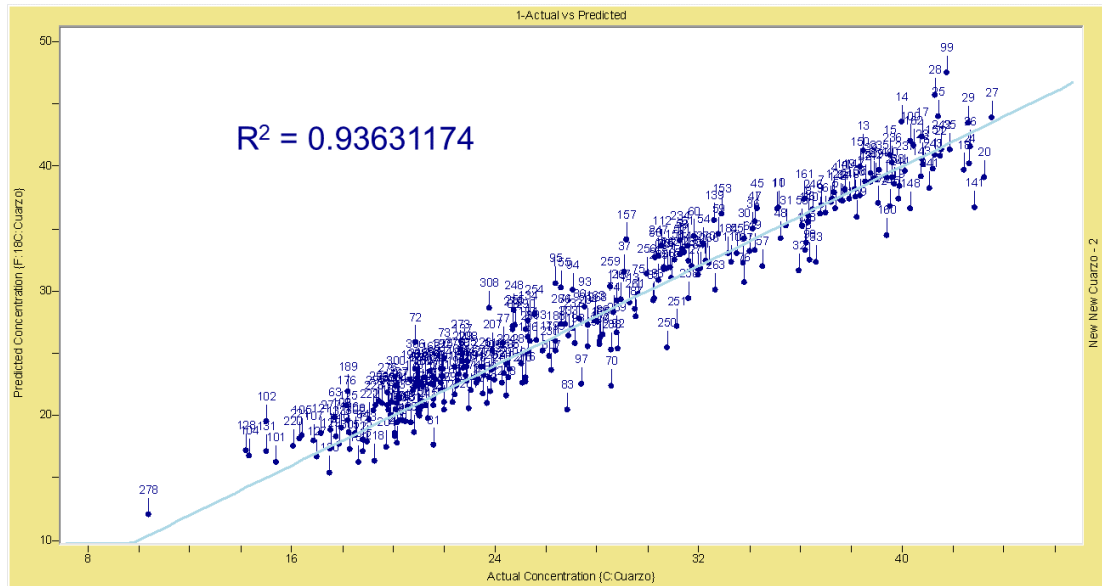


Figura 5.14. Gráfico Actual V/S Predicted del modelo quimiométrico de cuarzo. Elaborado en GRAMS IQ.

Tabla 5.2. Resultados estadísticos del modelo quimiométrico de cuarzo.

SEP	2.03
RPD	3.72
Valor	Criterio
RPD>4	Excelente
3<RPD<4	Logrado
2.25<RPD<3	Aceptable
1.75<RPD<2.25	Moderadamente aceptable
RPD<1.75	No utilizable
R2	0.93631174
Total Outliers	5
Total Muestras	309
Total cal	261
Total Test	43
% Outliers	1.618
% Calibration	84.466
% Test	13.916
Factores	18

Con los resultados estadísticos que se pueden ver en la Tabla 5.2, el modelo tendría un criterio de logrado en base al RPD y una buena correlación (R^2), sin tener un gran sesgo por la cantidad de “outliers” seleccionados.

5.5.2. Modelo quimiométrico de plagioclasa

En el caso del modelo de plagioclasa, la Figura 5.15 muestra los resultados Actual V/S Predicted y se obtuvo un coeficiente de correlación del 93% aproximadamente.

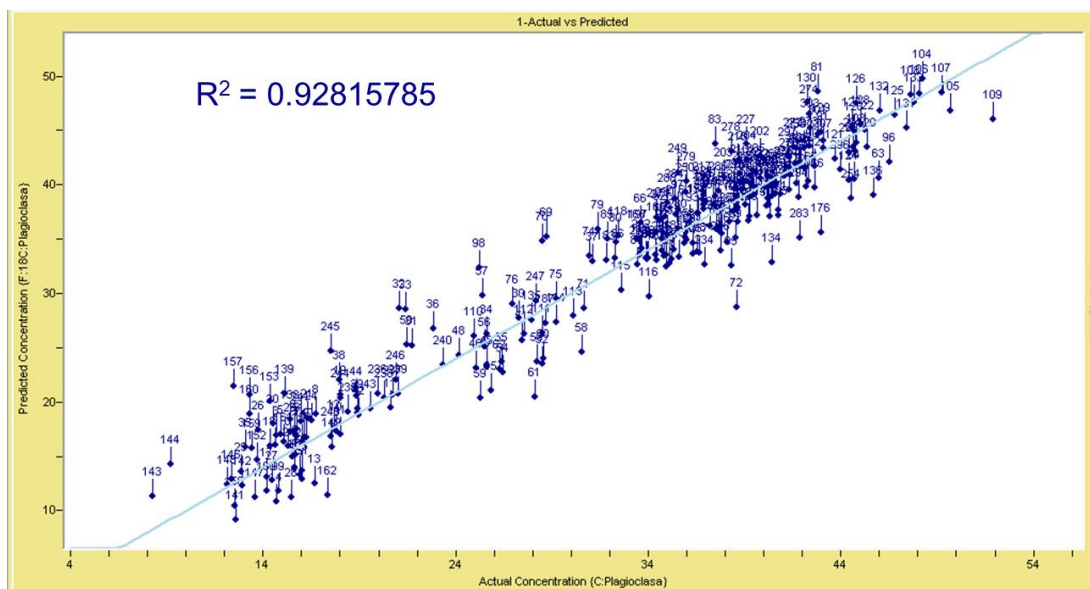


Figura 5.15. Gráfico Actual V/S Predicted del modelo quimiométrico de plagioclasa. Elaborado en GRAMS IQ.

Tabla 5.3. Resultados estadísticos del modelo quimiométrico de plagioclasa.

SEP	2.72
RPD	3.83
Valor	Criterio
RPD>4	Excelente
3<RPD<4	Logrado
2.25<RPD<3	Aceptable
1.75<RPD<2.25	Moderadamente aceptable
RPD<1.75	No utilizable
R2	0.92815785
Total Outliers	6
Total Muestras	309
Total cal	260
Total Test	43
% Outliers	1.942
% Calibration	84.142
% Test	13.916
Factores	18

El modelo por su RPD queda en el criterio logrado, con un buen coeficiente de correlación (R^2) y con poco sesgo en los datos, ya que se tomaron pocos “outliers” (Tabla 5.3).

5.5.3. Modelo quimiométrico de feldespato K

En el modelo de feldespato K, se obtuvo un coeficiente de correlación de aproximadamente 80%, la Figura 5.16 muestra los resultados Actual V/S Predicted.

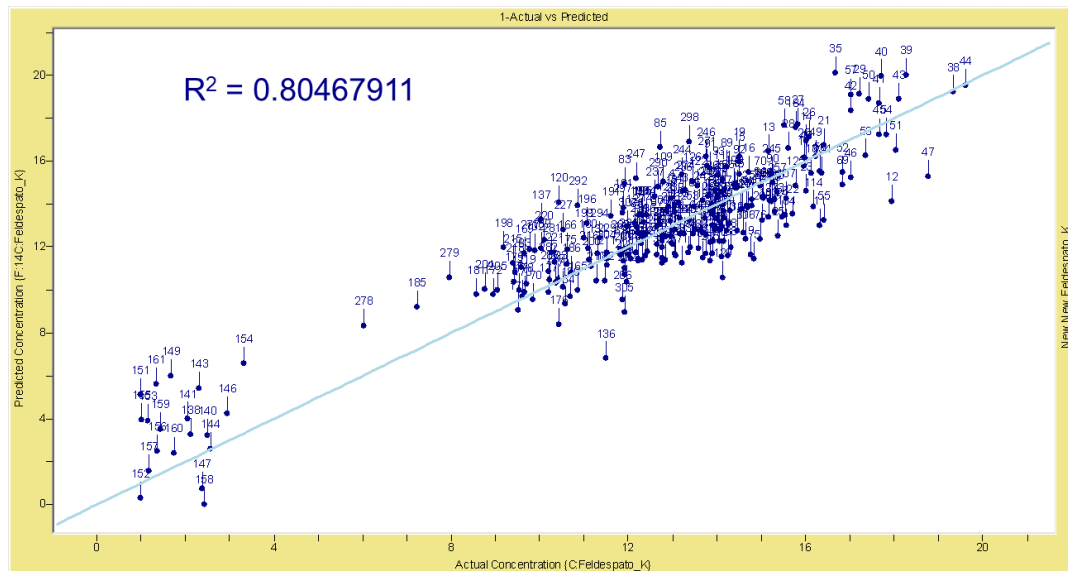


Figura 5.16. Gráfico Actual V/S Predicted del modelo quimiométrico de feldespato K. Elaborado en GRAMS IQ.

Tabla 5.4. Resultados estadísticos del modelo quimiométrico de feldespato K.

SEP	1.94
RPD	1.81
Valor	Criterio
RPD>4	Excelente
3<RPD<4	Logrado
2.25<RPD<3	Aceptable
1.75<RPD<2.25	Moderadamente aceptable
RPD<1.75	No utilizable
R2	0.80467911
Total Outliers	25
Total Muestras	309
Total cal	244
Total Test	40
% Outliers	8.091
% Calibration	78.964
% Test	12.945
Factores	14

El modelo gracias al RPD queda dentro del criterio moderadamente aceptable, con un coeficiente de correlación aceptable (Tabla 5.4). Este modelo no se pudo mejorar mucho más, ya que al seleccionar más de veinticinco “outliers”, los resultados no mejoraban significativamente, dejando un gran sesgo, por lo que se mantuvo la cantidad en veinticinco.

5.5.4. Modelo quimiométrico de actinolita

El modelo quimiométrico de actinolita se elaboró exclusivamente con las muestras relacionadas con las UG de Ripio Verde y Mezcla. Esto se debe a que la actinolita no se encuentra en el Ripio Rojo, o si está presente, en general es en porcentajes muy bajos, que están asociados con contaminación proveniente del Ripio Verde y Mezcla, ya que el Ripio Rojo tiene como origen, material del Pórfido Este que no contiene este mineral.

En el modelo se obtuvo un coeficiente de correlación de aproximadamente 91% en el gráfico Actual V/S Predicted, el cual se puede visualizar en la Figura 5.17.

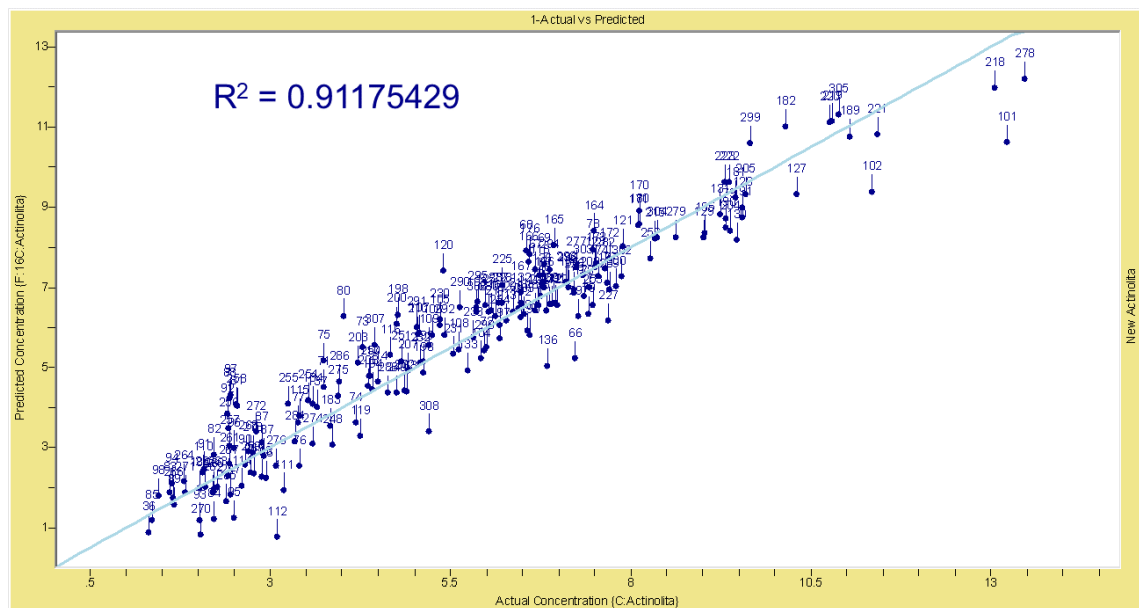


Figura 5.17. Gráfico Actual V/S Predicted del modelo quimiométrico de actinolita. Elaborado en GRAMS IQ.

Tabla 5.5. Resultados estadísticos del modelo quimiométrico de actinolita.

SEP	0.56
RPD	4.43
Valor	Criterio
RPD>4	Excelente
3<RPD<4	Logrado
2.25<RPD<3	Aceptable
1.75<RPD<2.25	Moderadamente aceptable
RPD<1.75	No utilizable
R2	0.91175429
Total Outliers	3
Total Muestras	205
Total cal	176
Total Test	26
% Outliers	1.463
% Calibration	85.854
% Test	12.683
Factores	16

Los resultados estadísticos clasifican el modelo como excelente, con un buen coeficiente de correlación (R^2) y poco sesgo debido a la poca cantidad de “outliers” seleccionados (Tabla 5.5).

5.6. Definición de UG

La base de datos de mediciones NIR de los sondeos de aire reverso de la campaña 2022/2023 fue actualizada con los porcentajes de cuarzo, plagioclasa, feldespato K y actinolita, ya cuantificados, lo que permitió definir las siguientes UG:

5.6.1. UG de cuarzo

El diagrama de árbol de decisión generado en el programa Orange Data Mining se puede observar en la Figura 5.18. A partir de este diagrama, se pudieron definir cuatro UG de cuarzo, independientes de las UG de los ripios, ya que el cuarzo se encuentra en todas estas en cantidades variables.

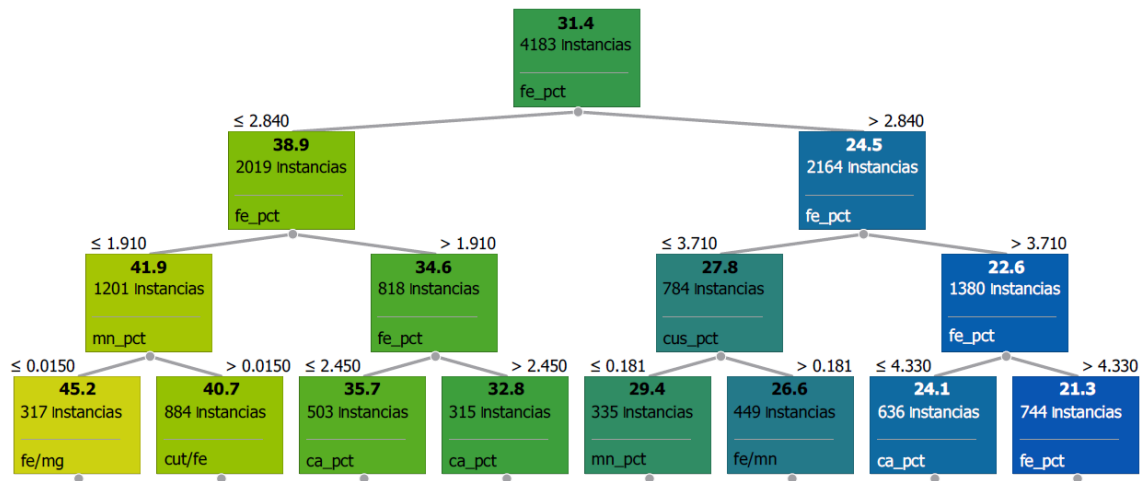


Figura 5.18. Diagrama de árbol de decisión con el cuarzo como “target”. Elaborado en Orange Data Mining.

La definición de las UG (Tabla 5.6) se basó en los quiebres estadísticos de las leyes de Fe que entrega el diagrama de árbol y en los porcentajes aproximados de cuarzo. Es importante destacar que los porcentajes del mineral van aumentando a medida que se incrementa la numeración de la UG, algo que se realizó también para las demás definiciones de los otros minerales.

La primera de las UG tiene el mayor porcentaje de Fe, siendo este mayor al 3.170% y también el menor porcentaje de cuarzo, con un total de 1,380 muestras.

La segunda UG posee una ley de Fe entre 2.840% y 3.170%, y un porcentaje de cuarzo asociado de aproximadamente 27.8%. Con un total de 784 muestras, esta UG es la que tiene la menor cantidad de muestras.

La tercera UG consta de una ley de Fe entre 1.910% y 2.840%, un porcentaje de cuarzo aproximado de 34.6% y un total de 818 muestras.

La cuarta UG posee la menor ley de Fe, siendo menor o igual a 1.910% y el mayor porcentaje de cuarzo, correspondiente a 41.9%, con un total de 1,201 muestras. En general las cantidades de muestras de cada UG, no son ampliamente diferentes entre sí.

Tabla 5.6. Definiciones de las UG de cuarzo.

UG de cuarzo	Quiebres estadísticos (%)	Porcentaje aprox. de cuarzo	Muestras
UG_QZ 1	>3.710 Fe	22.6	1,380
UG_QZ 2	>2.840 Fe y \leq 3.170 Fe	27.8	784
UG_QZ 3	>1.910 Fe y \leq 2.840 Fe	34.6	818
UG_QZ 4	\leq 1.910 Fe	41.9	1,201

El gráfico de probabilidad lognormal relacionado a estas UG (Figura 5.19), demuestra que las unidades se encuentran separadas entre sí y no hay coincidencias, por lo que se toman como buenas definiciones.

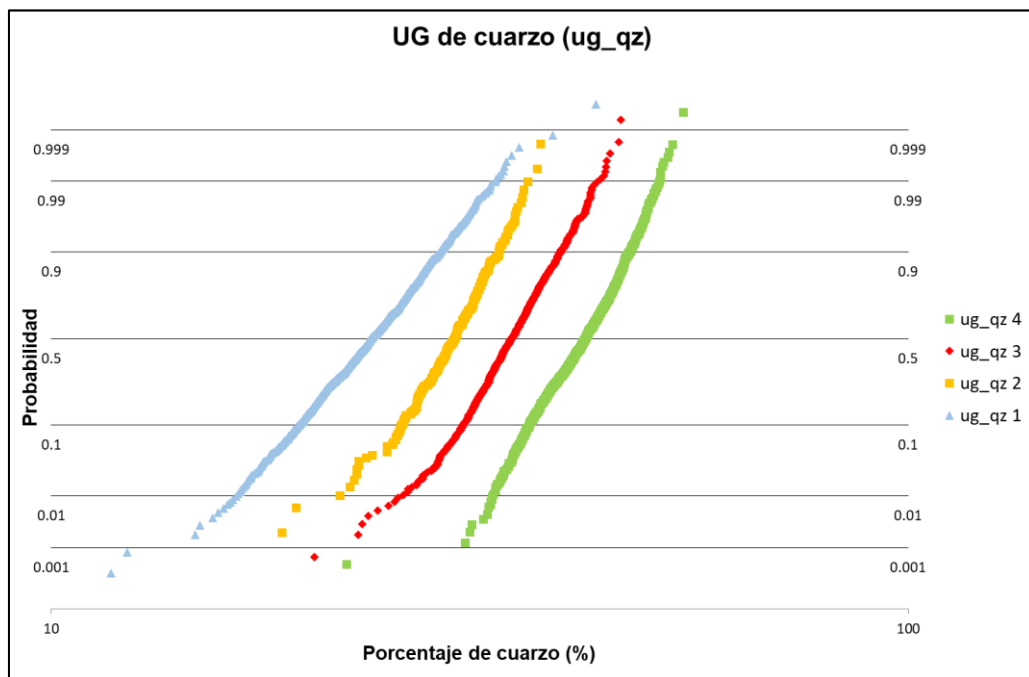


Figura 5.19. Gráfico de probabilidad lognormal en el que se identifican por separado las UG de cuarzo. Elaborado gracias a Mapttek Vulcan.

En cuanto a los histogramas de las UG de cuarzo (Figura 5.20), la UG_QZ 1 muestra que parece seguir una distribución normal, aunque presenta un dato que está bastante alejado hacia la derecha (aproximadamente 40%), el cual debería clasificarse como un valor extremo u outlier. La mayoría de sus datos se concentra entre los valores 20 y 24% de cuarzo. En la UG_QZ 2, los datos también se aproximan a una distribución normal, sin embargo, existe un valor alejado a la derecha (aproximadamente 42%), al igual que en la

UG_QZ 1, junto con algunos valores que se escapan un poco de la curva bajo el 20%. A pesar de ello, los datos muestran un buen ajuste general, con una mayor concentración entre el 25 y 28% de cuarzo.

Se observa en la UG_QZ 3 que el cuarzo sigue con bastante precisión una distribución normal, sin un desplazamiento importante de los datos en ninguna dirección, aunque algunas muestras se encuentran fuera del extremo inferior de los porcentajes. La mayor concentración de datos está entre el 33 y el 36% de cuarzo.

Por último, en la UG_QZ 4 se aprecia un ligero desplazamiento de los datos hacia la derecha, pero no lo suficientemente significativo como para considerarse una desviación importante de un comportamiento normal. Esta distribución muestra mayor variabilidad en los porcentajes de cuarzo en comparación con las otras UG, con la mayor concentración de datos entre el 40 y 44% y un pico importante alrededor del 42%.

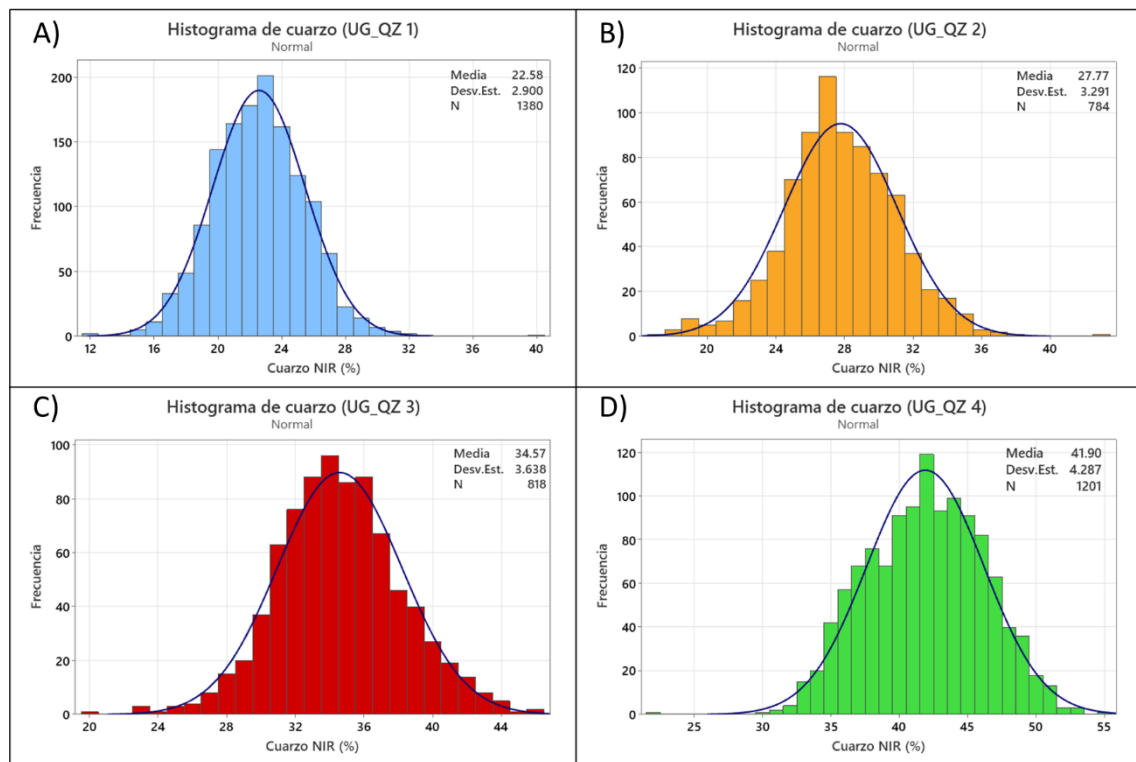


Figura 5.20. Histogramas para las UG de cuarzo. La curva en azul ilustra una curva gaussiana que sirve como referencia para analizar el patrón de las barras. (A) Ilustra la UG_QZ 1. (B) Ilustra la UG_QZ 2. (C) Ilustra la UG_QZ 3. (D) Ilustra la UG_QZ 4.

5.6.2. UG de plagioclasa

El diagrama de árbol de decisión de la plagioclasa que se puede apreciar en la Figura 5.21, permitió definir cuatro UG de plagioclasa, al igual que el cuarzo, independientes de las UG de ripio.

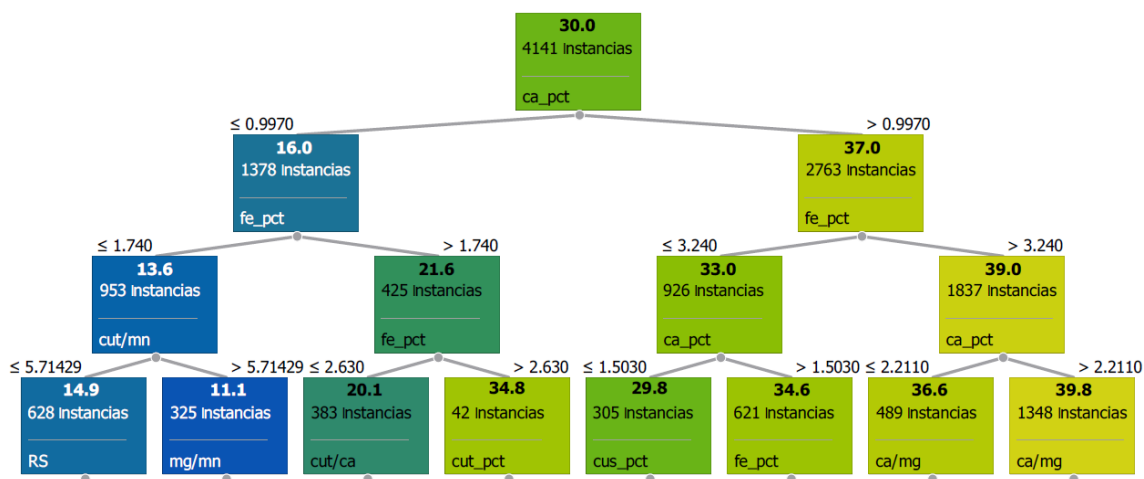


Figura 5.21. Diagrama de árbol de decisión con la plagioclasa como “target”. Elaborado en Orange Data Mining.

La definición de estas UG (Tabla 5.7) se sustentó en los quiebres estadísticos de las leyes de Ca y Fe entregadas por el diagrama de árbol, junto con los porcentajes aproximados de plagioclasa. La primera UG posee las menores leyes de Ca y Fe, con porcentajes menores o iguales a 0.9970% y 1.740% respectivamente. Además, presenta un porcentaje de 13.6% de plagioclasa y un total de 953 muestras.

La segunda UG consta de una ley menor o igual a 0.9970% de Ca y una ley mayor a 1.740% de Fe, con un porcentaje de plagioclasa asociado de 21.6% y un total de 425 muestras. Esta UG es la que menor cantidad de muestras posee con una significativa diferencia, pero se incluye para tener el espectro completo de valores asociados a las leyes de Ca y Fe.

La tercera UG posee una ley de Ca mayor a 0.9970% y una ley de Fe menor o igual a 3.240%, con un porcentaje de plagioclasa de 33% y un total de 926 muestras.

La cuarta UG tiene las mayores leyes de Ca y Fe, siendo estas mayores a 0.9970% y 3.240% respectivamente, por otro lado, también tiene el mayor porcentaje de plagioclasa que es 39% y la mayor cantidad de muestras, con un valor de 1,837.

Tabla 5.7. Definiciones de las UG de plagioclasa.

UG de plagioclasa	Quiebres estadísticos (%)	Porcentaje aprox. de plagioclasa	Muestras
UG_PLG 1	≤ 0.9970 Ca y ≤ 1.740 Fe	13.6	953
UG_PLG 2	≤ 0.9970 Ca y > 1.740 Fe	21.6	425
UG_PLG 3	> 0.9970 Ca y ≤ 3.240 Fe	33.0	926
UG_PLG 4	> 0.9970 Ca y > 3.240 Fe	39.0	1,837

El gráfico de probabilidad lognormal correspondiente a las UG de plagioclasa (Figura 5.22), muestra que las unidades se encuentran en general bien diferenciadas, pero con algunas coincidencias en los valores más altos de la UG_PLG 2, por lo que se toman como definiciones aceptables.

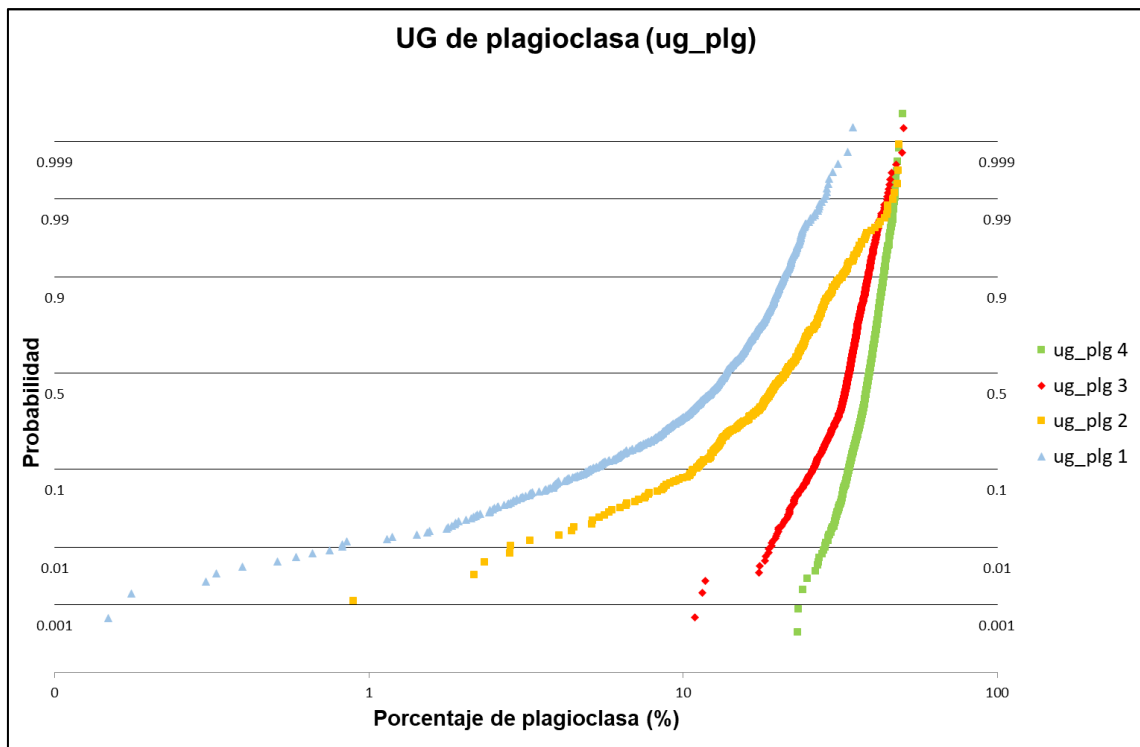


Figura 5.22. Gráfico de probabilidad lognormal en el que se identifican por separado las UG de plagioclasa. Elaborado gracias a Maptek Vulcan.

Los histogramas de las UG de plagioclasa (Figura 5.23) muestran que la UG_PLG 1 sigue una distribución de datos cercana a la normal, con un ligero desplazamiento de la concentración de los porcentajes hacia la izquierda. Los datos presentan una mayor variabilidad en comparación con las demás UG, pero bastantes grupos de muestras se desvían del ajuste de la curva en los valores más extremos, tanto en la parte inferior como superior de los porcentajes. La mayor concentración de datos se encuentra entre el 14 y 15% de plagioclasa.

En la UG_PLG 2, los datos siguen una distribución casi simétrica, con un pequeño desplazamiento hacia la izquierda, acercándose a la normalidad. Son pocos los valores escapados de la curva, pero destacan algunos casos por encima del 44%. La mayor concentración de datos se encuentra entre el 18 y el 24% de plagioclasa.

La UG_PLG 3, muestra un desplazamiento de los datos hacia la derecha. A pesar de aproximarse a una distribución normal, varios grupos se escapan de la curva, tanto en el extremo inferior como en el centro de los datos. La mayor concentración de datos está entre el 32 y el 36%, con un pico importante en torno al 34% de plagioclasa.

Finalmente, en la UG_PLG 4 los datos siguen una distribución aproximadamente normal, con una ligera inclinación hacia los valores más altos y algunos grupos de muestras escapados en el extremo inferior. La mayor concentración de datos se encuentra entre el 38 y el 40% de plagioclasa.

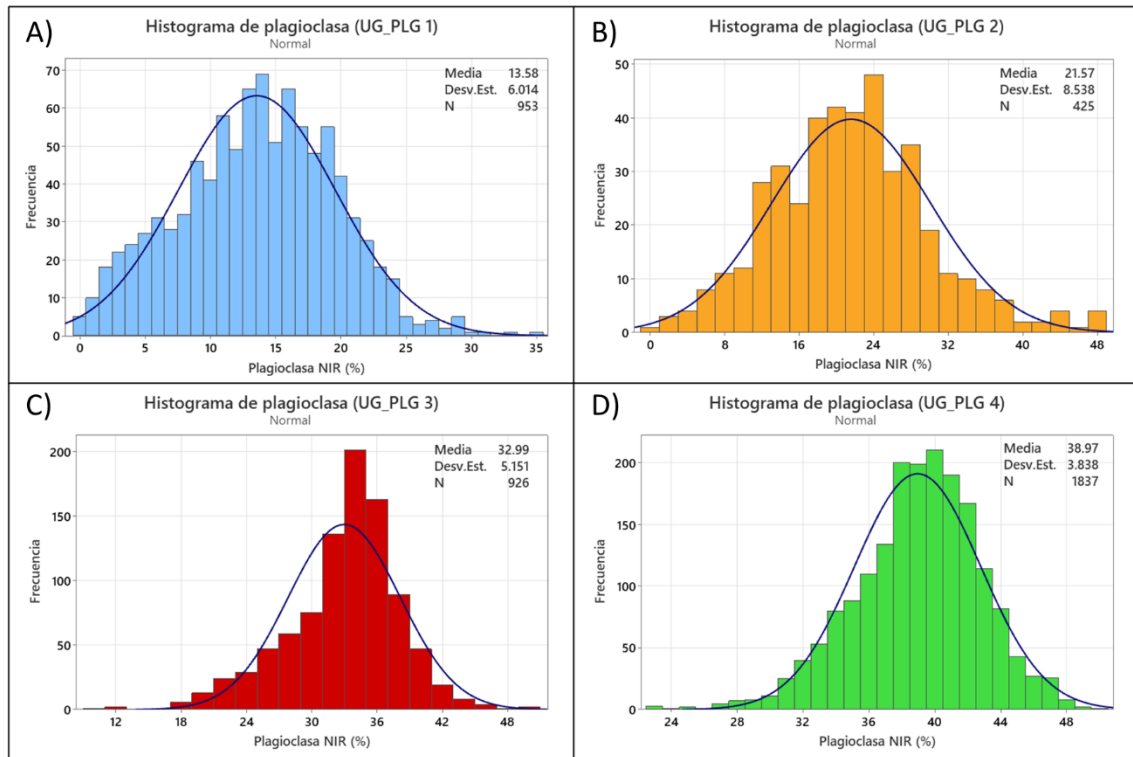


Figura 5.23. Histogramas para las UG de plagioclasa. La curva en azul ilustra una curva gaussiana que sirve como referencia para analizar el patrón de las barras. (A) Ilustra la UG_PLG 1. (B) Ilustra la UG_PLG 2. (C) Ilustra la UG_PLG 3. (D) Ilustra la UG_PLG 4.

5.6.3. UG de feldespato K

El diagrama de árbol de decisión del feldespato K, visible en la Figura 5.24, permitió definir tres UG de feldespato K, al igual que en el caso del cuarzo y la plagioclasa, estas UG son independientes de las UG de ripio.

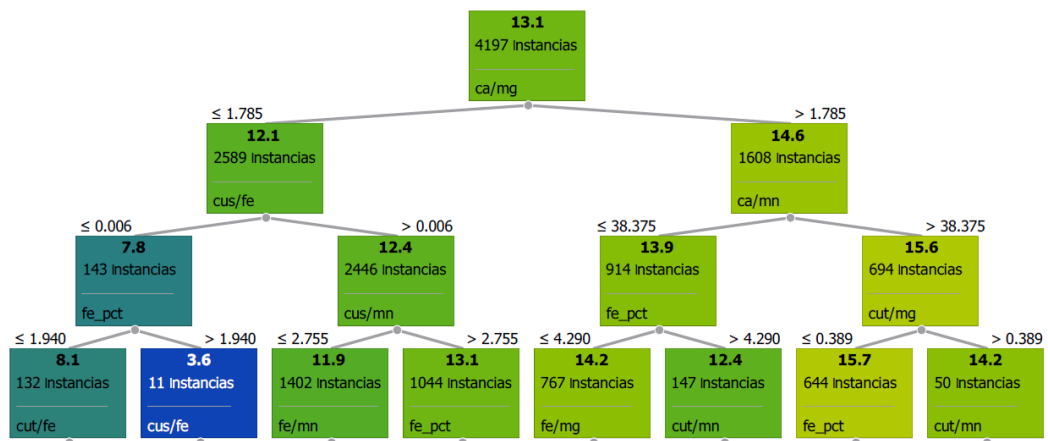


Figura 5.24. Diagrama de árbol de decisión con el feldespato K como “target”. Elaborado en Orange Data Mining.

Las UG definidas (Tabla 5.8) se basaron en los quiebres estadísticos de las razones de Ca/Mg y Ca/Mn, esto debido a que las leyes como tal no permitían una buena separación de conjuntos. También se usaron los porcentajes de feldespato K, según los datos entregados por el diagrama de árbol.

La primera UG posee la menor razón de Ca/Mg, la cual es inferior o igual a 1.785%, con un porcentaje de feldespato K del 12.1%. Esta UG es la más representativa debido a su mayor cantidad de muestras, con un total de 2,589, lo cual es una diferencia significativa en comparación con las otras.

La segunda UG tiene una razón de Ca/Mg superior a 1.785% y una razón de Ca/Mn igual o inferior a 38.375%, con un porcentaje de feldespato K de 13.9% y un total de 914 muestras.

La tercera UG posee las mayores razones de Ca/Mg y Ca/Mn, superiores a 1.785% y 38.375% respectivamente. Además, presenta la mayor ley de feldespato K, con un 15.6% y un total de 694 muestras.

La definición de estas UG fue más complicada debido a que los porcentajes de feldespato K no varían mucho, optando a realizar solo las tres UG descritas.

Tabla 5.8. Definiciones de las UG de feldespato K.

UG de feldespato K	Quiebres estadísticos (%)	Porcentaje aprox. de feldespato K	Muestras
UG_FLK 1	≤ 1.785 Ca/Mg	12.1	2,589
UG_FLK 2	> 1.785 Ca/Mg y ≤ 38.375 Ca/Mn	13.9	914
UG_FLK 3	> 1.785 Ca/Mg y > 38.375 Ca/Mn	15.6	694

El gráfico de probabilidad lognormal para las UG de feldespato K que se puede ver en la Figura 5.25, revela que las unidades están en su mayoría bien distinguidas, sin embargo, hay ciertas superposiciones en los valores más altos de las unidades, por lo que las definiciones se consideran como aceptables.

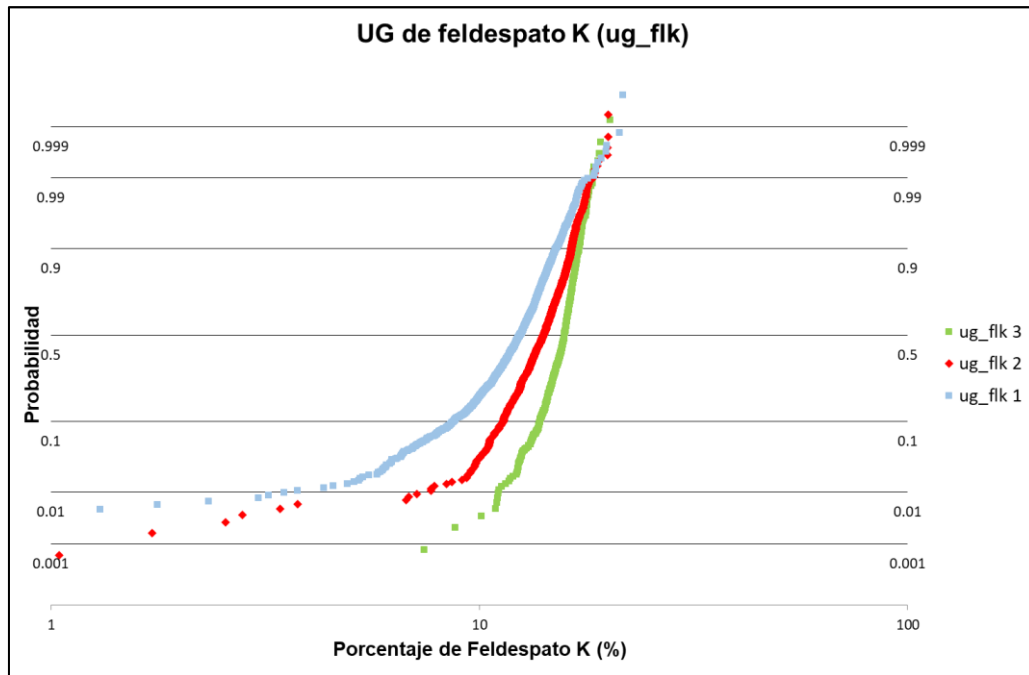


Figura 5.25. Gráfico de probabilidad lognormal en el que se identifican por separado las UG de feldespato K. Elaborado gracias a Maptek Vulcan.

En los histogramas de las UG de feldespato K (Figura 5.26), se observa que la UG_FLK 1 presenta una distribución bastante cercana a la normal, aunque con un ligero desplazamiento de los datos hacia la derecha, debido a valores que se desvían de la curva en la parte inferior y central de los porcentajes. La distribución de los datos presenta una mayor variabilidad en sus grupos en comparación con las demás UG_FLK, con la mayor concentración entre el 11 y 14% de Feldespato K.

La UG_FLK 2 muestra un histograma con datos desplazados hacia la derecha, debido a grupos escapados de la curva en el extremo inferior de los porcentajes. A pesar de esto, la distribución general se asemeja a una normal. La mayor concentración de datos se encuentra entre el 12.8 y 16% de feldespato K.

En la UG_FLK 3, los datos se aproximan a una distribución normal, pero con una cantidad importante de valores desviados de la curva, en el extremo inferior y medio de los porcentajes, lo que desplaza los datos hacia la derecha. La mayor concentración de datos se encuentra entre el 15.5 y 16.5% de Feldespato K.

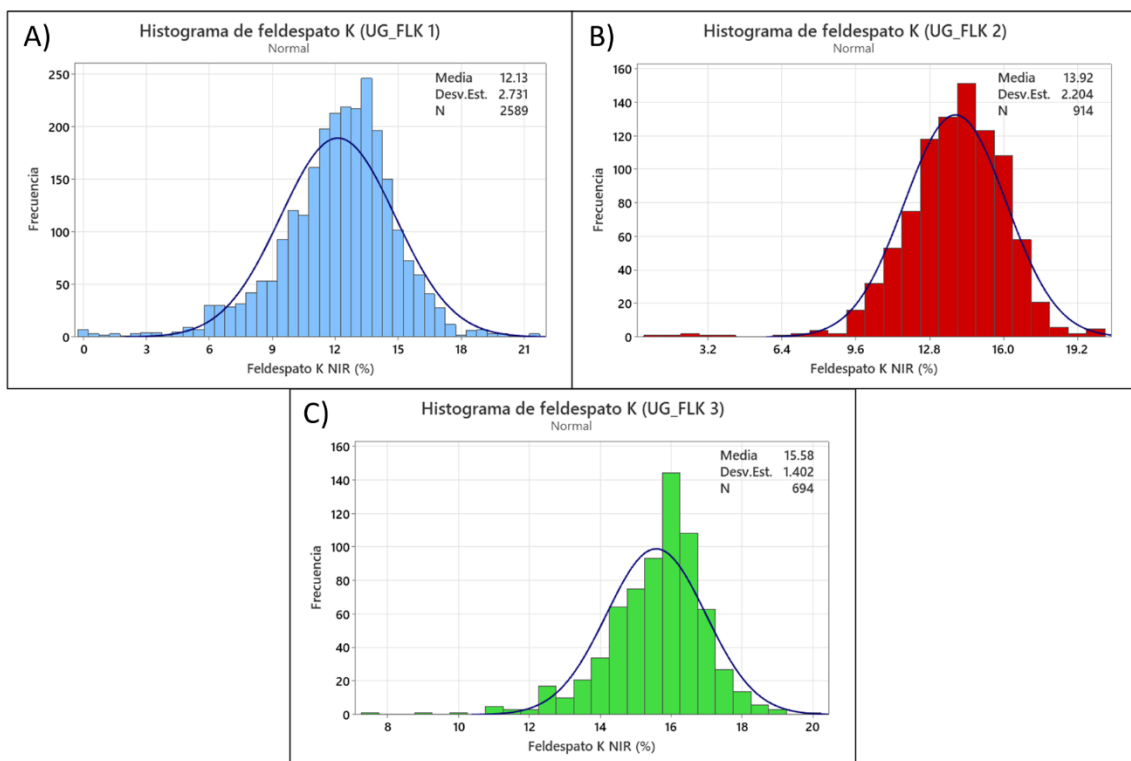


Figura 5.26. Histogramas para las UG de feldespato K. La curva en azul ilustra una curva gaussiana que sirve como referencia para analizar el patrón de las barras. (A) Ilustra la UG_FLK 1. (B) Ilustra la UG_FLK 2. (C) Ilustra la UG_FLK 3.

5.6.4. UG de actinolita

En el caso de la actinolita, se eliminaron todos los datos relacionados con la UG de Ripio Rojo debido a las razones anteriormente descritas, para así categorizar de manera separada la UG de Ripio Rojo como una UG de actinolita. Las otras tres UG se definieron gracias al árbol de decisión de la Figura 5.27.

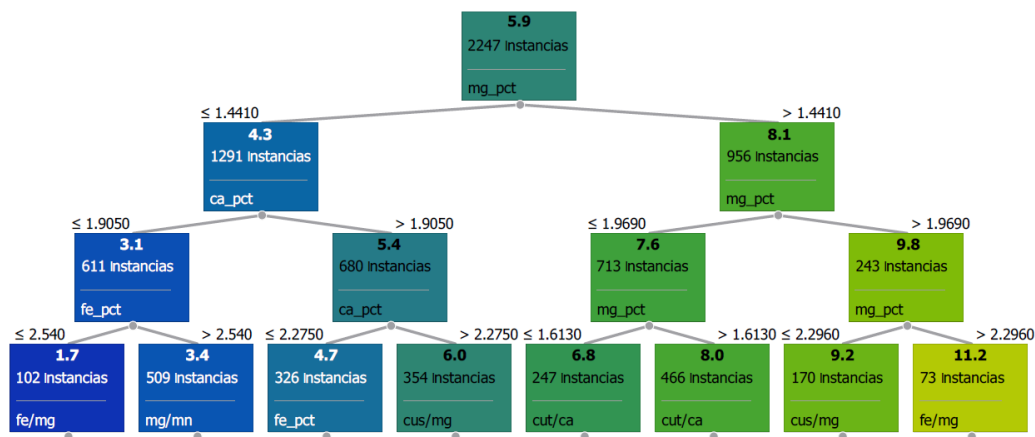


Figura 5.27. Diagrama de árbol de decisión con la actinolita como “target”. Hecho en Orange Data Mining

La definición de las UG (Tabla 5.9) se basó en los quiebres estadísticos asociados a las leyes de Mg y Ca, junto con los porcentajes aproximados de actinolita, que entrega el diagrama de árbol, excepto la UG_ACT 1. La primera unidad de actinolita corresponde, como se mencionó anteriormente, a la UG del Ripio Rojo (51).

La segunda unidad de actinolita posee las menores leyes de Mg y Ca, las cuales son inferiores o iguales a 1.4410% y 1.9050% respectivamente, con un porcentaje de actinolita de 3.1% y un total de muestras de 611, la menor cantidad de todas.

La tercera unidad cuenta con una ley de Mg menor o igual a 1.4410% y una ley de Ca mayor a 1.9050%, con un porcentaje de actinolita de 5.4% y un total de 680 muestras.

La cuarta unidad tiene la mayor ley de Mg con un porcentaje superior a 1.4410 % y el mayor porcentaje de actinolita, que corresponde a 8.1%. El total de muestras de esta UG es de 956.

En la determinación de estas UG se puede ver que no hay mucha diferencia en cuanto a la cantidad de muestras entre ellas.

Tabla 5.9. Definiciones de las UG de actinolita.

UG actinolita	UG ripios	Quiebres estadísticos (%)	Porcentaje aprox. de actinolita	Muestras
UG_ACT 1	UG 51	-	-	-
UG_ACT 2	UG 50, 52 y 53	$\leq 1.4410 \text{ Mg y } \leq 1.9050 \text{ Ca}$	3.1	611
UG_ACT 3	UG 50, 52 y 53	$\leq 1.4410 \text{ Mg y } > 1.9050 \text{ Ca}$	5.4	680
UG_ACT 4	UG 50, 52 y 53	$> 1.4410 \text{ Mg}$.	8.1	956

El gráfico de probabilidad lognormal para las UG de actinolita, mostrado en la Figura 5.28, indica que las unidades se encuentran claramente separadas entre sí, sin coincidencias significativas, salvo en muy pocos valores cercanos a cero entre las UG 1 y 2. Por lo tanto, se consideran buenas definiciones. Es relevante destacar que la UG 1 posee varias muestras que se encuentran bajo el límite de cuantificación, pero con una distancia de Mahalanobis menor a 3, por lo que se les asignó un valor estándar de 0.01% de

actinolita a esas muestras. Esto se hizo porque si se dejaban solo los valores por sobre este límite de cuantificación, la estimación posterior se encontraría sobrestimada.

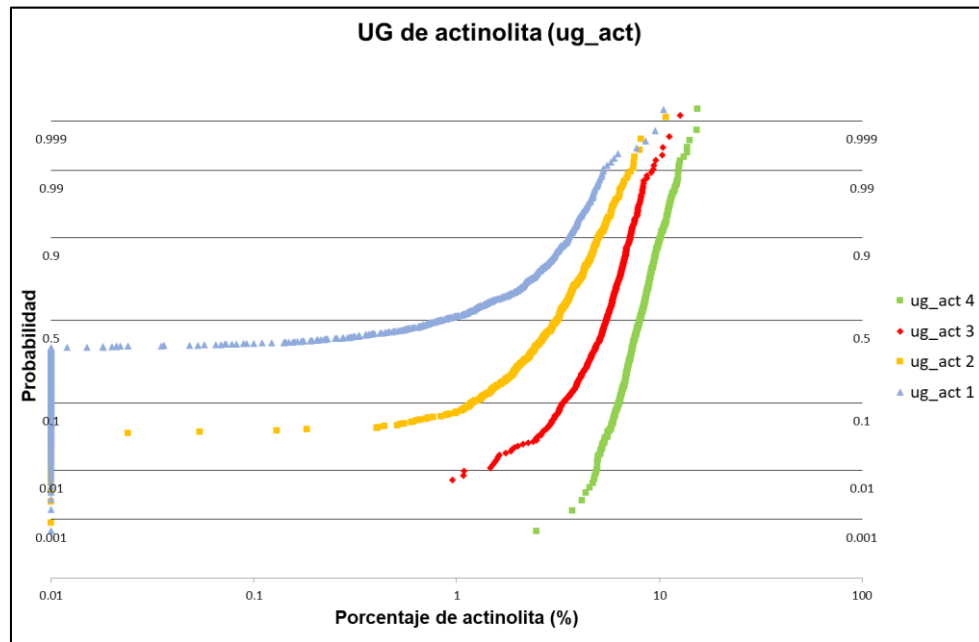


Figura 5.28. Gráfico de probabilidad lognormal en el que se identifican por separado las UG de actinolita. Elaborado gracias a Maptek Vulcan.

En los histogramas de las UG de actinolita (Figura 5.29), se observa que la UG_ACT 1 no sigue una distribución normal, ya que la mayor concentración de datos se encuentra muy alejada de la media (1.359%), cercana al 0% de actinolita, lo que lo convierte en el valor más común, con muy pocos datos mostrando un porcentaje alto. Esto se debe a las muestras a las que se les asignó el valor 0.01%, por estar por debajo del límite de cuantificación. En la UG_ACT 2, los datos presentan una distribución cercana a la normal, aunque están desplazados hacia la izquierda debido a grupos escapados de la curva en los extremos inferior y superior de los porcentajes, destacando el grupo de valores cercanos a 0%. La mayoría de sus datos se encuentran entre el 2.5 y el 3.5% de actinolita. La UG_ACT 3 muestra una distribución de datos casi simétrica, aproximándose a una normal, pero con un desplazamiento hacia la izquierda provocado por algunos grupos extremos que se desvían de la curva que comprenden pocas muestras. La mayor parte de sus datos se ubica entre el 5 y el 6.5% de actinolita. Por último, la UG_ACT 4 presenta una distribución cercana a la normal, aunque con valores extremos que se escapan de la curva en la parte superior y central de los porcentajes. Se destaca que, en la parte media,

los valores se concentran de manera significativa, dejando pocos datos en otros grupos que están por debajo de la curva. La mayor concentración de datos de esta UG se encuentra entre el 7 y 9% de actinolita.

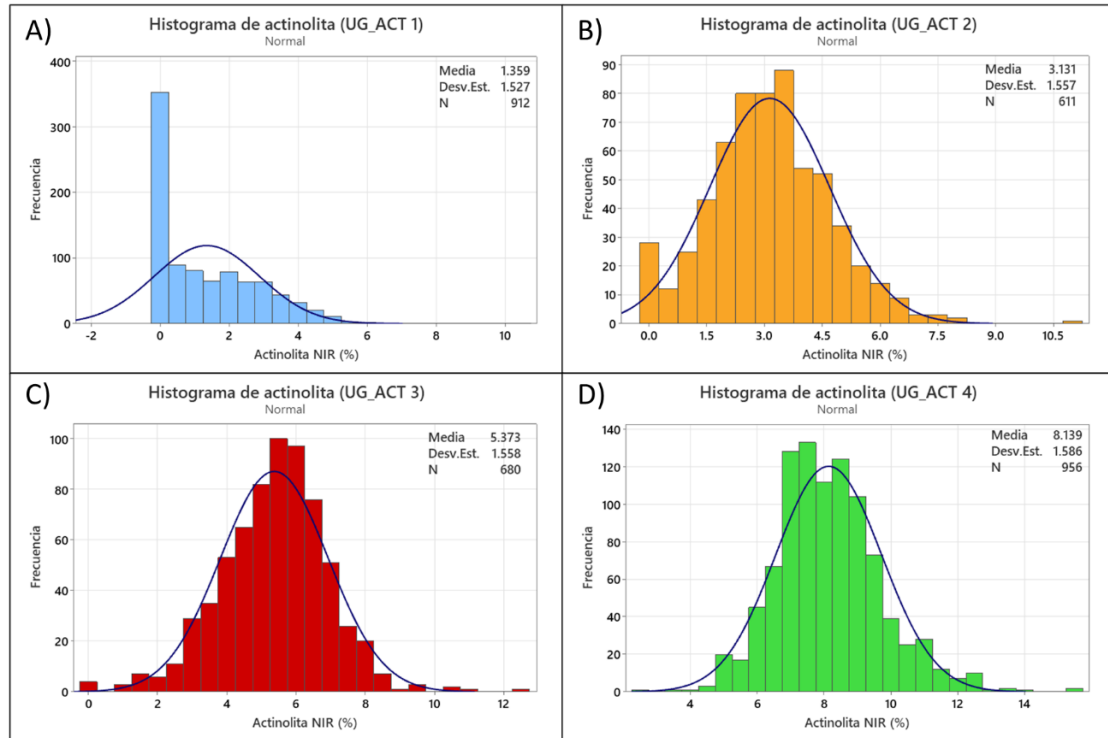


Figura 5.29. Histogramas para las UG de actinolita. La curva en azul ilustra una curva gaussiana que sirve como referencia para analizar el patrón de las barras. (A) Ilustra la UG_ACT 1. (B) Ilustra la UG_ACT 2. (C) Ilustra la UG_ACT 3. (D) Ilustra la UG_ACT 4.

5.7. Modelos de estimación

Los resultados de las UG se incorporaron al modelo RAMS 2 para realizar la estimación de los minerales con el método inverso de la distancia al cuadrado. Como se describió anteriormente, se realizaron cuatro pasadas de estimación, aumentando el radio de búsqueda en cada una de ellas. Es importante destacar que los datos del modelo más cercanos a las muestras NIR tienen un menor grado de incertidumbre, ya que a medida que se avanza en los pasos, también aumenta la incertidumbre de la información entregada por el modelo, debido a que se extrapolan valores de la base de datos de estimación a distancias más lejanas. Esto permitió desarrollar los modelos que se presentan a continuación, los cuales se muestran en base a las secciones 2,760 m del eje Z (cota), 2,300 m del eje X (este) y -1,000 m del eje Y (norte).

5.7.1. Modelos de cuarzo

El modelo de las UG de Cuarzo (Figura 5.30) muestra amplias áreas de UG_QZ 1 y 2 en las zonas centro-superior, lo que concuerda con las regiones de menor porcentaje en el modelo de estimación de cuarzo (Figura 5.31). Además, en los sectores periféricos de la porción norte y en gran parte de la zona sur del modelo de estimación, se observan los porcentajes más altos de cuarzo, lo que coincide con las UG de mayor numeración.

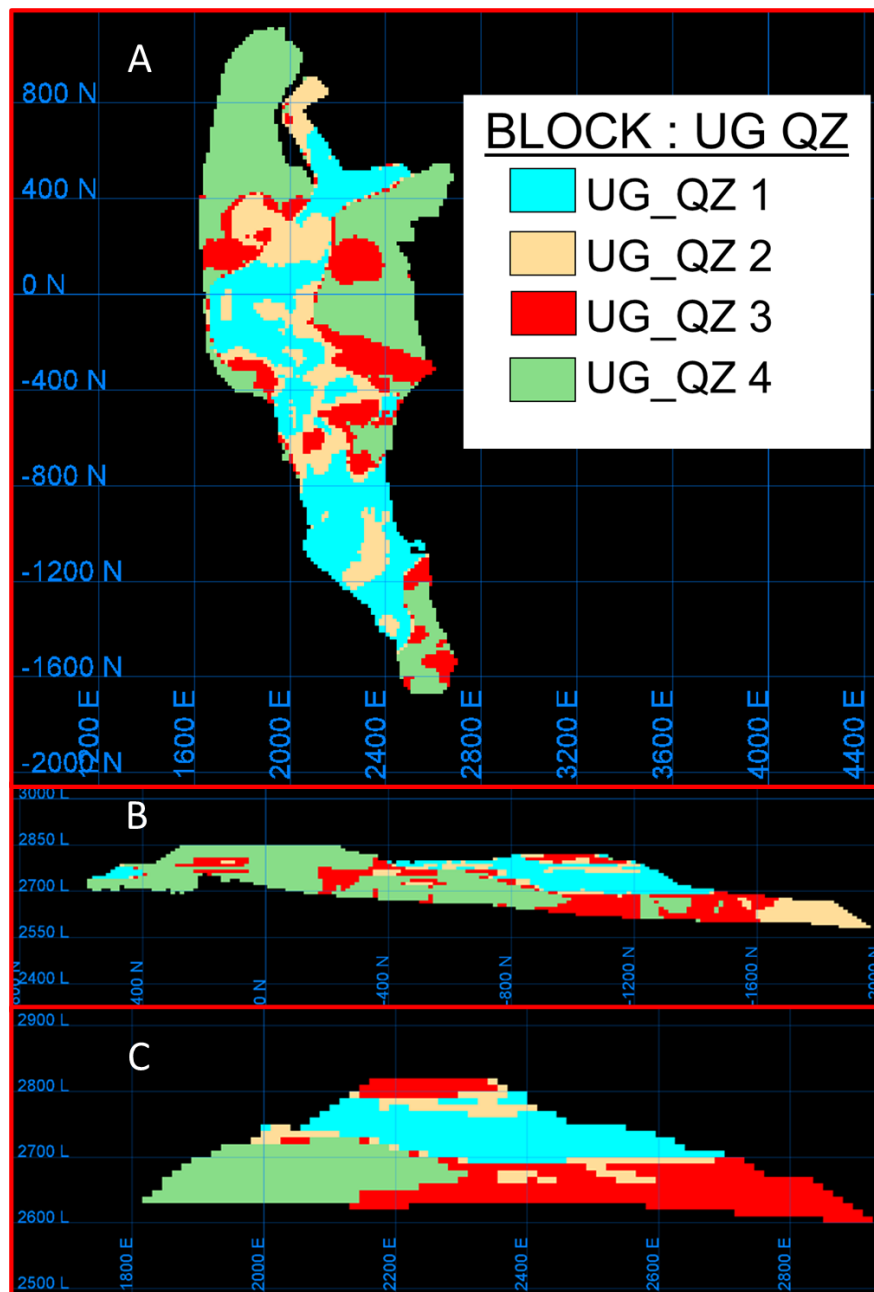


Figura 5.30. Modelo de UG de cuarzo. (A) sección cota 2,760. (B) sección 2,300E. (C) sección -1,000N.

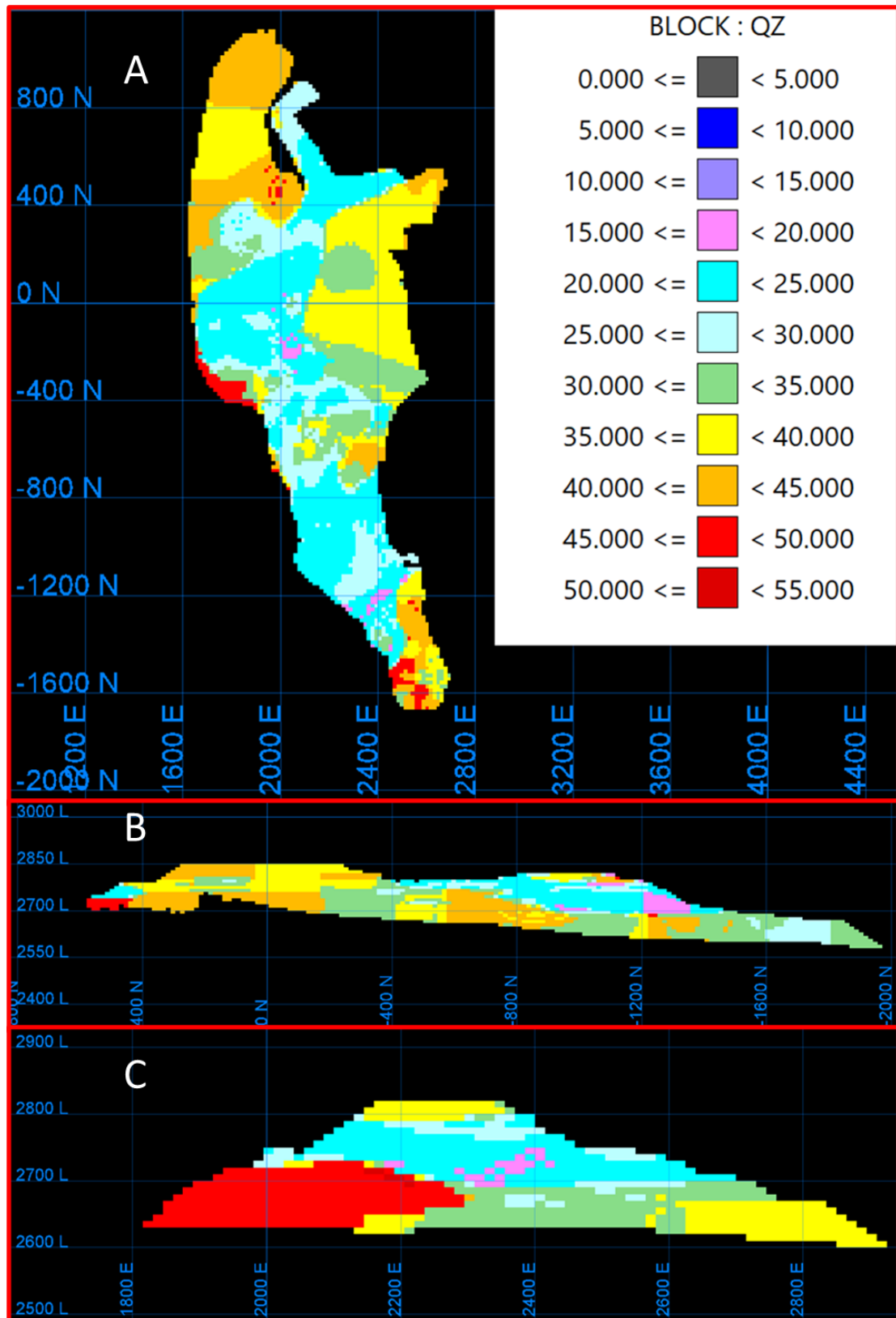


Figura 5.31. Modelo de estimación de cuarzo. (A) sección cota 2,760. (B) sección 2,300E. (C) sección - 1,000N.

5.7.2. Modelos de plagioclasa

El modelo de las UG de plagioclasa (Figura 5.32) muestra una relación generalmente inversa al modelo de cuarzo, lo cual también se observa en el modelo de estimación de plagioclasa (Figura 5.33), donde los porcentajes de plagioclasa son mayoritariamente opuestos a los del cuarzo.

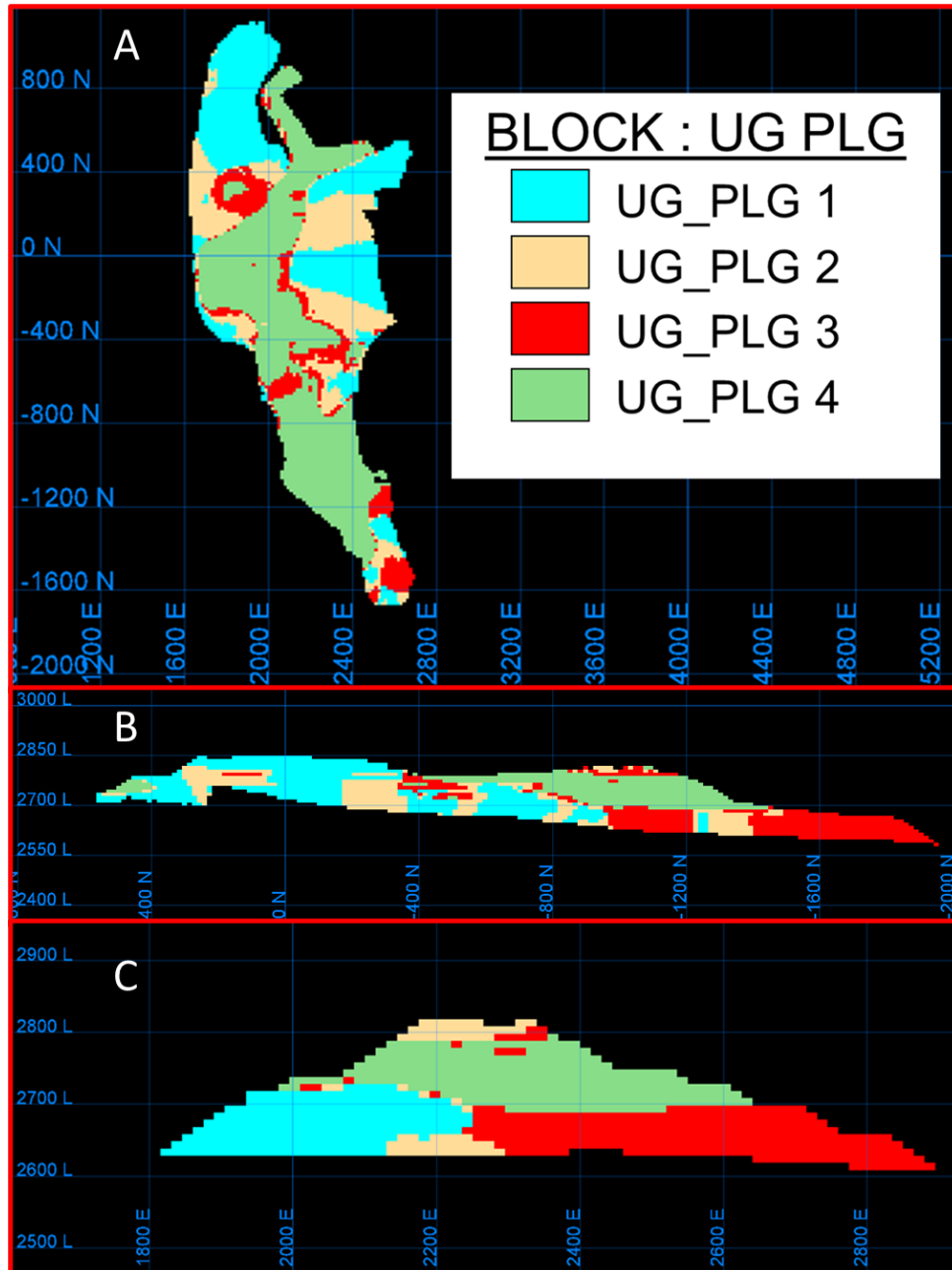


Figura 5.32. Modelo de UG de plagioclasa. (A) sección cota 2,760. (B) sección 2,300 E. (C) sección - 1,000N.

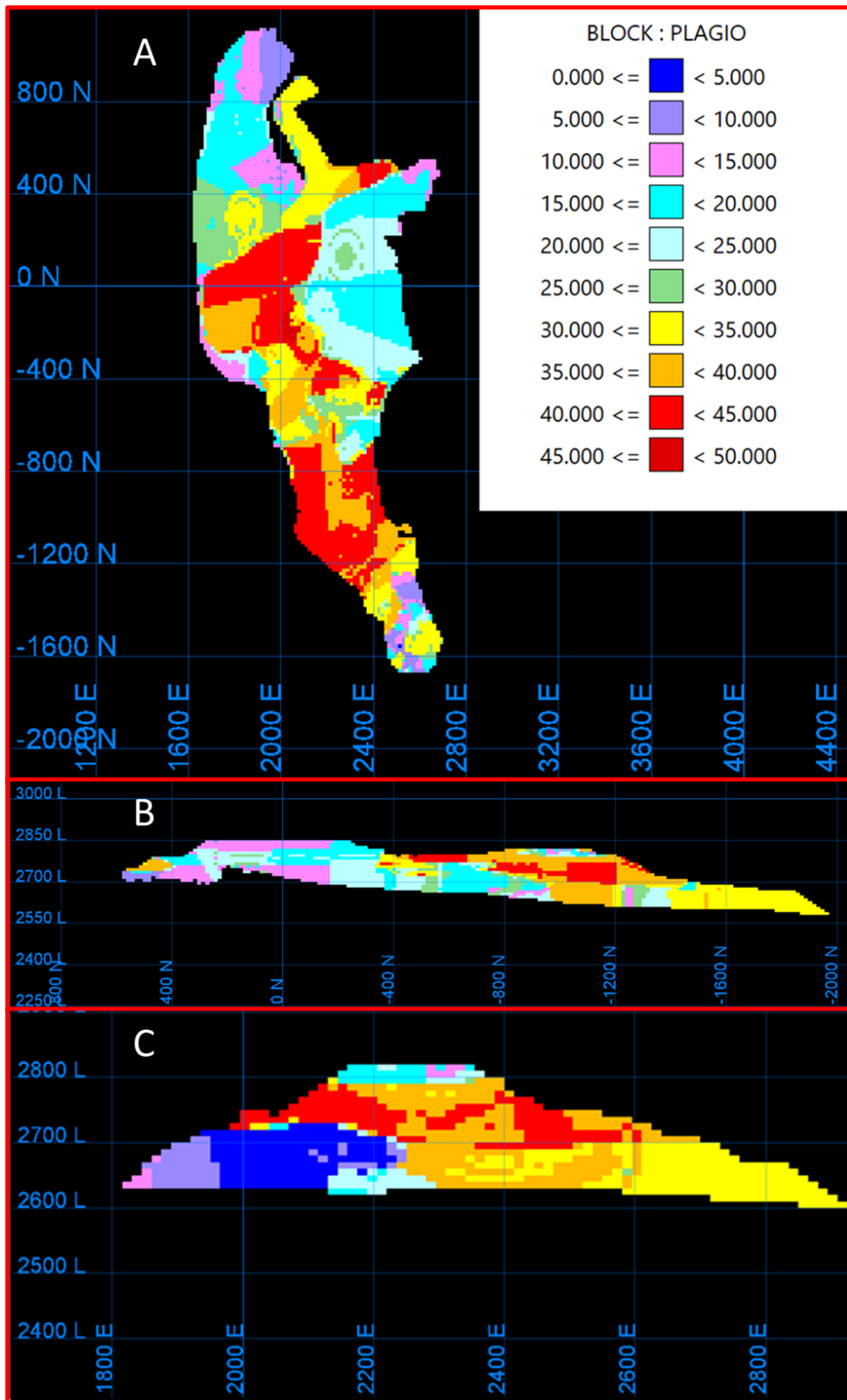


Figura 5.33. Modelo de estimación de plagioclasa. (A) sección cota 2,760. (B) sección 2,300E. (C) sección -1,000N.

5.7.3. Modelos de feldespato K

En el modelo de UG de feldespato K (Figura 5.34), se observa una amplia dominancia de la UG_FLK 1 en el sector centro y norte del modelo, mientras que en las zonas más al sur de la coordenada norte se presenta una mayor predominancia de la UG_FLK 2 y 3. En el modelo de estimación (Figura 5.35), la zonación no es tan marcada, debido a la poca variación de los porcentajes del mineral en la base de datos.

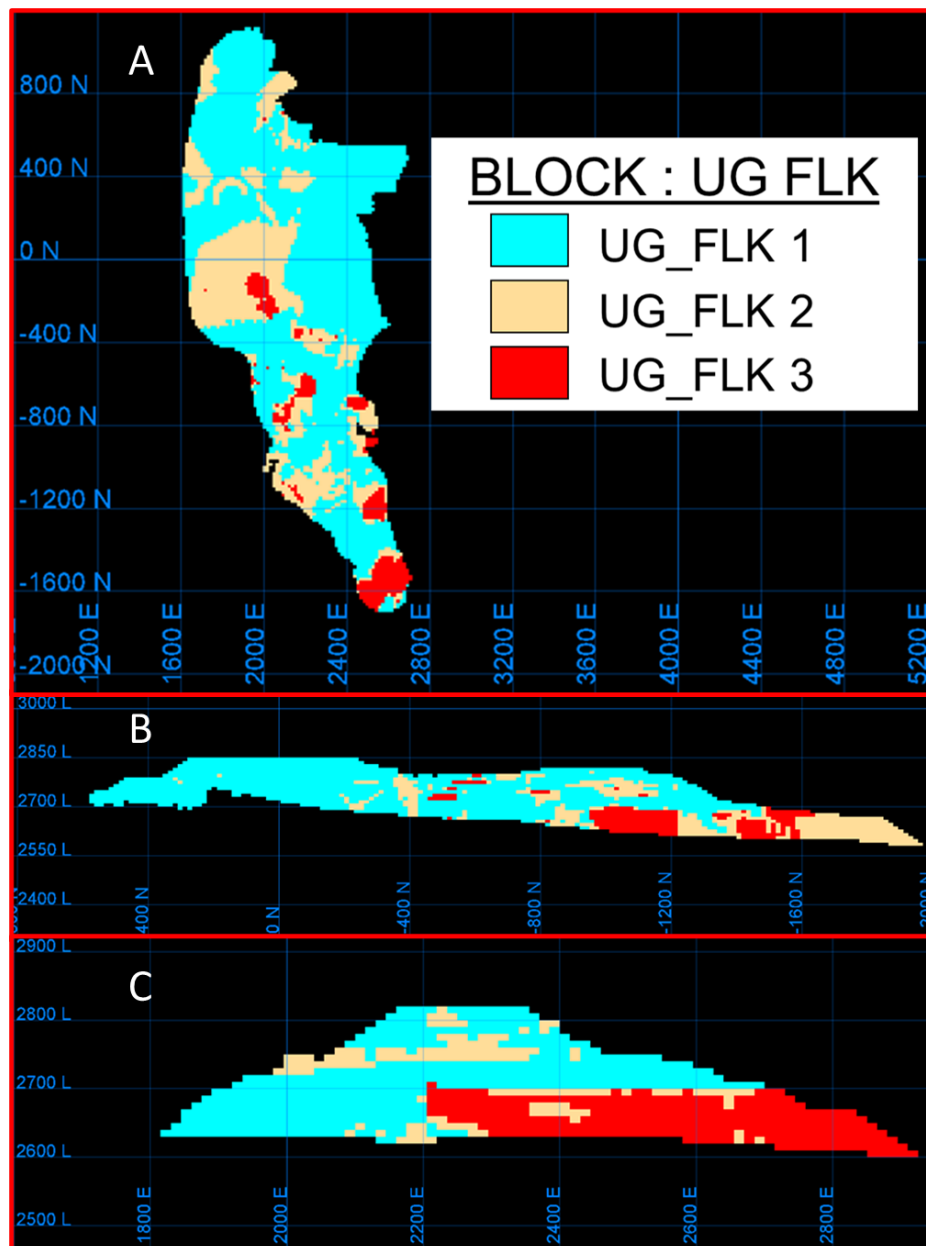


Figura 5.34. Modelo de UG de feldespato K. (A) sección cota 2,760. (B) sección 2,300E. (C) sección - 1,000N.

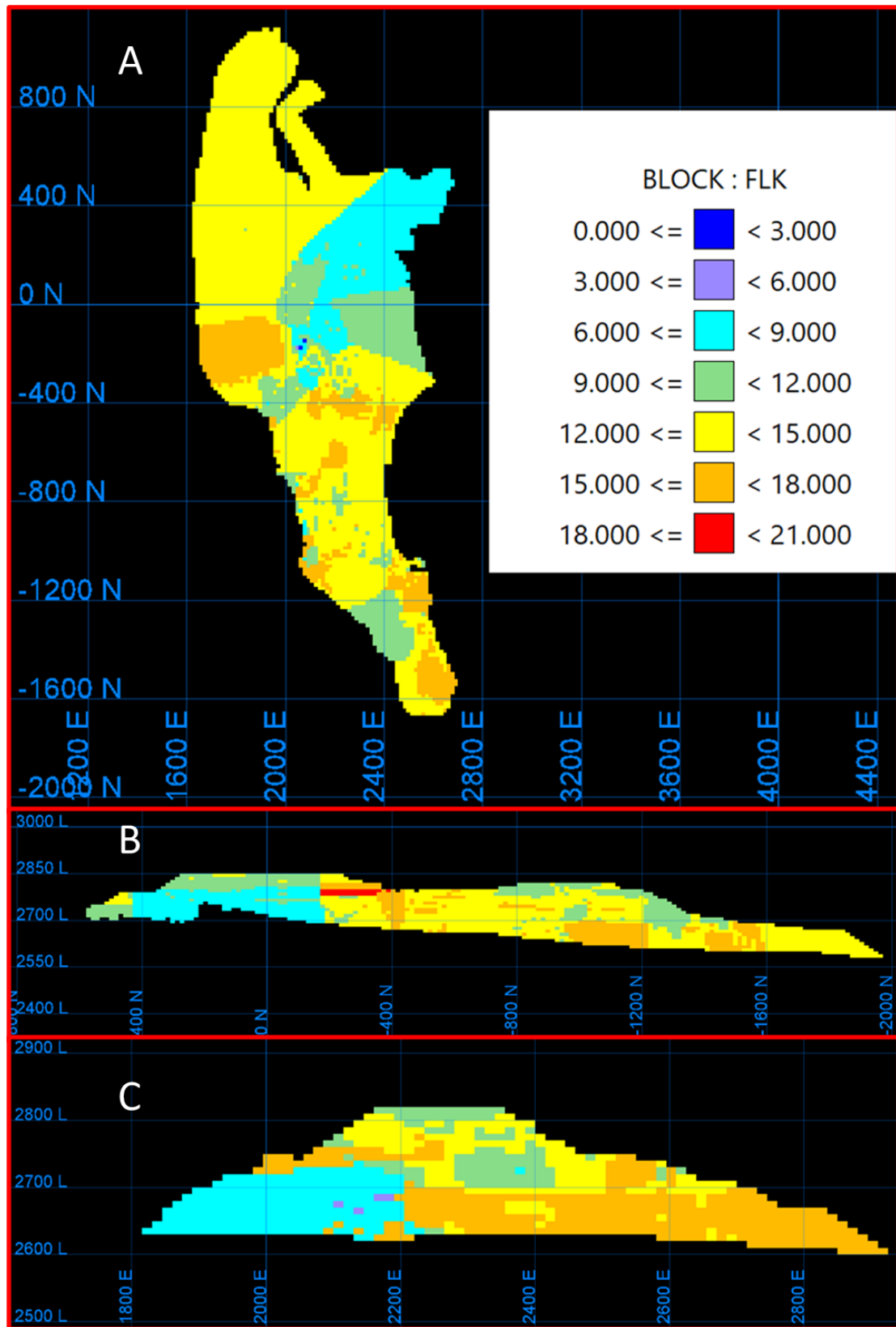


Figura 5.35. Modelo de estimación de feldespatos K. (A) sección cota 2,760. (B) sección 2,300E. (C) sección -1,000N.

5.7.4. Modelos de actinolita

En general, hay una gran dominancia de la UG_ACT 1 en el modelo de las UG de actinolita (Figura 5.36), la cual presenta los valores más bajos de actinolita en el modelo de estimación (Figura 5.37). Sin embargo, también se encuentran datos atípicos que poseen un porcentaje medio del mineral en esa UG debido a un pequeño número de muestras NIR de la base de datos de estimación con esos rangos. El sector en el modelo de estimación que mayor porcentaje de actinolita posee se concentra principalmente en la zona centro-sur.

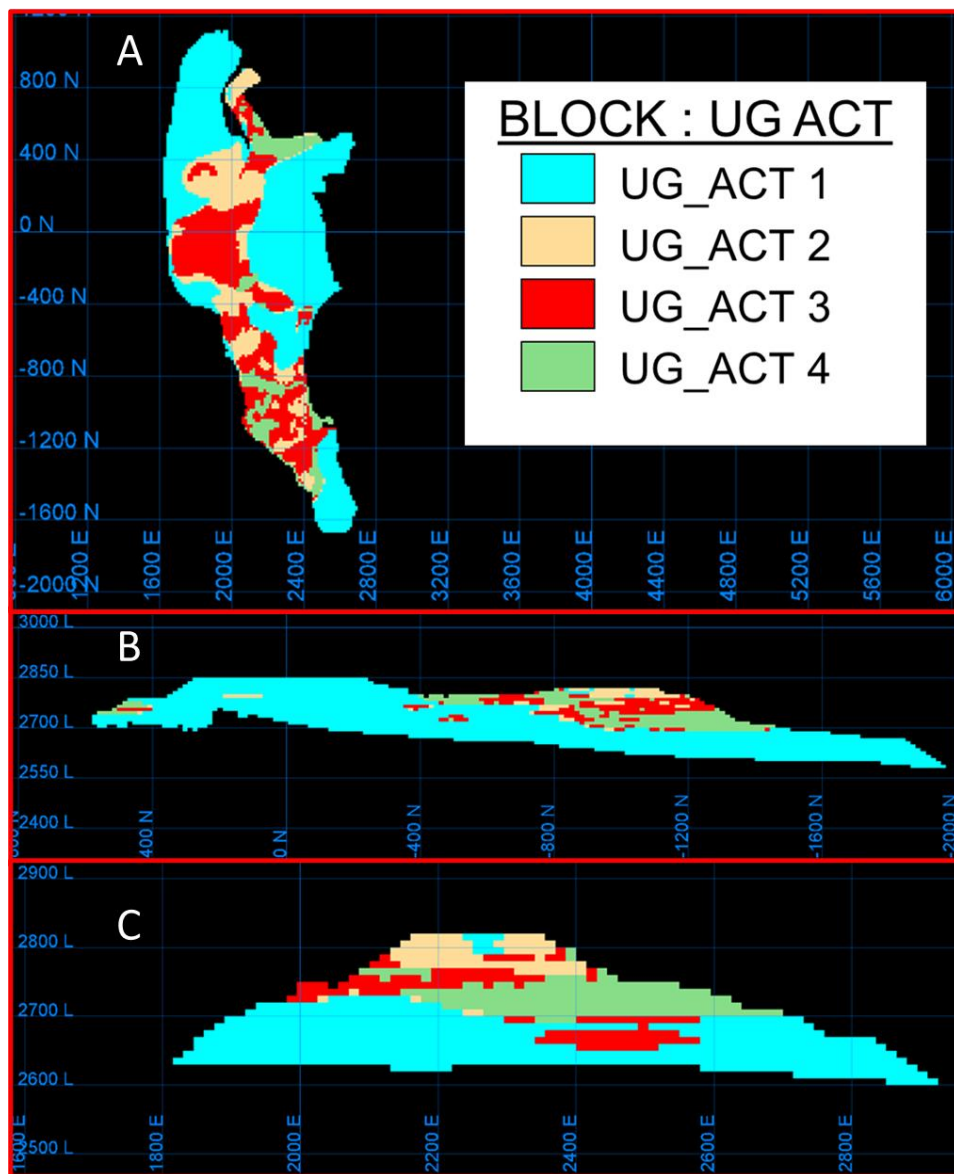


Figura 5.36. Modelo de UG de actinolita. (A) sección cota 2,760. (B) sección 2,300E. (C) sección -1,000N.

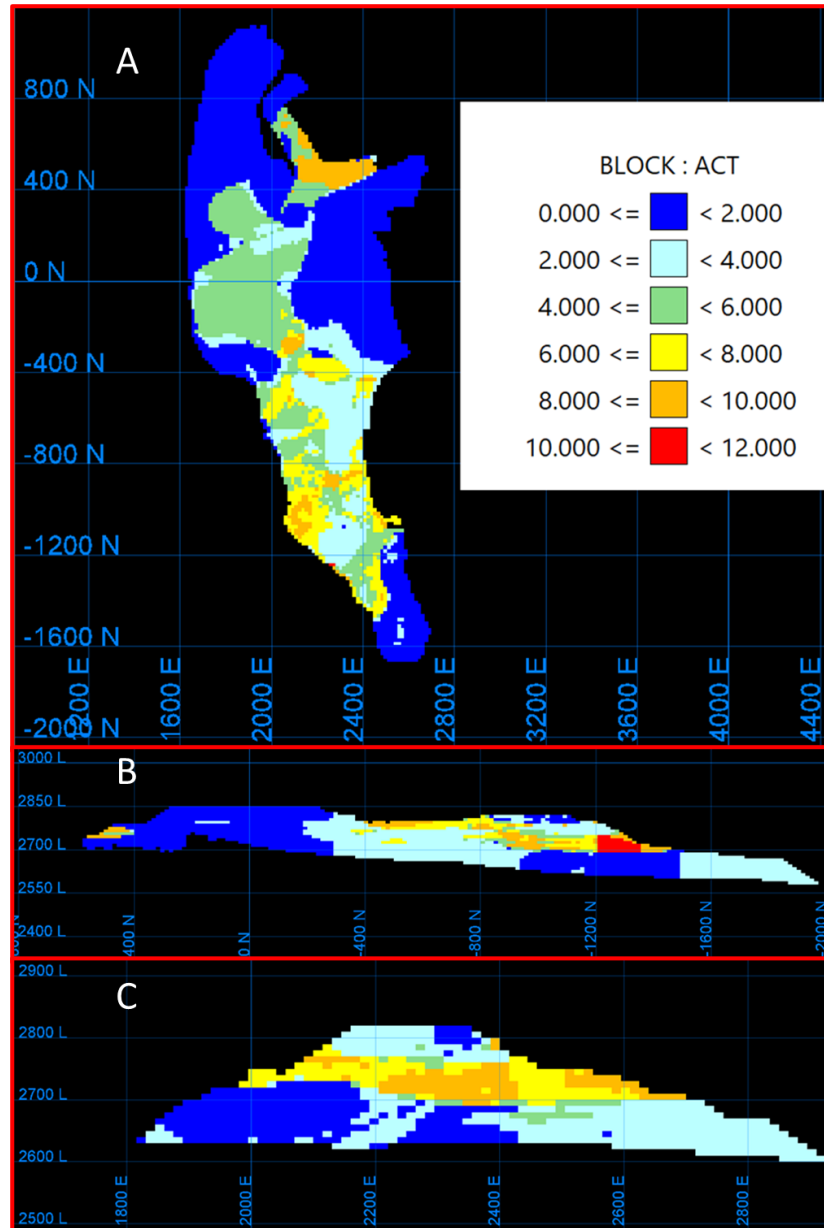


Figura 5.37. Modelo de estimación de actinolita. (A) sección cota 2,760. (B) sección 2,300E. (C) sección - 1,000N.

5.8. Validación de los modelos de estimación

5.8.1. Validación por promedio de muestras en bloques de estimación

Las muestras NIR en la base de datos de estimación son cada un metro y de diferentes UG, y el modelo de estimación posee bloques definidos con 15 metros en el eje X (este), 15 m en el eje Y (norte), y 10 m en el eje Z (cota), por lo que para comparar los datos de

las muestras con el modelo de bloques se realizó la estimación con potencia 0 y un radio de búsqueda que no fuera superior al espacio de un bloque, así se obtiene un promedio de las muestras dentro de los bloques sin realizar una estimación como tal y esto se comparó con lo estimado. La comparación fue realizada utilizando gráficos de dispersión por UG de estimación (Figura 5.38, 5.39, 5.40 y 5.41).

5.8.1.1. Cuarzo

Las correlaciones entre el promedio de cuarzo en las muestras por bloque y el cuarzo estimado presentan resultados satisfactorios. Al comparar los datos de las diferentes UG_QZ, todas muestran correlaciones similares. La UG_QZ 1 es la que presenta el menor valor, con una correlación aproximada de 0.90. Por otro lado, la UG_QZ 4 destaca con el mejor desempeño, alcanzando un coeficiente de correlación de aproximadamente 0.92. En el caso de la UG_QZ 2, se pueden observar valores bastante alejados del valor medio de la UG, lo que se debe a la distribución de sus datos, evidenciado previamente en los histogramas presentados.

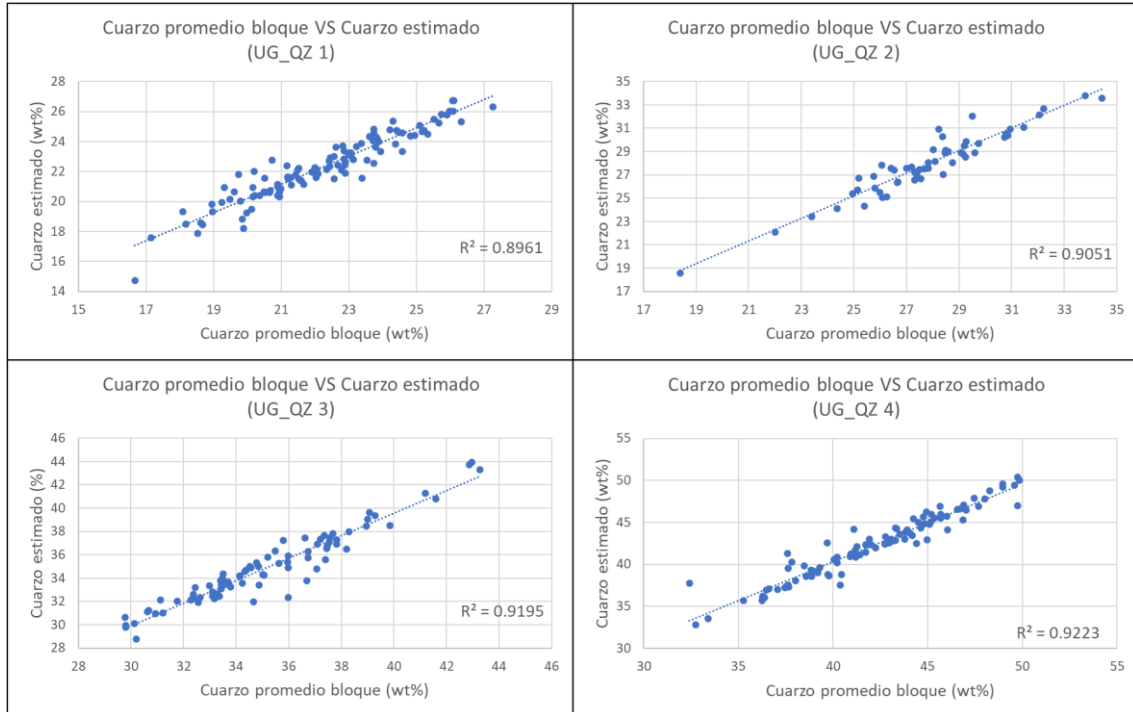


Figura 5.38. Gráficos de dispersión que muestran la relación entre el promedio de porcentajes de cuarzo de las muestras por espacio de bloque y el cuarzo estimado, separados por UG. El R^2 representa el coeficiente de correlación.

5.8.1.2. Plagioclasa

La comparación gráfica entre el promedio de plagioclasa por bloque y la plagioclasa estimada muestra excelentes resultados, con correlaciones bastante altas. La más baja de todas corresponde a las muestras de la UG_PLG 1, con una correlación de aproximadamente 0.90, mientras que la más alta se observa en la UG_PLG 2, que posee una gran variabilidad y una amplia distribución de datos. En la UG_PLG 3, se identifican valores atípicos alejados de la concentración principal, provocados por los valores más marginales de esta UG, lo cual es visible en su histograma.

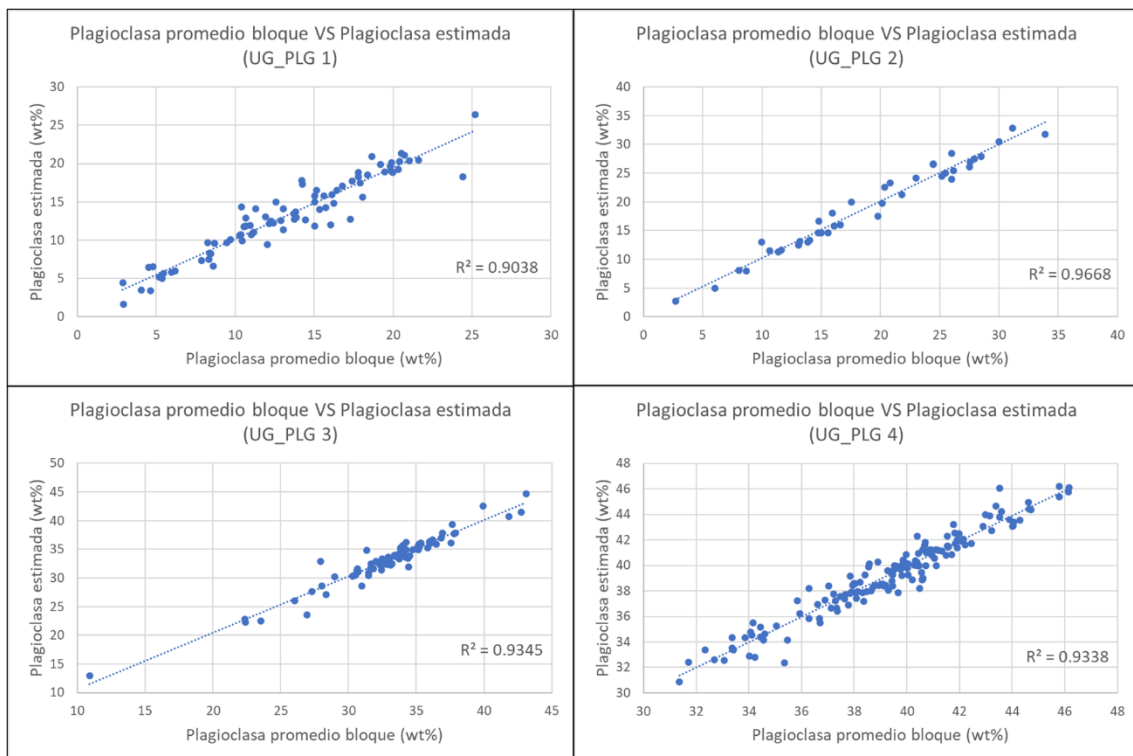


Figura 5.39. Gráficos de dispersión que muestran la relación entre el promedio de porcentajes de plagioclasa de las muestras por espacio de bloque y la plagioclasa estimada, separados por UG. El R^2 representa el coeficiente de correlación.

5.8.1.3. Feldespato K

El modelo de estimación de feldespato K, en los gráficos de comparación entre el promedio de feldespato K de las muestras por bloque y el feldespato K estimado, presenta excelentes resultados. La correlación más baja se obtuvo en las muestras correspondientes a la UG_FLK 3, con un valor de aproximadamente 0.92. En contraste, la UG_FLK 1

presenta el mejor resultado, la cual presenta una gran variabilidad y una amplia distribución de datos en su histograma. En la UG_FLK 2, se observan valores irregulares que se alejan bastante de la nube de puntos, correspondientes a los valores atípicos de esta UG.

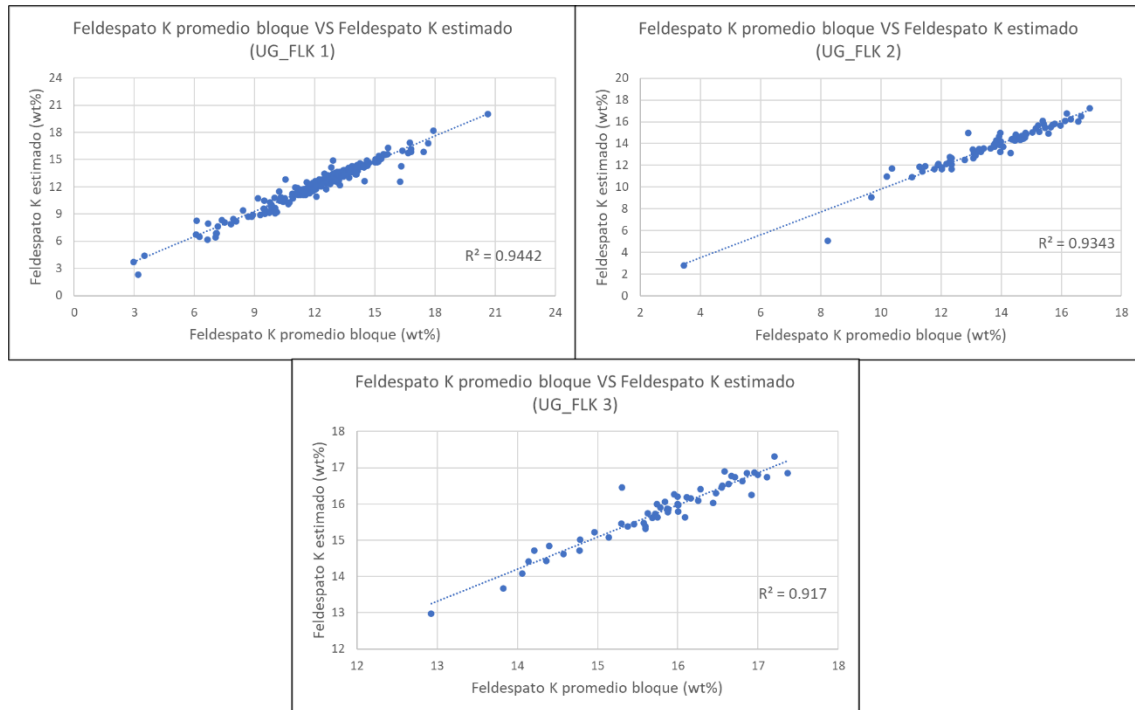


Figura 5.40. Gráficos de dispersión que muestran la relación entre el promedio de porcentajes de feldespato K de las muestras por espacio de bloque y el feldespato K estimado, separados por UG. El R^2 representa el coeficiente de correlación.

5.8.1.4. Actinolita

Los resultados de la comparación gráfica entre el promedio de actinolita por bloque y la actinolita estimada muestran correlaciones buenas en general. Sin embargo, las muestras de la UG_ACT 4 presentan la correlación más baja, de aproximadamente 0.80. Esta UG presenta muy altas concentraciones de datos en valores cercanos a la media, lo que provoca que otros conjuntos de datos contengan pocas muestras, como se observó en los histogramas anteriores. Las demás correlaciones son excelentes, destacando el coeficiente de correlación de aproximadamente 0.96 de la UG_ACT 2, que presenta una amplia distribución de datos.

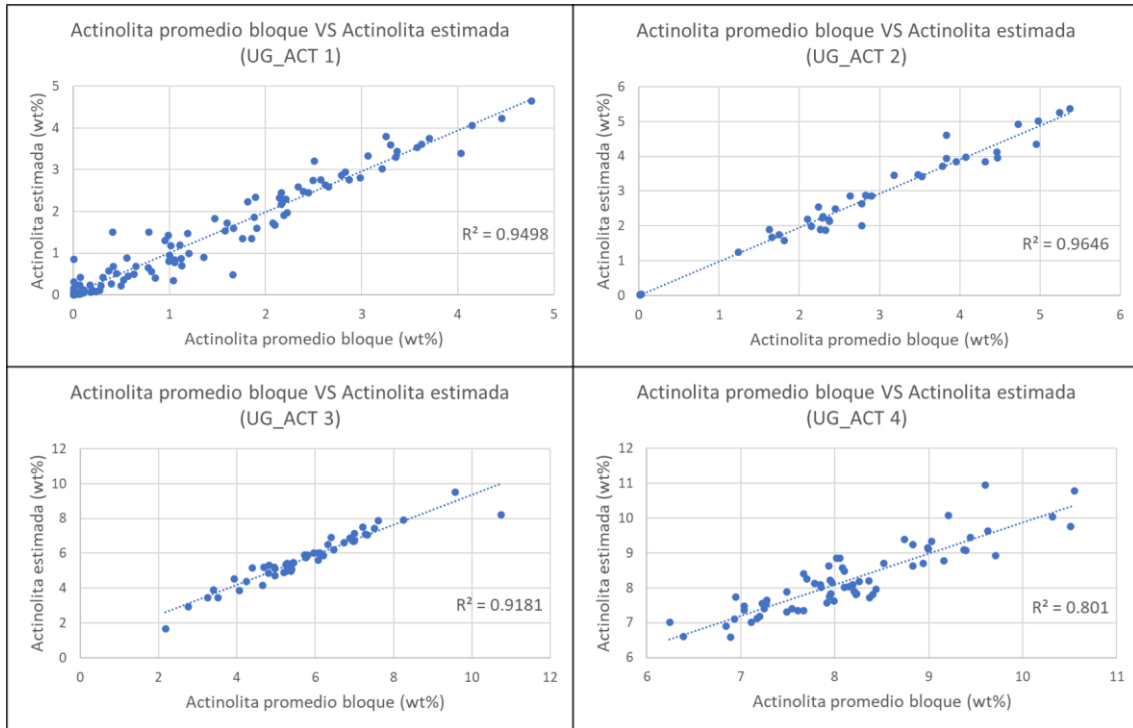


Figura 5.41. Gráficos de dispersión que muestran la relación entre el promedio de porcentajes de actinolita de las muestras por espacio de bloque y la actinolita estimada, separados por UG. El R^2 representa el coeficiente de correlación.

5.8.2. Análisis de deriva

5.8.2.1. Cuarzo

En los gráficos de análisis de deriva de la estimación de cuarzo (Anexos, Figura 9.1, 9.2, 9.3 y 9.4), se observa una buena correlación en general en todas la UG. En la UG_QZ 1, los valores en el eje X (este) muestran porcentajes de cuarzo estables con poca variación, al igual que en el eje Y (norte). En el eje Z (cota) se encuentra una cantidad alta de cuarzo en la zona más baja de la cota.

En la UG_QZ 2, el eje X no muestra cambios significativos en los porcentajes de cuarzo. En contraste, el eje Y presenta porcentajes mayores en la zona central y el sector sur, mientras que el eje Z registra los menores porcentajes de cuarzo en las cotas más centrales. La UG_QZ 3 muestra porcentajes de cuarzo estables en el eje X, mientras que en los ejes Y y Z, se observa un aumento de cuarzo en las zonas más altas de las coordenadas. En la

UG_QZ 4, los valores en el eje Y son bastante variables, mientras que en los ejes X y Z, los valores no tienden a cambiar significativamente.

Los aumentos de cuarzo en algunos sectores probablemente ocurren porque esas zonas corresponden en su mayoría a ripios rojos.

5.8.2.2. Plagioclasa

Los gráficos de análisis de deriva de la estimación de plagioclasa (Anexos, Figura 9.5, 9.6, 9.7 y 9.8) muestran una correlación aceptable en las UG_PLG 1 y 2, en cambio en las UG_PLG 3 y 4 se observa una buena relación entre la base de datos y lo estimado. En la UG_PLG 1, los valores de plagioclasa fluctúan considerablemente en todos los ejes, especialmente en el eje Y, donde los valores cambian drásticamente a medida que se avanza en la coordenada.

En la UG_PLG 2 la variabilidad de los porcentajes de plagioclasa aumenta bastante en comparación con la UG_PLG 1 en todos los ejes. En el eje X se observan algunas diferencias entre los valores de la base de datos y lo estimado, debido al suavizado de los porcentajes al estimar.

En el caso de la UG_PLG 3, la tendencia es menos variable que en las primeras dos UG, por lo que no hay grandes cambios de porcentaje, a excepción del eje Z, donde hay una cantidad mucho menor de plagioclasa en las cotas más altas.

Finalmente, en la UG_PLG 4, en todos los ejes se observa una tendencia muy estacionaria, con prácticamente ningún cambio en los porcentajes de plagioclasa.

5.8.2.3. Feldespato K

Los gráficos de análisis de deriva de la estimación de feldespato K (Anexos, Figura 9.9, 9.10 y 9.11) presentan una correlación aceptable en la UG_FLK 1 y una buena correlación en las UG_FLK 2 y 3. En la UG_FLK 1, se observa poca variación en los datos de los ejes X y Z, mientras que el eje Y muestra cambios constantes entre coordenadas. Además, en todos los ejes existe una tendencia a disminuir los porcentajes de feldespato K en los

valores centrales de las coordenadas, lo que debe estar relacionado con una mayor presencia de Ripio Verde y Mezcla en esas zonas.

En la UG_FLK 2, se observa menor variación en los datos que en la UG_FLK 1 y una buena correlación en todos los ejes. Por último, la UG_FLK 3 presenta valores en general estáticos que se muestran constantes a lo largo de la mayor parte de las coordenadas, pero con algunos sectores donde tiende a disminuir el porcentaje de feldespatos K.

5.8.2.4. Actinolita

En los gráficos de análisis de deriva de la estimación de actinolita (Anexos, Figura 9.12 9.13, 9.14 y 9.15), se observa una correlación aceptable en las UG_ACT 1 y 2, mientras que una buena correlación en las UG_ACT 3 y 4. En la UG_ACT 1, se observan variaciones importantes en todos los ejes. En el eje Y, la actinolita aumenta en los sectores centro-sur. En el eje X, la tendencia del porcentaje de actinolita muestra valores más altos a medida que se avanza en la coordenada hacia el este, mientras que en el eje Z los valores aumentan a medida que disminuye la cota. En los ejes X y Z, se detectan algunas discrepancias entre la estimación y la base de datos, atribuibles al suavizado de los porcentajes en la estimación.

En la UG_ACT 2, los porcentajes de actinolita oscilan considerablemente en todos los ejes, sin mostrar tendencias claras. En la UG_ACT 3 ocurre algo similar, excepto en el eje Z, donde se observa un aumento evidente de los valores de actinolita en las cotas más centrales.

En la UG_ACT 4, los valores son mucho más estables que en las demás UG, con poca tendencia al cambio en los porcentajes de actinolita, sin embargo, en los ejes Y y Z se observan algunas variaciones que no presentan una tendencia clara.

De todas las gangas modeladas, la actinolita es la que experimenta las mayores fluctuaciones en su rango de porcentajes dentro del RAMS 2.

5.9. Información de terreno



Figura 5.42. Fotografía que muestra la zona limítrofe entre áreas con diferentes niveles de humedad en los rípios del RAMS 2. La línea segmentada de color rojo indica, de manera aproximada, el límite entre ambas zonas.

En terreno se observaron diferencias significativas entre sectores húmedos y sectores más secos. En la Figura 5.42 se aprecia una clara distinción en el material, con un límite aproximado marcado por la línea de color rojo. La zona a la izquierda corresponde a acumulaciones de ripio que, al secarse con el tiempo, tienden a disgregarse en su parte inferior. En cambio, la zona a la derecha presenta un comportamiento similar al de una roca sedimentaria (comportamiento rocoso), con un material más compacto que, a pesar de estar expuesto al sol, es difícil de secar. Según las observaciones preliminares, este último sector corresponde a una zona de UG alta de actinolita y el material origen de estos rípios es principalmente roca mineralizada de Mina Sur.

5.10. Relación de la actinolita y la humedad en los rипios en stock

Se buscó estudiar de manera más exhaustiva la actinolita, puesto que en la revisión en terreno se detectó cierta relación con la humedad, para lo que se realizó la cubicación de los sólidos CADEMI desde marzo de 2023 hasta el 20 de octubre de 2024, extrayendo principalmente los valores asociados a la UG y su estimación de actinolita, junto con la humedad y se compararon estos dos últimos valores por mes. Para ello, los porcentajes de actinolita estimada y la humedad fueron ponderados en función del tonelaje extraído de cada UG de actinolita. El análisis del tonelaje extraído por UG de actinolita y la humedad en los rипios excavados para la conformación de pilas entre marzo de 2023 y octubre de 2024 (Figura 5.43) muestra una cierta conexión entre ambos parámetros. El gráfico permite apreciar que los porcentajes de humedad varían según las fluctuaciones del material que se extrae de las diferentes UG_ACT, las cuales reflejan los cambios globales de los porcentajes de actinolita. En general, al aumentar el tonelaje extraído desde las UG_ACT 3 y especialmente la 4, se observa un incremento en los porcentajes de humedad, mientras que al aumentar el tonelaje de las UG_ACT 1 y 2, los porcentajes de humedad tienden a disminuir su valor en la mayoría de los casos.

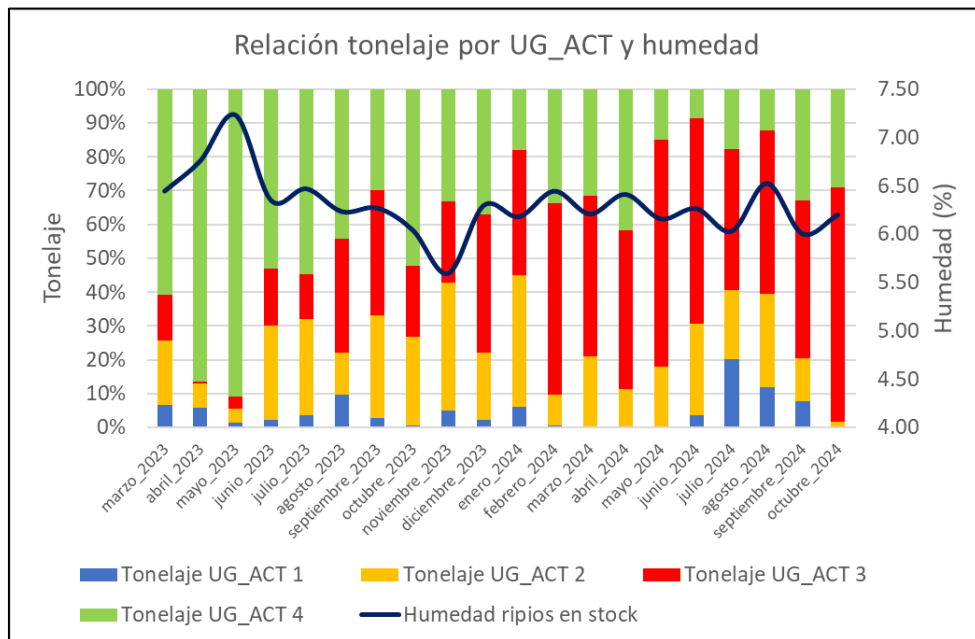


Figura 5.43. Gráfico combinado que compara el tonelaje de material extraído por UG de actinolita y su humedad entre marzo de 2023 y octubre de 2024. El tonelaje se representa como un gráfico de datos 100% apilados y la humedad como un gráfico de líneas.

La comparación entre la actinolita estimada y la humedad del material extraído de los rípios para su disposición en las pilas entre marzo de 2023 y octubre de 2024 (Figura 5.44) muestra que los valores tienden a relacionarse de manera directamente proporcional, especialmente a partir del año 2023 hasta julio de 2024.

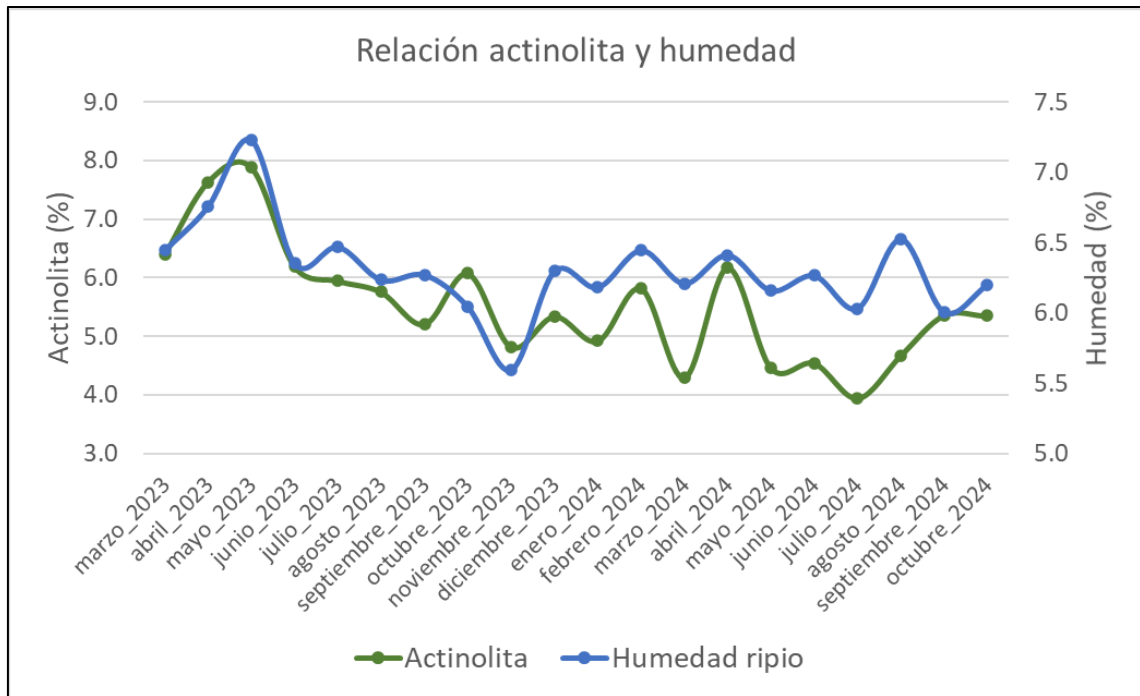


Figura 5.44. Gráfico de líneas que compara la actinolita estimada y la humedad del material extraído de los rípios entre marzo de 2023 y octubre de 2024.

5.11. Evolución de porcentajes de material fino y humedad en pilas post-lixiviación

La evolución del porcentaje de material fino de la granulometría de cola y la humedad en las pilas ya lixiviadas, se estudió mediante un gráfico que compara estos dos parámetros (Figura 5.45). Es importante destacar que, en las bases de datos asociadas a las pilas de lixiviación, el porcentaje de finos también está calculado como la cantidad de material que pasa por la malla de tamiz #100 (<150 μm).

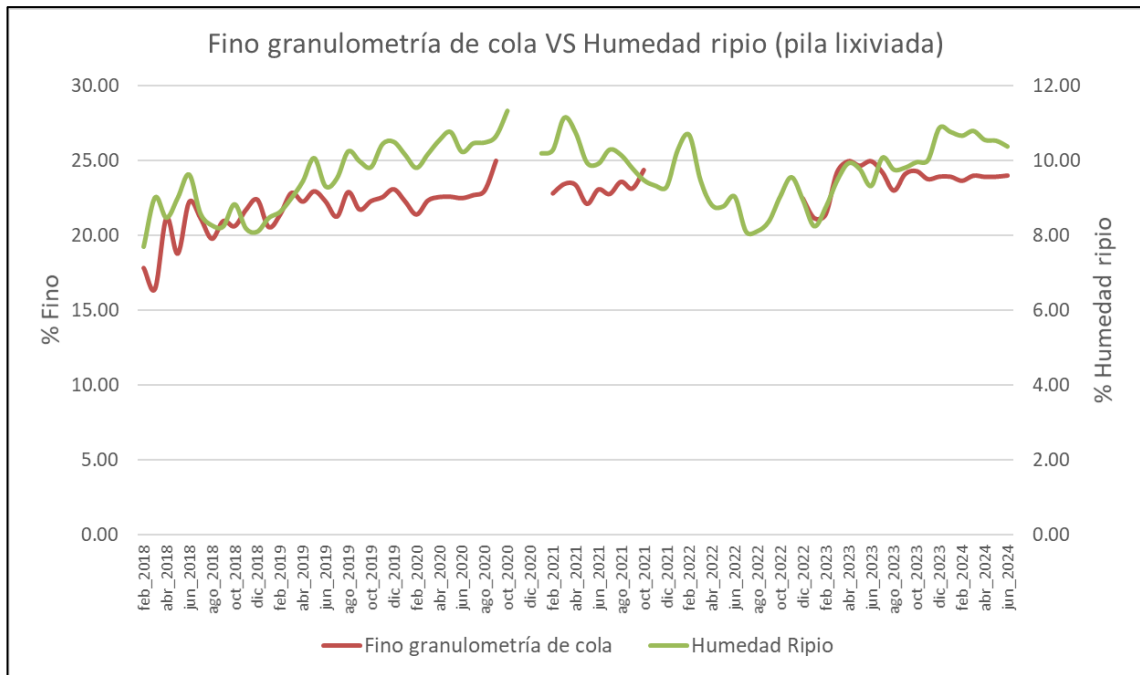


Figura 5.45. Gráfico de evolución del porcentaje de finos de la granulometría de cola y humedad en pilas ya lixiviadas. Elaborado en Excel.

En la Figura 5.45, se observa que el porcentaje de finos en la granulometría de cola tiende a una pequeña disminución en las fechas más cercanas a la actualidad, mientras que la humedad muestra un aumento significativo que no puede ser explicado por los finos. Además, a partir de abril de 2023, los datos de ambas características se separan de manera notable.

5.12. Análisis químicos de pilas post-lixiviación

5.12.1. Arcillas VS Humedad

Los análisis químicos permitieron la confección de gráficos de dispersión entre las arcillas y la humedad de las muestras, con el objetivo de ver la correlación entre los datos, los gráficos resultantes son los siguientes:

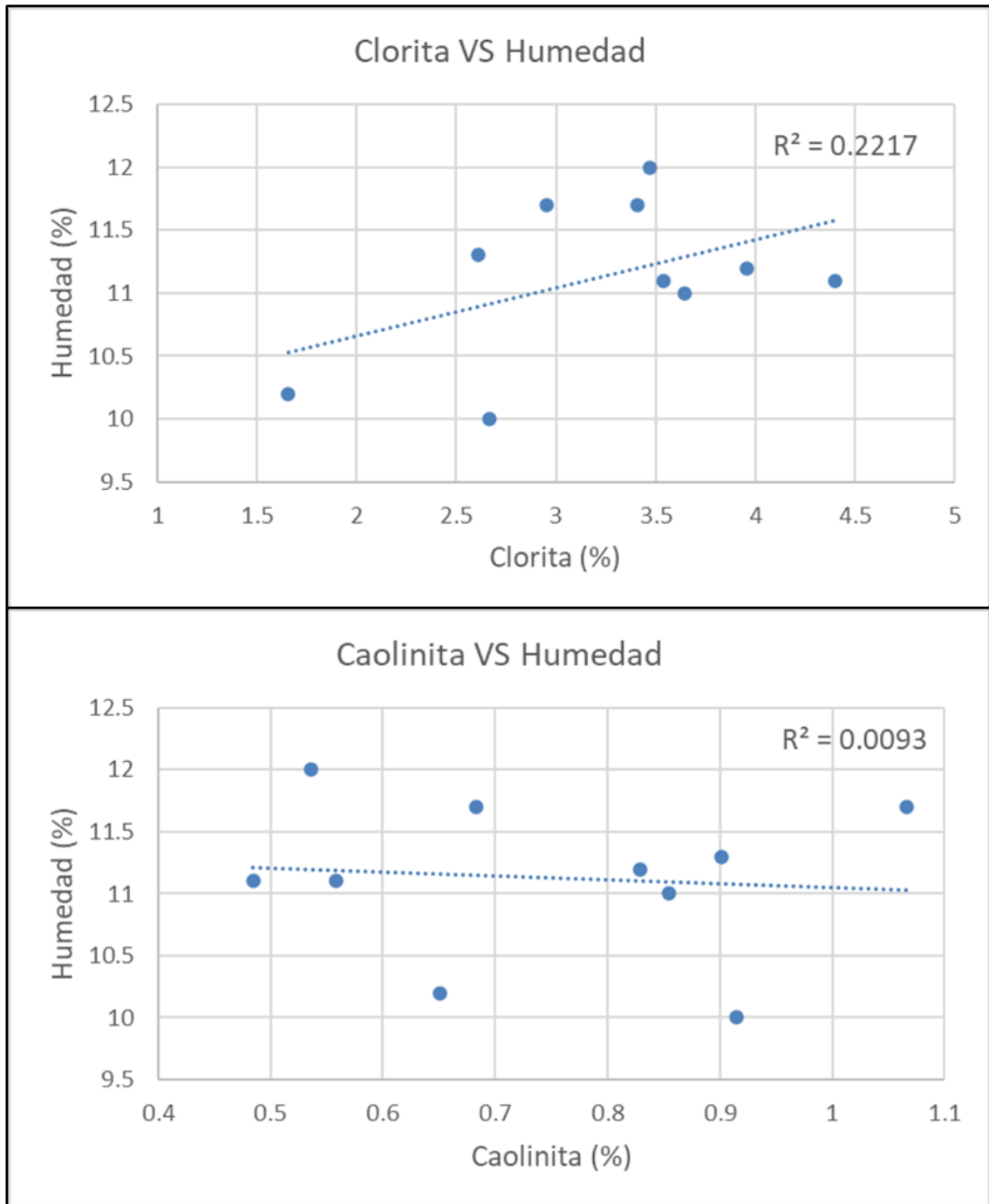


Figura 5.46. Gráficos de dispersión de arcillas en comparación con la humedad de las pilas post-lixiviación. El gráfico superior corresponde al de la clorita VS la humedad y el inferior al de caolinita VS humedad. El R^2 representa el coeficiente de correlación. Elaborados en Excel.

Según los datos (Figura 5.46), la caolinita y la clorita no tienen mucha relación con los porcentajes de humedad con coeficientes de correlación bastante bajos en especial el de la caolinita que tiene un coeficiente cercano a cero.

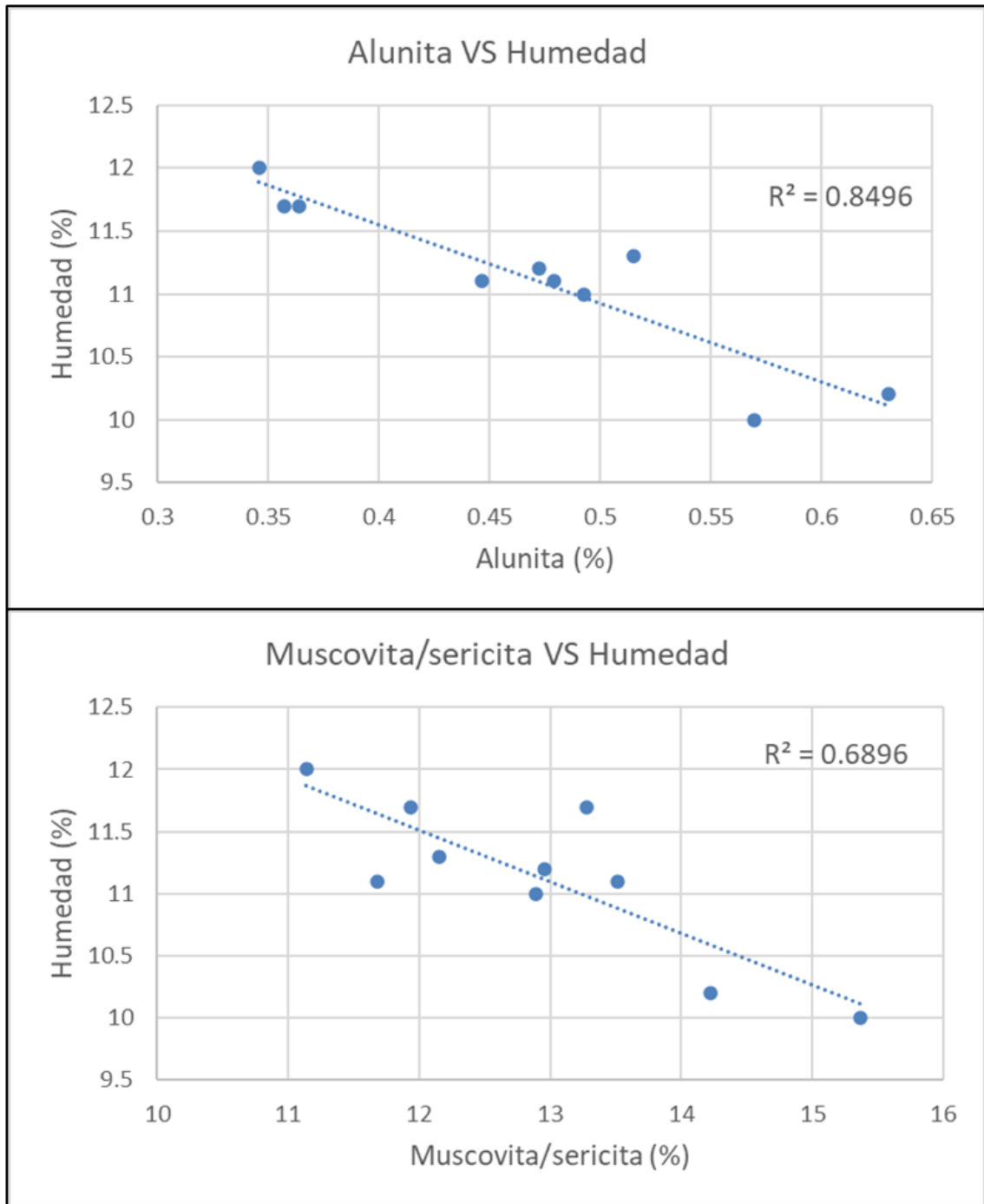


Figura 5.47. Gráficos de dispersión de arcillas en comparación con la humedad de las pilas post-lixiviación. El gráfico superior corresponde al de la alunita VS la humedad y el inferior al de muscovita/sericita VS humedad. El R^2 representa el coeficiente de correlación. Elaborados en Excel.

Según lo que se puede ver en los gráficos (Figura 5.47), la alunita posee una buena correlación negativa con la humedad (a mayor porcentaje de alunita, menor humedad) con un coeficiente de correlación de aproximadamente 0.85. La muscovita/sericita, que

incluye a la illita también tiene una correlación negativa con la humedad con un coeficiente de correlación de aproximadamente 0.69.

5.12.2. Minerales modelados VS humedad

También se realizaron gráficos de dispersión con los análisis químicos de las pilas lixiviadas para observar las correlaciones entre los minerales modelados y la humedad residual en las pilas. A continuación, se presentan los gráficos:

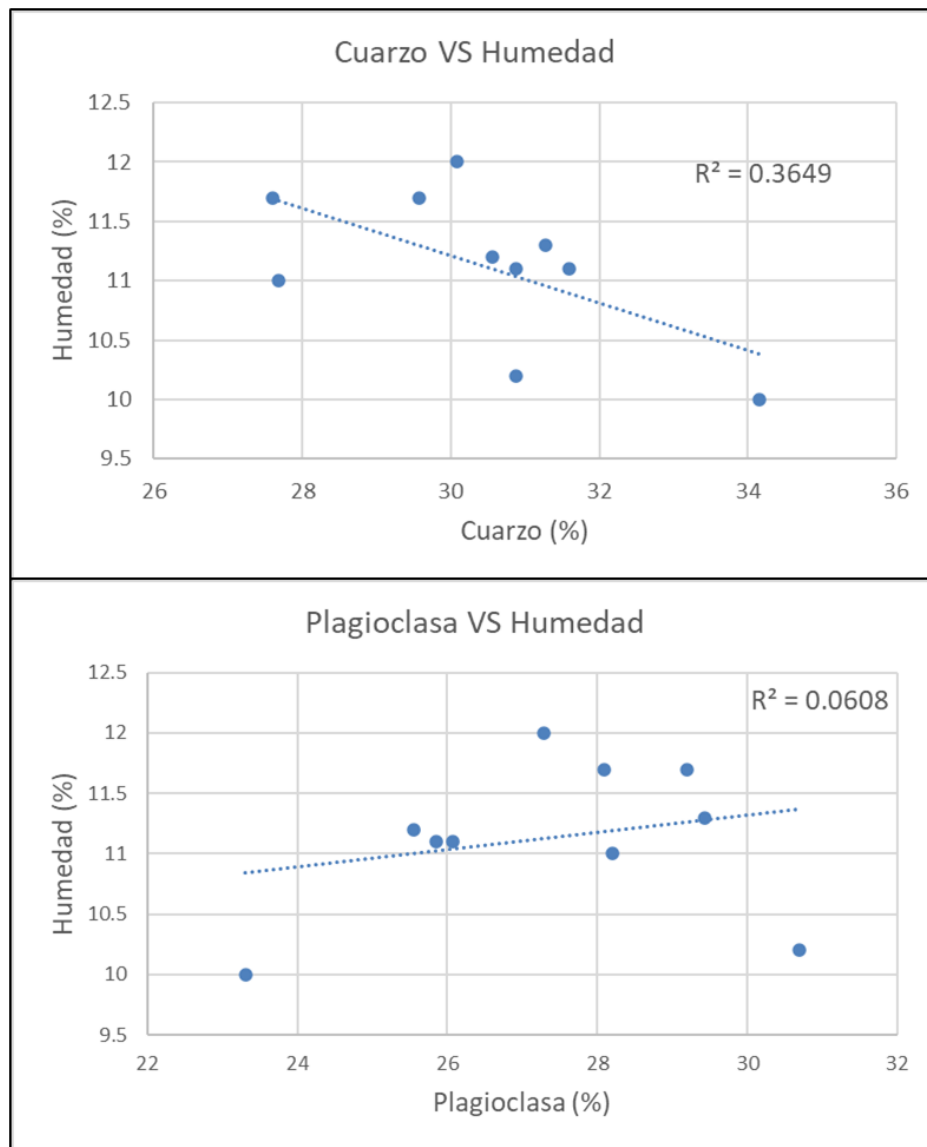


Figura 5.48. Gráficos de dispersión de minerales modelados en comparación con la humedad de las pilas post-lixiviación. El gráfico superior corresponde al de cuarzo VS humedad y el inferior al de plagioclasa VS humedad. El R^2 representa el coeficiente de correlación. Elaborados en Excel.

En el gráfico del cuarzo (Figura 5.48) se puede ver una correlación negativa entre el mineral y la humedad con un coeficiente de correlación bajo de aproximadamente 0.36. En el caso de la plagioclasa, la correlación con los datos de humedad es casi nula (Figura 5.48).

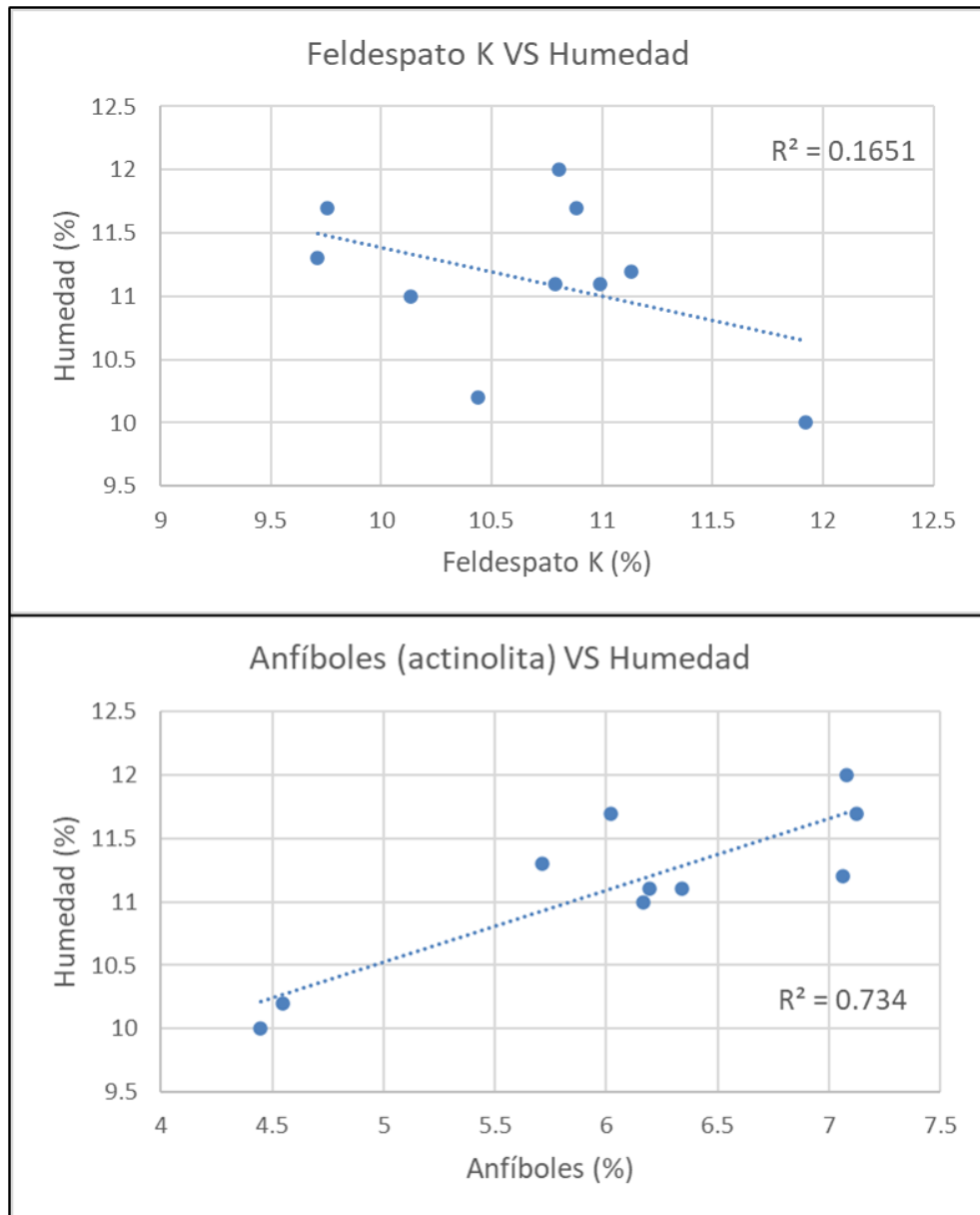


Figura 5.49. Gráficos de dispersión de minerales modelados en comparación con la humedad de las pilas post-lixiviación. El gráfico superior corresponde al de feldespato K VS la humedad y el inferior al de anfíboles VS humedad. El R^2 representa el coeficiente de correlación. Elaborados en Excel.

Según los datos (Figura 5.49), el Feldespato K tiene una baja correlación con la humedad con un coeficiente de correlación de aproximadamente 0.17. En el caso de los anfíboles, principalmente compuestos por actinolita, se observa una correlación positiva con la humedad (a mayor cantidad de anfíboles, mayor humedad) con un coeficiente de correlación alto de aproximadamente 0.73.

5.12.3. Elementos VS humedad

Otro aspecto importante de las pilas post-lixiviación son las leyes de los elementos que las componen, dentro de las que destaca la correlación existente entre el calcio y la humedad con un coeficiente de correlación de aproximadamente 0.77 (Figura 5.50). Otros coeficientes de menor magnitud, pero importantes son el del potasio con 0.74 y el del magnesio con 0.69 (Figura 5.51). En cuanto a los demás elementos, estos no presentan una correlación significativa (Anexos, Figura 9.16 y 9.17).

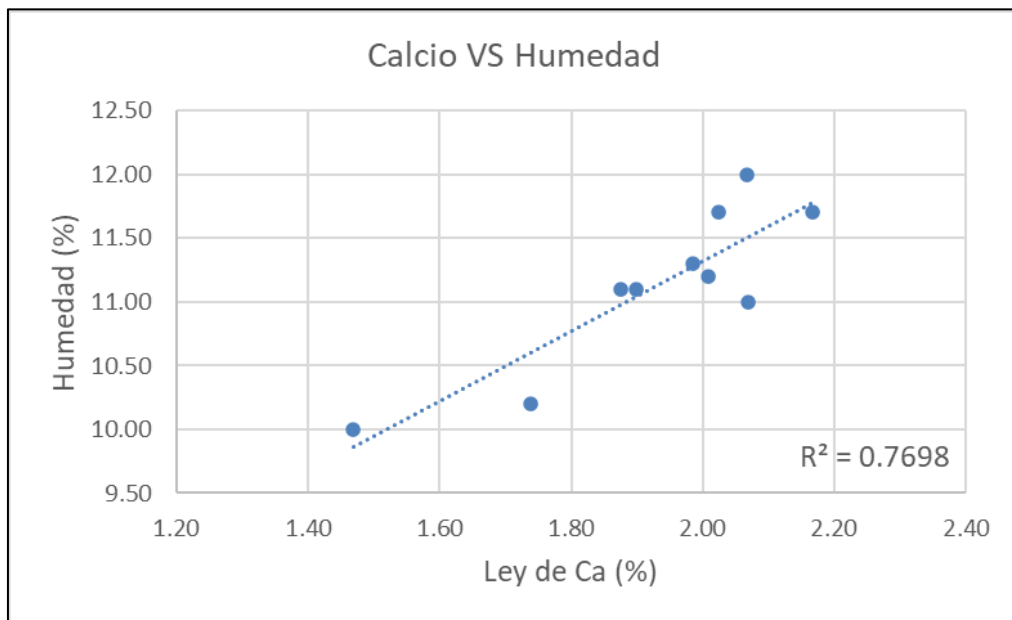


Figura 5.50. Gráfico de dispersión de la ley de Ca en comparación con la humedad de las pilas post-lixiviación. El R^2 representa el coeficiente de correlación. Elaborado en Excel.

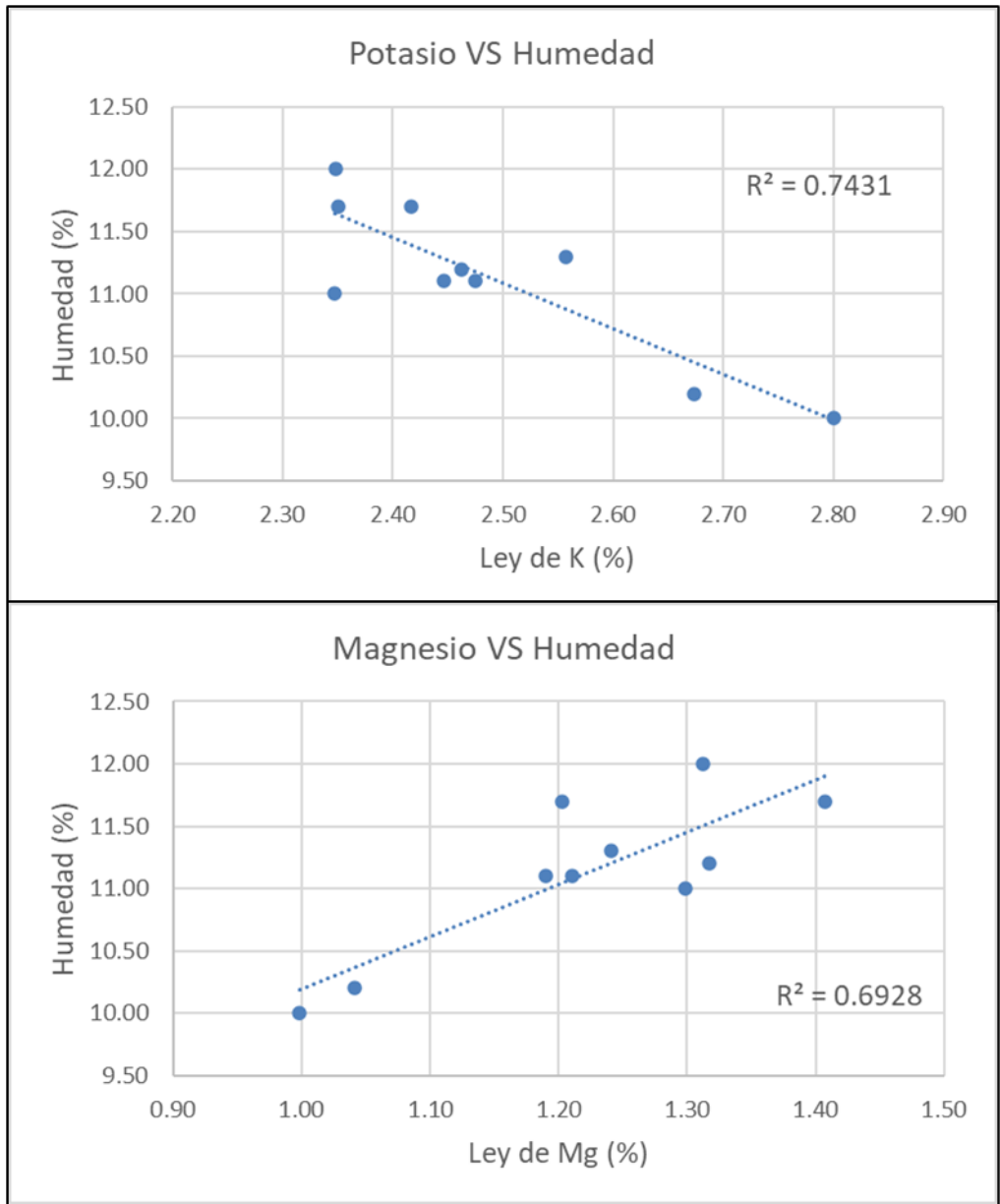


Figura 5.51. Gráficos de dispersión de las leyes de K y Mg en comparación con la humedad de las pilas post-lixiviación. El gráfico superior representa el de potasio y el inferior el de magnesio. El R^2 representa el coeficiente de correlación. Elaborado en Excel.

6. CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN

Los estudios preliminares sobre el comportamiento de la humedad en los stocks de ripios del RAMS 2 evidencian una tendencia creciente en este parámetro a lo largo del tiempo, en el Ripio Verde y la mezcla, alcanzando niveles elevados en los últimos periodos. Este fenómeno sugiere que alguna característica interna de los stocks ha cambiado, favoreciendo una mayor retención de humedad en el material.

Esta evolución también se observó en el ripio residual post-lixivación, donde la humedad ha aumentado en concordancia con las fechas en que se identificó un incremento similar en los stocks. Este exceso de humedad causa las dificultades actuales en la disposición final de los ripios generados tras el proceso de lixivación en pilas, ya que su estabilidad estructural se ve comprometida, complicando su correcta colocación en botaderos.

6.1. Implicancias de la presencia de finos y arcillas en el aumento de la humedad

Un factor responsable del aumento de humedad en el RAMS 2 y los ripios lixiviados podría ser la presencia de finos y arcillas en el material procesado. Tal como señala Bouffard (2008), estos componentes pueden aumentar significativamente la retención de humedad, afectando negativamente el drenaje del sistema. Además, las arcillas y finos por su tamaño tienen la capacidad de consumir una cantidad considerable de ácido sulfúrico pudiendo generar problemas en la eficiencia del proceso de lixivación.

En los análisis históricos sobre la evolución del material fino en el RAMS 2 (Figura 5.4, 5.5 y 5.6), se observó que existe una relación inversamente proporcional entre la cantidad de finos y el aumento de la humedad en los stocks. Este mismo comportamiento se registró al comparar la proporción de finos y la humedad en los ripios generados tras el proceso de lixivación en pilas (Figura 5.45). Estos hallazgos sugieren que no existe una conexión directa entre la cantidad de material fino y los problemas de humedad actuales, lo que apunta a otros factores como responsables del aumento de humedad observado.

El estudio de las arcillas principales presentes en los ripios en stock reveló que los porcentajes generales de caolinita, clorita e illita disminuyeron significativamente durante el cambio de lixivación del material proveniente del RAMS 1 al del RAMS 2 (Figura 5.10, 5.11 y 5.12). Esto sugiere que estas arcillas no son responsables del incremento de

humedad, ya que si su presencia fuera un factor determinante, los problemas de humedad se habrían presentado también en el RAMS 1, donde su concentración era mayor. Además, al comprobar la relación entre las arcillas caolinita y clorita con la humedad de las pilas post-lixiviación, se encontró una correlación prácticamente nula entre estas variables (Figura 5.46), lo que refuerza la idea de que estas arcillas tienen un rol irrelevante en los problemas de humedad actuales.

En cuanto a la muscovita, cuya información disponible solo abarca el periodo de explotación del RAMS 2, se pueden apreciar fluctuaciones notables en sus porcentajes a lo largo del tiempo gracias a la Figura 5.13, destacando una fuerte caída en el último periodo registrado.

Es crucial resaltar que la muscovita es un componente principal del Ripio Rojo, rípios que son utilizados para reducir la humedad general de la mezcla que conforma las pilas de lixiviación. Esto puede explicar lo observado en la Figura 5.47, donde se evidenció una correlación negativa entre la muscovita/sericita y la humedad del rípio residual tras el proceso de lixiviación en pilas. Esto permite interpretar que un mayor contenido de muscovita indicaría una mayor proporción de Ripio Rojo en la mezcla, lo que contribuye a la disminución de la humedad general.

Es relevante destacar que la muscovita es uno de los minerales más resistentes a la meteorización química en la serie de Bowen (Tarbuck *et al.*, 2005). Además, según Chetty (2018), este mineral se considera como pobremente soluble, por lo que es difícil que cause reacciones significativas en el proceso de lixiviación. Sin embargo, la muscovita podría reaccionar, generando una disolución incongruente por ácidos según Eby (2016), pero sería en casos anómalos.

En lo que respecta a la alunita, la única información disponible es la de su correlación con la humedad en los rípios generados tras el proceso de lixiviación, sin contar con datos específicos sobre su evolución o su relación con la humedad en los stocks de rípios (RAMS 2). En la Figura 5.47, se observó una correlación negativa importante entre la alunita y la humedad del material que posteriormente será dispuesto en los botaderos, similar a lo sucedido con la muscovita. Esto llevó a una conclusión similar a la alcanzada con la muscovita, dado que la alunita es un componente relevante de los rípios rojos, es

razonable interpretar que un mayor porcentaje de esta arcilla en la mezcla de las pilas indica una mayor proporción de Ripio Rojo. Esto refuerza el uso que se le da a estos ripios para contribuir a una menor retención de humedad en la mezcla final.

6.2. Minerales modelados, contenido y zonas importantes

Los minerales de ganga seleccionados en este estudio para ser modelados en el RAMS 2 fueron escogidos debido a la significativa variación mineralógica observada entre las muestras de la mezcla, las cuales presentaban comportamientos diferenciados. Algunas de estas muestras exhiben un comportamiento más asociado al de una grava, mientras que otras se asemejan más al de una roca.

Es importante destacar que, en las validaciones de las estimaciones, se observó que, en general, existe una mayor correlación en la validación para las UG que presentan una mayor variabilidad y amplitud en la distribución de sus datos. Esto se debe a que el método inverso a la distancia tiende a mejorar su desempeño cuando existe una mayor variabilidad y amplitud en sus conjuntos de datos, ya que cuando los valores están muy concentrados, el método no puede captar adecuadamente las variaciones significativas.

6.2.1. Distribución y control de las unidades geológicas de cuarzo

Los sectores de menor porcentaje de cuarzo en el RAMS 2, están fuertemente controlados por las UG de cuarzo 1 y 2, las cuales se encuentran ampliamente distribuidas en las zonas centro-superior del modelo. Por otro lado, los mayores porcentajes de cuarzo en el RAMS 2 están dominados principalmente por las UG de cuarzo 3 y 4, que predominan en los espacios periféricos de la zona más al norte y en una parte significativa de la porción sur, además de estar ampliamente distribuidas en las cotas inferiores.

En comparación con las UG de los ripios (50, 51, 52 y 53), las UG_QZ 1 y 2 están asociadas principalmente con zonas de Ripio Verde, Ripio Mezcla y Ripio Mezcla Débil, mientras que las UG_QZ 3 y 4 se relacionan con el Ripio Rojo, lo cual es coherente considerando que estos últimos contienen los mayores porcentajes de cuarzo, según los resultados de los análisis químicos.

6.2.2. Distribución y control de las unidades geológicas de plagioclasa

Los espacios con menor porcentaje de plagioclasa en el RAMS 2, al igual que en el caso del cuarzo, están representados por las UG_PLG de menor valor numérico (1 y 2), mientras que los mayores porcentajes corresponden a las UG_PLG de mayor número (3 y 4). En general, los porcentajes de plagioclasa están distribuidos de manera inversa a las estimaciones de cuarzo, con una mayor concentración de plagioclasa en las zonas donde el cuarzo presenta sus valores más bajos y viceversa.

En comparación con las UG de los rípios, la plagioclasa muestra sus mayores valores en zonas asociadas principalmente al Ripio Verde, Ripio Mezcla y Ripio Mezcla Débil, mientras que los menores porcentajes de plagioclasa se encuentran predominantemente en sectores de Ripio Rojo. Esto es consistente con los resultados de los análisis químicos, que indican que las muestras de Ripio Rojo presentan los menores valores de plagioclasa. Sin embargo, existen algunas excepciones en la parte centro-sur del modelo, donde se observan porcentajes significativos de plagioclasa (30-40 wt%) en áreas correspondientes a Ripio Rojo.

6.2.3. Distribución y control de las unidades geológicas de feldespato K

En el modelo de feldespato K, los valores menos significativos están representados por la UG_FLK 1, que domina gran parte de los sectores centro y norte del modelo, por otro lado, los porcentajes más importantes se encuentran en las UG_FLK 2 y 3, que tienen una mayor representación en la parte sur del modelo. Es relevante señalar que, en general, no existe una diferencia significativa en los valores de feldespato K entre las distintas UG, lo que explica por qué la zonificación en la visualización del modelo de estimación no es tan clara en función de las UG.

Por esta misma razón, tampoco se observa una relación destacada entre las UG de los rípios con las estimaciones del modelo. Sin embargo, se puede afirmar que los valores más elevados de feldespato K se encuentran mayormente asociados a las zonas correspondientes a los Rípios Rojos.

6.2.4. Distribución y control de las unidades geológicas de actinolita

El modelo de actinolita muestra los valores más bajos en torno a las UG_ACT 1 y 2, de estas dos, la primera presenta una distribución bastante importante en todo el modelo del RAMS 2, predominando principalmente en las cotas más bajas y en las áreas exteriores de la zona norte y sur. Además, la UG_ACT 1 fue considerada como todo el material relacionado con la UG de Ripio Rojo, ya que estos rипios, en su mayoría, no presentan actinolita o tienen valores muy bajos, lo cual también se confirmó en los análisis químicos. No obstante, existen muestras de la UG de Ripio Rojo con valores de actinolita algo significativos, lo que provoca la presencia de valores de hasta un 4 wt% de actinolita en el modelo en zonas que representan este tipo de rипio. Esta anomalía se explica por la contaminación de la UG 51 con material de los otros tipos de rипios, ya que el Ripio Rojo se formó a partir de la lixiviación del Pórfido Este, una unidad que no posee esta mineralogía.

Los valores más altos de actinolita están representados por las UG_ACT 3 y 4. Es relevante destacar que las estimaciones más altas de actinolita se encuentran en la zona centro-sur del modelo, sector que actualmente se encuentra en explotación. Según la definición como tal de las UG de actinolita, las UG 2, 3 y 4 están presentes únicamente en las zonas correspondientes a las UG de rипio 50, 52 y 53.

6.3. Implicancias de los minerales modelados en la lixiviación

El cuarzo, la plagioclasa, el feldespato K y la actinolita son silicatos, cuyas posibles reacciones químicas durante el proceso de lixiviación en pilas, podrían generar situaciones inesperadas, que impacten la eficiencia del procedimiento. Cuando los silicatos entran en contacto con ácidos, puede ocurrir uno de los siguientes resultados: una disolución congruente, que podría llevar a la formación de gel de sílice; una disolución incongruente, que provoca la formación de fases minerales secundarias; o bien, la ausencia de cualquier reacción (Terry, 1983).

6.3.1. Implicancia de los minerales cuarzo, plagioclasa y Feldespato K en la lixiviación

Entre los cuatro minerales modelados, el cuarzo, la plagioclasa y el feldespato K destacan como los principales formadores de roca. Estos minerales podrían influir en el proceso de lixiviación en pilas al proporcionar una mayor estabilidad estructural a la pila (algo observado en el capítulo de resultados) o, en algunos casos, desencadenar reacciones que podrían afectar de manera negativa al proceso.

Según el trabajo de Eby (2016), el cuarzo es extremadamente resistente a todos los tipos de disolución, y Chetty (2018) lo clasifica como un mineral pobremente soluble, por lo que ambos autores concuerdan en que el mineral es difícil que reaccione químicamente con otras sustancias, lo que sugiere que es prácticamente inerte.

En cuanto a la plagioclasa, Chetty (2018) señala que la albita, una plagioclasa sódica, está dentro de los minerales pobremente solubles, mientras que la anortita, una plagioclasa cálcica, se clasifica como moderadamente soluble. Eby (2016) indica que las plagioclasas son un grupo mineral que puede sufrir una disolución incongruente en contacto con ácidos. Owen *et al.* (2024) advierte que minerales como la plagioclasa pueden ser disueltos, pero que estos pueden generar un mayor consumo de ácido, liberación de elementos no deseados y/o reducir la permeabilidad y el drenaje de las pilas, debido a la precipitación de fases minerales secundarias. Además, Jansen y Taylor (2003) incluyen a la plagioclasa cálcica como un consumidor importante de ácido en el proceso de lixiviación.

El feldespato K, al igual que la albita, se clasifica como un mineral pobremente soluble en Chetty (2018). Eby (2016) postula que este mineral puede experimentar una disolución incongruente inducida por ácidos, lo que podría generar fases minerales secundarias que afecten el proceso de lixiviación.

Estos tres minerales formadores de roca siguen la susceptibilidad a la meteorización química inversa a la serie de Bowen, con el siguiente orden de menor a mayor susceptibilidad; cuarzo, feldespato K y plagioclasa (Tarbuck *et al.*, 2005). En general, tanto el feldespato K como el cuarzo, son prácticamente inertes frente al ataque de ácido.

Los análisis químicos realizados a las muestras de rípios del RAMS 2 (Tabla 5.1), revelaron que estos tres minerales están presentes en menor proporción en la mezcla con material de origen de “roca” que en aquellos con origen de “grava”. La plagioclasa muestra poca variación entre estos dos tipos de muestras, aunque existe una diferencia notable de este mineral entre el Rípio Verde y el Rípio Rojo. Observaciones de campo sugieren que el rípio con comportamiento rocoso, que posee una mayor proporción de material de origen de rocas mineralizadas de Mina Sur, las cuales están dominadas por rocas máficas (anfíbolitas principalmente), retiene más humedad en el RAMS 2. Esto sugiere que los minerales cuarzo, plagioclasa y feldespato K no deberían contribuir significativamente a la acumulación de humedad, ya que se encuentran en menor proporción en esas litologías.

Los análisis químicos del rípio generado posterior al proceso de lixiviación en pilas muestran que estos minerales no tienen una correlación importante con la humedad de la pila (Figura 5.48 y 5.49). Por lo tanto, no deberían ser los principales responsables del aumento de humedad en los stocks ni en las pilas. Sin embargo, estos minerales siguen siendo cruciales en el proceso debido a su papel en mantener la estabilidad estructural de las pilas durante todo el proceso de lixiviación.

6.3.2. Implicancia del mineral actinolita en la lixiviación

La actinolita pertenece al grupo de los anfíboles, que son parte de los inosilicatos (Klein y Hurlbut, 1997). Según Eby (2016), los anfíboles pueden experimentar una disolución congruente en contacto con ácidos, lo que podría llevar a la formación de gel de sílice. Sin embargo, Chetty (2018) sostiene que los inosilicatos en su mayoría producen una disolución incongruente, además de manera más específica clasifica a los anfíboles como unos minerales moderadamente solubles.

Jansen y Taylor (2003) resaltan que los anfíboles, debido a su composición, pueden consumir grandes cantidades de ácido durante el proceso de lixiviación. Esta observación es respaldada por Koizhanova *et al.* (2023), quienes realizaron estudios de lixiviación en yacimientos de cobre, que demostraron que los silicatos de calcio y magnesio, elementos principales que componen a la mayoría de los anfíboles, incluyendo la actinolita, aumentan el consumo de ácido sulfúrico en gran medida. En Owen *et al.* (2024) se

menciona que la lixiviación de anfíboles, al igual que la de la plagioclasa, puede incrementar el consumo de ácido, liberar elementos indeseables y/o disminuir la permeabilidad y el drenaje de las pilas, a causa de la formación de fases minerales secundarias.

Además, la disolución de minerales como la actinolita libera iones de calcio que pueden facilitar la formación de yeso, un mineral que puede provocar hinchamiento, reducción de la permeabilidad en el lecho de lixiviación y pérdida de Cu en solución (Ausburn y Baum, 2014; Owen *et al.*, 2024), otra forma del yeso que se puede formar es la bassanita que puede provocar los mismos efectos. Esto podría contribuir a la acumulación de humedad en los ripios después del proceso de lixiviación en pilas.

El material de los ripios en stock en el RAMS 2 con comportamiento rocoso mostró tener una cantidad importante de anfíboles, representados mayormente por la actinolita y esta acumulación de ripio también presentó niveles muy altos de humedad en los stocks. Los estudios realizados mediante la cubicación de los CADEMI, entre marzo de 2023 y octubre de 2024 (Figura 5.43 y 5.44), revelaron que la actinolita está estrechamente relacionada con los niveles de humedad, tanto por UG, como por actinolita estimada. Esto demuestra que este mineral tiene una tendencia a asociarse con la acumulación de humedad, al menos en el contexto del RAMS 2.

Los anfíboles, representados principalmente por la actinolita, también mostraron una fuerte conexión con la humedad del material residual post-lixiviación, con un coeficiente de correlación bastante alto, presentado en la Figura 5.49. Además, de esta información se puede inferir que con valores de anfíboles mayores a 5% la humedad tiende a superar el 11%. Todo esto permite interpretar que la actinolita es un factor clave en los problemas asociados a las pilas que se destinan al botadero.

Su implicancia en el proceso de lixiviación puede explicarse por varios factores previamente mencionados, permitiendo interpretar que la actinolita o los anfíboles en general, provocan lo siguiente en el procedimiento: un alto consumo de ácido, lo que provocaría un aumento en la proporción de agua en la solución lixivante, y la posible formación de gel de sílice o fases minerales secundarias, reduciría la porosidad y el drenaje de la pila, favoreciendo la retención de humedad. Además, la liberación de calcio durante

su disolución podría contribuir a la formación de bassanita y yeso (sulfatos de calcio), los cuales son perjudiciales para el proceso. Sin embargo, los análisis de los stocks y las pilas post-lixiviación no revelaron cantidades significativas de estos minerales, por lo que no hay evidencia para respaldar esta hipótesis.

6.4. Elementos en pilas post-lixiviación

Los elementos que mostraron las mejores correlaciones con la humedad del ripio residual tras el proceso de la lixiviación en pilas, fueron el calcio, el potasio y el magnesio. El calcio posee una correlación positiva con la humedad (Figura 5.50), lo que está alineado con el aumento de la actinolita (anfíboles), respaldando las interpretaciones previas sobre su papel en el proceso de lixiviación. Una parte del calcio también podría estar asociada a plagioclasas con un mayor contenido de este elemento en su composición, las cuales reaccionarían con la solución lixivante.

El potasio, por su parte, es clave en la composición del feldespato K, la muscovita y la alunita, minerales que son parte importante del Ripio Rojo. Esto explica su correlación negativa con la humedad (Figura 5.51), ya que una mayor presencia de estos minerales indica una mayor proporción de Ripio Rojo en la mezcla, lo que ayuda a estabilizar la pila. El magnesio, al ser un componente relevante de la actinolita y los anfíboles en general, también muestra una correlación positiva con la humedad (Figura 5.51), lo que es coherente con el comportamiento de estos minerales en el proceso de lixiviación.

7. CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los datos obtenidos en este estudio han permitido comprender mejor cómo diversos factores, que incluyen la presencia de ciertos minerales y las características físicas del ripio, influyen en la retención de la humedad, lo que tiene implicancias tanto en la eficiencia del proceso de lixiviación como en la estabilidad estructural de las pilas post-lixiviación.

Uno de los hallazgos más importantes es la identificación de una tendencia creciente en la humedad retenida por los rípios del RAMS 2 y los rípios ya lixivados en los últimos periodos, desde aproximadamente marzo de 2023. Aunque inicialmente se sospechaba que la presencia de finos y arcillas podría ser la principal causa de este incremento en la humedad, los análisis han demostrado que no son responsables del fenómeno. De hecho, las evaluaciones recientes han revelado que el contenido de material fino ha disminuido en los últimos periodos.

En el caso de las arcillas como la caolinita, clorita e illita, también demostraron haber disminuido entre el paso del RAMS 1 al RAMS 2. Además, la correlación nula o débil entre la caolinita y clorita con la humedad en los rípios lixivados sugiere que otros factores deben estar contribuyendo a este comportamiento. No obstante, se destaca la influencia de las arcillas muscovita y alunita, componentes principales del Ripio Rojo. Los análisis químicos revelaron una correlación negativa entre la presencia de estos minerales y la humedad retenida en el residuo post-lixiviación. Esto indica que una mayor proporción de Ripio Rojo en la mezcla de las pilas de lixiviación ayuda a reducir la humedad general del material. Esta conclusión refuerza el uso del Ripio Rojo como componente importante para mitigar los problemas de humedad en los rípios.

Posteriormente, en la investigación se realizó el modelamiento de algunos minerales de ganga, que presentan importantes variaciones entre los tipos de muestras de rípios. Es relevante señalar que este modelamiento posee limitaciones, ya que los stocks de rípios no siguen una estructura geológica ordenada, lo que incrementa la incertidumbre de los datos. Además, en este proceso de modelamiento se observó que existe una mayor correlación en la validación para las UG que presentan una mayor variabilidad y amplitud en la distribución de sus datos. En cuanto a los minerales de ganga modelados, como el

cuarzo, la plagioclasa y el feldespato K, los resultados de las observaciones en terreno y los análisis químicos, indican que estos minerales no parecen tener un impacto directo en el aumento de humedad. Sin embargo, su presencia sigue siendo relevante debido a su influencia en la estabilidad estructural de las pilas. Además, dado que estos minerales son altamente resistentes a la disolución, su interacción con los ácidos durante el proceso de lixiviación es limitada, lo que minimiza su impacto negativo en la eficiencia del proceso.

Por otro lado, la actinolita es un mineral que presenta sus mayores concentraciones en las zonas actualmente explotadas del RAMS 2. Su contenido muestra una relación significativa con la humedad en los stocks de ripios y los ripios posteriores a la lixiviación. Además, parece ser más activo en términos de su interacción con los ácidos utilizados en el proceso de lixiviación. Por lo tanto, la actinolita o los anfíboles en general, se consideran uno de los principales factores que influyen en las dificultades actuales del procesamiento de los stocks de ripios, lo que implica que, a mayor contenido de actinolita, más problemas se presentarán durante la lixiviación.

Se definió un posible proceso que explica la retención de humedad debido a las reacciones de la actinolita conforme avanza la lixiviación. El proceso incluiría primero un alto consumo de ácido provocado por la interacción del mineral con el ácido, lo que lleva a un aumento en el contenido de agua en solución y con la formación de gel de sílice o fases minerales secundarias, generadas por la disolución del mineral, se reduciría la porosidad y el drenaje de la pila, facilitando la retención de humedad. Sin embargo, los resultados también sugieren que es necesario seguir investigando estos factores para poder definir de manera más detallada el proceso y confirmar la influencia de la actinolita o anfíboles.

En conclusión, este estudio ofrece una visión de los factores que influyen en la retención de humedad en los ripios del RAMS 2 y proporciona información valiosa para optimizar los procesos de lixiviación y la disposición de los ripios. A medida que se continúe investigando y se implementen nuevas estrategias de gestión, es probable que se pueda mitigar de manera más efectiva los problemas de humedad y estabilidad estructural de las pilas lixiviadas, lo que contribuirá al éxito a largo plazo de las operaciones mineras.

De acuerdo con el estudio se recomienda:

- Realizar análisis químicos detallados a las pilas antes y después del proceso de lixiviación, lo cual permitirá evaluar los cambios importantes en los elementos y la mineralogía de la mezcla luego de realizado el procedimiento.
- Realizar pruebas metalúrgicas de lixiviación para evaluar y aclarar el fenómeno de retención de humedad. Con estos ensayos, es posible ajustar parámetros para optimizar el proceso y reducir la retención de humedad en las pilas.
- Delimitar las zonas de mayor porcentaje de actinolita y preparar planes para el tratamiento del material.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Aguilera, J. C. M. (2008). Caracterización geotécnica y estructural de la rampa de exploración y del túnel de drenaje, mina Chuquicamata (Memoria para optar al título de Geólogo). Universidad de Chile.
- Aguilera, U. (2018). Procedimiento para la preparación y medición de muestras por espectrometría NIR, mediante el uso del software Indico Pro. Superintendencia de Geología, División Codelco Chuquicamata, 31 p. (Informe inédito).
- Andrade, J. A. C. y Celis, J. M. C. (2021). Modelo geometalúrgico de la caracterización de arcillas para la eficiencia de la flotación usando la metodología de machine learning. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 24(48), 55-68.
- Aracena, I. (1981). Geología y alteración del sector norte del yacimiento de Chuquicamata (Memoria de título). Universidad de Chile.
- Aravena Maureira, J. (2020). Desarrollo de un modelo para predecir la concentración de cobre en el PLS del Proyecto Lixiviación de Ripios de la Gerencia de Extracción y Lixiviación, Codelco–División Chuquicamata. (Informe de Memoria de Título para optar al título de Ingeniero Civil Metalúrgico). Universidad de Concepción.
- Arnott, A. M. (2003). Evolution of the hydrothermal alteration at the Chuquicamata porphyry copper system, northern Chile (Tesis de doctorado). Universidad Dalhousie.
- Astengo, M. (2002). Caracterización geológica geotécnica estructural e hidrogeológica de Mina Sur y Extensión Sureste. (Memoria de título). Universidad Católica del Norte.
- Ausburn, K. y Baum, W. (2014). Heap leaching: Maximise your copper extraction. Mining Magazine, 4, 80–81.

- Ballard, J. R., Palin, J. M., Williams, I. S. y Campbell, I. H. (2001). Two ages of porphyry intrusion resolved for the super-giant Chuquicamata copper deposit of northern Chile, by ELA-ICP-MS and SHRIMP. *Geology*, 29, 383-386.
- Barra, F., Alcota, H., Rivera, S., Valencia, V., Munizaga, F. y MaksaeV, V. (2013). Timing and formation of porphyry Cu–Mo mineralization in the Chuquicamata district, northern Chile: New constraints from the Toki cluster. *Mineralium Deposita*, 48(5), 629–651.
- Blanco, N. y Tomlinson, A. (2009). Carta Chiu Chiu, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica (117), 1 mapa, escala 1:50.000. Santiago, Chile.
- Boric, R., Díaz, F. y MaksaeV, V. (1984). Complemento mapa metalogénico, II Región (12 vols.). Servicio Nacional de Geología y Minería-CORFO, Santiago. (Informe inédito).
- Bouffard, S. C. (2008). Agglomeration for heap leaching: Equipment design, agglomerate quality control, and impact on the heap leach process. *Minerals Engineering*, 21(15), 1115–1125. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.05.019>
- Brantley, S. L. (2008). Kinetics of mineral dissolution. En: Brantley, Susan, Kubicki, James, White, Art (Eds.), *Kinetics of Water–Rock Interaction*. Springer, New York.
- Brigatti, M. F., Galan, E. y Theng, B. K. G. (2006). Capítulo 2: Structures and Mineralogy of Clay Minerals. En B. K. G. T. y G. L. Faïza Bergaya (Ed.), *Developments in Clay Science* (Vol. 1, pp. 19–86). Elsevier. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1572435205010020>
- Burns, D. A. y Ciurczak, E. W. (Eds.). (1992). *Handbook of Near Infrared Analysis*. Marcel Dekker.
- Campbell, I. H., Ballard, J. R., Palin, J. M., Allen, C. y Faunes, A. (2006). U-Pb zircon geochronology of granitic rocks from the Chuquicamata-El Abra porphyry

copper belt of northern Chile: Excimer Laser Ablation ICP-MS analysis. *Economic Geology*, 101, 1327-1344.

- Camus, F. (2003). Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, Chile.
- Cancino, F., Alvarado, D., Navea, J. y Campos, L. (2015). Estudio del comportamiento del ponderador inverso a la distancia elevado a la potencia “n”, en el cálculo de la ley media y en la interpolación de recursos mineros. *Revista de la Facultad de Ingeniería UDA*. www.revistaingenieria.uda.cl
- Casal, C. (2013). Implantación de la tecnología NIRS en aplicaciones in-situ como herramienta de apoyo a las decisiones en el sector primario (Tesis de maestría). Universidad de Oviedo.
- Chetty, D. (2018). Acid-gangue interactions in heap leach operations: A review of the role of mineralogy for predicting ore behaviour. *Minerals*, 8(2), 47. <https://doi.org/10.3390/min8020047>
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales) y SitRural (Sistema de Información Territorial). (2021). Recursos naturales comuna de Calama. SitRural. https://www.sitrural.cl/wp-content/uploads/2021/11/Calama_rrnn.pdf
- CODELCO. (2016). Caracterización recursos artificiales modelo y estimación recursos ripios RAMS 1 y RAMS 2 (Informe interno). Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, División Chuquicamata.
- CODELCO. (2023). Informe geometalúrgico RAMS (Informe interno). Superintendencia de Geología, Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, División Chuquicamata.
- Collado, J., Lattus, J. y Rodríguez, J. (2005). Estudio estructural preliminar, Mina Chuquicamata 2005 (Informe interno). Subgerencia de Geología, Codelco Norte.
- Córdova, S. (2010). Actualización modelo geológico de arsénico octubre 2010.

Informe interno, Superintendencia de Geología, División Chuquicamata, Corporación Nacional del Cobre. (Informe inédito).

- Córdova, S., Demané, E., Fortt, L., Órdenes, T. y Ramírez, F. (2010). En Primera Jornada de Geociencias de la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, División Codelco Norte, Chuquicamata, Calama (pp. 11-21).
- Crundwell, F. K. (2013). The dissolution and leaching of minerals: mechanisms, myths and misunderstandings. *Hydrometallurgy*, 139, 132–148.
- Crundwell, F. K. (2014). The mechanism of dissolution of minerals in acidic and alkaline solutions: Part II Application of a new theory to silicates, aluminosilicates and quartz. *Hydrometallurgy*, 149, 265–275. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.07.003>
- Deer, W. A., Howie, R. A. y Zussman, J. (2013). *Introduction to the Rock-Forming Minerals* (3.a ed.). Geological Society of London.
- Demané, E. (2015). *Alteración y Mineralización Hipógena del Yacimiento Chuquicamata* (Presentación inédita).
- Demané, E., Barrios, C., Ardiles, C. e Iglesias, J. (2023). Actualización estimación recursos artificiales RAMS 2 (Informe interno). Superintendencia de Geología, Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, División Chuquicamata, Codelco.
- Dilles, J. H., Tomlinson, A. J., Martin, M. W. y Blanco, N. (1997). The El Abra and Fortuna granodiorite complexes: A porphyry copper batholith sinistrally displaced by the Falla Oeste. En VIII Congreso Geológico Chileno (Actas 3, pp. 1883-1887). Antofagasta, Chile.
- División Codelco Norte. (2009). *Caracterización geotécnica estructural, proyecto mina subterránea Chuquicamata, delineamiento para ingeniería básica*. (Informe inédito).
- Eby, G. N. (2016). *Principles of Environmental Geochemistry*. Waveland Press.

- Fearn, T. (2002). Assessing calibrations: SEP, RPD, RER and R2. *NIR News*, 13(6), 12–13. <https://doi.org/10.1255/nirn.689>
- García, P. (2013). Caracterización de la alteración potásica intensa relicta del yacimiento Chuquicamata, región de Antofagasta, Chile (Memoria para optar al título de Geólogo). Universidad Católica del Norte.
- Henríquez, S., Becerra, J. y Arriagada, C. (2014). Geología del área San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 171, 149 p., 1 mapa, escala 1:100.000. Santiago.
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H. y Gisbert Blanquer, J. M. (2011). Silicatos.
- Jansen, M. y Taylor, A. (2003). Overview of gangue mineralogy issues in oxide copper heap leaching. En *Proceedings of the ALTA Conference*, Perth, Australia (pp. 19-24).
- Jara, F. (2023). Generación del sustento geometalúrgico para el futuro modelamiento del parámetro NIR en División Chuquicamata rajo y subterránea, corto plazo. (Memoria para optar al título de Geóloga). Universidad Católica del Norte.
- Klein, C. y Hurlbut, C. (1997). *Manual de Mineralogía* (4.a ed.). Editorial Reverté.
- Koizhanova, A., Kenzhaliyev, B., Magomedov, D., Kamalov, E., Yerdenova, M., Bakrayeva, A. y Abdylidayev, N. (2023). Study of factors affecting the copper ore leaching process. *ChemEngineering*, 7(3), 54. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7030054>
- Lindsay, D. (1997). Structural control and anisotropy of mineralization within the Chuquicamata porphyry copper deposit, northern Chile (Presentación de tesis doctoral, no publicada). Universidad Dalhousie.
- Lindsay, D., Zentilli, M. y Rojas de la Rivera, J. (1995). Evolution of an active

ductile to brittle shear system controlling mineralization at the Chuquicamata porphyry copper deposit, northern Chile. *International Geology Review*, 37, 945-958.

- López Alfaro, E. J. (2012). Estudio experimental de la permeabilidad de materiales depositados en pilas de lixiviación. (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil). Universidad de Chile.
- Lopez, V. M. (1939). The primary mineralization at Chuquicamata, Chile. *Economic Geology*, 34, 674-711.
- MaksaeV, V. y Zentilli, M. (1988). Marco metalogénico regional de los megadepósitos de tipo pórfido cuprífero del Norte Grande de Chile. En V Congreso Geológico Chileno (Tomo I, pp. B181-B212).
- MaksaeV, V., Tomlinson, A. y Blanco, N. (1994). Estudio geológico de la franja longitudinal comprendida entre Quebrada Blanca y Chuquicamata. SERNAGEOMIN-CODELCO. (Informe inédito).
- Malley, D. F., Martin, P. D. y Ben-Dor, E. (2004). Application in analysis of soils. *Near-Infrared Spectroscopy in Agriculture*, 44, 729-784.
- Marín, C. (1973). Petrografía, alteración y mineralización del yacimiento cuprífero Exótica, Provincia de Antofagasta. (Memoria de título). Universidad de Chile.
- Marinovic, N. y Lahsen, A. (1984). Hoja Calama, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, N°58.
- Mintec. (2000). Reconstitución histórica botaderos RAMS y determinación zonas compactación y leyes (Informe inédito).
- Münchmeyer, C. (1996). Exotic deposits-products of lateral migration of supergene solutions from porphyry copper deposits. En F. Camus, R. H. Sillitoe y R. Petersen (Eds.), *Andean copper deposits: new discoveries, mineralization, styles and metallogeny* (pp. 43-58). Soc. Econ. Geol. Spec. Publ.

- Munchmeyer, C. y Urqueta, I. (1974). Geología del yacimiento Exótica. En Coloquio sobre fenómenos de alteración y metamorfismo en rocas volcánicas e intrusivas (pp. 213-253). Publicación del Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Muñoz González, C. I. (2022). Estudio de la disolución de la ganga no metálica en la lixiviación de minerales de cobre y su influencia sobre la cinética de recuperación de cobre. (Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería mención Ingeniería Química y Biotecnología). Universidad de Chile.
- Naranjo, J. y Paskoff, R. (1981). Estratigrafía de los depósitos cenozoicos de la región de Chiuchiu-Calama, Desierto de Atacama. *Revista Geológica de Chile*, 13–14, 79–85.
- Northey, S., Mohr, S., Mudd, G., Weng, Z. y Giurco, D. (2014). Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 190-201.
- Osborne, B. G. (2000). Near-Infrared Spectroscopy in Food Analysis. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*.
- Ossandón, G., Fréaut, R., Gustafson, L., Lindsay, D. y Zentilli, M. (2001). Geology of the Chuquicamata Mine: A progress report. *Economic Geology*, 96, 249–270.
- Owen, N. D., Ram, R., Vollert, L., Seaman, B., Etschmann, B., Xing, Y. y Brugger, J. (2024). The deleterious role of gangue mineralogy in copper extraction: A case study of poor recovery in leaching low-grade Cu ores. *Applied Geochemistry*, 166, 105984. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105984>
- Pardo, R. y Rivera, S. (1999). Exploración básica de seguimiento en distrito Chuquicamata II región. (Informe inédito).
- Proffett, J. M. (2003). Geological basis for the orebody model, Chuquicamata. Informe interno de consultoría, Subgerencia de Geología, Codelco, Chile.

(Informe inédito).

- Proffett, J. M. y Dilles, J. H. (2007). SHRIMP-RG ion microprobe U-Pb age determinations of intrusive rock units northeast of the Chuquicamata mine, Chile. CODELCO, 15 p. (Informe inédito).
- Quintana, K. y Martínez, C. (2021). Caracterización de gangas NIR, QEMSCAN® y XRD en un depósito de pórfido de cobre de clase mundial: un estudio de caso. Procemin Geomet.
- Raczynnski, A. (1963). Geología del distrito minero de Tuina (Memoria de título). Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Rein, P. (2007). Cane Sugar Engineering. Ed. Bartens.
- Reutter, K. J., Scheuber, E. y Chong, G. (1996). The Precordilleran system of Chuquicamata, northern Chile: Evidence for reversals along arc-parallel strike-slip fault. *Tectonophysics*, 259, 213-228.
- Reynolds, P., Ravenhurst, C., Zentilli, M. y Lindsay, D. (1998). High-precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of two consecutive hydrothermal events in the Chuquicamata porphyry copper system, Chile. *Chemical Geology*, 148, 45-60.
- Rivera, S. L., Alcota, H., Proffett, J., Díaz, J., Leiva, G. y Vergara, M. (2012). Update of the geologic setting and porphyry Cu-Mo deposits of the Chuquicamata district, northern Chile. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 16, 19-54.
- Rossi, G. (1990) *Biohydrometallurgy*. McGraw-Hill Book Company GMBH, Hamburg.
- Sillitoe, R. H. y McKee, E. H. (1996). Age of supergene oxidation and enrichment in the Chilean porphyry copper province. *Economic Geology*, 91, 164-179.
- Sillitoe, R. H. y Perelló, J. (2005). Andean copper province: Tectonomagmatic

settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 845–890.

- Siña, A. y Superintendencia de Geología, Codelco Norte. (2005). Modelo geológico y estimación de recursos cupríferos del depósito Chuquicamata. Gerencia de Geología, División Codelco Norte, 170 p. (Informe inédito).
- Snäll, S. y Liljefors, T. (2000). Leachability of major elements from minerals in strong acids. *Journal of Geochemical Exploration*, 71(1), 1–12. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(00\)00140-6](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(00)00140-6)
- Superintendencia de Geología. (2001). Estimación de recursos III (Informe inédito). División Chuquicamata, Codelco.
- Superintendencia de Geología. (2002). Estimación de recursos IV (Informe inédito). División Chuquicamata, Codelco.
- Superintendencia Ingeniería de Procesos. (2024). RdP: Reducción de área disponible de botaderos por alta fluidez de ripios excavados (Informe inédito). Gerencia de Extracción y Lixiviación, División Chuquicamata, Codelco.
- Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K. y Tasa, D. (2005). *Ciencias de la Tierra* (8.a ed., Vol. 1). Madrid: Pearson Educación.
- Terry, B. (1983). The acid decomposition of silicate minerals part I. Reactivities and modes of dissolution of silicates. *Hydrometallurgy*, 10(2), 135–150. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(83\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0304-386X(83)90002-6)
- Tomlinson, A. J. y Blanco, N. (1997). Structural evolution and displacement history of the West Fault system, Precordillera, Chile: Part 2, postmineral history. En VIII Congreso Geológico Chileno (Actas 3, pp. 1878-1882). Antofagasta, Chile.
- Tomlinson, A. J. y Cornejo, P. (2012). Regional distribution of Middle Eocene-early Oligocene porphyry copper centers in northern Chile: Second order patterns

and possible causes. En XIII Congreso Geológico Chileno, Actas, 40–42.

- Tomlinson, A. J., Blanco, N. y Dilles, J. H. (2010). Carta Calama, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Preliminar 8, 3 anexos, 1 mapa, escala 1:50.000. Santiago.
- Tomlinson, A. J., Blanco, N., Maksaev, V., Dilles, J. H., Grunder, A. L. y Ladino, M. (2001). Geología de la precordillera andina de Quebrada Blanca–Chuquicamata, Regiones I y II (20°30'–22°30' S). Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Informe Registrado IR-01-20, 2 volúmenes, 444 p., 20 mapas, escala 1:50.000. Santiago.
- Tomlinson, A., Blanco, N., Dilles, J., Maksaev, V. y Ladino, M. (2018). Carta Calama, región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 199, 1 mapa, escala 1:100.000. Santiago.
- Tomlinson, A., Mpodozis, C., Cornejo, P., Ramírez, C. y Dumintro, T. (1994). El Sistema de fallas Sierra Castillo-Agua Amarga: Transpresión sinistral Eocena en la Precordillera de Potrerillo, El Salvador. En VII Congreso Geológico Chileno (Vol. 2, pp. 1459-1463). Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- West, A., Galy, A. y Bickle, M. (2005). Tectonic and climatic controls on silicate weathering. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(1–2), 211–228. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.03.020>
- White, A. F. y Buss, H. L. (2014). Natural weathering rates of silicate minerals. *Treatise on Geochemistry* (2.a ed., pp. 115–155). Elsevier.
- Zentilli, M., Maksaev, V., Boric, R. y Wilson, J. (2018). Spatial coincidence and similar geochemistry of Late Triassic and Eocene–Oligocene magmatism in the Andes of northern Chile: Evidence from the MMH porphyry type Cu–Mo deposit, Chuquicamata District. *International Journal of Earth Sciences*, 107(3), 1097–1126.

9. ANEXOS

Tabla 9.1. Análisis DRX de la porción fina de muestras de ripios.

Muestra	Ripio	Cuarzo (%)	Plagioclasa (%)	Feldespatos K (%)	Clorita (%)	Illita/Moscovita (%)	Caolín (%)	Yeso (%)	Hematita (%)	Molibdenita (%)	Alunita (%)	Anhidrita (%)	Bassanita (%)	Biotita (%)	Actinolita (%)	Pirita (%)
STO1056850	MEZCLA	29.235	33.811	11.278	3.028	11.676	1.975	1.099	1.125			0.24	1.953		4.578	
STO1056853	MEZCLA	26.82	34.652	13.857	3.194	9.099	2.576		1.059			0.284	2.222	1.297	4.94	
STO1056856	ROJOS	59.05	11.213	13.838		10.706	2.285		0.307		2.291	0.311				
STO1056859	VERDES	22.217	43.044	13.134	1.302	7.495	1.837		0.438			0.217	1.793	0.78	7.744	
STO1056862	VERDES	22.425	46.553	14.601	1.431	4.639	1.593		1.06			0.253		0.691	6.754	
STO1056865	ROJOS	54.79	10.762	14.707		14.349	1.007		0.534	0.001	3.051	0.42		0.38		
STO1056870	VERDES	24.165	42.344	13.86	1.5	6.862	1.759		0.798			0.241		0.949	7.522	
STO1056873	MEZCLA	32.242	31.715	14.185	2.032	10.486	2.373		0.727			0.31		1.078	4.852	
STO1056876	MEZCLA	30.466	31.174	14.355	2.427	10.096	2.231		1.02			0.315	1.857	0.984	5.075	
STO1056879	ROJOS	49.689	13.658	17.005		13.713	1.682		0.353		2.669	0.377		0.395	0.459	
STO1056882	MEZCLA	31.526	37.781	13.222	0.839	7.976	1.597		0.721			0.273		0.801	5.264	
STO1056887	MEZCLA	30.919	37.674	13.157	1.277	7.877	1.542		0.69			0.285		0.745	5.834	
STO1056890	VERDES	23.42	44.193	13.087	1.287	7.107	1.943		0.28			0.22		0.895	7.569	
STO1056893	ROJOS	54.468	10.94	12.717		14.446	1.136		0.437		3.859	0.405		0.642	0.949	
STO1056896	MEZCLA	23.684	42.485	11.702	1.615	6.896	2.886		0.682			0.254	1.859	0.97	6.967	
STO1056899	VERDES	22.875	46.353	12.242	1.123	5.522	1.734		1.068			0.199	2.04	0.46	6.384	
STO1056902	VERDES	23.622	45.061	12.701	1.024	5.747	1.511		0.708			0.227	1.702	0.843	6.857	
STO1056905	VERDES	24.677	41.713	13.882	1.325	7.01	1.818		0.869			0.228	1.25	0.855	6.372	
STO1056908	ROJOS	42.39	21.143	19.17		11.61	1.51		0.538		1.532	0.314		0.542	0.738	0.514
STO1056914	VERDES	24.118	43.286	12.933	1.802	6.131	2.293		0.575			0.217		0.964	7.682	
STO1056917	MEZCLA	33.294	32.099	13.956	1.37	9.641	1.53		0.654		1.257	0.263		0.792	5.143	
STO1056920	MEZCLA	26.918	38.701	12.986	1.8	7.156	1.584		0.77			0.25	1.832	0.923	7.081	
STO1056923	MEZCLA	26.328	39.196	13.056	1.865	7.094	1.872		0.746			0.257	1.852	0.814	6.92	
STO1056926	VERDES	23.293	45.083	13.772	1.246	5.138	1.463		0.974			0.234		1.006	7.791	
STO1056932	MEZCLA	26.449	40.827	14.292	1.214	6.648	1.95		0.798			0.24		0.991	6.591	
STO1056935	VERDES	22.525	45.01	13.524	1.479	5.568	1.85		0.878			0.208		1.186	7.771	
STO1056938	MEZCLA	27.871	37.158	13.419	1.746	7.692	2.097		0.69			0.264	1.724	1.098	6.242	
STO1056941	MEZCLA	30.566	35.102	12.983	2.136	7.417	1.941		1.211		1.152	0.243	0.957	0.679	5.612	
STO1056944	VERDES	21.757	42.563	12.206	3.076	7.177	3.194	1.358	1.389			0.251	0.931	1.638	4.461	

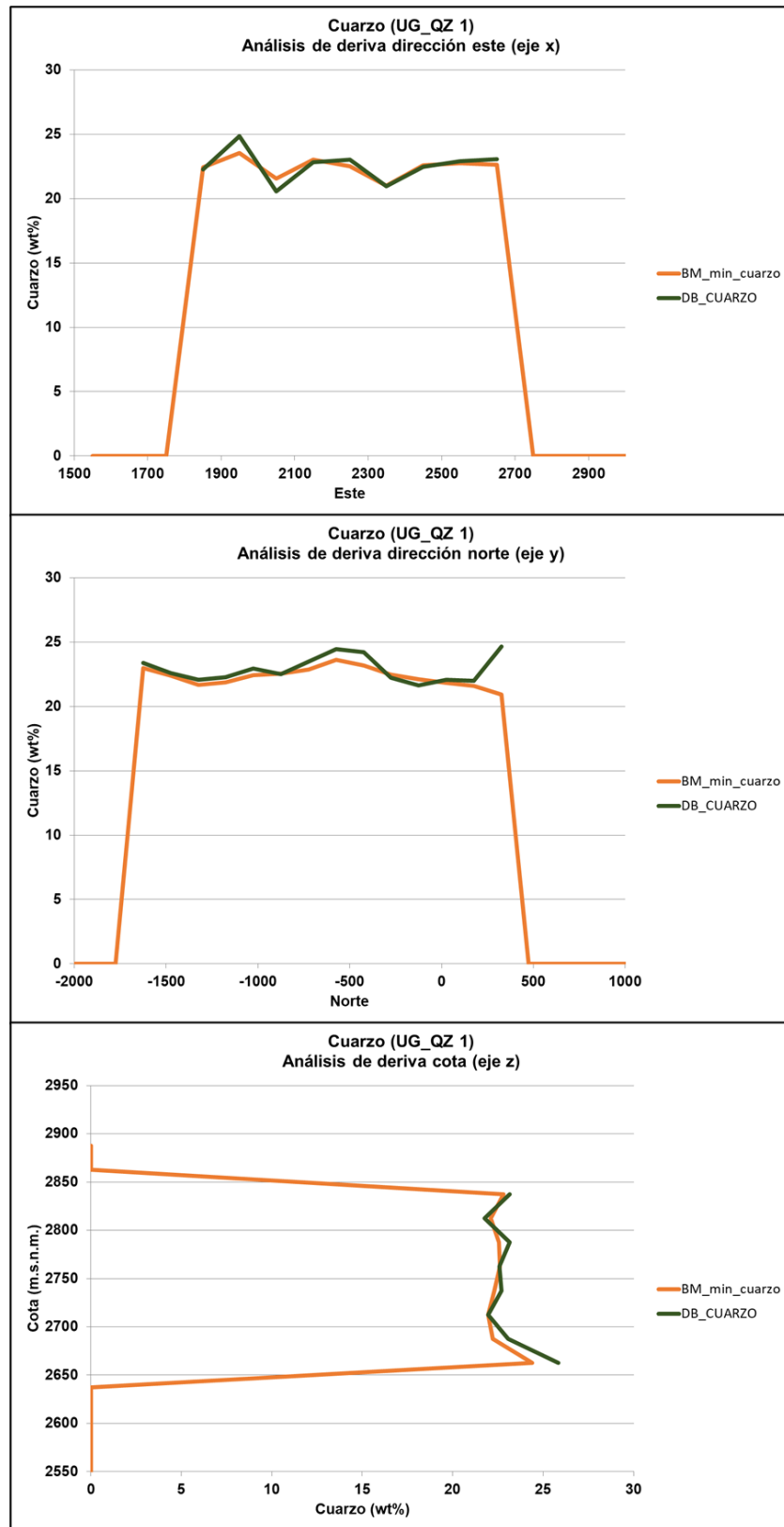


Figura 9.1. Análisis de deriva en la estimación de la UG de cuarzo 1 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_cuarzo” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_CUARZO” a la base de datos.

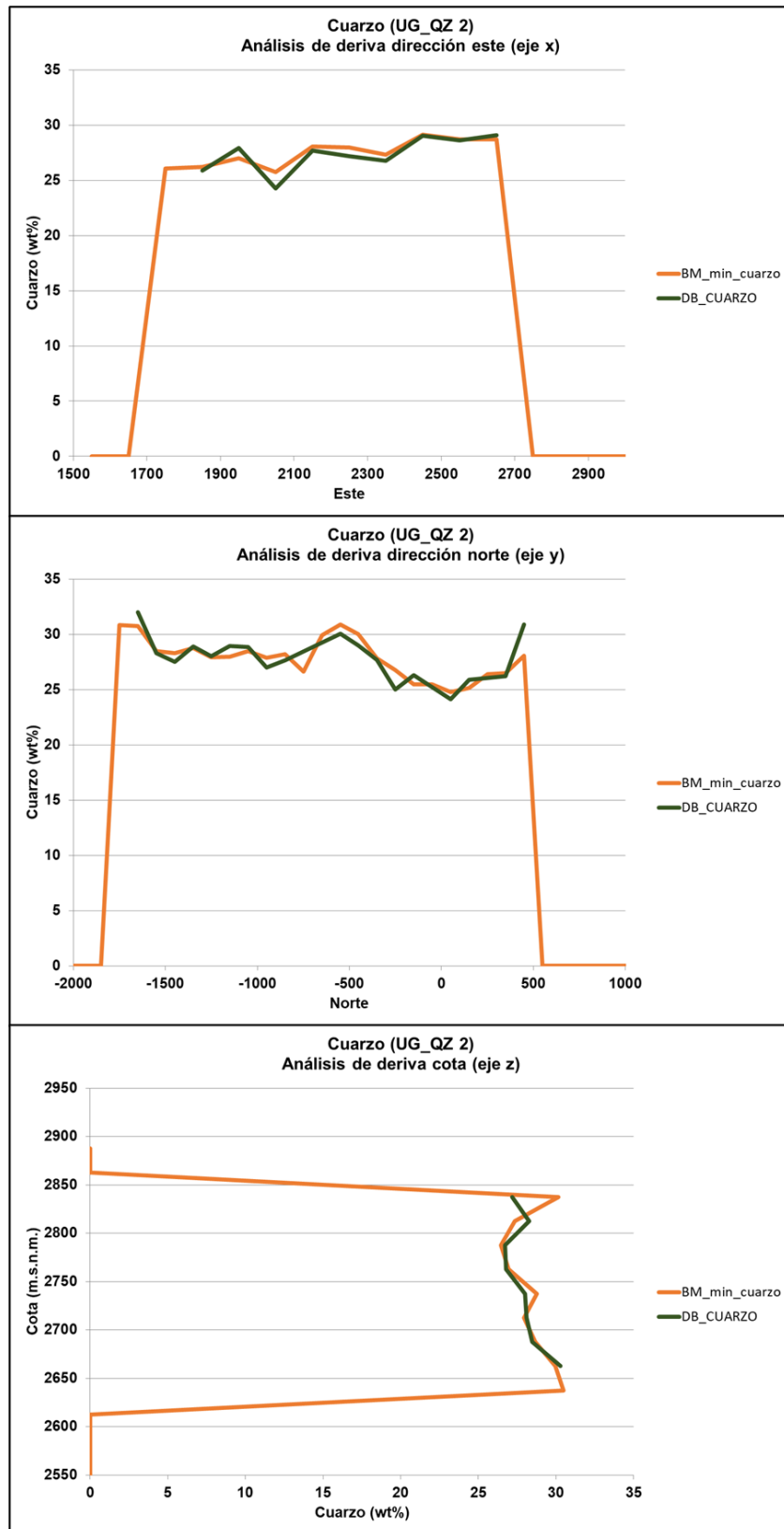


Figura 9.2. Análisis de deriva en la estimación de la UG de cuarzo 2 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_cuarzo” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_CUARZO” a la base de datos.

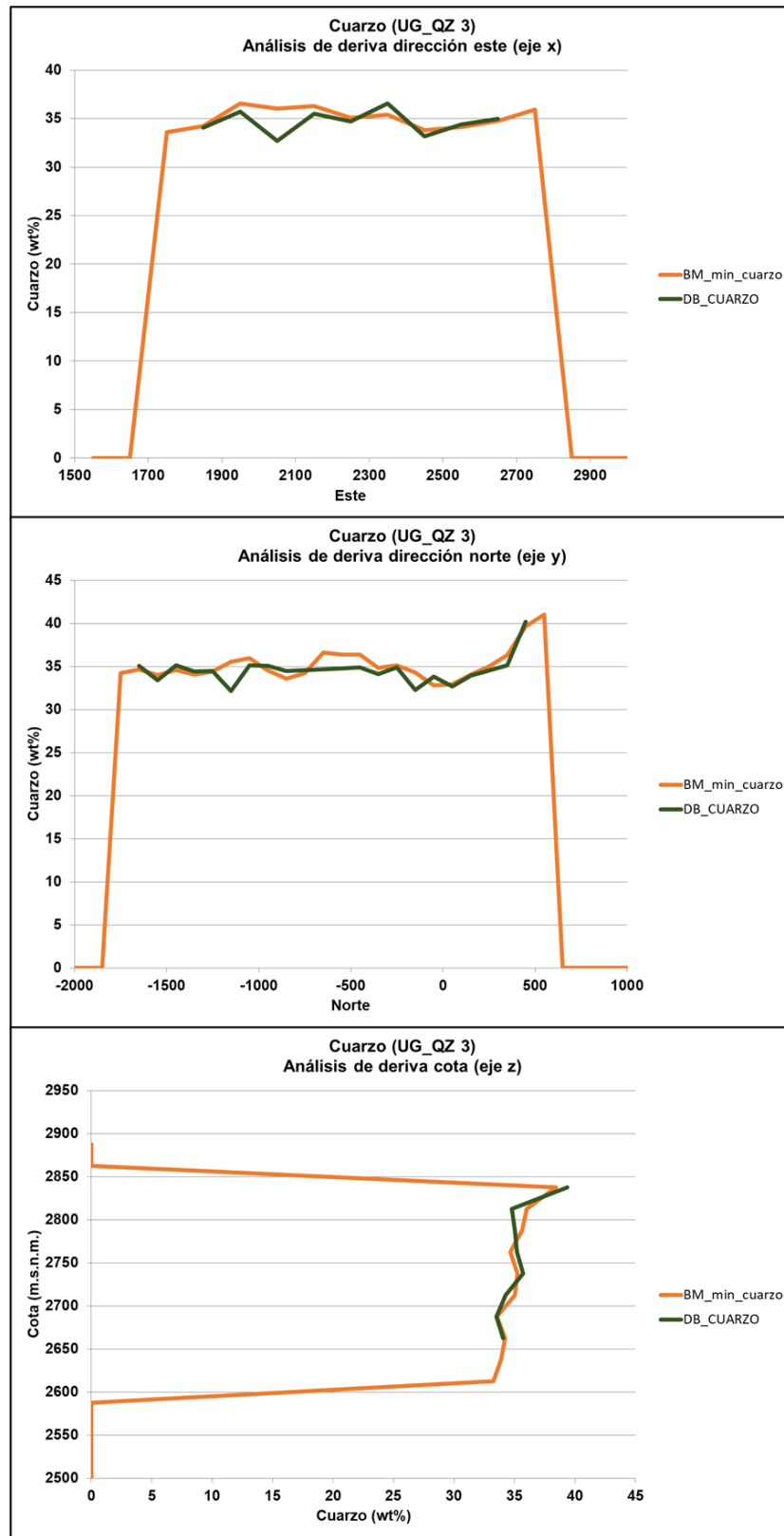


Figura 9.3. Análisis de deriva en la estimación de la UG de cuarzo 3 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_cuarzo” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_CUARZO” a la base de datos.

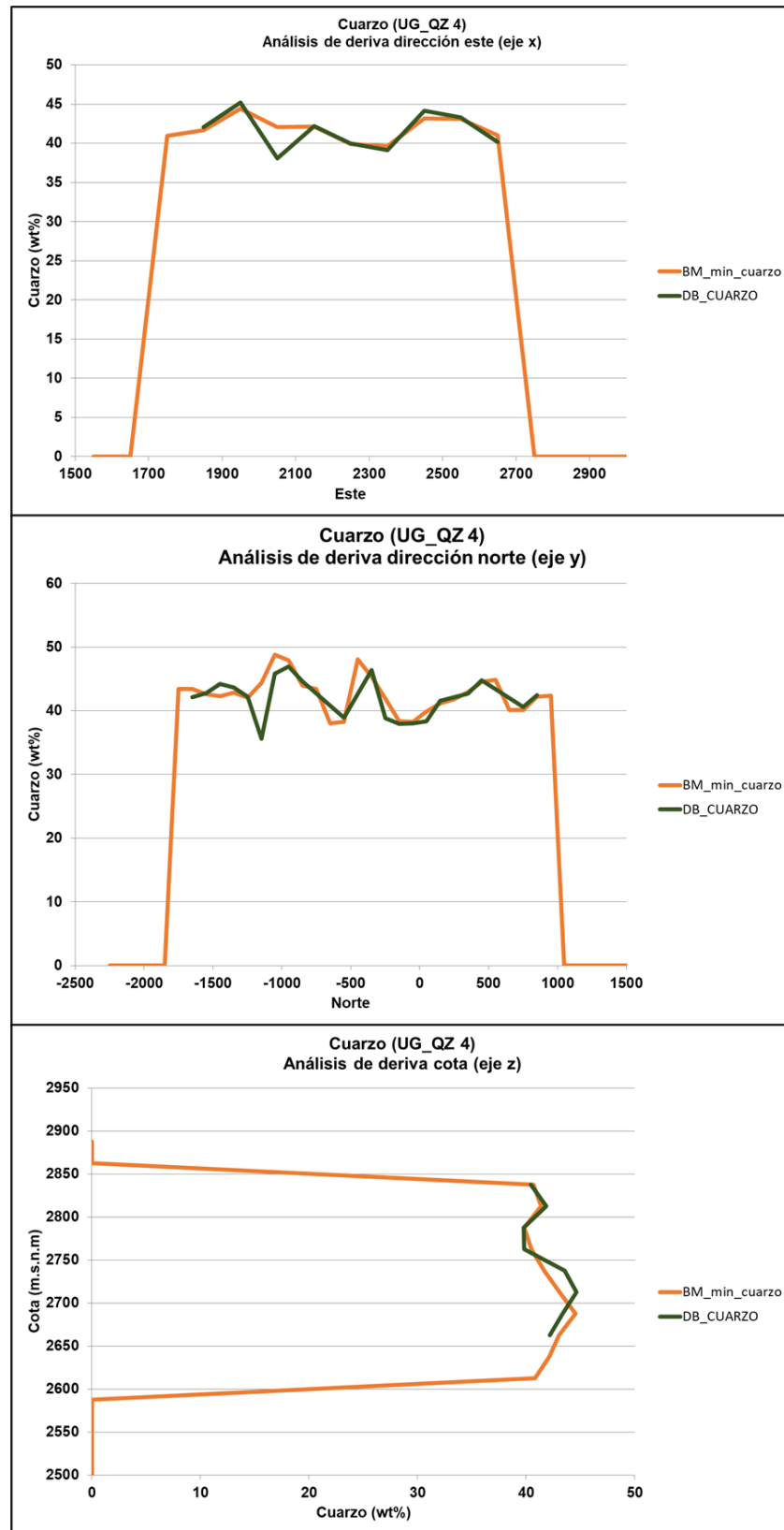


Figura 9.4. Análisis de deriva en la estimación de la UG de cuarzo 4 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_cuarzo” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_CUARZO” a la base de datos.

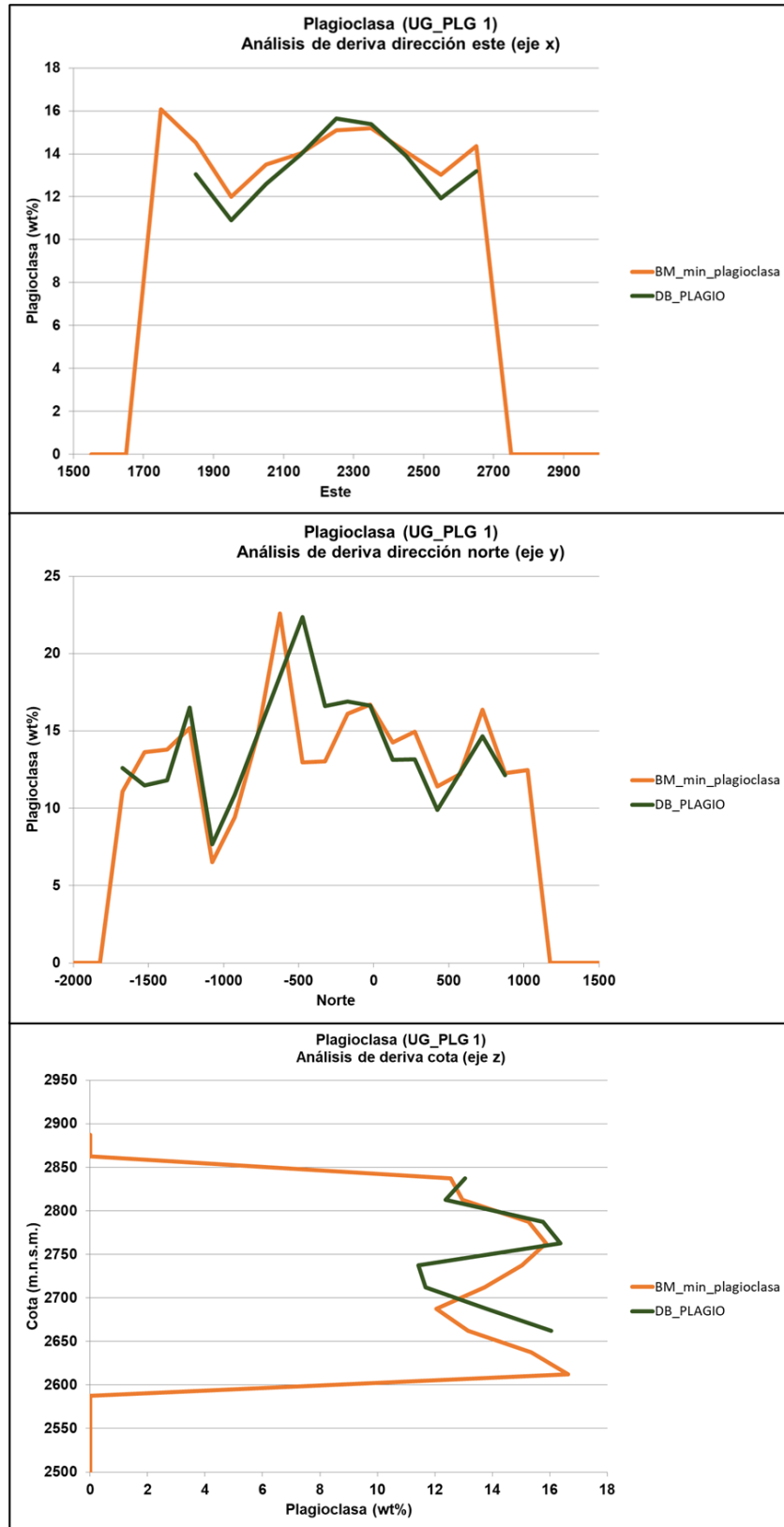


Figura 9.5. Análisis de deriva en la estimación de la UG de plagioclasa 1 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_plagioclasa” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_PLAGIO” a la base de datos.

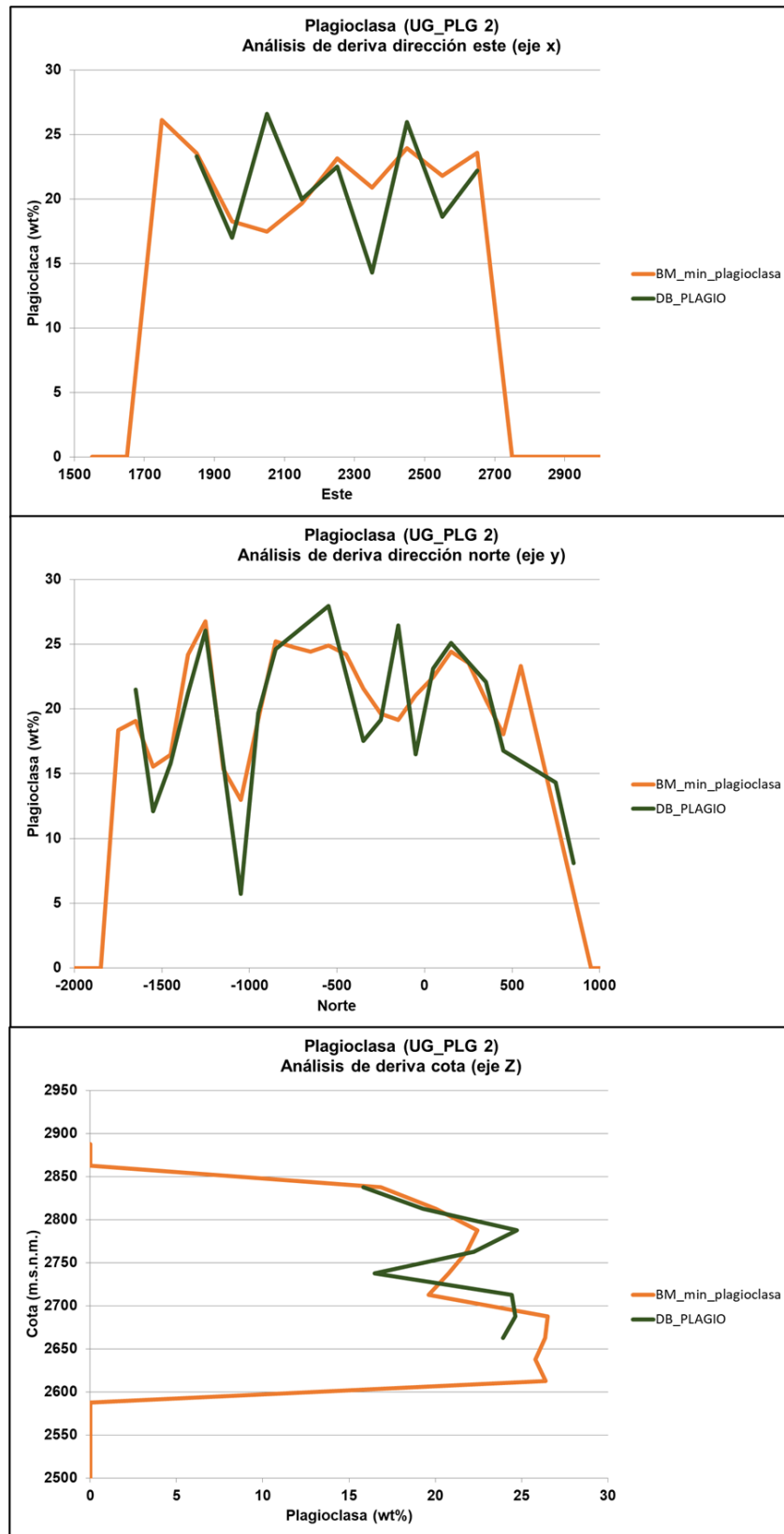


Figura 9.6. Análisis de deriva en la estimación de la UG de plagioclasa 2 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_plagioclasa” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_PLAGIO” a la base de datos.

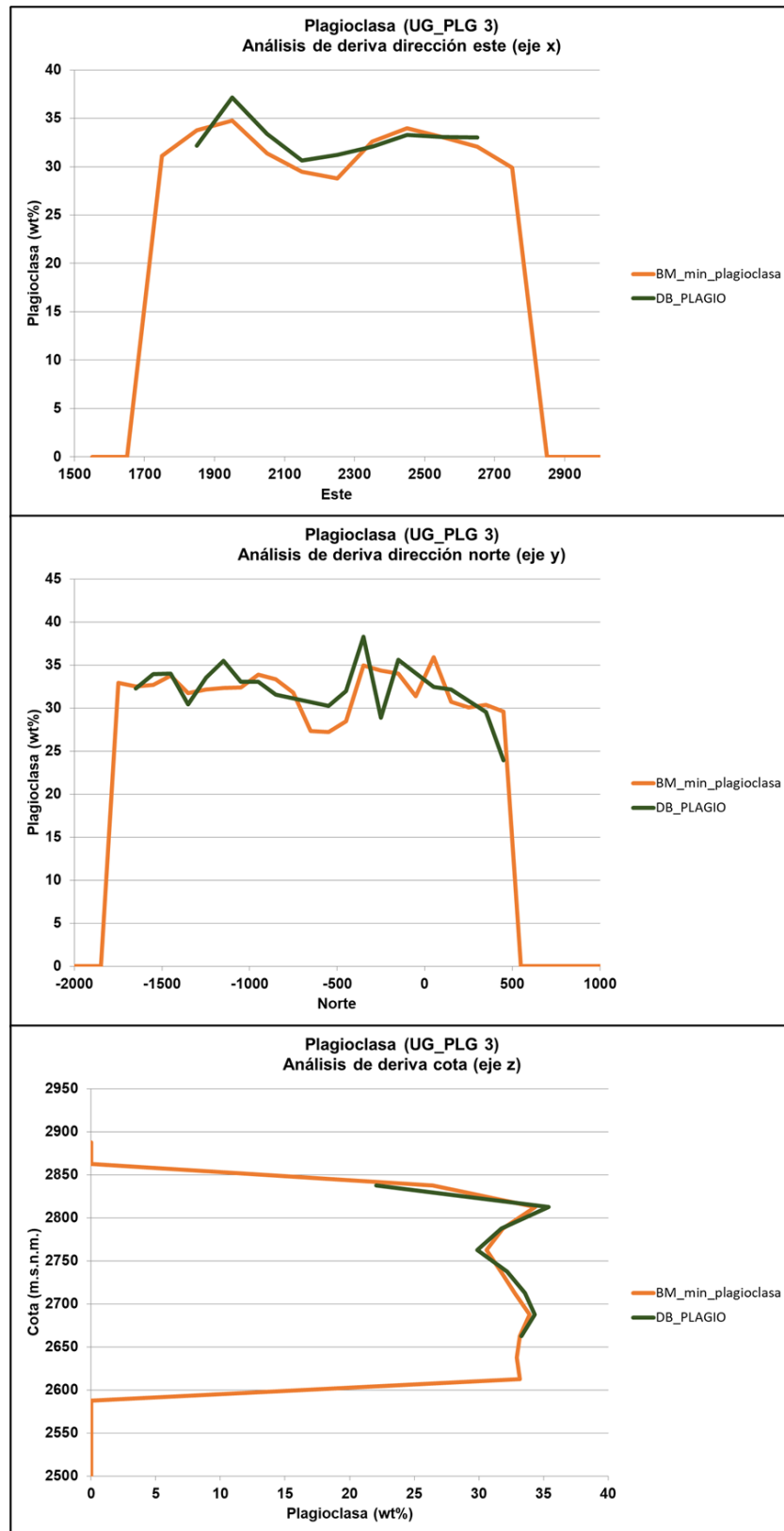


Figura 9.7. Análisis de deriva en la estimación de la UG de plagioclasa 3 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_plagioclasa” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_PLAGIO” a la base de datos.

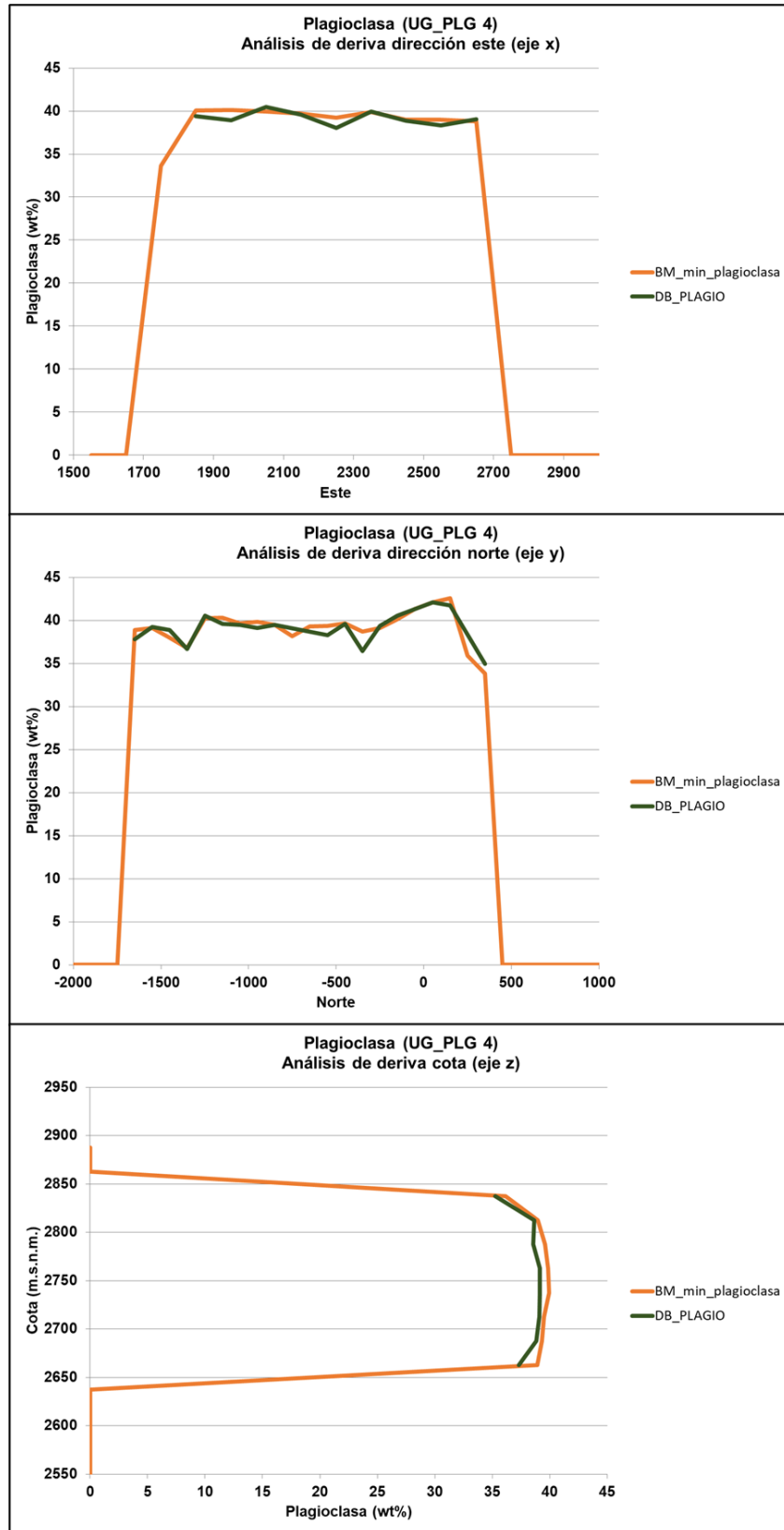


Figura 9.8. Análisis de deriva en la estimación de la UG de plagioclasa 4 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_plagioclasa” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_PLAGIO” a la base de datos.

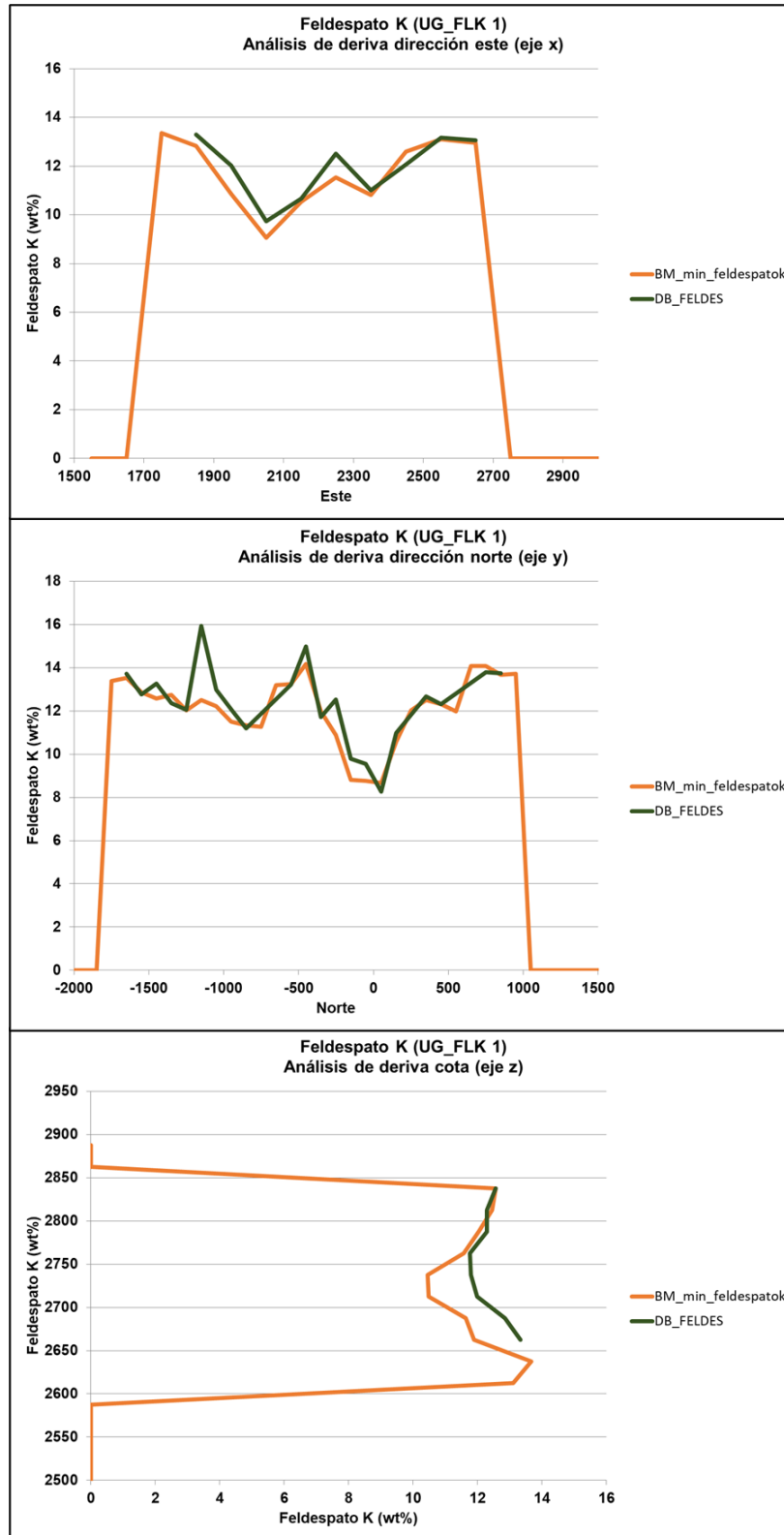


Figura 9.9. Análisis de deriva en la estimación de la UG de feldespatos K 1 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_feldespatok” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_FELDES” a la base de datos.

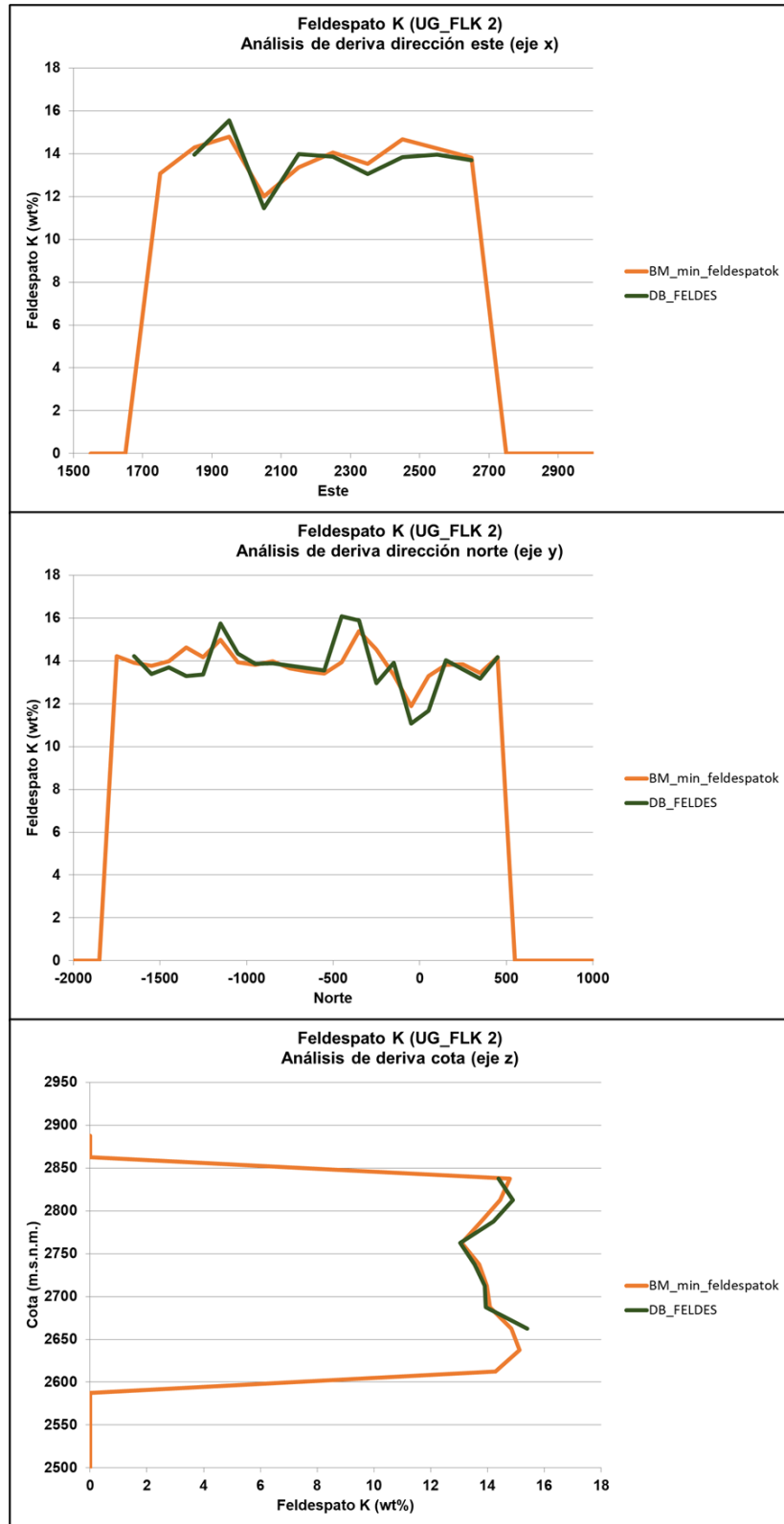


Figura 9.10. Análisis de deriva en la estimación de la UG de feldespatato K 2 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_feldespatok” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_FELDES” a la base de datos.

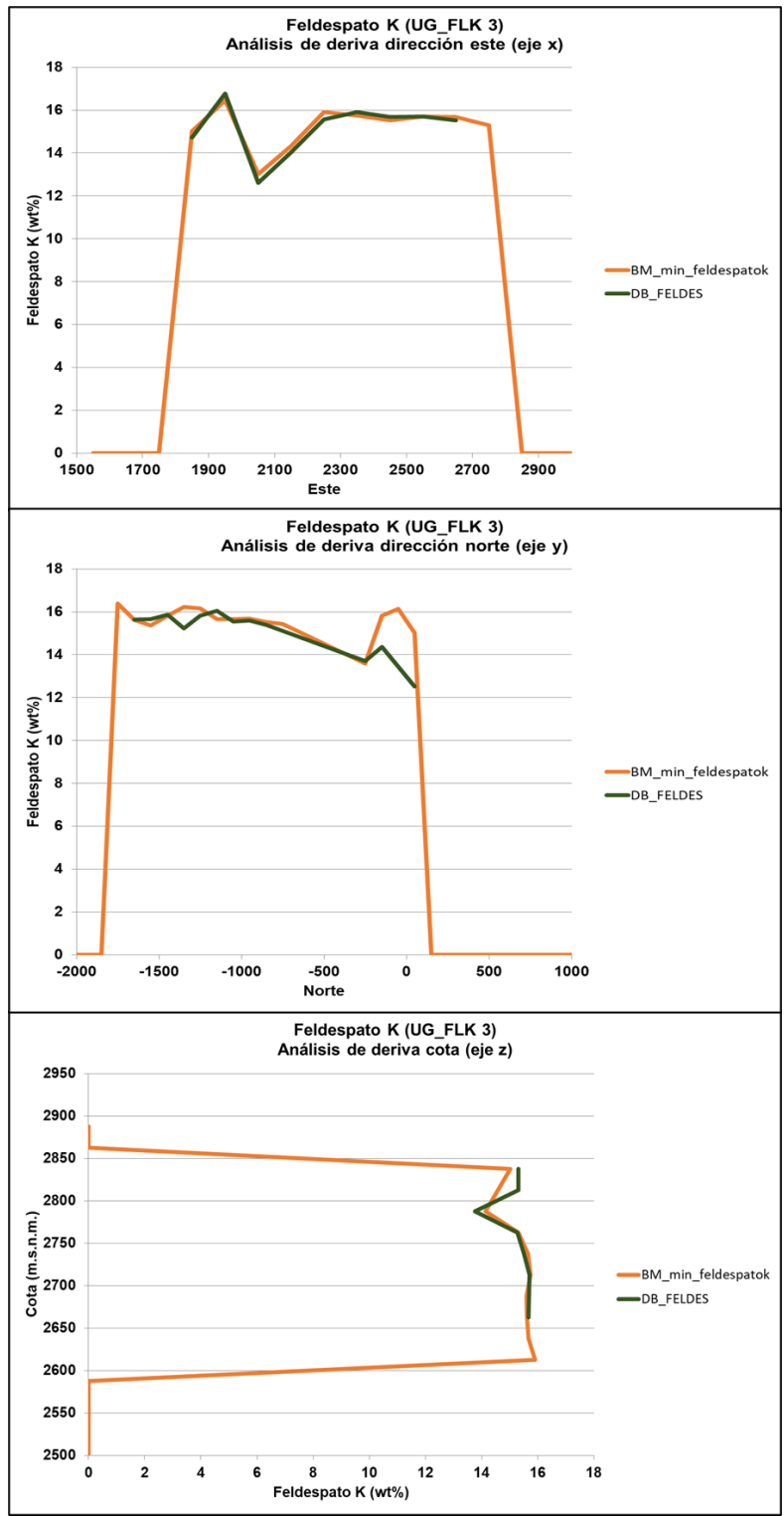


Figura 9.11. Análisis de deriva en la estimación de la UG de feldespatos K 3 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_feldespatok” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_FELDES” a la base de datos.

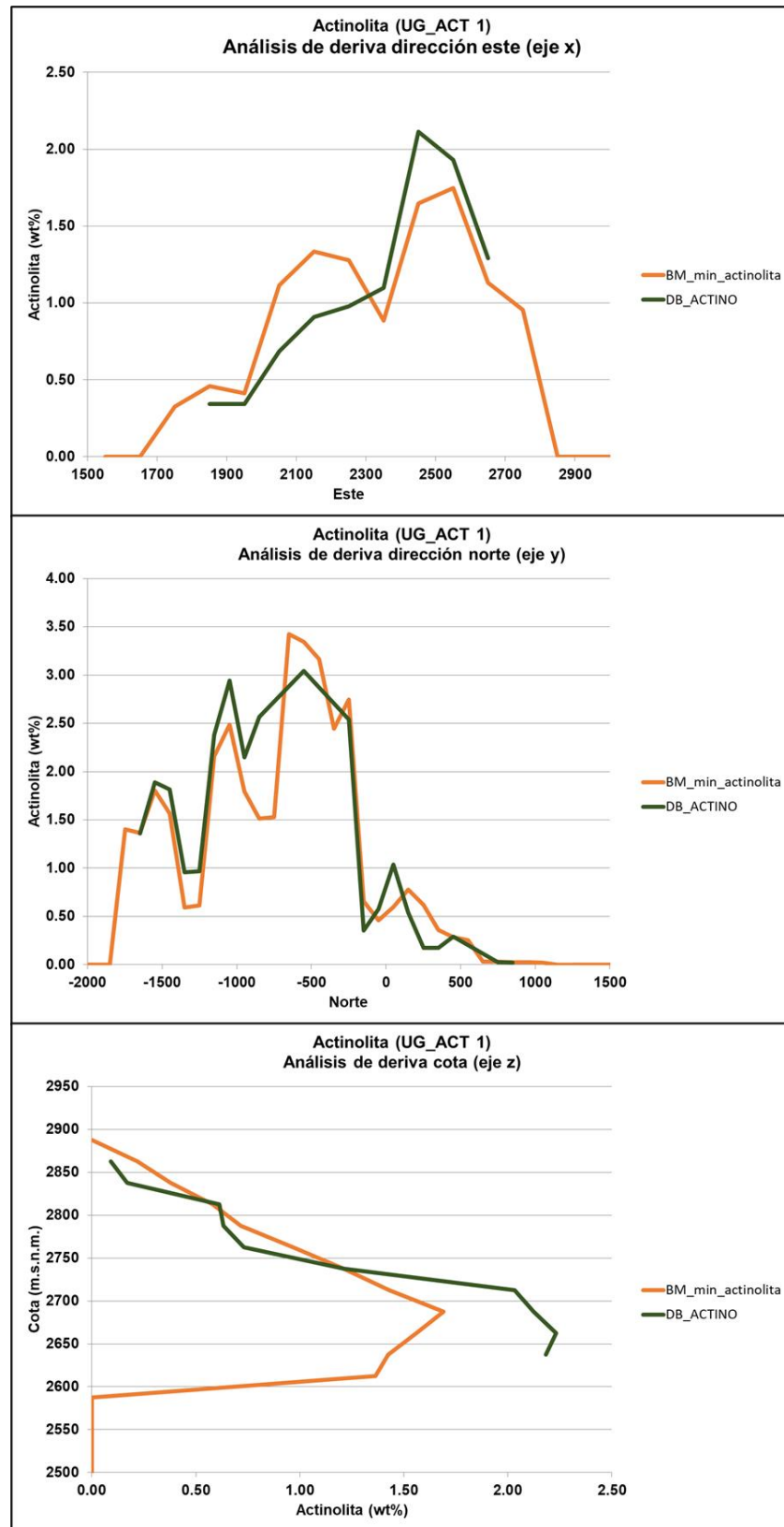


Figura 9.12. Análisis de deriva en la estimación de la UG de actinolita 1 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_actinolita” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_ACTINO” a la base de datos.

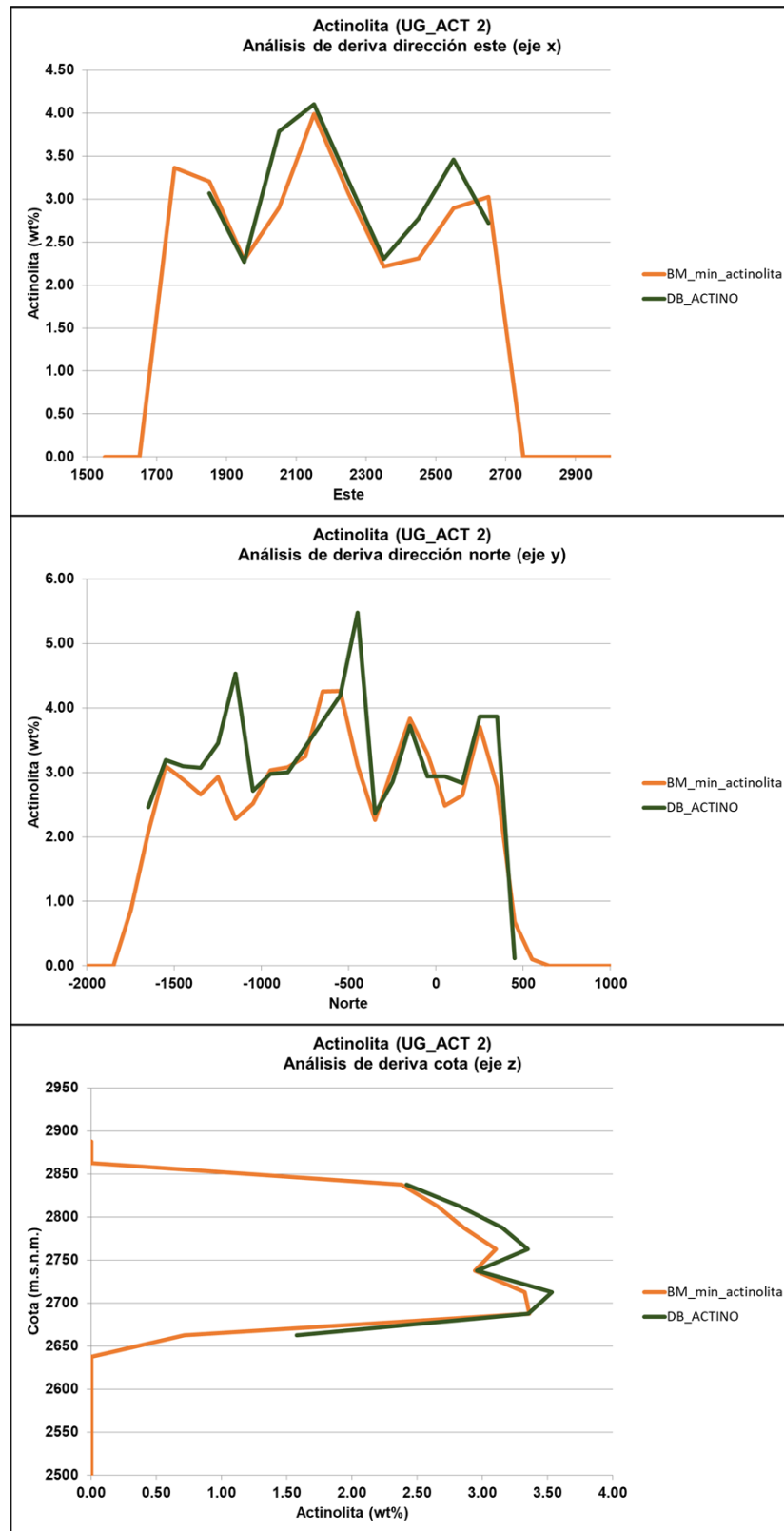


Figura 9.13. Análisis de deriva en la estimación de la UG de actinolita 2 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_actinolita” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_ACTINO” a la base de datos.

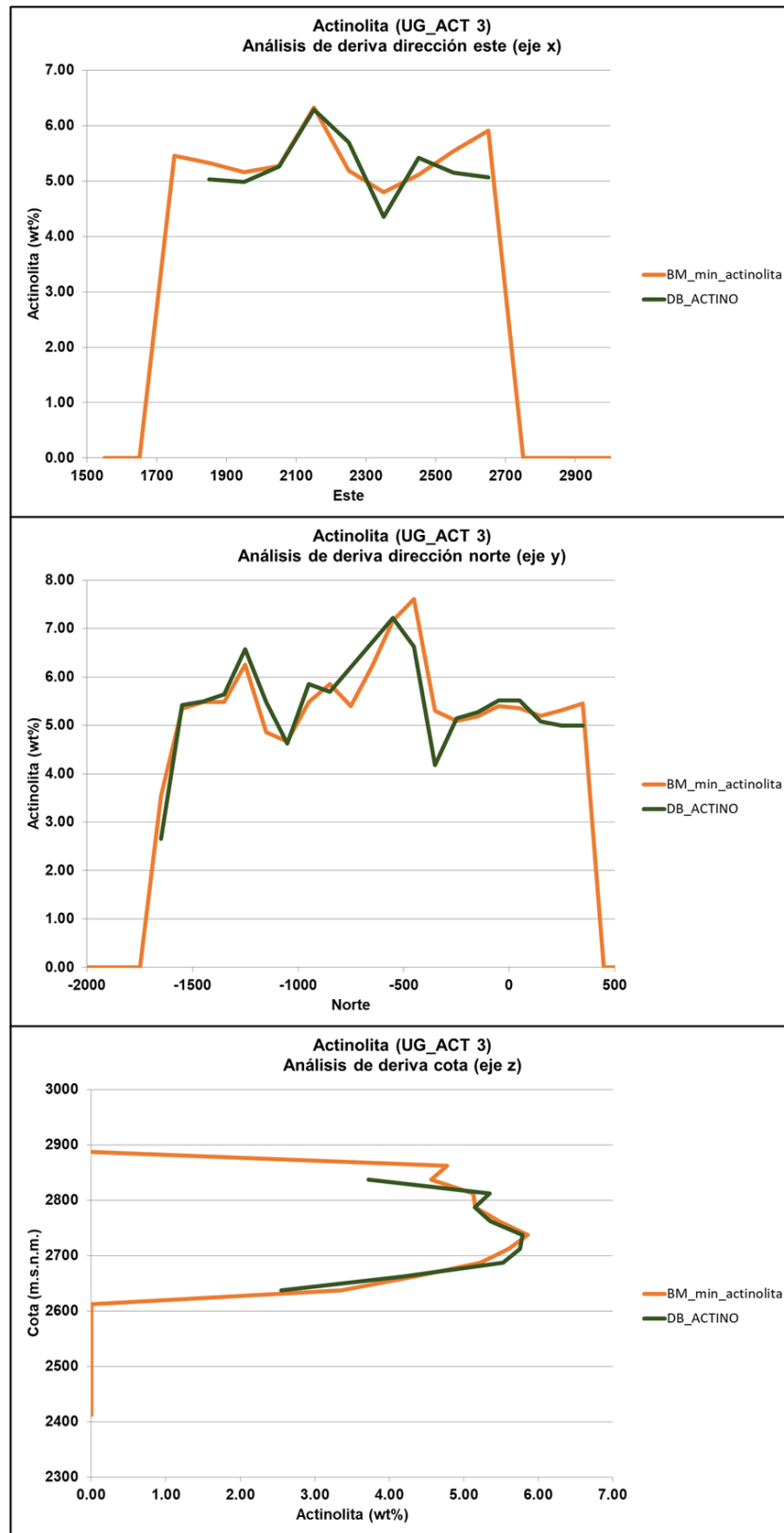


Figura 9.14. Análisis de deriva en la estimación de la UG de actinolita 3 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_actinolita” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_ACTINO” a la base de datos.

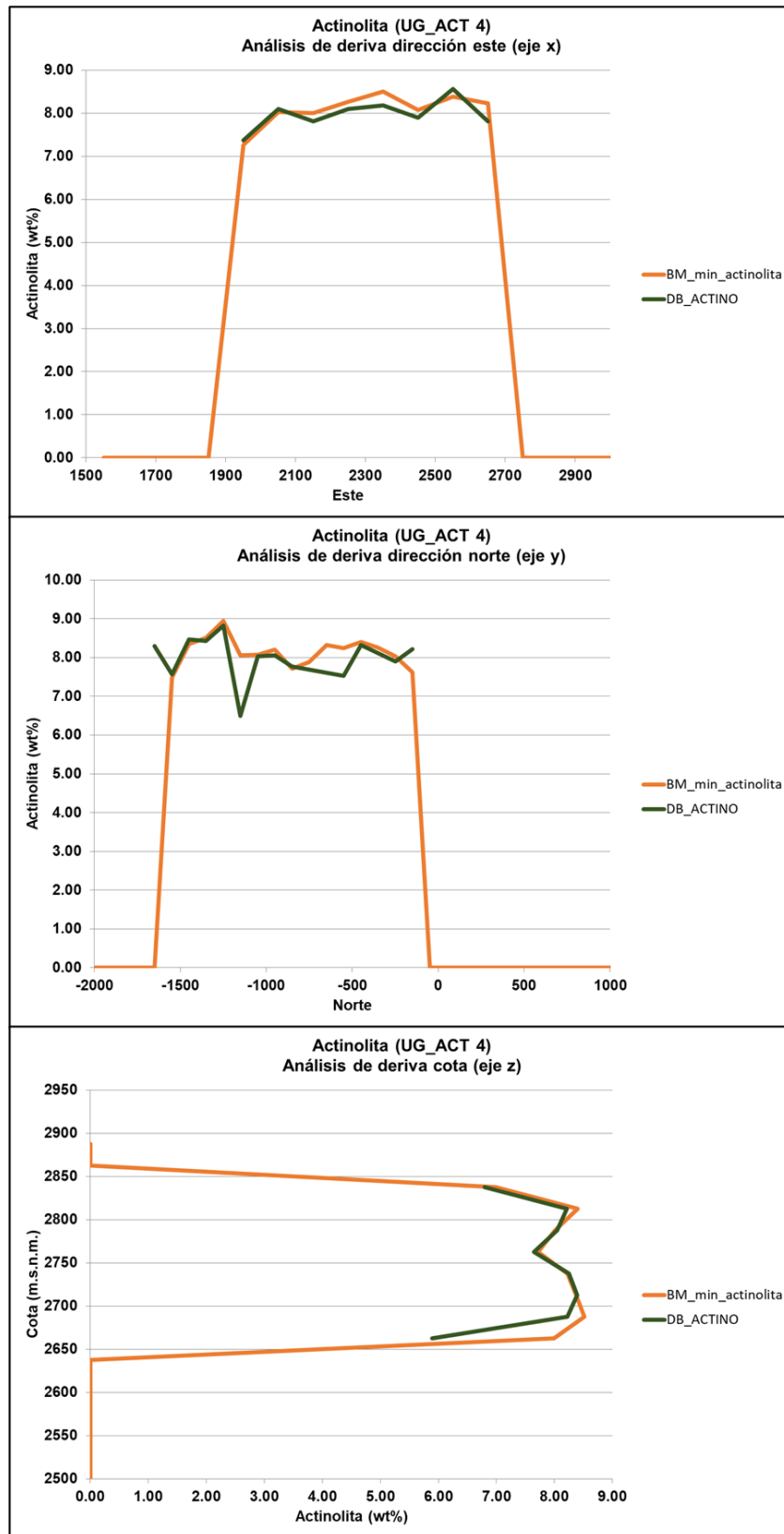


Figura 9.15. Análisis de deriva en la estimación de la UG de actinolita 4 en coordenadas este, norte y cota. “BM_min_actinolita” corresponde al modelo de bloques, mientras que “DB_ACTINO” a la base de datos.

Tabla 9.2. Análisis modal TESCAN de muestras de pilas post-lixiviación. Los valores se muestran en porcentaje.

<i>Composición mineralógica</i>										
<i>Modal Full / Sample</i>	<i>PILA NORTE 40 33N 29/05/2024</i>	<i>PILA NORTE 40 33S 29/05/2024</i>	<i>PILA NORTE 40 35C 30/05/2024</i>	<i>PILA NORTE 40 35S 30/05/2024</i>	<i>PILA NORTE 40 36N 31/05/2024</i>	<i>PILA NORTE 40 36C 31/05/2024</i>	<i>PILA NORTE 40 36S 31/05/2024</i>	<i>PILA NORTE 40 37N 01/06/2024</i>	<i>PILA NORTE 40 37C 01/06/2024</i>	<i>PILA NORTE 40 37S 01/06/2024</i>
Quartz	30.881	30.090	31.277	29.566	27.677	30.873	31.601	34.157	30.556	27.601
Plagioclase	30.687	27.295	29.433	28.097	28.204	26.074	25.847	23.311	25.548	29.192
Muscovite/sericite	14.225	11.140	12.152	11.932	12.892	11.678	13.514	15.363	12.959	13.279
K-Feldespar	10.441	10.807	9.714	10.887	10.136	10.993	10.788	11.920	11.134	9.755
Amphibole	4.547	7.078	5.712	6.018	6.168	6.338	6.194	4.449	7.063	7.125
Chlorites	1.658	3.468	2.611	3.407	3.648	4.399	3.536	2.666	3.957	2.951
Epidote	1.627	3.028	2.691	3.003	3.083	4.037	3.311	1.599	2.821	3.312
Fe-Oxides	2.192	2.238	1.235	1.947	3.380	1.298	1.582	2.220	1.611	1.959
Biotite	0.684	0.613	1.589	1.680	1.242	1.031	0.487	0.602	0.676	0.980
Kaolinite	0.651	0.536	0.902	0.683	0.855	0.485	0.558	0.914	0.828	1.067
Alunite	0.630	0.346	0.515	0.357	0.492	0.446	0.479	0.569	0.472	0.364
Tourmaline	0.280	0.626	0.444	0.412	0.282	0.612	0.404	0.213	0.336	0.532
Ilmenite	0.156	0.577	0.156	0.204	0.341	0.370	0.307	0.179	0.298	0.126
Chrysocolla	0.276	0.280	0.222	0.223	0.276	0.205	0.212	0.327	0.221	0.173
Jarosite	0.180	0.085	0.463	0.221	0.182	0.227	0.184	0.240	0.153	0.138
Pyroxene	0.144	0.494	0.109	0.080	0.191	0.216	0.075	0.057	0.398	0.105
Titanite	0.112	0.142	0.139	0.482	0.140	0.126	0.169	0.192	0.150	0.120
Other Clays	0.166	0.104	0.069	0.089	0.120	0.124	0.094	0.152	0.149	0.169
Cu-bearing Fe Oxide	0.005	0.181	0.148	0.130	0.194	0.033	0.183	0.010	0.201	0.176
Pyrite	0.083	0.063	0.018	0.109	0.006	0.047	0.034	0.503	0.016	0.007
Titanomagnetite	0.063	0.060	0.014	0.081	0.051	0.061	0.043	0.044	0.002	0.444
Apatite	0.049	0.039	0.110	0.048	0.176	0.040	0.133	0.045	0.160	0.033
Cu-bearing Clay	0.064	0.088	0.078	0.084	0.064	0.058	0.096	0.073	0.109	0.045
Rutile	0.072	0.052	0.062	0.093	0.064	0.070	0.062	0.049	0.059	0.055
Chlorite Cu	0.004	0.359	0.023	0.028	0.016	0.013	0.015	0.010	0.006	0.154
Chalcocite/Digenite	0.002	0.000	0.045	0.055	0.000	0.067	0.041	0.079	0.053	0.000
Pitch(Cu)	0.005	0.157	0.025	0.001	0.000	0.003	0.002	0.000	0.000	0.002
Pseudomalachite	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.016	0.000	0.088
Chalcopyrite	0.075	0.002	0.002	0.000	0.001	0.004	0.000	0.000	0.000	0.001
others	0.043	0.053	0.041	0.081	0.121	0.076	0.049	0.043	0.067	0.047
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Humedad	10.2	12	11.3	11.7	11	11.1	11.1	10	11.2	11.7

Tabla 9.3. Análisis FRX de muestras de pilas post-lixiviación. Los valores se muestran en porcentaje.

ID MUESTRA	Humedad	Si (%)	Al (%)	Fe (%)	Ca (%)	Cu (%)	S (%)	Mg (%)	Na (%)	K (%)	Ti (%)	Mn (%)	P (%)	Mo (%)	Zn (%)	As (%)	Pb (%)	Cl (%)	I (%)	Ag (%)	Ba (%)
PILAR NORTE 40 33N 29/04/2024	10.20	25.95	7.47	3.69	1.74	0.16	1.70	1.04	1.55	2.67	0.26	0.07	0.05	0.0103	0.0490	0.0212	<LOD	0.05	<LOD	<LOD	0.08
PILAR NORTE 40 36N 31/05/2024	11.00	25.36	7.80	4.35	2.07	0.16	1.54	1.30	1.69	2.35	0.32	0.08	0.05	0.0071	0.0514	0.0197	<LOD	0.04	<LOD	<LOD	0.08
PILAR NORTE 40 37N 01/06/2024	10.00	25.78	7.49	3.50	1.47	0.21	1.81	1.00	1.49	2.80	0.26	0.07	0.06	0.0096	0.0530	0.0204	0.0065	0.04	<LOD	<LOD	0.06
PILAR NORTE 40 35C 30/05/2024	11.30	25.51	7.79	3.60	1.98	0.17	1.69	1.24	1.53	2.56	0.31	0.08	0.05	0.0077	0.0538	0.0182	0.0065	0.03	<LOD	<LOD	0.08
PILAR NORTE 40 36C 31/05/2024	11.10	25.85	7.79	3.65	1.90	0.15	1.77	1.19	1.71	2.47	0.32	0.07	0.05	0.0077	0.0554	0.0235	<LOD	0.05	<LOD	<LOD	0.07
PILAR NORTE 40 37C 01/06/2024	11.20	25.62	7.74	3.73	2.01	0.16	1.68	1.32	1.59	2.46	0.32	0.08	0.04	0.0077	0.0546	0.0227	<LOD	0.05	<LOD	<LOD	0.05
PILAR NORTE 40 33S 29/05/2024	12.00	25.57	7.84	4.39	2.07	0.18	1.68	1.31	1.67	2.35	0.33	0.08	0.05	0.0064	0.0570	0.0235	<LOD	0.04	<LOD	<LOD	0.09
PILAR NORTE 40 35S 30/05/2024	11.70	24.93	7.54	4.13	2.02	0.18	1.76	1.20	1.61	2.42	0.31	0.08	0.06	0.0064	0.0554	0.0197	<LOD	0.05	<LOD	<LOD	0.06
PILAR NORTE 40 36S 31/05/2024	11.10	25.69	7.64	3.84	1.88	0.15	1.52	1.21	1.70	2.45	0.30	0.07	0.05	0.0077	0.0530	0.0220	<LOD	0.05	<LOD	<LOD	0.07
PILAR NORTE 40 37S 01/06/2024	11.70	25.62	7.87	4.20	2.17	0.16	1.65	1.41	1.61	2.35	0.30	0.08	0.05	0.0071	0.0570	0.0189	<LOD	0.04	<LOD	<LOD	0.07

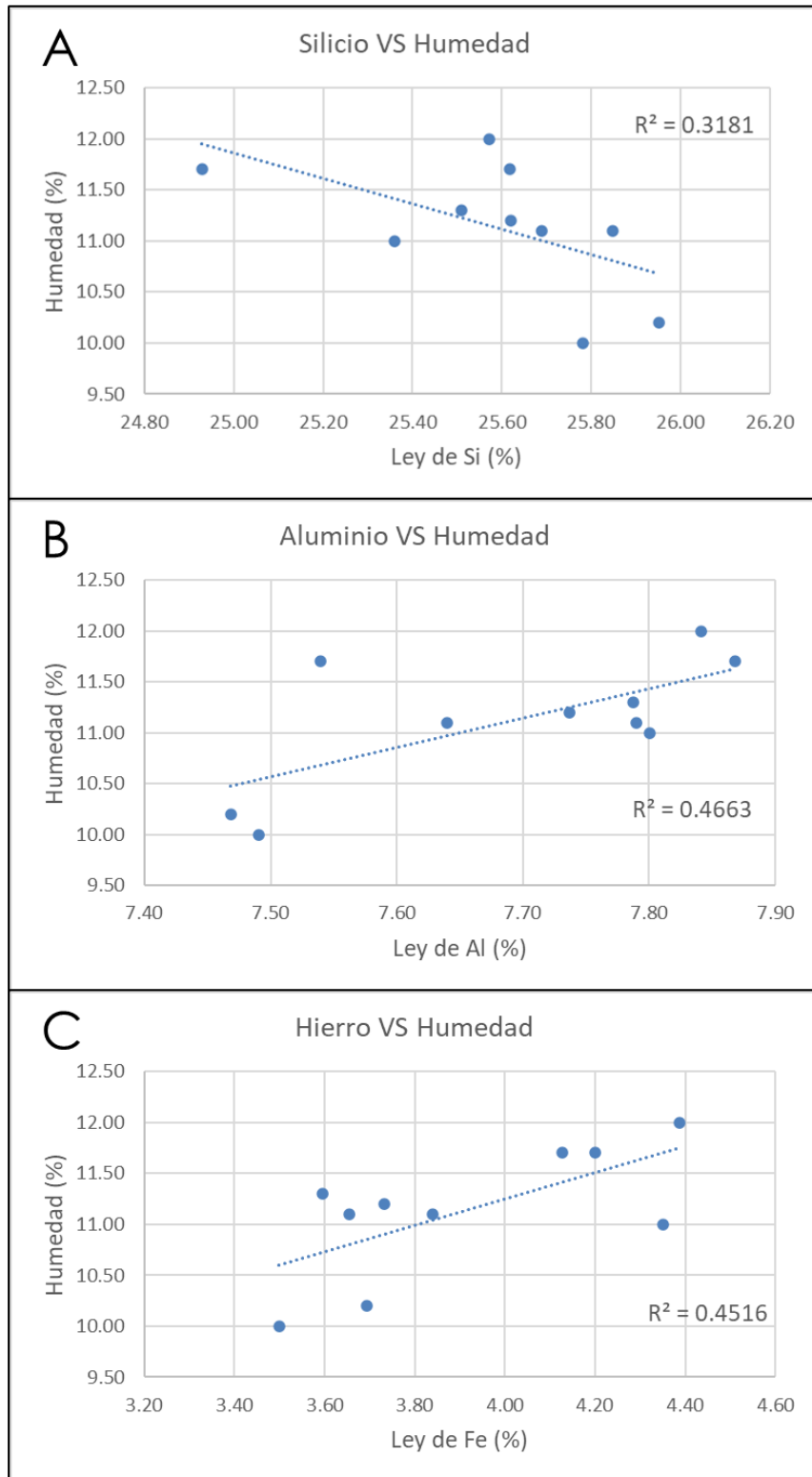


Figura 9.16. Gráficos de dispersión que muestran la relación entre las leyes de Si, Al y Fe y los niveles de humedad en las pilas post-lixiviación. (A) corresponde al silicio. (B) corresponde al aluminio. (C) corresponde al hierro. El R^2 representa el coeficiente de correlación. Elaborado en Excel.

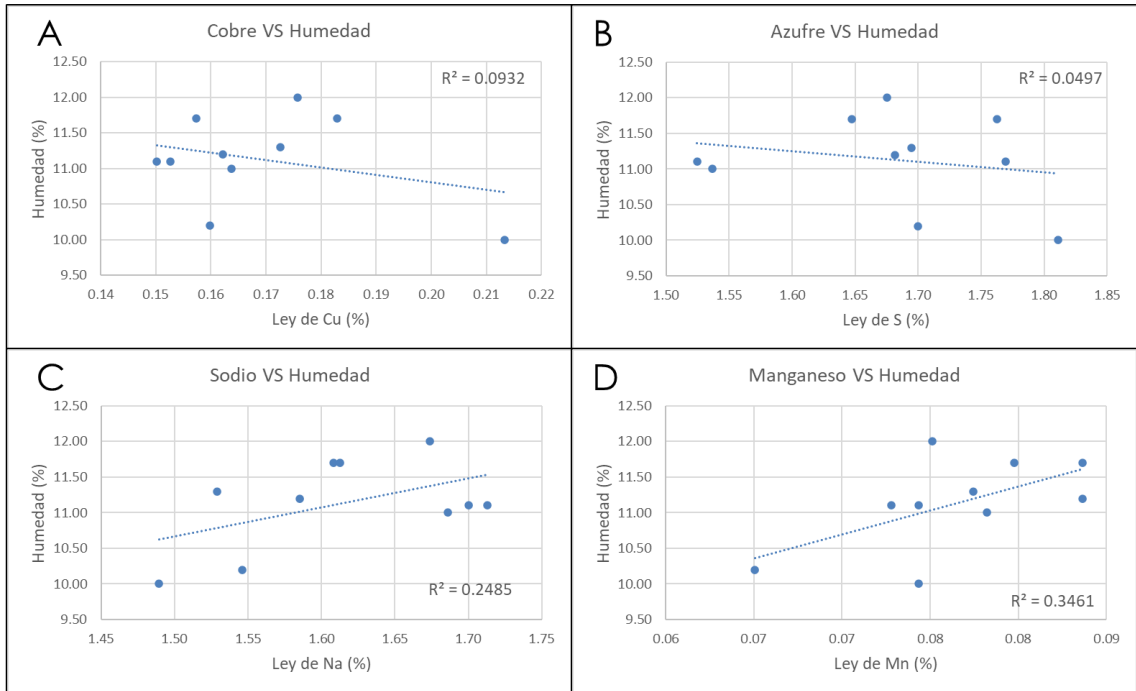


Figura 9.17. Gráficos de dispersión que muestran la relación entre las leyes de Cu, S, Na y Mn y los niveles de humedad en las pilas post-lixiviación. (A) corresponde al cobre. (B) corresponde al azufre. (C) corresponde al sodio. (D) corresponde al manganeso. El R^2 representa el coeficiente de correlación. Elaborado en Excel.