



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



**DEFINICIÓN DE UNIDADES GEOMETALÚRGICAS
PARA EL CONSUMO DE ÁCIDO Y EXTRACCIÓN DE
COBRE PROYECTO POLO SUR, REGIÓN DE
ANTOFAGASTA, CHILE.**

Memoria para optar al Título de Geólogo.

Vicente Tomás Zerene Riquelme

Profesor Patrocinante: Dr. Óscar Jeréz Riveros
Profesional Guía: Sra. Xiomara Rubio Pereira
Profesores Comisión: Dra. Fernanda Álvarez Amado
MSc. Abraham González Martínez

Concepción, 2023.

*A mis madres, padre
y hermanos*

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	1
1.1.1. OBJETIVO GENERAL	1
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
1.2. ALCANCES	2
1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS	3
1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO	4
1.5. TRABAJOS ANTERIORES	4
1.6. AGRADECIMIENTOS	5
2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	7
2.1. ROCAS ESTRATIFICADAS	7
2.1.1. TRIÁSICO SUPERIOR-JURÁSICO INFERIOR Y SUPERIOR	7
2.1.1.1. Estratos Las Lomas.....	7
2.1.1.2. Rocas del Jurásico Inferior.....	7
2.1.1.3. Grupo Caracoles.....	7
2.1.1.4. Formación Llanura Colorada	8
2.1.2. CRETÁCICO SUPERIOR	9
2.1.2.1. Formación Quebrada Mala.....	9
2.1.3. PALEOCENO-EOCENO INFERIOR	9
2.1.3.1. Formación Cinchado.....	9
2.1.4. EOCENO MEDIO	10
2.1.4.1. Formación Esperanza	10
2.1.5. OLIGOCENO-MIOCENO	10
2.1.5.1. Formación El Tesoro.....	10
2.1.5.2. Formación Los Arrieros.....	11

2.1.6. MIOCENO SUPERIOR-PLIOCENO	11
2.2. ROCAS INTRUSIVAS	11
2.2.1. PALEOZOICO	11
2.2.2. TRIÁSICO SUPERIOR-JURÁSICO INFERIOR	11
2.2.3. CRETÁCICO INFERIOR	12
2.2.4. CRETÁCICO SUPERIOR	12
2.2.5. PALEOCENO-EOCENO INFERIOR	12
2.2.6. EOCENO MEDIO	13
2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	13
3. GEOLOGÍA LOCAL	16
3.1. UNIDADES LITOLÓGICAS	17
3.1.1. UNIDADES ESTRATIFICADAS	17
3.1.1.1. Volcanitas Andesíticas (Formación Cinchado).....	17
3.1.1.2. Volcanitas Riolíticas (Formación Cinchado).....	18
3.1.1.3. Gravas (Formación El Tesoro).....	19
3.1.2. UNIDADES INTRUSIVAS	19
3.1.2.1 Complejo Intrusivo Polo Sur	20
I) Stock Diorítico a Diorítico Cuarífero (42 a 44 Ma).....	20
II) Pórfido Granodiorítico a Dacítico Principal (42 a 41 Ma).....	20
III) Pórfidos Dacíticos Tardíos (41,75 a 43,0 Ma).....	21
IV) Brechas Ígneas e Hidrotermales (42,1 a 51,8 Ma).....	21
V) Brechas Freatomagmáticas.....	22
3.1.2.2. Complejo Intrusivo Sherezade.....	22
I) Diorita-Cuarzo Diorita.....	23
II) Pórfido Granodiorítico Sherezade (43 a 45 Ma).....	23
III) Pórfido Tonalítico.....	24
IV) Brechas Ígneas e Hidrotermales.....	24
3.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	24
3.3. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL	27

3.3.1. ALTERACIÓN POTÁSICA	30
3.3.1.1. Alteración Potásica Feldespática (KF).....	30
3.3.1.2. Alteración Potásica Biotítica (KBT).....	30
3.3.2. ALTERACIÓN SERICITA-CLORITA (SC)	31
3.3.3. ALTERACIÓN CUARZO-SERICITA (QS)	31
3.4. MINERALIZACIÓN	32
3.4.1. ZONA DE LIXIVIACIÓN-OXIDACIÓN	32
3.4.2. ZONA MIXTA	33
3.4.3. ZONA DE ENRIQUECIMIENTO SUPÉRGENO	33
3.4.4. ZONA PRIMARIA	34
4. CONTEXTO GEOMETALÚRGICO	35
4.1. LIXIVIACIÓN	35
4.1.1. CONSUMO DE ÁCIDO EN LA LIXIVIACIÓN.....	35
4.2. PROCESO HIDROMETALÚRGICO	36
4.3. MODELOS GEOMETALÚRGICOS	38
5. BASE DE DATOS	41
5.1. MAPEO GEOLÓGICO	41
5.1.1. LITOLOGÍAS.....	41
5.1.2. MINERALOGÍA.....	45
5.1.2.1. Óxidos de Cu.....	45
5.1.2.2. Sulfuros de Cu y Pirita.....	46
5.1.2.3. Otros Sulfuros.....	48
5.1.2.4. Óxidos de Fe.....	48
5.1.2.5. Minerales de Ganga.....	48
5.1.3. ALTERACIONES.....	48
5.1.4. ZONAS MINERALES.....	51
5.1.5. ESTRUCTURAS.....	51
5.2. CARACTERIZACIÓN GEOMETALÚRGICA	53
5.2.1. QEMSCAN.....	53

5.2.2. DRX.....	56
5.2.3. PRUEBAS ISO PH.....	56
5.2.4. PRUEBAS COLUMNAS UNITARIAS.....	57
6. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	58
6.1. ANÁLISIS LEYES DE COBRE.....	58
6.1.1. LEYES DE COBRE POR LITOLOGÍAS.....	58
6.1.2. LEYES DE COBRE POR ALTERACIONES.....	59
6.1.3. LEYES DE COBRE POR ZONAS MINERALES.....	60
6.2 VALIDACIÓN BASE DE DATOS.....	61
6.2.1 VALIDACIÓN MAPEO GEOLÓGICO.....	61
6.2.1.1. Zonas de alteración.....	61
6.2.1.2. Zonas Minerales.....	67
6.3. RESULTADO DE COLUMNAS UNITARIAS Y BOTELLAS ISO PH.....	73
6.3.1. COLUMNAS UNITARIAS.....	73
6.3.1.1. Resultados por Alteraciones.....	73
6.3.1.2. Resultados por Litologías.....	75
6.3.1.3. Resultados por Zonas Minerales.....	77
6.3.2. BOTELLAS ISO PH.....	79
6.3.2.1. Resultados por Alteraciones.....	79
6.3.2.2. Resultados por Litologías.....	80
6.3.2.3. Resultados por Zonas Minerales.....	81
7. UGM DE CONSUMO DE ÁCIDO.....	84
7.1. DEFINICION DE UNIDADES.....	84
7.2. CARACTERIZACIÓN DE UNIDADES.....	89
7.3. COMPORTAMIENTO DE LA GANGA EN LA LIXIVIACIÓN.....	93
7.4. MODELAMIENTO DE UGM DE CONSUMO.....	96
8. UGM DE EXTRACCIÓN DE COBRE.....	99
8.1. DEFINICIÓN DE UNIDADES.....	102
8.2. CARACTERIZACIÓN DE UNIDADES.....	103

8.2.1. ÓXIDOS VERDES-BROCHANTITA (OXV-BR).....	103
8.2.2. ÓXIDOS VERDES-ATACAMITA (OXV-AT).....	105
8.2.3. ÓXIDOS NEGROS (OXN).....	106
8.2.4. ÓXIDOS NEGROS FILOSILICATOS (OXN-PHY).....	107
8.2.5. SULFUROS SECUNDARIOS-MIXTOS (SEC-MX).....	109
8.2.6. SULFUROS PRIMARIOS (PRI).....	111
8.2.7. CONSUMO DE ÁCIDO POR UGM DE EXTRACCIÓN.....	113
8.3. DIFERENCIAS ENTRE POLO SUR Y SHEREZADE.....	114
8.3.1. ÓXIDOS VERDES-BROCHANTITA (OXV-BR).....	114
8.3.2. ÓXIDOS VERDES-ATACAMITA (OXV-AT).....	115
8.3.3. ÓXIDOS NEGROS FILOSILICATOS (OXN-PHY).....	116
8.3.4. SULFUROS SECUNDARIOS Y MIXTOS (SEC-MX).....	117
8.4. MODELAMIENTO DE UGM DE EXTRACCIÓN.....	119
8.4.1. DIVISIÓN ENTRE LAS UNIDADES OXV-BR Y OXV-AT.....	120
8.4.2. DIVISIÓN ENTRE LAS UNIDADES OXN Y OXN-PHY.....	121
8.4.3. MODELO COMPLETO.....	122
8.5. RELACIÓN ENTRE LITOLOGÍAS Y UGM DE EXTRACCIÓN.....	124
8.6. VALIDACIÓN DEL USO DE BOTELLAS ISO-PH.....	126
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	128
10. REFERENCIAS.....	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación Proyecto Polo Sur.....	3
2. 1. Mapa geológico regional.....	8
2. 2. Mapa estructural del Distrito Minero Centinela.....	14
3. 1. Mapa geológico del Proyecto Polo Sur.....	16
3. 2. Superficies 3D de estructuras N40°-60°E.....	25
3. 3. Superficies 3D de estructuras N80°E-N80°W.....	26
3. 4. Superficies 3D de estructuras N30°-60°W.....	27
3. 5. Modelo de alteración de Polo Sur.....	28

3. 6.	Modelo de alteración de Sherezade.....	29
3. 7.	Modelo en planta Polo Sur/Sherezade, cota 1850.....	29
4. 1.	Modelo 3D UGM Óxidos Verdes y Óxidos Negros.....	39
4. 2.	Modelo 3D UGM de sulfuros.....	40
5. 1.	Unidades litológicas del depósito Polo Sur.....	44
5. 2.	Unidades litológicas del depósito Sherezade.....	44
5. 3.	Gráficos de porcentajes relativos de óxidos de cobre del depósito Polo Sur.....	45
5. 4.	Gráficos de porcentajes relativos de óxidos de cobre del depósito Sherezade.....	46
5. 5.	Gráficos de porcentajes relativos de sulfuros de cobre del depósito Polo Sur.....	47
5. 6.	Gráficos de porcentajes relativos de sulfuros de cobre del depósito Sherezade.....	47
5. 7.	Matriz de alteración del <i>software</i> Xilab MAP.....	49
5. 8.	Alteraciones del depósito Polo Sur.....	50
5. 9.	Alteraciones del depósito Sherezade.....	50
5.10.	Zonas Minerales del depósito Polo Sur.....	52
5.11.	Zonas Minerales del depósito Sherezade.....	52
6. 1.	Leyes de CuT por litologías del depósito Polo Sur.....	58
6. 2.	Leyes de CuT por litologías del depósito Sherezade.....	59
6. 3.	Leyes de CuT por alteraciones del depósito Polo Sur.....	59
6. 4.	Leyes de CuT por alteraciones del depósito Sherezade.....	60
6. 5.	Leyes de CuT por zona mineral del depósito Polo Sur.....	60
6. 6.	Leyes de CuT por zona mineral del depósito Sherezade.....	61
6. 7.	Minerales de alteración mapeados por zona de alteración en porcentajes relativos para el depósito Polo Sur.....	62
6. 8.	Gráficos de frecuencia acumulada de mineralogía de alteración por zona de alteración para el depósito Polo Sur.....	62
6. 9.	Minerales de alteración mapeados por zona de alteración en porcentajes relativos para el depósito Sherezade.....	63
6.10.	Gráficos de frecuencia acumulada de mineralogía de alteración por zona de alteración para el depósito Sherezade.....	64
6.11.	Mineralogía de alteración QEMSCAN por zonas de alteración de Polo Sur.....	65
6.12.	Mineralogía de alteración QEMSCAN por zonas de alteración de Sherezade.....	65
6.13.	Mineralogía de alteración DRX por zonas de alteración de Polo Sur.....	66
6.14.	Mineralogía de alteración DRX por zonas de alteración de Sherezade.....	66
6.15.	Minerales de mena por zonas minerales en porcentajes relativos, depósito Polo Sur.....	68
6.16.	Gráficos de frecuencia acumulada de minerales de mena por zonas minerales en porcentajes relativos, depósito Polo Sur.....	68
6.17.	Minerales de mena por zonas minerales en porcentajes relativos, depósito Sherezade.....	69
6.18.	Gráficos de frecuencia acumulada de minerales de mena por zonas minerales en porcentajes relativos, depósito Sherezade.....	70
6.19.	Mineralogía de mena QEMSCAN por zonas minerales, depósito Polo Sur.....	70
6.20.	Mineralogía de mena QEMSCAN por zonas minerales, depósito Sherezade.....	71
6.21.	Mineralogía de mena DRX por zonas minerales, depósito Polo Sur.....	72
6.22.	Mineralogía de mena DRX por zonas minerales, depósito Sherezade.....	72
6.23.	Resultados por alteración para el depósito Polo Sur.....	74
6.24.	Resultados por alteración para el depósito Sherezade.....	74

6.25.	Resultados por litología para el depósito Polo Sur.....	75
6.26.	Resultados por litología para el depósito Sherezade.....	76
6.27.	Resultados por zonas minerales para el depósito Polo Sur.....	77
6.28.	Resultados por zonas minerales para el depósito Sherezade.....	78
6.29.	Resultados por alteración para el depósito Polo Sur.....	79
6.30.	Resultados por alteración para el depósito Sherezade.....	80
6.31.	Resultados por litología para el depósito Polo Sur.....	81
6.32.	Resultados por litología para el depósito Sherezade.....	82
6.33.	Resultados por zonas minerales para el depósito Polo Sur.....	82
6.34.	Resultados por zonas minerales para el depósito Sherezade.....	83
7. 1.	Comportamiento de la mineralogía QEMSCAN de alteración al CAN, depósito Polo Sur.....	85
7. 2.	Comportamiento de la mineralogía QEMSCAN de alteración al CAN, depósito Sherezade.....	86
7. 3.	Comportamiento de la mineralogía DRX de alteración al CAN, depósito Polo Sur.....	87
7. 4.	Comportamiento de la mineralogía DRX de alteración al CAN, depósito Sherezade.....	87
7. 5.	CAN (kg/t) por tipo de alteración.....	88
7. 6.	CAN (kg/t) por Unidad de Consumo.....	90
7. 7.	CAN por mineralogía de ganga QEMSCAN.....	91
7. 8.	CAN por mineralogía de ganga DRX.....	92
7. 9.	Mineralogía de ganga por Unidad de Consumo.....	93
7.10.	Serie de Bowen, con cinética de lixiviación.....	94
7.11.	Resultados experimentales de extracción de Cu y consumo de ácido.....	95
7.12.	Modelo en planta de Unidades de Consumo de ácido.....	97
7.13.	Secciones de los depósitos y Unidades de consumo.....	98
8. 1.	Diagrama Eh-pH con campos de estabilidad de minerales de cobre a 25°C y 1 atmósfera.....	100
8. 2.	Gráficos de frecuencia acumulada de Extracción de Cu y Razón de solubilidad (RS) de la UGM OXV-BR.....	104
8. 3.	Mineralogía de mena de la unidad OXV-BR en porcentajes relativos.....	104
8. 4.	Gráficos de frecuencia acumulada de Extracción de Cu y Razón de solubilidad (RS) de la UGM OXV-AT.....	105
8. 5.	Mineralogía de mena de la unidad OXV-AT en porcentajes relativos.....	106
8. 6.	Gráficos de frecuencia acumulada de Extracción de Cu y Razón de solubilidad (RS) de la UGM OXN.....	107
8. 7.	Mineralogía de mena de la unidad OXN en porcentajes relativos.....	107
8. 8.	Gráficos de frecuencia acumulada de Extracción de Cu y Razón de solubilidad (RS) de la UGM OXN-PHY.....	108
8. 9.	Mineralogía de mena de la unidad OXN-PHY en porcentajes relativos.....	108
8.10.	Gráficos de frecuencia acumulada de Extracción de Cu y Razón de solubilidad (RS) de la UGM SEC-MX.....	109
8.11.	Mineralogía de mena de la unidad SEC-MX en porcentajes relativos.....	110
8.12.	Extracción de cobre versus mineralogía de mena de la unidad SEC-MX.....	111
8.13.	Gráficos de frecuencia acumulada de Extracción de Cu y Razón de solubilidad (RS) de la UGM PRI.....	112

8.14.	Mineralogía de mena de la unidad PRI en porcentajes relativos.....	112
8.15.	CAN por UGM de extracción de cobre.....	113
8.16.	Extracción de Cu y RS para los depósitos Polo Sur y Sherezade en la UGM OXV-BR.....	114
8.17.	Diferencia mineralógica en porcentaje relativo de los depósitos Polo Sur y Sherezade, para UGM OXV-BR.....	115
8.18.	Extracción de Cu y RS para los depósitos Polo Sur y Sherezade en la UGM OXV-AT.....	115
8.19.	Diferencia mineralógica en porcentaje relativo de los depósitos Polo Sur y Sherezade, para UGM OXV-AT.....	116
8.20.	Extracción de Cu y RS para los depósitos Polo Sur y Sherezade en la UGM OXN-PHY.....	117
8.21.	Diferencia mineralógica en porcentaje relativo de los depósitos Polo Sur y Sherezade, para UGM OXN-PHY.....	117
8.22.	Extracción de Cu y RS para los depósitos Polo Sur y Sherezade en la UGM SEC-MX.....	118
2.23.	Diferencia mineralógica en porcentaje relativo de los depósitos Polo Sur y Sherezade, para UGM SEC-MX.....	118
8.24.	Modelo de UGM de OXV-BR y OXV-AT.....	120
8.25.	Modelo de UGM de OXN y OXN-PHY.....	121
8.26.	Modelo en plantas de UGM de extracción.....	123
8.27.	Secciones del modelo de UGMs de extracción.....	124
8.28.	Secciones del modelo de UGMs de extracción vs litologías.....	125
8.29.	Comparación de resultados de columnas unitarias y botellas Iso pH para UGMs de extracción.....	127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
4. 1. Reacción relativa de silicatos de ganga en condiciones de lixiviación en pilas.....	36
4. 2. Definición de UGM del Proyecto Polo Sur, con mineralogía y química.....	39
5. 1. Unidades litológicas de Polo Sur.....	42
5. 2. Unidades litológicas de Sherezade.....	43
5. 3. Alteraciones del Proyecto Polo Sur.....	49
5. 4. Zonas minerales y definición.....	51
5. 5. Datos QEMSCAN para el uso de análisis.....	54
5. 6. Agrupación QEMSCAN de diferentes laboratorios.....	54
5. 7. Datos DRX para el uso de análisis.....	56
5. 8. Datos botellas Iso pH para el uso de análisis.....	57
5. 9. Datos resultados de columnas unitarias para el uso de análisis.....	57
7. 1. Resumen resultados CAN por Unidad.....	89
7. 2. Mineralogía de ganga QEMSCAN y DRX.....	93
7. 3. Energía de enlace metal-oxígeno.....	95
8. 1. Cinética de disolución relativa de minerales de cobre en ácido sulfúrico.....	101
8. 2. Resumen estadístico de la unidad OXV-BR.....	103

8. 3.	Resumen estadístico de la unidad OXV-AT.....	105
8. 4.	Resumen estadístico de la unidad OXN.....	106
8. 5.	Resumen estadístico de la unidad OXN-PHY.....	109
8. 6.	Resumen estadístico de la unidad SEC-MX.....	110
8. 7.	Resumen estadístico de la unidad PRI.....	112
8. 8.	Resumen estadístico del CAN por UGM de extracción en kg/t.....	113

RESUMEN

El proyecto minero Polo Sur se encuentra ubicado en el Distrito Minero Centinela, controlado en su mayoría por la empresa Antofagasta Minerals S.A. (AMSA), y está constituido por dos depósitos de tipo pórfido ubicados en la franja de pórfidos cupríferos del Eoceno medio al Oligoceno inferior. El proyecto Polo Sur se constituye de dos yacimientos, el depósito Polo Sur que se encuentra en la parte norte del proyecto, y el depósito Sherezade hacia el sector suroeste. Ambos depósitos están separados por un domo riolítico llamado cerro Pamela. Posee un total de recursos de 108,5 Mt de óxidos con 0,40% CuT y 1548,5 Mt de sulfuros con 0,34% de CuT.

El proyecto está acotado a la zona de óxidos y mixtos los 10 primeros años, contemplando un proceso de lixiviación ácida en pilas, y la definición de UGM para la extracción de cobre está basada en la mineralogía de mena y química asociada (CuT, CuS y razón de solubilidad), mientras que para las UGM de enriquecimiento supérgeno estas fueron definidas a partir de mineralogía normativa con análisis secuencial. A pesar de estar definidas estas unidades, se requiere un análisis detallado de la mineralogía y las respuestas metalúrgicas para las asociaciones de ganga y el consumo de ácido y para las asociaciones de mena y la extracción de cobre, esto utilizando resultados de columnas unitarias con mineralogía QEMSCAN, y botellas Iso pH con mineralogía DRX que no habían sido usadas para análisis anteriores.

Con la información disponible desde las bases de datos del mapeo geológico, mineralogía QEMSCAN y DRX, se realiza una revisión y validación de las leyes, zonas minerales y alteraciones definidas en el proyecto. Por otra parte, a partir de los resultados de columnas unitarias y botellas Iso pH se observa que el consumo de ácido tiene estrecha relación con las alteraciones hidrotermales, y la extracción de cobre muestra relación con las zonas minerales.

Con los análisis y validaciones anteriores se definen dos unidades de consumo de ácido: la Unidad 1 QS asociado a la alteración cuarzo sericita donde esta asociación mineralógica de cuarzo y sericita muestra que bajo procesos de lixiviación ácida tienen un bajo consumo, mientras que la Unidad 2 SC está asociada a la alteración sericita clorita, donde la asociación de clorita, biotita y plagioclasa muestran un comportamiento de alto consumo de ácido.

Por otra parte, se definen seis unidades de extracción de cobre a partir de las asociaciones de mena en porcentajes relativos y razón de solubilidad (RS): OXV-BR de mineralogía principal brochantita/antlerita con extracción y RS similares sobre el 80%, OXV-AT caracterizada por la presencia de atacamita y alta extracción de cobre mayor que la RS en 10 puntos porcentuales, OXN definida por la asociación de copper wad/pitch y cloritas con cobre con extracción y RS muy similares, OXN-PHY con mineralogía principal biotitas y cloritas con cobre con una extracción mayor que la RS en 13 puntos porcentuales aprox., SEC-MIX con asociación de mena principal la calcosina, calcopirita, covelina y menores cantidades de atacamita y brochantita/antlerita donde la RS es baja y la extracción depende de los contenidos de calcosina y óxidos de cobre, y finalmente la unidad PRI caracterizada principalmente por calcopirita con muy bajas RS y extracciones de cobre.

Con estas unidades definidas se construye un modelo tridimensional mostrando la distribución espacial para las unidades de consumo de ácido, y para las unidades de extracción de cobre donde la distribución muestra una directa relación con las litologías en el depósito Polo Sur. Finalmente, se realiza una validación del uso de las botellas Iso pH como test para geometalurgia *in situ*, donde los resultados muestran evidentes similitudes en los comportamientos con los test de columnas unitarias tanto para el consumo de ácido como para la extracción de cobre.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto minero de Polo Sur está constituido por el depósito de tipo pórfido cuprífero Polo Sur ubicado en la parte norte y por el pórfido Sherezade que se encuentra en la parte sur, ubicados en la franja de pórfidos cupríferos del Eoceno medio al Oligoceno inferior (44-32 Ma). Estos depósitos están separados por el cerro Pamela (domo riolítico) y se emplazan en el Distrito Minero Centinela (DMC), controlado en su mayoría por la empresa Antofagasta Minerals S.A. (AMSA).

El yacimiento posee recursos por un total de 108,5 millones de toneladas métricas (Mt) de óxidos con 0,40% CuT y 1548,5 Mt de sulfuros con 0,34% de CuT. El proyecto se incorpora al desarrollo de Minera Centinela, pues sus recursos lixiviables darán continuidad a la línea de óxidos de la minera, copando la capacidad de la planta de chancado OXE (oxidados de Encuentro) con 10 Mt/año (Lazcano y Mamani, 2022).

El DMC posee una planta de electroobtención ubicada en la mina El Tesoro y una planta concentradora en la mina Esperanza. El proyecto de Polo Sur reemplazará parcial a totalmente los minerales de OXE desde el año 2024, por lo que la extracción de Polo Sur utilizará la infraestructura instalada en OXE para el chancado y lixiviación de los minerales, para luego ser enviados a la planta de electro obtención de El Tesoro (Lazcano y Mamani, 2020).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GENERAL

A partir de la información geológica y geometalúrgica existente, definir asociaciones de mena para el desarrollo del modelo geometalúrgico de extracción de cobre, y asociaciones de ganga para el modelo geometalúrgico de consumo de ácido.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reconocer la información existente, proveniente de mapeos geológicos y testeos geometalúrgicos.

- Conocer los testeos utilizados en hidrometalurgia, y los parámetros que se miden.
- Conocer la información química y mineralógica, y su uso en la hidrometalurgia
- Analizar la data de mapeos geológicos, estudios mineralógicos y análisis químicos de cobre soluble, para definir asociaciones de mena que presenten control sobre la extracción de cobre en los testeos geometalúrgicos, tanto en botellas Iso pH como en columnas unitarias.
- Analizar la data del mapeo geológico y estudios mineralógico para reconocer gangas que muestren control o indicadores del consumo de ácido neto de los minerales en los testeos.
- Validar el uso de botellas Iso pH como test para geometalurgia *in situ*.
- Modelar unidades de consumo de ácido y de extracción de cobre.

1.2. ALCANCES

Esta memoria de título se enmarca en una revisión y análisis de bases de datos con análisis químicos, mapeos geológicos, estudios mineralógicos, pruebas geometalúrgicas y diferentes modelos desarrollados en el Proyecto Polo Sur.

Con estos datos se busca reconocer y establecer asociaciones mineralógicas de mena que presenten controles sobre la extracción de cobre, a partir de análisis químicos de cobre total y cobre soluble en los testeos geometalúrgicos de botellas Iso pH y columnas unitarias, para el desarrollo de un modelo geometalúrgico de extracción de cobre. Además, con el mapeo geológico de sondaje y estudios mineralógicos se busca reconocer las gangas que tengan control o indicadores del consumo de ácido neto, para el desarrollo de un modelo geometalúrgico de consumo de ácido.

El proyecto está acotado a las zonas de óxidos y mixtos en los 10 primeros años, pero se trabajará con la data de todas las zonas minerales para determinar sus asociaciones de mena y ganga para el consumo de ácido neto con énfasis en las zonas de óxidos, buscando establecer si existen diferencias entre las asociaciones minerales en los depósitos de Polo Sur con Sherezade, y con esto diferencias entre las unidades geometalúrgicas que se definirán para ambos depósitos.

En esta memoria de título se trabajará solo con datos existentes, por lo que no se considera la realización de nuevas pruebas geometalúrgicas ni mineralógicas.

1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS

El proyecto Polo Sur está ubicado en la franja de pórfidos cupríferos del Eoceno medio al Oligoceno inferior (44-32 Ma) en la Región de Antofagasta, en el norte de Chile, a 130 km al NE de la ciudad de Antofagasta, 90 km al SW de la ciudad de Calama y a 40 km al SE de Sierra Gorda, con una altitud entre 2.200 y 2.400 m s.n.m. Las coordenadas UTM centrales del proyecto son 7.430.800 N y 478.888 E (Figura 1.1).

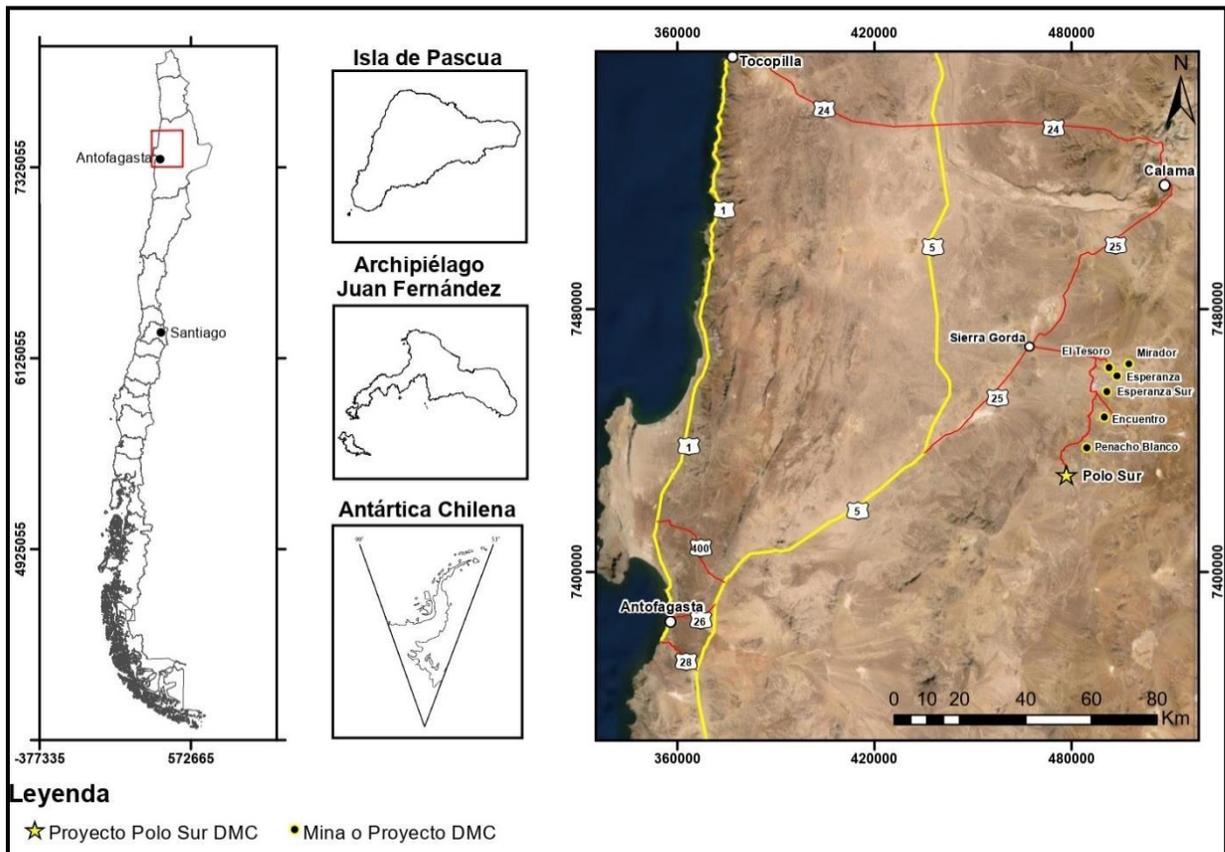


Figura 1.1: Mapa de ubicación Proyecto Polo Sur.

Es posible acceder al Proyecto Polo Sur desde Antofagasta por la Ruta 5, y continuar por la Ruta 25. También se puede acceder desde Calama por la Ruta 25 hacia el sur. Desde ambos orígenes se llega al pueblo Sierra Gorda, punto donde se toma el camino de acceso a Minera Centinela en buen estado, por 25 km. Luego se continúa por un camino interno de tierra, por 32 km hasta el proyecto.

1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La primera parte de este trabajo se basa en una revisión bibliográfica para conocer el contexto geológico y geometalúrgico del proyecto:

- Revisión de directrices de geometalurgia y protocolo de mapeo geológico de AMSA
- Revisión bibliográfica de la geología regional y local del yacimiento mediante publicaciones, informes y presentaciones internas.
- Estudiar el proceso hidrometalúrgico, testeos químicos y los parámetros críticos.
- Revisión de la data de estudios de lixiviación y mineralogía de Polo Sur.
- Revisión de la base de datos de sondajes de mapeos.

En la segunda parte se realizan los análisis de las bases de datos disponibles

- Análisis de la información de sondajes del mapeo geológico.
- Análisis de los estudios mineralógicos y análisis químico de cobre soluble.
- Análisis de resultados de pruebas botellas Iso pH y de columnas unitarias
- Definir asociaciones de mena que presenten control sobre la extracción de cobre, y mineralizaciones de ganga que muestren control o indicadores de consumo de ácido neto en los testeos. La información será analizada mediante el software *ioGAS* y *Orange*.
- Modelamiento geometalúrgico de extracción de cobre y consumo de ácido neto, con el software *Leapfrog*.

1.5. TRABAJOS ANTERIORES

Diversos estudios se han realizado en torno al Proyecto Polo Sur. Estos han sido elaborados con estudios internos de AMSA, con estudios de empresas externas y publicaciones académicas.

Perelló (2002) describe la geología de Polo Sur, identificando las alteraciones hidrotermales, mineralización y recursos geológicos.

Alfaro y otros (2013) presentan un informe donde realizan una actualización del modelo geológico y un modelo de estimación de recursos de Polo Sur y Sherezade, donde se incorporaron nuevos sondeos para redefinir las zonas de mineralización.

Jensen y otros (2014) realiza un modelo estructural del Proyecto Polo Sur, a partir de mapeo de sondeos y mapeo superficial. Modelo que el año 2020 es actualizado con nuevos datos de mapeos.

Mpodozis y Cornejo (2015) presentan el estado de conocimiento de la geología y metalogénesis del Distrito Minero Centinela.

Mpodozis y Cornejo (2018) realizan un Mapa Geológico de la Cordillera de Domeyko 1:200.000 entre Sierra Limón Verde y Salar Los Morros.

Lazcano y Mamani (2020) realizan un informe detallado del Proyecto Polo Sur, con descripciones litológicas, de las alteraciones hidrotermales y mineralización, presentando un modelo de alteración.

GeoEstima (2021) efectúa un informe con modelamiento de unidades geometalúrgico y mineralogía de sulfuros secundarios escalado a un modelo de bloques. Además, realiza un modelo geotécnico del proyecto.

Lazcano y otros (2021) realizan un subcapítulo del Informe del Estudio de Prefactibilidad del Proyecto Polo Sur, donde se describe la geología detallada regional y local, la geometalurgia con la definición de unidades geometalúrgicas (UGM's), además de estudios geotécnicos, hidrogeológicos y de estimación de recursos.

1.6. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a Antofagasta Minerals S.A. por esta gran oportunidad de desarrollar mi memoria con el gran equipo de la Gerencia de Evaluación de Recursos, en el edificio corporativo. Especialmente a mi tutora Xiomara Rubio por la constante ayuda durante todos estos

meses, brindándome las herramientas para lograr este trabajo, por la confianza depositada en mí, apoyándome con diferentes cursos de geometalurgia para el mejor desarrollo de la memoria y respondiendo todas mis dudas. También agradecer el patrocinio del Dr. Oscar Jerez, por el compromiso y correcciones de esta memoria para ir en mejora del producto final y por la confianza durante el desarrollo de esta.

Asimismo, agradecer al equipo del Proyecto Polo Sur, Eduardo Lazcano, Andrés Tassara y a Iván Mamani por toda la ayuda brindada y la disposición para ir mejorando el trabajo. Igualmente, a Ramón Aguirre y nuevamente a Iván Mamani, por el apoyo en la elaboración de los modelos tridimensionales con *Leapfrog*, y a Ariel Armella quien me estuvo ayudando los primeros meses para generar las bases de datos, que sin esto la memoria habría sido imposible.

Agradecer enormemente a mi familia quienes han sido un apoyo incondicional en estos años de formación universitaria, que a pesar de la distancia siempre estuvieron muy cerca para darme aliento cada día, también a la familia Contreras-Gatica quienes fueron mi familia adoptiva en Concepción que me brindaron mucha contención emocional y siempre creyeron en mí. Agradezco a los fuertes lazos formados durante estos años, mis amigos y amigas Angela Contreras, Matías Barra, Javiera Flores, Alonso Hidalgo, Javiera Rioseco y Constanza Tapia, que me ayudaron cada día a crecer tanto profesional como personalmente y me dieron un apoyo que no es posible dimensionar.

Finalmente, y por supuesto no menos importante quiero agradecer a la persona que estuvo presente en cada minuto durante estos meses de desarrollo de la memoria dándome amor, contención y un apoyo increíble, quien creyó en mi en los momentos donde creí que no podía, a mi amigo de aventuras y de vida, mi novio Camilo Castro Zúñiga.

2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1. ROCAS ESTRATIFICADAS

En el DMC afloran rocas estratificadas mesozoicas y cenozoicas que albergan a todos los yacimientos del distrito, estas están representadas por rocas volcánicas y sedimentarias tanto continentales como marinas (Figura 2.1).

2.1.1. TRIÁSICO SUPERIOR-JURÁSICO INFERIOR Y SUPERIOR

2.1.1.1. Estratos de Las Lomas

Son secuencias de rocas volcánicas con intercalaciones sedimentarias continentales o transicionales marinas, que contienen principalmente rocas volcánicas ácidas (tobas riolíticas y dacíticas, domos, sills) y sedimentos de composición arcosas y volcanitas riolíticas, hacia techo los niveles muestran una transición gradual hacia tobas retrabajadas, areniscas volcánicas y calizas marinas del Jurásico Inferior. Los estratos tienen un rango de edad entre los 231 y los 198 Ma, definida por más de 25 dataciones de U/Pb en circones (Mpodozis y Cornejo, 2018).

2.1.1.2. Rocas del Jurásico Inferior

Secuencia marina compuesta por rocas sedimentarias carbonatadas, principalmente calizas con contenido fosilífero de edad Hettangiano-Sinemuriano. Afloran en el sector nor-oriental del distrito, al este del bloque Esperanza-Esperanza Sur y del yacimiento Encuentro (Mpodozis y Cornejo, 2018).

2.1.1.3. Grupo Caracoles

Aflora en la parte central y occidental del distrito. Está compuesto por secuencias calcáreas marinas fosilíferas con niveles de limonitas calcáreas bituminosas con concreciones, además de depósitos

evaporíticos subacuáticos del Oxfordiano. Esta unidad forma parte de la roca caja del yacimiento Mirador (Mpodozis y Cornejo, 2018).

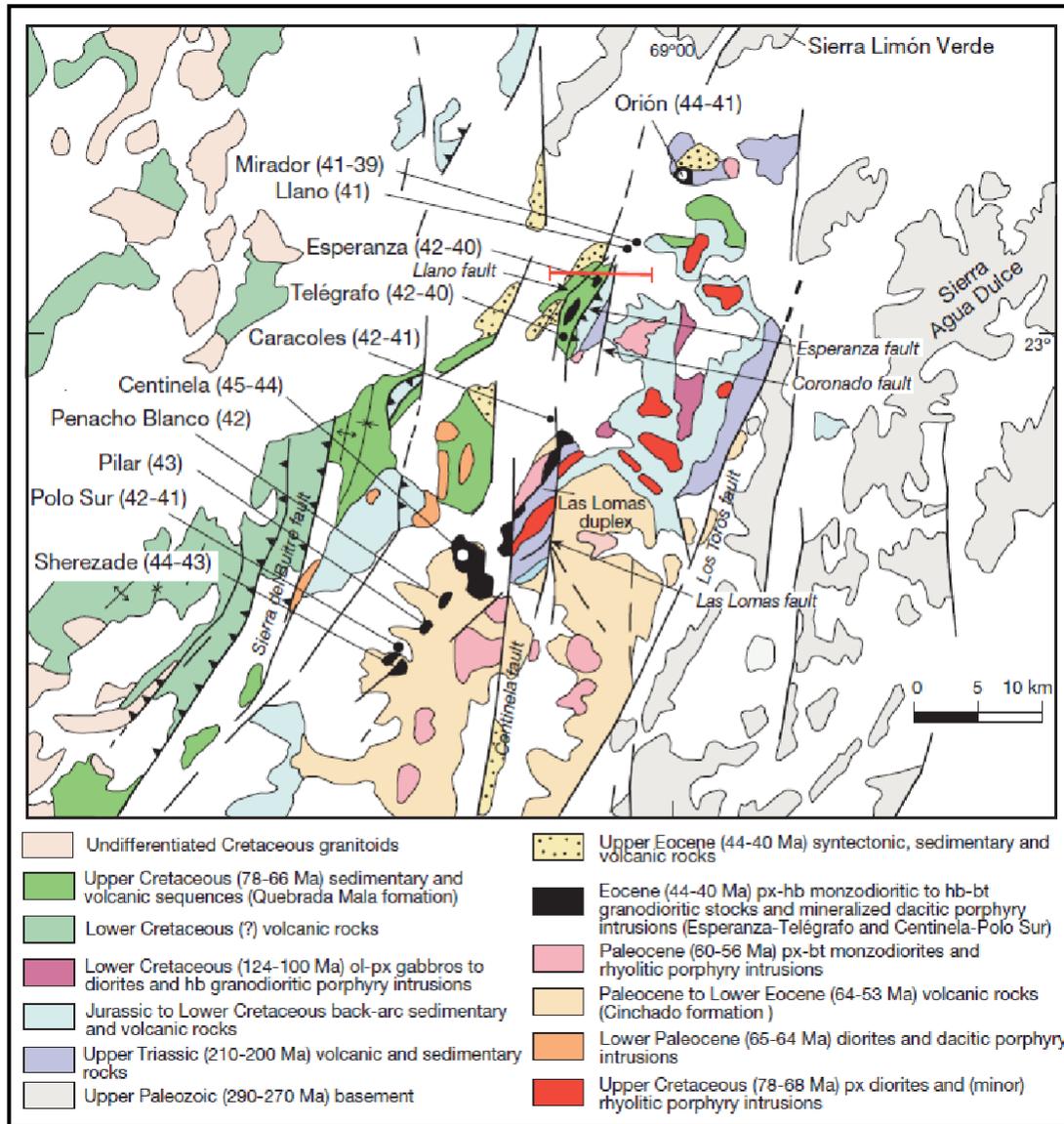


Figura 2.1: Mapa geológico regional. Extraído de Mpodozis y otros (2012).

2.1.1.4. Formación Llanura Colorada

Son secuencias sedimentarias clásticas finas de tono rojizo que se compone de limolitas calcáreas y arcillolitas con ondulitas y estratificación cruzada gruesa, con intercalaciones de areniscas de cuarzo feldespáticas y conglomerados. Esta unidad es la transición hacia el Cretácico Inferior.

2.1.2. CRETÁCICO SUPERIOR

2.1.2.1. Formación Quebrada Mala

Aflora de forma elongada en la parte occidental del distrito, asociada a la traza de la Falla Sierra El Buitre (Montaño, 1976; en Lazcano y Mamani, 2020). Está compuesta por secuencias de rocas volcánicas plegadas con niveles de tobas riolíticas y dacíticas soldadas, brechas basálticas y andesíticas, y niveles de areniscas y conglomerados volcanigénicos con aporte de material basáltico y andesítico (Mpodozis y Cornejo, 2018). Son parte de la roca caja de los yacimientos Esperanza y Esperanza Sur, y la parte profunda del yacimiento El Encuentro (Lazcano y Mamani, 2020). Se han realizado numerosas dataciones de U/Pb en circones y de Ar-Ar en sanidina y biotita, obteniendo un rango de edad entre los 72 y 76 Ma. (Mpodozis y Cornejo, 2018).

2.1.3. PALEOCENO-EOCENO INFERIOR

2.1.3.1. Formación Cinchado

Esta formación aflora en el sector central y sur del distrito, corresponde a secuencias de rocas volcánicas y volcano-sedimentarias que se encuentran sobreyaciendo discordantemente a las rocas del Grupo Caracoles y con leve discordancia a la Formación Quebrada Mala (Montaño, 1976). Está compuesta en la parte basal por secuencia de lavas levemente plegadas y brechas andesíticas, tobas líticas dacíticas, con niveles de vitrófiros, algunos domos daciandesíticos macizos y escasas intercalaciones de areniscas y limolitas, esto representa el primer evento volcánico paleógeno en el distrito. Sus edades van de los 64 a los 62 Ma, determinada con dataciones de U/Pb y Ar-Ar.

La parte media de la unidad está conformada por lavas andesíticas con intercalaciones de extensas ignimbritas riolíticas y dacíticas, con edades entre 60 y 57 Ma, además de las ignimbritas de la “cincha” del Cerro Cinchado de 59 a 58 Ma. Aflora en la parte alta del cerro Cinchado, en los bloques volcánicos andesíticos y tobas riolíticas del yacimiento Penacho Blanco y en el Cerro Rosado.

El miembro superior de 54 a 50 Ma (Eoceno inferior), está compuesto por lavas y brechas andesíticas y ocasionalmente basálticas con abundantes zeolitas y carbonatos, que están asociados a cuerpos volcánicos parcialmente preservados. Además, está formado por plateaus subhorizontales entre flujos ignimbríticos riolíticos, relacionado con flujos soldados de calderas volcánicas o de centros eruptivos menores de complejos de domos riolíticos aislados como en Cerro Pamela, en el sector del yacimiento de Polo Sur o en la caldera Cerro Pabellón. Tiene una edad entre los 52 y 50 Ma, datado con Ar-Ar en sanidina. Las volcanitas riolíticas de esta unidad corresponden a la roca caja de los yacimientos Polo Sur y Sherezade (Mpodozis y Cornejo, 2015).

2.1.4. EOCENO MEDIO

2.1.4.1. Formación Esperanza

Secuencia volcánica piroclástica y en parte epiclástica proximal de aproximadamente 200 m de espesor que aflora al oeste del yacimiento Esperanza formando parte de los limbos del sinclinal de Esperanza, también ha sido reconocida en sondajes que atraviesan la Falla Telégrafo en Esperanza Sur. Está compuesta por flujos piroclásticos semi-soldados, depósitos macizos de bloques y ceniza de composición riolítica a dacítica, niveles cineríticos, areniscas y conglomerados, con una edad U/Pb en circones de 42 Ma. (Mpodozis y otros, 2012).

2.1.5 OLIGOCENO-MIOCENO

2.1.5.1. Formación El Tesoro

Con una amplia distribución en el distrito esta unidad está constituida por una secuencia sedimentaria de 400 m de espesor, con conglomerados clasto-soportado, areniscas y brechas polimícticas rojas, moderadamente cementados por yeso, con intercalaciones de calizas arenosas. Esta se forma discordante sobre la Formación Esperanza y hospeda la mineralización exótica de El Tesoro. Se incluye un horizonte de “Gravas Rojas” en El Tesoro y en el pit de Encuentro, donde se realizó una datación de U/Pb en circones de un lente de ceniza, resultando una edad de 22,5 Ma (Mpodozis y Cornejo, 2018).

2.1.5.2. Formación Los Arrieros

Aflora en la Quebrada Los Arrieros, al este de los yacimientos Esperanza y Esperanza Sur, y al oeste y sur del yacimiento el Encuentro. Está compuesta por depósitos aluvionales y fluviales de gravas y arenas gruesas polimícticas, semiconsolidadas a consolidadas, cementadas por carbonatos y sulfatos, incluye lentes de material fino y paleocanales con cenizas que fueron datadas en un rango de 15 a 10 Ma (Mpodozis y Cornejo, 2018).

2.1.6. MIOCENO SUPERIOR-PLIOCENO

Corresponden a depósitos de gravas semiconsolidadas, areniscas gruesas con intercalaciones de cenizas volcánicas, además de depósitos no consolidados de origen aluvial y gravitacional no diferenciados, con arenas gruesas y niveles de limos que también están intercalados con cenizas volcánicas. Las cenizas fueron datadas con U/Pb en circones obteniendo una edad de 5,7 hasta 1,5 Ma (Mpodozis y Cornejo, 2018).

2.2. ROCAS INTRUSIVAS

2.2.1. PALEOZOICO

Son las rocas intrusivas más antiguas del distrito y afloran al este de la Falla Los Toros con Complejos plutónicos de composición intermedia a ácida del Paleozoico Superior y Pórfidos riolíticos y dacíticos de la Sierra de Agua Dulce y Providencia que localmente son afectados por alteración hidrotermal con intensa silicificación. En Sierra de Limón Verde afloran granitoides como sienogranitos a sienitas. (Mpodozis y Cornejo, 2018).

2.2.2. TRIÁSICO SUPERIOR-JURÁSICO INFERIOR

Intrusivos que están expuestos en el Duplex de Las Lomas, que son un conjunto de cuerpos subvolcánicos dioríticos y monzodioríticos que forman relieves prominentes de rocas porfídicas con abundantes anfíboles alterados a clorita y carbonatos, con fenocristales de plagioclasa en una

masa fundamental de textura granular de plagioclasas y material félsico. Edades obtenidas en el Duplex Las Lomas varían entre los 200 y 210 Ma (Mpodozis y Cornejo, 2018).

2.2.3. CRETÁCICO INFERIOR

En este periodo se emplazaron grupos de stocks, sills y diques asociados a un pulso alcalino de edad 121 a 123 Ma (Aptiano), compuesto por dioritas de hornblenda kaersutítica y clinopiroxeno, y pórfidos dacíticos de hornblenda, biotita y sanidina. Presenta vetas con mineralización de plata en Placilla de Caracoles y Cerro La Deseada, intruyendo a las secuencias marinas jurásicas (Mpodozis y Cornejo, 2018).

2.2.4. CRETÁCICO SUPERIOR

Luego de un gap desde el Aptiano la actividad magmática se reanuda emplazando cuerpos dioríticos y gábricos, pórfidos andesíticos a daciandesíticos y riolíticos que están asociados al vulcanismo de la Formación Quebrada Mala. Los gabros intruyen a las secuencias marinas jurásicas en el sector de Placilla de Caracoles, mientras que los pórfidos dacíticos y riolíticos en el sector del Cerro Los Mellizos. Estas intrusiones tienen una edad entre los 66 y 80 Ma (U/Pb) (Mpodozis y Cornejo, 2018; Lazcano y Mamani, 2020).

2.2.5. PALEOCENO-EOCENO INFERIOR

Los intrusivos de este periodo son coetáneos al vulcanismo de la Formación Cinchado. Los más antiguos afloran a 10 km al este de Polo Sur en el sector de Cerro Rosado, y está compuesto por pórfidos dioríticos, dacíticos, riolíticos, andesíticos y daciandesíticos con edades entre 60 y 62 Ma. En el sector de Cerro Centinela afloran granodioritas, pórfidos dacíticos y daciandesíticos de edad 58 a 62 Ma, asociados a volcanitas de la misma edad. Los intrusivos del Paleoceno medio afloran en la parte norte del Duplex de Las Lomas, emplazados de forma sintectónica al movimiento de las fallas, se compone de granodioritas de hornblenda y biotita, desarrollando skarns en calizas del Oxfordiano e intruyen a volcanitas del Paleoceno inferior (Mpodozis y Cornejo, 2018). Unos 10 km al sureste de los yacimientos Polo Sur y Sherezade, al interior de la caldera Cerro Pabellón,

domos y pórfidos dacíticos de 55 Ma intruyen a volcanitas del Paleoceno superior-Eoceno inferior (Lazcano y Mamani, 2020). Durante el Eoceno inferior, al interior de la caldera Cerro Pabellón se desarrolla una nueva caldera denominada “Polo Sur”, que representa un evento más joven de magmatismo ácido formando un anillo de pórfidos daciandesíticos de 52 Ma que intruyen a volcanitas ácidas de 53 a 54 Ma. El Domo Pamela de edad 52 a 53 Ma, se ubica en el límite norte de esta caldera (Mpodozis y Cornejo, 2015).

2.2.6. EOCENO MEDIO

Corresponde al último evento magmático del distrito, donde se emplazan los pórfidos de Cu-Mo de edades 45 a 39 Ma, que son contemporáneos al volcanismo de la Formación Esperanza. Al norte del distrito afloran los pórfidos cupríferos que son los actuales yacimientos Esperanza, Esperanza Sur y Mirador con edades entre los 40 y 42 Ma, que corresponden a cuerpos dacíticos a granodioríticos que intruyen secuencias del Triásico al Cretácico Superior. En el Llano de Caracoles está el yacimiento Encuentro, intruyendo rocas sedimentarias y volcánicas del Jurásico al Paleoceno, con edad de 41 a 42 Ma. En el sector sur se encuentran los pórfidos Polo Sur, Sherezade y Penacho Blanco de edades entre los 41 y 44 Ma (Mpodozis y Cornejo, 2015).

2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El DMC es atravesado por algunas fallas mayores del Sistema de Falla de Domeyko. Se encuentra en el extremo septentrional de la Falla Sierra de Varas, que termina como un abanico de fallas, con fallas mayores como la Falla Centinela (NS), la Falla Los Toros, la Falla Telégrafo (NE, N30°E) (Mpodozis y otros, 2009) y otras fallas importantes como Sierra Del Buitre, Las Lomas, Coronado y Llano (Figura 2.2).

Las fallas Centinela y Las Lomas forman arreglos de fallas con geometría sigmoidal con rumbo NNE, limitadas por fallas mayores NS a NNE definiendo sistemas de dúplex de rumbo en el norte del Llano de Caracoles (Duplex Esperanza) e inmediatamente al norte del Cerro Centinela (Duplex de Las Lomas). En estos sistemas se emplazan los pórfidos mineralizados mayores del distrito como los yacimientos Esperanza, Esperanza Sur y Encuentro (Mpodozis y otros, 2009).

La transpresión debido al acortamiento cortical que dominó el distrito durante el emplazamiento de los pórfidos cupríferos entre los 45 y 41 Ma coincidió con la Fase Orogénica Incaica (Mpodozis y otros, 2009). Bajo estas condiciones tectónicas el emplazamiento de los pórfidos cupríferos de Esperanza, Esperanza Sur y Encuentro fueron en parte guiados por fallas preexistentes reactivadas durante el evento deformacional (Perelló y otros 2010). La extensa historia deformacional sería una condición esencial para debilitar la corteza continental y permitir el emplazamiento de los intrusivos eocenos mineralizados del distrito.

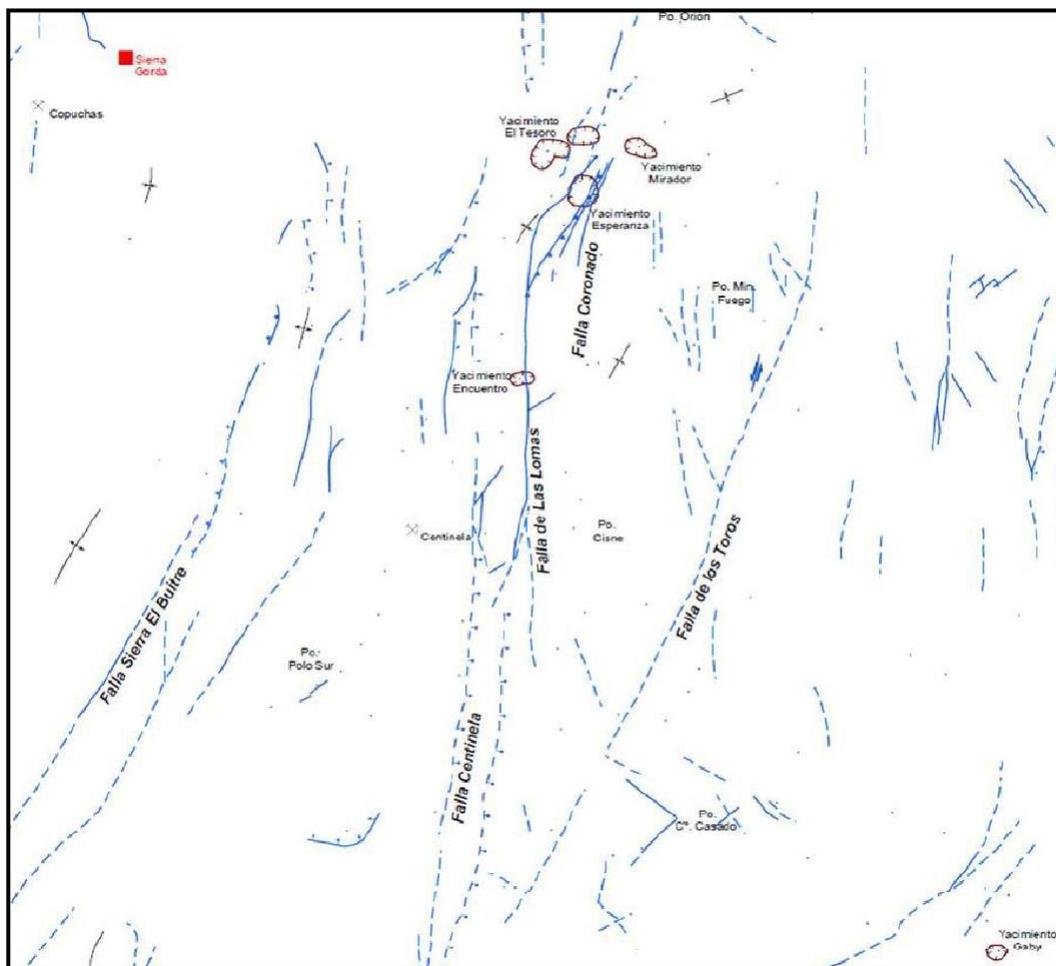


Figura 2.2: Mapa estructural del Distrito Minero Centinela. Extraído de Lazcano y Mamani (2020).

En la Falla Sierra El Buitre donde se observan evidencias de movimiento inverso subvertical, el gran espesor de la Formación Quebrada Mala al W de la falla y la ausencia hacia el este sugiere que la falla habría constituido una estructura normal al borde de la cuenca Quebrada Mala en el Cretácico Superior (Perelló, 2002). Luego cambió a falla inversa en un evento de acortamiento en el Paleoceno debido a las evidencias de millonitas de ~59 Ma subparalelas a la falla. Esto indica una importante deformación durante el Paleoceno superior en el sector occidental del distrito con reactivaciones en el Eoceno y en menor medida durante el Mioceno, con rasgos como el escarpe actual de la Sierra del Buitre (Lazcano y Mamani, 2020).

3. GEOLOGÍA LOCAL

Los pórfidos Polo Sur y Sherezade se ubican 21 km en línea recta al SSW del yacimiento Encuentro y están en la parte norte de la “Caldera Polo Sur” (Perelló, 2002). Polo Sur se ubica 2 km al norte de Sherezade y está cubierto por una capa de gravas del Mioceno, mientras que Sherezade no presenta gravas importantes y la mineralización oxidada se expone casi en superficie, esto llevó a que se realizara una explotación a pequeña escala mediante el rajo Sherezade (Lazcano y Mamani, 2020).

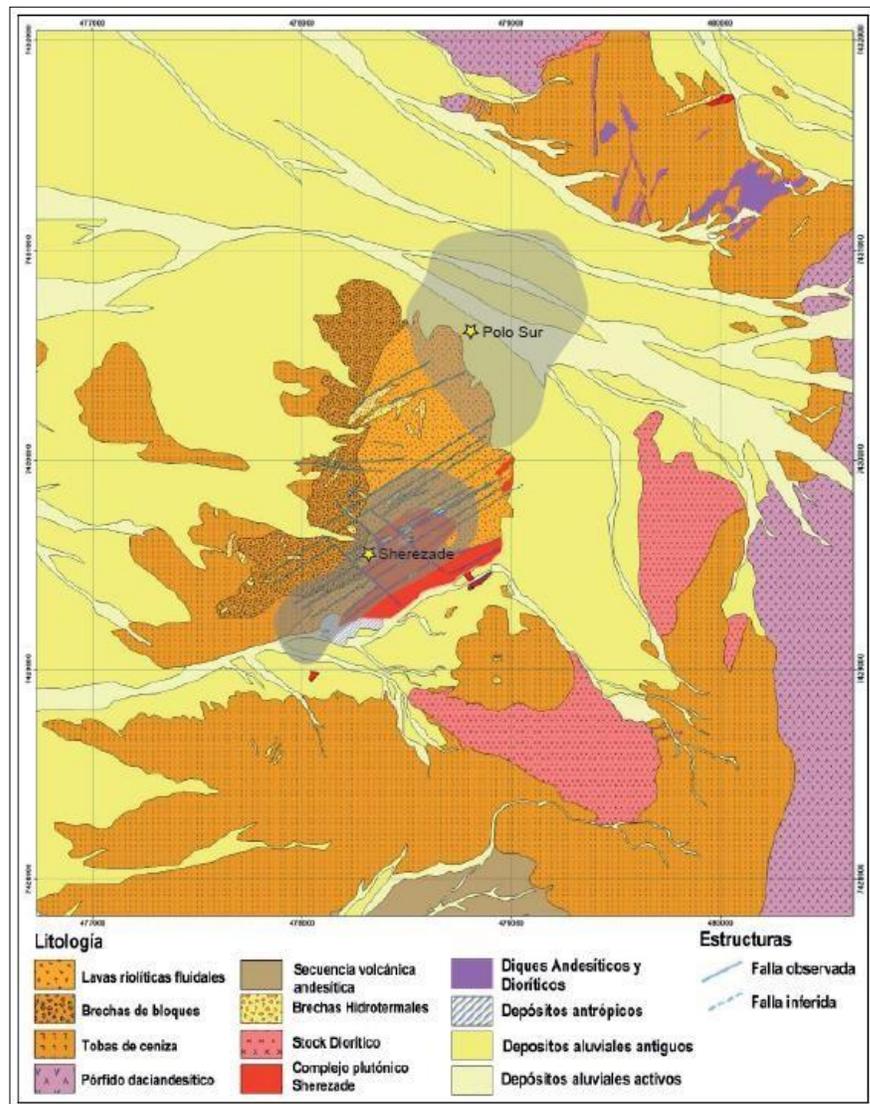


Figura 3.1: Mapa geológico del Proyecto Polo Sur. Extraído de Lazcano y Mamani (2020).

Los pórfidos varían desde cuarzo-dioríticos en Sherezade a granodioríticos en Polo Sur, e intruyen andesitas basálticas en la parte inferior y riolitas en su parte superior de la Formación Cinchado (Figura 3.1) (Montaño, 1976). Los pórfidos y brechas presentan edades U/Pb entre 42 y 44 Ma, similar al resto de la mineralización del distrito Centinela (Lazcano y Mamani, 2020).

Lo depósitos tienen un claro control estructural y litológico, más evidente en Sherezade, donde la mineralización sigue una dirección N50°-60°E de las estructuras principales. En Polo Sur, la mineralización está controlada principalmente por una serie de brechas hidrotermales genética y espacialmente relacionadas a diques de pórfidos dacíticos a granodioríticos, agrupados en la unidad de Pórfido Granodiorítico Principal, con orientación preferente N50°-60°E.

3.1. UNIDADES LITOLÓGICAS

3.1.1. UNIDADES ESTRATIFICADAS

La roca caja de los depósitos Polo Sur y Sherezade corresponde rocas de la Formación Cinchado, que constituye un volcanismo bimodal con andesitas basálticas en la parte inferior y riolitas en la superior. Las volcanitas riolíticas son parte de un domo volcánico denominado “Domo Pamela”, el que a su vez forma parte de la caldera volcánica “Caldera Polo Sur”. Las unidades volcánicas en Polo Sur se encuentran cubiertas por gravas postminerales.

3.1.1.1. Volcanitas Andesíticas (Formación Cinchado)

Los afloramientos de esta unidad se ubican al sur de Sherezade y en Polo Sur ha sido reconocida a través de sondajes, se encuentra infrayaciendo concordante a las volcanitas riolíticas (Alfaro y otros, 2013) y está compuesta por una secuencia de tobas y lavas andesíticas en la parte superior y aglomerados y autobrechas hacia la base. Se encuentra mal estratificada, pero se infieren manteos subhorizontales. En otros sectores, esta secuencia se compone de lavas andesítico-basálticas (Mpodozis y Cornejo, 2012)

Su base y potencia real no se han podido determinar, pero aparece en sondajes de aproximadamente 1000 m, por lo que se infiere una potencia de al menos 500 m. En el yacimiento Sherezade la unidad ha sido reconocida en sondajes hasta los 500 m de profundidad (Lazcano y Mamani, 2020). Cuenta con dos dataciones para definir su rango de edad que va de los 55,8 a 56,0 Ma, con muestras tomadas en los alrededores de Polo Sur-Sherezade y en los afloramientos inmediatamente al sur del yacimiento Sherezade (Lazcano y Mamani, 2020).

Las edades de la unidad volcánica andesítica varían entre 56 y 58 Ma, ubicándolas en el Paleoceno superior, y validando su posición estratigráfica bajo las volcanitas del Eoceno inferior. Pueden ser correlacionadas con el miembro medio de la Formación Cinchado. (Marínovic y García, 1999).

3.1.1.2. Volcanitas Riolíticas (Formación Cinchado)

Esta secuencia constituye la mayor parte de la roca caja de los yacimientos Polo Sur y Sherezade. Aflora principalmente en el Cerro Pamela y sus alrededores, es reconocida en cantidad importante de los sondajes realizados en ambos yacimientos. Son principalmente riolitas fluidales, brechas de bloques, pórfidos riolíticos, y tobas dacíticas finas pumíceas.

El sistema del Domo Pamela está bien conservado e incluye un área central que podría corresponder al conducto del domo, formado por las lavas riolíticas fluidales y un anillo exterior de rocas piroclásticas con brechas de bloques proximales y tobas cristalinas pumíceas distales. El domo está emplazado en el límite norte de la caldera Polo Sur, representativa de un evento volcánico de composición ácida y carácter explosivo (Lazcano y Mamani, 2020).

Esta unidad riolítica sobreyace concordantemente a rocas volcánicas andesíticas y andesíticas basálticas, lo que se ha observado en los sondajes de Polo Sur. La unidad de riolitas va de los 180 a los 270 m, la que aumenta su espesor hacia en sector de Sherezade donde el sistema del Domo Pamela está mejor conservado (Alfaro y otros, 2013).

Las edades de la unidad volcánica riolítica varían en el rango de 47 a 53 Ma, confirmando un evento volcánico para el Eoceno inferior. De esta manera, puede ser correlacionado tentativamente con el miembro superior de la Formación Cinchado (Lazcano y Mamani, 2020).

3.1.1.3. Gravas (Formación El Tesoro)

Esta unidad aflora en los faldeos de la ladera norte del Domo Pamela, corresponde a la cubierta sedimentaria del yacimiento Polo Sur, que no se encuentra en Sherezade. Compuesta mayoritariamente por gravas monomícticas a polimícticas poco consolidadas y areniscas, dispuestas subhorizontal sobre las volcanitas de Formación Cinchado (Alfaro y otros, 2013). Esta unidad ha sido estimada con un espesor de hasta 90 m según sondajes realizados.

En el contacto inferior, esta unidad hospeda algunos tramos con mineralización de óxidos de cobre con características de mineralización exótica, con óxidos negros > óxidos verdes, que forman un pequeño cuerpo de unos pocos metros de potencia (< 10 m), elongado en sentido NW y ubicado principalmente en la parte NW del yacimiento (Lazcano y Mamani, 2020).

Por su disposición espacial y relaciones de contacto, estas gravas son correlacionables con la Formación El Tesoro del distrito, asignadas al límite Oligoceno-Mioceno.

3.1.2. UNIDADES INTRUSIVAS

Corresponden a complejos dioríticos a cuarzodioríticos que son premineralización, pórfidos cuarzodioríticos, granodioríticos y dacíticos, y brechas ígneas e hidrotermales, contemporáneos a la mineralización que intruyen a la secuencia de rocas volcánicas, lo que provoca una alteración hidrotermal en la roca caja de ambos yacimientos (Lazcano y Mamani, 2020).

3.1.2.1. Complejo Intrusivo Polo Sur

Son una serie de cuerpos intrusivos agrupados de manera informal de composición entre diorítica a granodiorítica que intruyen a la secuencia volcánica. Algunos están asociados a la generación de brechas ígneas e hidrotermales que hospedan parte de la mineralización (Alfaro y otros, 2013).

I) Stock Diorítico a Diorítico Cuarzífero (42 a 44 Ma)

Corresponde al intrusivo de mayores dimensiones en Polo Sur y el de mayor antigüedad, está dispuesto principalmente en el borde E de Polo Sur y es la roca caja de intrusiones posteriores. Se interpreta como un pulso precursor del evento mineralizador principal, posee leyes de CuT propias cercanos al 0,1% a 0,2% (Alfaro y otros, 2013). Solo ha sido reconocido en sondajes bajo la cubierta de gravas, aunque puede estar relacionado espacial y genéticamente con dos stocks dioríticos y monzodioríticos de edad similar que afloran al E y SE de Sherezade, aunque en estos no se reconoce mineralización.

Corresponden a rocas de composición diorítica a cuarzodiorítica de textura fanerítica inequigranular seriada con variaciones entre porfídica a fanerítica equigranular, de coloración marrón a verdosa oscura (Alfaro y otros, 2013).

II) Pórfido Granodiorítico a Dacítico Principal (42 a 41 Ma)

Corresponde a una serie de diques y cuerpos irregulares de pórfidos con composición granodiorítica a dacítica, elongados en dirección NE con dimensiones de 900 m de largo por 400 m de ancho, reconocidos en sondajes hasta 800 m. Estas intrusiones generan brechas ígneas e hidrotermales que alojan la mayor parte de la mineralización de Polo Sur (Alfaro y otros, 2013; Lazcano y Mamani, 2020).

Presenta textura entre holocristalina hipidiomórfica y holocristalina porfídica de grano grueso, con tonos verdosos. Las rocas hipidiomórficas están constituidas por fenocristales de plagioclasa tabulares, cuarzo con inclusiones poikilíticas de plagioclasa y fenocristales de biotita y anfíboles. Las rocas porfídicas tienen fenocristales de plagioclasas parcialmente alterados a feldespato

potásico o parcialmente argilizados, “books” de biotita reemplazados por illita y sericita o clorita y rutilo, y ojos de cuarzo; la masa fundamental contiene pequeños cristales de plagioclasa argilizada o parcialmente reemplazada por feldespato potásico, agregados de cuarzo granular y feldespato potásico, además de cantidades menores de biotita intersticial, apatito, anhidrita, carbonatos, clorita y sericita (Lazcano y Mamani, 2020).

III) Pórfidos Dacíticos Tardíos (41,75 a 43,0 Ma)

Son cuerpos con dirección NNE, de color pardo oscuro a pardo verdoso, que cortan a todas las demás unidades del yacimiento, menos las brechas freatomagmáticas. Carecen o presentan muy baja mineralización de cobre. Poseen textura porfídica con abundantes ojos de cuarzo y fenocristales de plagioclasa, biotita y anfíboles. Con masa fundamental de abundante biotita diseminada. En microscopio se puede identificar una textura porfídica orientada, con fenocristales de anfíboles y biotita, masa fundamental con biotita intersticial, además de anhidrita y magnetita (Alfaro y otros, 2013; Lazcano y Mamani, 2020).

IV) Brechas Ígneas e Hidrotermales (42,1 a 51,8 Ma).

Corresponden a brechas con diferentes estilos texturales dependiendo de la posición espacial, intensidad y la roca caja a la cual afectan. Son los principales cuerpos portadores de la mineralización de Cu y Mo.

Estas brechas están genéticamente relacionadas a la intrusión del Pórfido Granodiorítico a Dacítico Principal y su composición está ligada a las rocas de caja que hospedan. Dependiendo de la abundancia del cemento hidrotermal, estas brechas pueden gradar hacia cuerpos de brecha hidrotermal en sentido estricto, típicamente en posiciones más someras.

Otra agrupación de brechas hidrotermales está constituida por una serie de cuerpos menores de brechas de cuarzo-turmalina, normalmente presentes en las partes más altas del sistema.

Son matriz y cemento-soportados, con clastos de las rocas de caja en las que se emplazan. Pueden contener cuarzo hidrotermal, cúmulos de agregados finos de feldespato potásico, biotita, magnetita, plagioclasa y, localmente, abundante cuarzo (Cornejo, 2010 en Alfaro y otros, 2013). Como minerales accesorios pueden presentar apatito y circones.

Presentan alteración potásica, con feldespato potásico dominante, disseminación de pequeños cristales de biotita secundaria y crecimiento de cristales mayores de biotita asociados a vetillas con o sin feldespato potásico. También pueden estar afectadas por alteración sericita-clorita o cuarzo-sericita. Algunos cuerpos consisten principalmente de cemento hidrotermal biotítico, con rosetas de biotita cementando clastos de las rocas. Pueden estar acompañadas por cemento de cuarzo y fases de magnetita y apatito. Localmente, y dependiendo de la porosidad original, las fases finales corresponden a relleno de pirita, calcopirita y molibdenita (Lazcano y Mamani, 2020).

V) Brechas Freatomagmáticas

Tienen dimensiones pequeñas, ubicadas en tramos de sondajes menores a 4 m. Distribuidas aleatoriamente en Polo Sur, siendo las etapas más tardías del sistema hidrotermal, con altos contenidos de pirita y con bajos o nulos contenidos de cobre (Alfaro y otros, 2013).

Están constituidas por una matriz de polvo de roca con clastos polimícticos subredondeados a subangulosos de todas las variedades litológicas del depósito. Asociadas a alteración cuarzo-sericítica a argílica. El emplazamiento de estos cuerpos está asociado a estructuras como fallas o zonas de falla.

3.1.2.2. Complejo Intrusivo Sherezade

Informalmente se define como una agrupación de cuerpos hipabisales, de composiciones cuarzo-diorítica a tonalítica y dacítica, con un evidente control estructural con orientación N50°-60°E, e intruyen a la secuencia volcánica ácida del Domo Pamela. Contiene, brechas ígneas e hidrotermales con intensa alteración a cuarzo-sericita y disseminados de pirita., estas son mucho menos importantes que las equivalentes en el yacimiento de Polo Sur.

I) Diorita-Cuarzo Diorita

Intrusivo de composición diorítica a cuarzo diorítica que actúa como roca huésped de la mineralización. Su emplazamiento está aparentemente controlado por las estructuras con rumbo N50°E. Son rocas de color gris oscura a verdosa con textura porfídica de grano medio a grueso, compuesta de fenocristales de plagioclasa parcialmente reemplazadas a sericita, escasos fenocristales de cuarzo y biotita intersticial levemente cloritizada. La masa fundamental está compuesta por un agregado de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico, con magnetita diseminada (Alfaro y otros, 2013).

II) Pórfido Granodiorítico Sherezade (43 a 45 Ma)

Es un cuerpo irregular de pórfido y diques, de composición dacítico a granodiorítico de textura gruesa que afloran en el rajo de Sherezade y en sectores el este y sur del Cerro Pamela, intruyendo a la secuencia volcánica del Domo Pamela. Está compuesta de abundantes fenocristales de plagioclasas zonadas y ojos de cuarzo gruesos. Relictos de hornblenda biotitizada en equilibrio con biotita magmática son comunes. Los intersticios presentan abundante cuarzo, feldespato potásico fino, anhidrita, biotita fina, epidota y magnetita. Se identificaron vetillas A y B con cuarzo-feldespato potásico, biotita, calcita y algo de turmalina tardía (Lazcano y Mamani, 2020).

Posee texturas porfídicas gruesas con cierta orientación en cristales de plagioclasa, abundantes ojos de cuarzo. Relictos difusos de anfíboles con alteración potásica y reemplazo por biotita fina flogopita, localmente retrograda a clorita verdosa. Biotita con alteración a microgránulos de feldespato potásico, con biotita fina flogopita y magnetita en bordes. Los intersticios contienen también plagioclasas orientadas, relictos de biotita parcialmente cloritizada sobre un fondo granular fino de cuarzo con feldespato potásico argilizado, con esmectitas y opacos diseminados, con importante biotita intersticial con alteración potásica (Cornejo, 2013 en Lazcano y Mamani, 2020).

III) Pórfido Tonalítico

Este pórfido solo ha sido reconocido por sondajes al NE de Sherezade, e intruye a la unidad Diorita-cuarzodiorita y al Pórfido Sherezade. Posee una tonalidad gris verdosa con textura fanerítica equigranular de grano medio a grueso. Está compuesta por cuarzo, feldespato potásico y biotita cloritizada. En ciertas zonas se reconoce textura porfídica con ojos de cuarzo. No se reconoce mineralización en esta unidad (Alfaro y otros, 2013).

IV) Brechas Ígneas e Hidrotermales

Las brechas ígneas se encuentran al norte y en el rajo de Sherezade, emplazadas en las rocas volcánicas riolíticas y en las unidades Diorita y Pórfido Sherezade. Sin mineralización, solo tiene función de roca huésped. Presenta clastos subredondeados de composición indeterminada alterados a biotita secundaria y/o feldespato potásico. Matriz ígnea de composición diorítica a granodiorítica, con agregados de cuarzo, feldespato potásico y/o biotita, con abundante magnetita.

Las brechas hidrotermales se ubican en la ladera sur del Cerro Pamela y en el rajo de Sherezade, estas se caracterizan por intruir a todas las rocas del yacimiento, sin mineralización, con función de roca huésped de esta. Son matriz soportada de color gris oscuro, con fragmentos angulosos y subangulosos correspondientes a las diferentes litologías presentes en el yacimiento. Se encuentran alterados a sericita y/o caolín, con cemento de cuarzo, sericita y turmalina, con abundante hematita y goethita diseminada.

3.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En Polo Sur-Sherezade existen tres tendencias principales de estructuras subverticales bien definidas: la primera con rumbo $N40^{\circ}-60^{\circ}E$, una segunda tendencia E-W, y un grupo menos de fallas $N30^{\circ}-60^{\circ}W$ (Jensen y otros, 2014).

La primera de ellas con una serie de fallas con rumbo $N40^{\circ}-60^{\circ}E$ de manto al este a subverticales, que cruzan ambos yacimientos (Figura 2.2) y controlan el emplazamiento de los pórfidos

mineralizadores, la alteración hipógena y parte importante de la mineralización primaria y secundaria. Además, en Sherezade constituyen el principal control de la mineralización de óxidos. Estas estructuras fueron observadas en superficie en el portezuelo del Cerro Pamela y en sus limbos NE y NW, donde se reconocieron texturas foliadas y zonas milonitizadas (Perelló, 2002), también se encontraron en el antiguo rajo Sherezade.

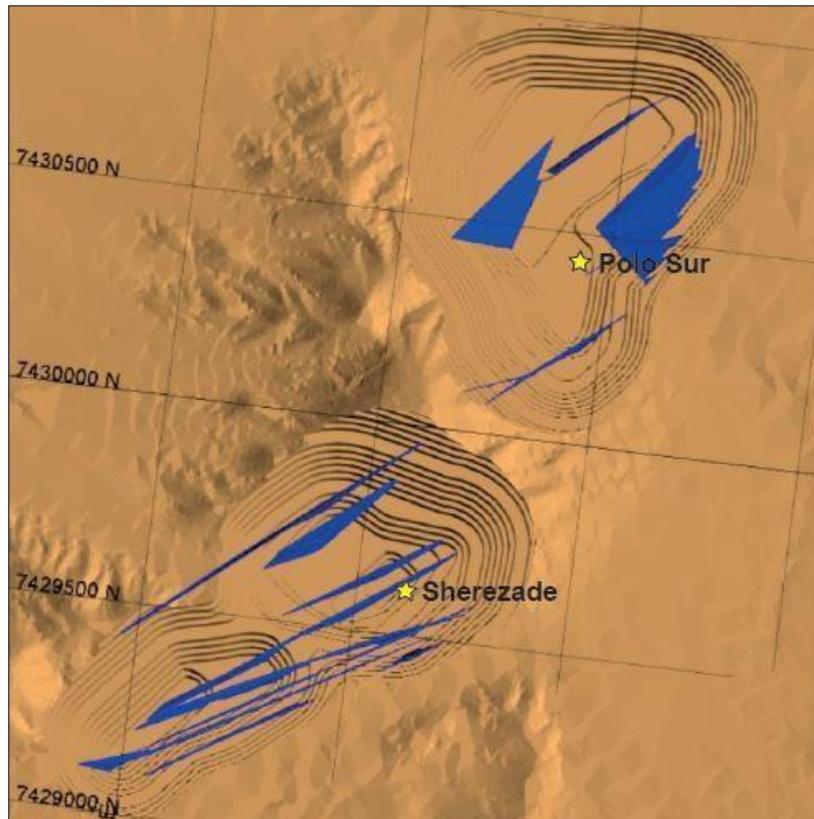


Figura 3.2: Superficies 3D de estructuras N40°-60°E. Extraído de Jensen (2020).

Una segunda tendencia estructural corresponde a fallas de rumbo N80°E a N80°W con manteos desde 60°S a subverticales (Figura 3.3), las que fueron reconocidas por estudios de sondajes diamantinos por Jensen y otros (2014; 2020), y en la ladera occidental del Cerro Pamela (Vieira y Cepeda, 1995; Wong y Marquardt, 2012), se identificó una falla importante con al menos 50 m de ancho y 800 m de largo. También se observó una de estas estructuras en la pared de la rampa de acceso al antiguo rajo Sherezade (Lazcano y Mamani, 2020).

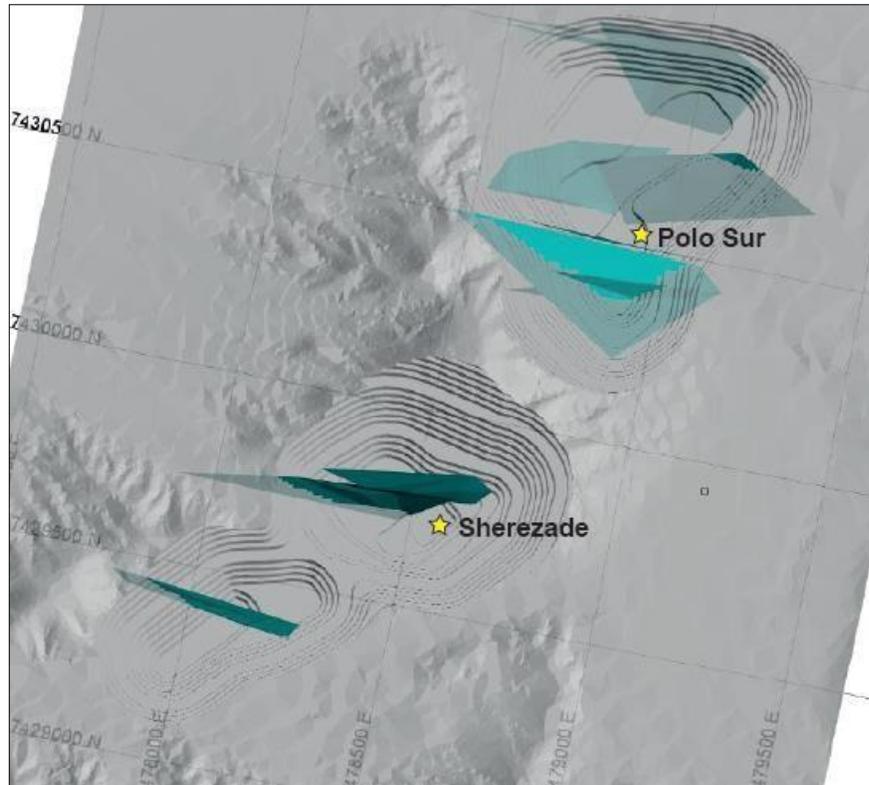


Figura 3.3: Superficies 3D de estructuras N80°E-N80°W. Extraído de Jensen (2020).

La última tendencia, son fallas de rumbo N30°-60°W con manteos entre 45° a 80° al NE, que fueron reconocidas en estudios de superficie en el sector de Sherezade y en el rajo antiguo homónimo (Vieira y Cepeda, 1995; y Wong y Marquardt, 2012). En Sherezade cortan al set estructural N40°-60°E con movimientos sinestrales postminerales. Además, al menos una de estas estructuras controla la forma de los afloramientos del pórfido Sherezade, (Vieira y Cepeda, 1995; Wong y Marquardt, 2012). Los estudios realizados por Jensen y otros (2014; 2020) han permitido detectar este set estructural en profundidad, observando un mejor desarrollo de las fallas en el sector de Polo Sur.

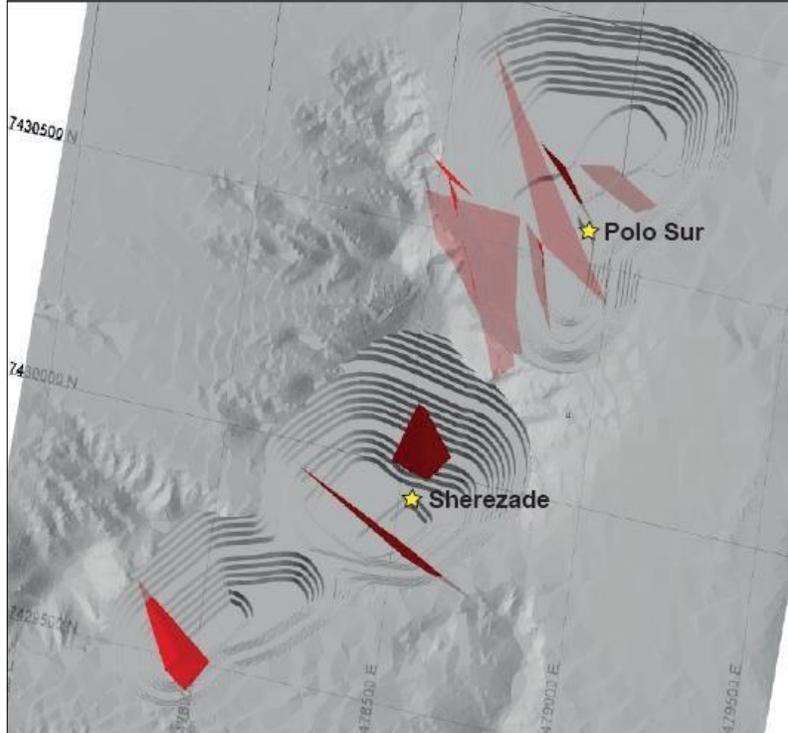


Figura 3.4: Superficies 3D de estructuras N30°-60°W. Extraído de Jensen (2020).

3.3. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

El yacimiento de Polo Sur presenta una alteración hidrotermal, con un núcleo de alteración potásica moderadamente pervasiva, que está desarrollada principalmente en los cuerpos de pórfido y en brechas ígneas como una alteración potásica feldespática (KF) y en las rocas de caja intrusivas y volcánicas de composición andesítica con una alteración potásica biotítica (KBT) (Lazcano y Mamani, 2020).

La alteración sericita-clorita (SC) corresponde a un evento temprano interpotásico de alteración, afectando a las unidades volcánicas andesíticas, a la roca caja diorítica, brechas hidrotermales, y en menor medida a la unidad volcánica riolítica. Este evento oblitera en parte a la alteración potásica inicial, pero está cortado por un nuevo evento potásico reflejado en el desarrollo de vetillas A/B y de feldespato potásico. Un evento de alteración sericita-clorita posterior oblitera a la alteración potásica biotítica inicial (Lazcano y Mamani, 2020).

En la porción superior del yacimiento predomina una zona de alteración cuarzo-sericita (QS), que oblitera las texturas y composición de las rocas. Este evento se sobrepone a las alteraciones potásica y sericita-clorita (Figura 3.5).

En Sherezade la alteración hidrotermal es diferente a Polo Sur, evidenciado por el núcleo de alteración potásica que en este yacimiento es muy reducido y está casi obliterado por completo, se encuentra principalmente por el pórfido Sherezade (KF) y en menor medida al stock de cuarzo diorítico (KBT). Esta zona, está rodeada por un halo de alteración sericita-clorita, que reemplaza a minerales que conforman el núcleo potásico (Figura 3.6). La alteración cuarzo-sericita más tardía destruye a las asociaciones anteriores, y tiene amplia distribución (Lazcano y Mamani, 2020).

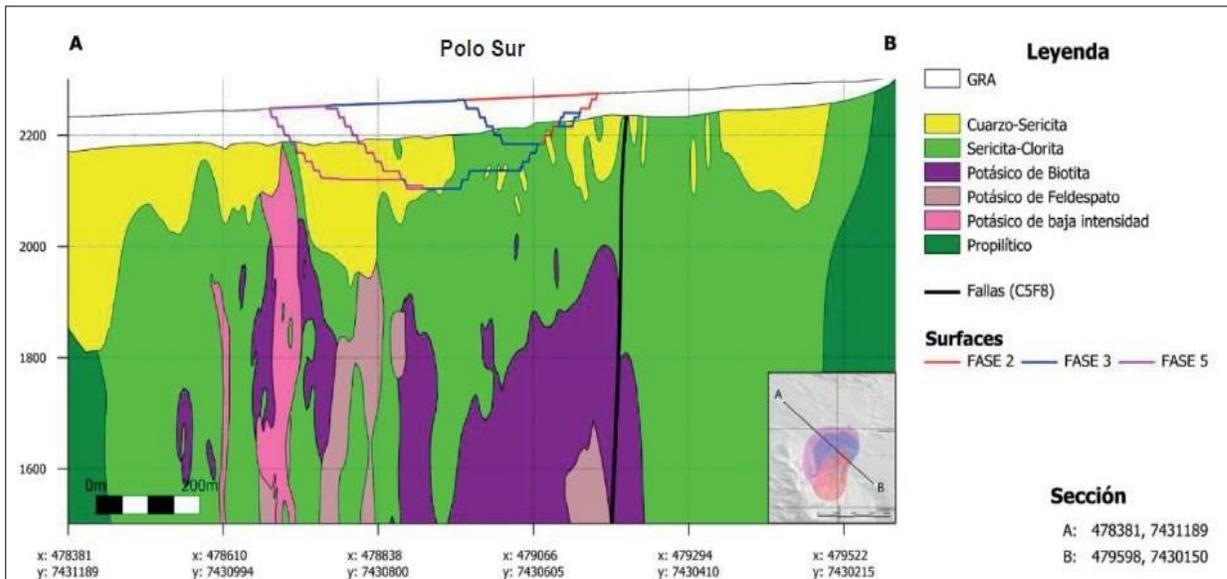


Figura 3.5: Modelo de alteración de Polo Sur. Extraído de Lazcano y Mamani (2022).

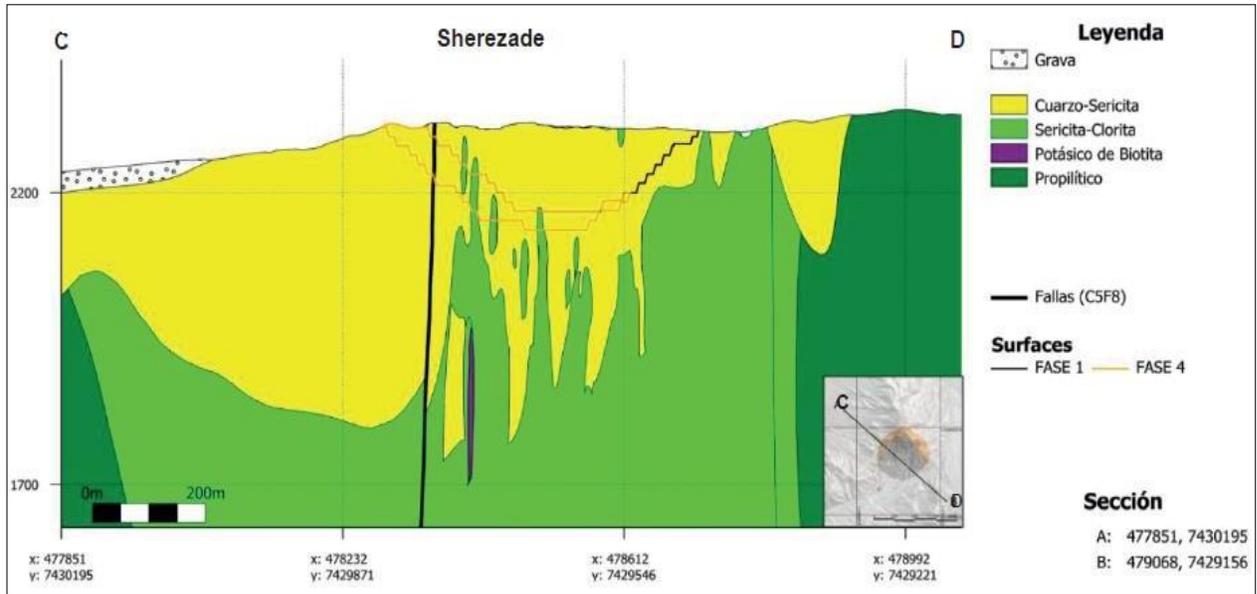


Figura 3.6: Modelo de alteración de Sherezade. Extraído de Lazcano y Mamani (2022).

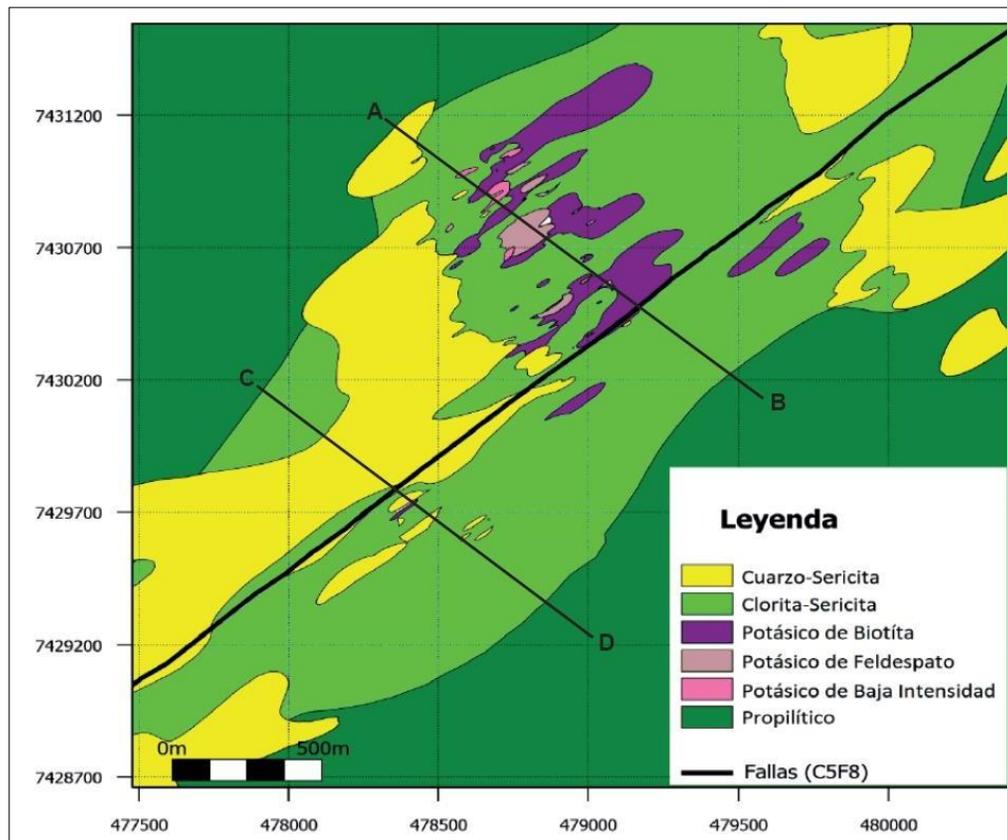


Figura 3.7: Modelo en planta Polo Sur/Sherezade, cota 1850. Extraído de Lazcano y Mamani (2022).

3.3.1. ALTERACIÓN POTÁSICA

La alteración potásica se encuentra tanto en el núcleo del sistema, en los diques y stocks de los pórfidos mineralizadores, como también en las rocas volcánicas andesíticas y dioríticas. Contiene las leyes de cobre más altas del sistema y está conformada por varias asociaciones de biotita flogopítica, feldespatos potásicos y magnetita hidrotermal (Lazcano y Mamani, 2020).

3.3.1.1. Alteración Potásica Feldespática (KF)

Afecta principalmente a los pórfidos y brechas ígneas e hidrotermales en la parte profunda de Polo Sur, y de manera muy reducida en Sherezade. Está caracterizada por el reemplazo de plagioclasas por agregados de feldespatos potásicos. Las vetillas tempranas de cuarzo no están bien desarrolladas y se observan localmente en las secciones centrales del yacimiento Polo Sur, con propagación de halos feldespáticos hacia la roca de caja. En las andesitas y dioritas de caja la alteración potásica feldespática no es intensa, observándose principalmente en Polo Sur, asociada a halos de vetillas, incorporando feldespatos potásicos a la roca que originalmente ya contenía biotita secundaria. En Polo Sur este tipo de alteración contiene cantidades apreciables de calcopirita y magnetita, localmente, bornita en zonas de brechas hidrotermales con alteración potásica más intensa.

3.3.1.2. Alteración Potásica Biotítica (KBT)

Se desarrolla principalmente en las rocas andesíticas y en el stock diorítico de Polo Sur, en zonas de contacto con los pórfidos mineralizadores, los minerales ferromagnesianos presentes favorecieron las reacciones con los fluidos provocando la precipitación de sulfuros, generación de biotitas secundarias magnésicas y precipitación de magnetita. En los diques de pórfido, esta alteración es menos intensa y está como reemplazo de minerales ferromagnesianos, y en vetillas tipo “early biotite” (EB).

En el stock diorítico de Polo Sur, la alteración potásica temprana es sobreimpuesta por el evento relacionado con la intrusión de los pórfidos mineralizadores, provocando una diseminación fina de biotita y magnetita.

En el Pórfido Granodiorítico Sherezade, la alteración tiene relictos de minerales máficos, anfíboles parcial o totalmente reemplazados a biotita fina, con minerales opacos y láminas de cuarzo y feldespato potásico. Vetillas tempranas de cuarzo del tipo A contienen feldespato potásico asociado a biotita.

3.3.2. ALTERACIÓN SERICITA-CLORITA (SC)

En Polo Sur, esta alteración es contemporánea a la alteración potásica y también se considera como un evento tardío destructor de ley de cobre. Ambos eventos tienen iguales asociaciones de clorita, mica blanca y carbonatos diferenciándose el evento tardío por el desarrollo de vetillas con halo clorítico. Estos eventos afectan a la unidad volcánica andesítica, al intrusivo diorítico y en menor medida a las brechas hidrotermales y la caja riolítica. Las vetillas tipo C incrementan el contenido de pirita en el sistema. En los pórfidos y brechas ígneas, el evento tardío destruye ley de cobre y la magnetita de los eventos potásicos anteriores.

Son la alteración principal en las secciones centrales de los pórfidos Polo Sur y Sherezade. Hacia niveles someros, esta alteración está reemplazada por el ensamble cuarzo-sericita (QS) que tiende a ocupar la porción superior de ambos sistemas (primeros 150 a 250 m). Lateralmente la alteración SC puede extenderse cientos de metros a partir del centro de cada sistema.

3.3.3. ALTERACIÓN CUARZO-SERICITA (QS)

Esta alteración se ubica en la parte superior de los yacimientos y hasta profundidades variables entre 150 a 250 m, las que aumentan en zonas con fuerte control estructural como Sherezade. En sectores profundos del sistema, se reconoce por los halos de vetillas D o asociada a estructuras tardías.

Se caracteriza por la presencia de sericita-arcilla y cuarzo, microscópicamente se ha encontrado andalucita en Polo Sur, mineral típico de alteración argílica avanzada profunda. La alteración cuarzo-sericita se superpone y destruye total o parcialmente la mineralogía de las alteraciones previas. Esta alteración hospeda la mineralización supérgena de óxidos verdes, óxidos negros y enriquecimiento secundario, la que en Sherezade se profundiza debido al control estructural dominante. Se incluye en esta unidad de alteración la alteración cuarzo-turmalina que está asociada a brechas tardías de cuarzo–turmalina, con turmalina diseminada o en vetillas.

3.4. MINERALIZACIÓN

La mineralización de Polo Sur está relacionada al emplazamiento de pórfidos y tiene un perfil de lixiviación y enriquecimiento secundario, mientras que en Sherezade el perfil de mineralización está controlado por una serie de estructuras NE que atraviesan el yacimiento, lo que forma zonas con menor continuidad lateral. Ambos perfiles de mineralización poseen 4 zonas: zona de lixiviación-oxidación, zona intermedia mixta, zona de enriquecimiento secundario y zona con mineralización primaria.

En Polo Sur, bajo una capa de gravas estériles de 60 a 90 m de espesor y cerca del contacto con la roca basal, se desarrollan pequeños lentes con mineralización de cobre en forma de óxidos negros y proporciones menores de óxidos verdes, con leyes de $CuT \geq 0,1\%$ (Lazcano y Mamani, 2020).

3.4.1. ZONA DE LIXIVIACIÓN-OXIDACIÓN

En Polo Sur esta zona tiene espesores de hasta 200m, con una mineralogía de limonitas de goethita, hematita y jarosita distribuidos de forma diseminada en fracturas y vetillas, también hay relleno parcial de espacios abiertos con cemento hidrotermal de turmalina y en clastos de brechas hidrotermales (Perelló, 2002). La presencia de alunita es típica en la zona supérgena, debido a la oxidación de la pirita en condiciones ácidas. En Sherezade la zona tiene un fuerte control estructural NE. La lixiviación en ambos depósitos se asocia a la alteración cuarzo sericita, con leyes de $CuT < 0,1\%$ (Lazcano y Mamani, 2020).

Polo Sur posee mineralización de óxidos de cobre, con intercalaciones de niveles limoníticos, donde se definen zonas mineralógicas de “Óxidos Verdes” y “Óxidos Negros”. Los Óxidos Verdes incluyen atacamita, brochantita, crisocola y cantidades menores de antlerita asociados a limonitas rojas hematíticas y trazas de calcosina y pirita. La zona de “Óxidos Negros” se compone de arcillas y limonitas con cobre, filosilicatos con cobre (cloritas, biotita), cantidades subordinadas de atacamita y presencia de sulfuros primarios como calcopirita (Lazcano y Mamani, 2020). Los Óxidos verdes y Óxidos negros presentan una clara zonación espacial con un dominio de Óxidos verdes en la parte S central y hacia el sector NW, mientras que los Óxidos negros presentan un mayor desarrollo en el sector SE y N del depósito (Lazcano y Mamani, 2020).

En Sherezade la zona de óxidos negros es reducida en extensión, lo que se refleja razones de solubilidad media mayores que en Polo Sur. Los cuerpos de óxidos forman bolsones subverticales por las estructuras NE, bien representado en la parte S del depósito (Lazcano y Mamani, 2020).

3.4.2. ZONA MIXTA

Zona con una distribución irregular que representa la transición entre la zona de óxidos y la zona de enriquecimiento secundario, controlada por las estructuras y por la litología (Perelló, 2002). Los espesores son muy variables y van de un par de metros a decenas de metros (~50 m) y se caracteriza por mezcla de limonitas, óxidos de cobre como atacamita y brochantita, calcosina, calcopirita, pirita, y calcantita localmente. Las leyes promedio de cobre varían entre 0,5% y 0,6%. Esta zona tiene relación de continuidad hacia la zona inferior de enriquecimiento secundario y, localmente presentan niveles de mineralización parcial lixiviada de bajas leyes ($CuT < 0,1\%$), con trazas de óxidos verdes y/o negros, trazas de sulfuros de cobre y una moderada a fuerte presencia de limonitas (Lazcano y Mamani, 2020).

3.4.3. ZONA DE ENRIQUECIMIENTO SUPÉRGENO

Esta zona se dispone de forma errática en un fondo con mineralización hipógena de pirita-calcopirita. Existen lugares con mayor o menor contenido de calcosina y/o covelina, formando así sectores locales dominados por mineralogía de enriquecimiento supérgeno de cobre. Está

hospedada por la alteración QS con abundantes vetillas D (Perelló, 2002), y presenta un control estructural principalmente en Sherezade. Estudios calcográficos muestran crecimientos de calcosina y covelina reemplazando cristales de pirita, calcopirita y bornita, y también asociaciones entre covelina y calcosina (Lazcano y Mamani, 2020).

La parte superior de la zona presenta las leyes más altas de cobre, mientras que, en profundidad las leyes bajan debido a la disminución de calcosina y aparición de covelina, o una combinación, además de la disminución de la intensidad del enriquecimiento respecto al total de sulfuros presentes (Lazcano y Mamani, 2020).

3.4.4. ZONA PRIMARIA

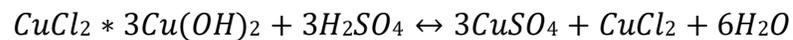
La mineralización hipógena está constituida principalmente por pirita y calcopirita, con muy escasa bornita, y con contenidos menores de sulfuros secundarios locales (< 10%). La molibdenita es importante en vetillas y algunos cuerpos de brechas hidrotermales (Lazcano y Mamani, 2020).

En Polo Sur la zona primaria consiste en una zona central de calcopirita y trazas de bornita en alteración potásica y sericita-clorita temprana. Lateralmente, aumenta la cantidad de pirita disminuyendo las leyes del yacimiento, para pasar finalmente a un halo de cuarzo-sericita donde domina la pirita. En Sherezade hay escasa información en la zona primaria y los pocos sondajes profundos muestran la baja ley del sistema primario siguiendo el patrón estructural característico de este depósito (Lazcano y Mamani, 2020).

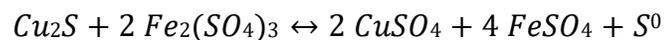
4. CONTEXTO GEOMETALÚRGICO

4.1. LIXIVIACIÓN

La lixiviación es el proceso químico que se utiliza para la extracción de uno o más constituyentes de interés de minerales a partir de mecanismos de disolución en medio acuoso. Los óxidos de cobre se lixivian rápidamente con ácido sulfúrico en comparación con otros minerales de cobre, lo que involucra reacciones ácido base donde se obtiene una sal disuelta y agua. Como lo que ocurre al lixiviar atacamita:



Los sulfuros de cobre por el contrario tienen un proceso de lixiviación mucho más lento e implican reacciones de óxido-reducción con Fe^{+3} para provocar la oxidación en el mineral. Los sulfuros secundarios como la calcosina o covelina se disuelven más rápido que la calcopirita, pero siguen siendo reacciones muy lentas que pueden llegar a demorar semanas. Ejemplo de disolución de calcosina:



4.1.1. CONSUMO DE ÁCIDO EN LA LIXIVIACIÓN

La obtención de los constituyentes de interés en el proceso de lixiviación es gracias a la adición de ácido sulfúrico para su extracción, pero los minerales de mena no son los únicos que lo consumen. La ganga es un importante consumidor de ácido en este proceso y es fundamental identificar los minerales de mayor consumo para optimizar la adición de este componente.

Chetty (2018) menciona que algunos de los factores que influyen en el consumo de ácido son:

- El tamaño del grano mineral.
- Cristalinidad mineral.

- Partículas aglomeradas en comparación con las sueltas.
- Fuerza ácida.
- Porosidad.
- Temperatura.

La Tabla 4.1 muestra la reactividad de silicatos típicos de pórfidos de cobre y el grado de solubilidad en condiciones de lixiviación en pilas. Las arcillas como el grupo de las esmectitas son importantes en este proceso (ya sean producto de la alteración mineral o producto de las reacciones ganga y ácido en la pila), esto porque las arcillas tienen la capacidad de retener el ácido, no lo consumen, pero provoca que no interactúe con los minerales de mena para la extracción de Cu (Chetty, 2018).

Tabla 4.1: Reacción relativa de silicatos de ganga en condiciones de lixiviación en pilas. Extraído de Chetty, 2018.

Mineral Solubility	
Readily Soluble:	
#biotite:	$(\text{H,K})_2(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3 + 10\text{H}^+ = 2\text{K}^+ + 2\text{Al}^{+++} + 3\text{H}_4\text{SiO}_4 + 2(\text{Fe,Mg})^{++}$
Moderately soluble:	
chlorite:	$(\text{Fe,Mg})_3[(\text{Si,Al})_2\text{O}_5](\text{OH})_4 + 6\text{H}^+ = 3(\text{Mg,Fe})^{++} + \text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Al}^{+++} + \text{H}_2\text{O}$
epidote:	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}(\text{Al,Fe})\text{OH}[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{SiO}_4] + 13\text{H}^+ = 2\text{Ca}^{++} + 2\text{Al}^{+++} + (\text{Al,Fe})^{+++} + 3\text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{O}$
#pyroxene:	$\text{Ca}(\text{Mg,Fe})(\text{SiO}_3)_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{++} + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Mg}^{++}$
amphibole:	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_4\text{Al}[\text{Si}_7\text{AlO}_{22}](\text{OH})_2 + 18\text{H}^+ + 4\text{H}_2\text{O} = 2\text{Ca}^{++} + 4\text{Mg}^{++} + 2\text{Al}^{+++} + 7\text{H}_4\text{SiO}_4$
#anorthite:	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 10\text{H}^+ = 2\text{Ca}^{++} + 2\text{Al}^{+++} + 2\text{H}_4\text{SiO}_4$
Poorly soluble:	
Muscovite, albite, K-feldspar; quartz, clays *, anhydrite	

4.2. PROCESO HIDROMETALÚRGICO

La hidrometalurgia es la rama de la metalurgia extractiva que estudia los procesos que permiten la extracción y obtención de metales y/o compuestos desde sus minerales, usando soluciones líquidas, acuosas y orgánicas.

El Proyecto Polo Sur no considera la construcción de una planta de tratamiento, esto porque utilizará la infraestructura disponible del DMC, que comprende la planta de chancado, aglomeración y lixiviación de la mina Encuentro, y la planta de extracción por solventes y electro-obtención (SX-EW) de la mina El Tesoro.

De esta forma las etapas que contempla el proceso se detallan a continuación:

- **Transporte:** el material extraído desde los rajos será transportado a través de camiones hacia la planta procesadora en la mina Encuentro.
- **Chancado:** la extracción desde la mina genera material de diversos tamaños, que pueden llegar a tener diámetros métricos. Por lo tanto, se realiza una reducción de tamaño para que la mineralogía que contiene Cu quede expuesta a la solución lixiviante. El material con tamaños desde 10” a 1 m y se reduce a partículas de tamaño 3/4” a 1/4”
- **Aglomeración:** el chancado produce partículas finas que dañan la permeabilidad de la pila impidiendo el paso de la solución lixiviante, para que esto no ocurra se realiza el proceso de aglomeración, donde las partículas más finas se adhieren a las más gruesas. El material chancado es ingresado a tambores donde se mezcla con agua y ácido sulfúrico para que se aglomere y dejarlo listo para la etapa de lixiviación.
- **Lixiviación:** en esta etapa el material es transportado y depositado en pilas de 4 a 5 m de altura. Las pilas son regadas por redes de cañerías y aspersores con soluciones ácidas que la humecta y disuelve el cobre, el que percola como solución. La solución rica efluente de la pila (PLS) se acumula en una piscina desde donde se bombea para ser transportada a la siguiente etapa de extracción por solventes en la planta SX-EW en la mina El Tesoro.
- **Extracción por solventes:** en este proceso se trasfiere el ion de Cu desde la solución (PLS) a una molécula orgánica, donde se intercambia con un ion de hidrógeno. Luego hay una etapa de re-extracción, donde el Cu unido a la molécula orgánica es removido por una solución de ácido sulfúrico. La solución de salida es un electrolito libre de impureza, con una concentración aproximada de 45 g/L.

- **Electro-obtención:** consiste en la transformación electroquímica del cobre disuelto en cobre metálico que se deposita en un cátodo mediante energía eléctrica, obteniéndose cátodos de cobre de alta pureza (99,99% de cobre).

4.3. UNIDADES Y MODELOS GEOMETALÚRGICOS VIGENTES

Las Unidades Geometalúrgicas (UGM) se definen como el agrupamiento de muestras geometalúrgicas que presentan comportamientos diferenciables geológica y metalúrgicamente. Las UGM's son la base para la estimación de variables geometalúrgicas en modelos in situ y se definen a partir de análisis exploratorio de datos (EDA), estas unidades deben presentar continuidad, sentido geológico y determinada respuesta metalúrgica a partir de ensayos metalúrgicos.

El modelo geometalúrgico es el modelamiento tridimensional de variables geológicas, mineralógicas, geotécnicas y metalúrgicas, que se emplean para comprender las respuestas metalúrgicas de los minerales en el proceso o son parámetros de entrada en los modelos de escalamiento.

En el Proyecto Polo Sur la definición actual de UGM para la extracción de cobre está basada en la mineralogía de mena y la química asociada (CuT, CuS y razón de solubilidad) para la zona de oxidación. Mientras que para la zona de enriquecimiento supérgeno se definieron con mineralogía normativa, a partir de análisis de cobre secuencial: cobre total (CuT), cobre soluble (CuS), cobre cianurable (CuCN) y cobre soluble en ácido férrico (CuF).

La información de mapeo y data de testeos geometalúrgicos y mineralógicos con las que se han definido las UGM han sido obtenidos a partir de numerosas campañas de muestreo desde el año 2013. De esta forma para el modelo de prefactibilidad se definieron las siguientes unidades: Óxidos Verdes (OXV), Óxidos Negros (OXN), Mixtos (MX), la zona de enriquecimiento secundario (SECC) es dividida en Sulfuros Fuertes (SF) y Sulfuros Débiles (SD), y las unidades de transición ST1 y ST2. El resumen de esas unidades se muestra en la Tabla 4.2 con las características químicas que las definen a cada una de ellas.

Las zonas de óxidos y mixtos fueron definidas a partir de las últimas campañas en las Fases 3 y 4 de prefactibilidad (Figura 4.1), para reconocer la variabilidad tanto en el depósito de Polo Sur como en Sherezade. Sumando una cantidad de 74 minicolumnas entre ambas zonas. Esta división se realizó tomando las asociaciones de mena y análisis químicos de cobre total, cobre secuencial y la razón de solubilidad. Para los Óxidos Verdes se consideró la mineralogía resumida en la Tabla 4.1 con una razón de solubilidad mayor o igual a un 45% y menor a un 45% para los Óxidos Negros.

Tabla 4.2: Definición de UGM del Proyecto Polo Sur, con mineralogía y química asociada. ArcCu: arcillas con cobre. RCuS: razón de solubilidad de cobre soluble. Sulcu: sulfuros de cobre. CC: calcosina. CV: covelina. CPY: calcopirita. Rx: razón parcial.

Nombre	UGM	Mineralogía	Química
Óxidos	OXV	Atacamita - brochantita ± crisocola, calcosiderita, -chalcantita, ± sulfuros relictos	Cut \geq 0,1 y RCuS \geq 45%
	OXN	Cu_biotita, Cu_clorita>lim-Cu, calcosiderita. Oxn (Fe-Cu), Oxn (Mn-Cu)	ArcCu \leq OXN. Cut \geq 0,1 y RCuS<45%
Mixto	MX	Atacamita-brochantita, lim-Cu, calcosina	Presencia de óxidos y sulfuros
Sulfuros	SECC	Calcosina>>calcopirita>covelina	CC \geq 70% Sulcu & CC+CV \geq 0,15Rx total
	ST1	Calcosina-covelina>calcopirita	(CC+CV \geq 70% Sulcu o 30% \leq CC<70% Sulcu) & CC+CV \geq 0,15 Rx total
	ST2	Calcopirita>covelina>calcosina	30%<CPY \leq 90% Sulcu & CC<30% Sulcu; CC+CV>0,15 Rx total

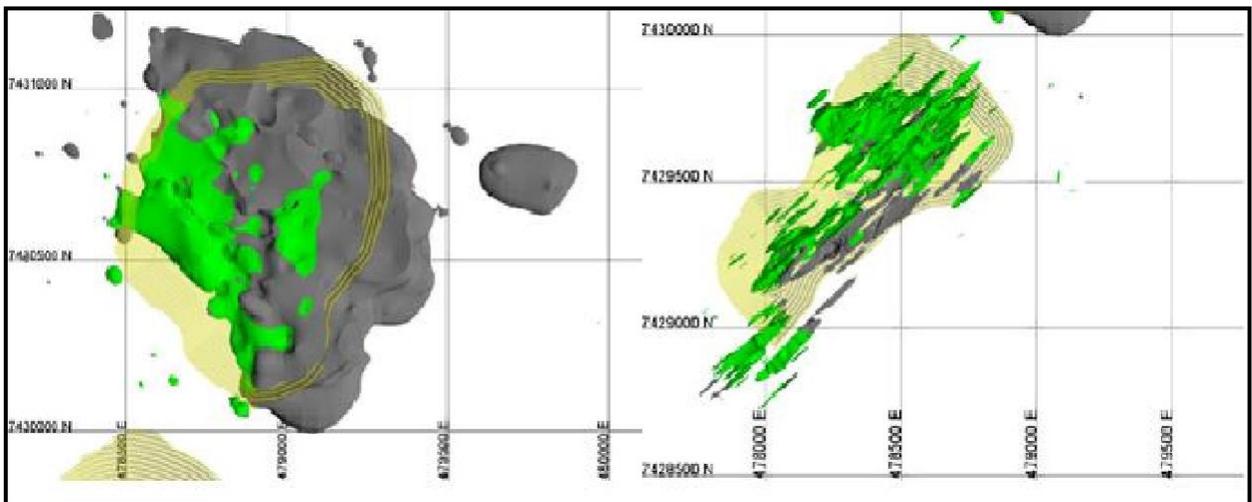


Figura 4.1: Modelo 3D UGM Óxidos Verdes y Óxidos Negros. Color verde corresponde a la zona de Óxidos Verdes y el color gris a la zona de Óxidos Negros. Depósito Polo Sur imagen izquierda y Sherezade en la imagen derecha. Extraído de Lazcano y Mamani (2020).

El modelo geometalúrgico de sulfuros se realizó en base a mineralogía normativa y análisis de cobre secuencial, donde se determinaron las mineralogías principales siendo estas calcosina, covelina y calcopirita. Se realizó una validación de los análisis químicos normativos con otras técnicas de caracterización mineralógica como QEMSCAN, calcografía y con el mapeo geológico obteniendo buenas correlaciones entre ellas. Luego se definieron las unidades geometalúrgicas de sulfuros secundarios que están resumidas en la Tabla 4.1, para posteriormente ser modeladas de forma tridimensional como se muestra en la Figura 4.2

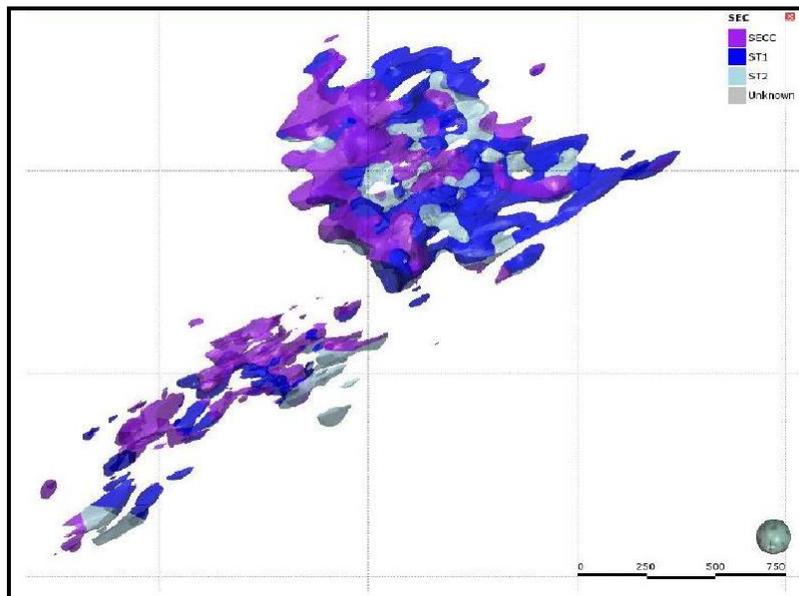


Figura 4.2: Modelo 3D UGM de sulfuros. Extraído de GeoEstima (2021).

5. BASE DE DATOS

La base de datos a analizar contiene datos proporcionados de los mapeos geológicos de las diferentes campañas de sondajes, con información de alteraciones, mineralogía, litologías y estructuras. También datos de estudios mineralógicos *quantitative evaluation of minerals by scanning electron microscopy* (QEMSCAN) y difracción de rayos X (DRX) realizadas en 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 y 2019, además de pruebas geometalúrgicas de botellas Iso pH y columnas unitarias realizadas a partir de las campañas de 2013, 2014 y 2017.

5.1. MAPEO GEOLÓGICO

El mapeo geológico cuenta con gran cantidad de información obtenida con numerosas campañas de sondajes, haciendo una recopilación de las campañas más antiguas (incluyendo sondajes anteriores a la adquisición de los depósitos por AMSA), con campañas hasta el año 2021 con un total de 525 sondajes que suman en conjunto 164.250 m. Los sondajes cuentan con información analizada que es registrada en detalle en una cartilla digital “DMC_POLO_SUR” mediante el *software* Xilab MAP en tramos de diferentes longitudes, incluyendo tramos no mapeados y que no cuentan con datos.

Al tener numerosas campañas de sondajes, la información se ha registrado con diferentes metodologías, por lo que la unificación de los datos es fundamental al momento de realizar los modelos geológicos. Es por esta razón que las litologías, alteraciones y zonas minerales son agrupadas con diferentes criterios para facilitar el modelamiento de unidades en una base de datos de modelo geológico “ps_2021”.

5.1.1. LITOLOGÍAS

La base de datos contiene numerosas litologías registradas (40), que para efectos del modelamiento geológico se simplificó unificando litologías. Por ejemplo, algunas brechas que, si bien poseen clastos de diferente composición corresponden a un mismo evento de brechización, por lo que se unifican en un solo código de modelamiento. Definiendo así las litologías para el modelo geológico

(Tabla 5.1 y 5.2). Hay litologías que se repiten entre los depósitos de Polo Sur y Sherezade, pero también hay litologías que diferencian ambos depósitos.

Para efectos del registro, en las rocas ígneas intrusivas se debe considerar su textura ya sea fanerítica equigranular, inequigranular o porfídica, además del listado de minerales formadores de roca. Para brechas y gravas se debe que agregar la textura si corresponde a textura brechosa, y completar el porcentaje de matriz y clastos, e indicar si la matriz está o no mineralizada.

Tabla 5.1: Unidades litológicas de Polo Sur.

Nombre	Código Agrupado	Código BD Oficial
Gravas	GRA	GRA
		GRAVAS
Brecha hidrotermal	BXH_PS	BXIGRD
		BX1C
		BX1P
		BXIGR
		BX2
		BXH_6
Brecha Cuarzo-Turmalina	BXQT_PS	BXQT
Complejo intrusivo Sherezade	CSH	PSH
Diorita	DIO	DIO
		DIOR
		PDRTC
Pórfido Dacítico Intermineral	PORDAC1	PGRND
		GRD
		PORDAC_4.2
Pórfido Dacítico tardío	PORDAC2	PORDAC_0.1
Rocas Volcánicas Riodacíticas	VRD	VRD
		TUFRIO
		BXV
Rocas Volcánicas Andesíticas	VAND	VAND
		PORAND
		BXAND
No Modelado	NO_MODEL	SI
		VETA
		<i>BXH_0.15*</i>
		SR
		BXFM
		BXT
		NOMAP
		OTRO
RXIND		

Tabla 5.2: Unidades litológicas de Sherezade.

Nombre	Código Agrupado	Código BD Oficial
Gravas	GRA	GRAVAS
		GRA
Brecha Hidrotermal	BXH_SH	BXHTI
		BXIGRD
		BXHT
		BXIGR
		BXHL
		BXHS
Brecha Cuarzo-Turmalina	BXQT_SH	BXQT
Complejo intrusivo Sherezade	CSH	DIOR
		PGSH
		PSH
		DIO
		ITON
		PORDAC
Unidad Volcánica Riodacítica	VRD	VRD
		VAND
		PORAND
		VETA
No Modelado	NO_MODEL	BXT
		SI
		SR
		OTRO
		NOMAP
		BXFM
		RXIND
		BX2

En los gráficos (Figura 5.1 y 5.2) se observa que en el depósito Polo Sur la litología dominante son las dioritas seguido de las rocas volcánicas riodacíticas y andesíticas, mientras que en el depósito Sherezade predominan las rocas volcánicas riodacíticas y el Complejo Intrusivo Sherezade (que incluye dioritas, el pórfido granodiorítico Sherezade y el pórfido tonalítico).

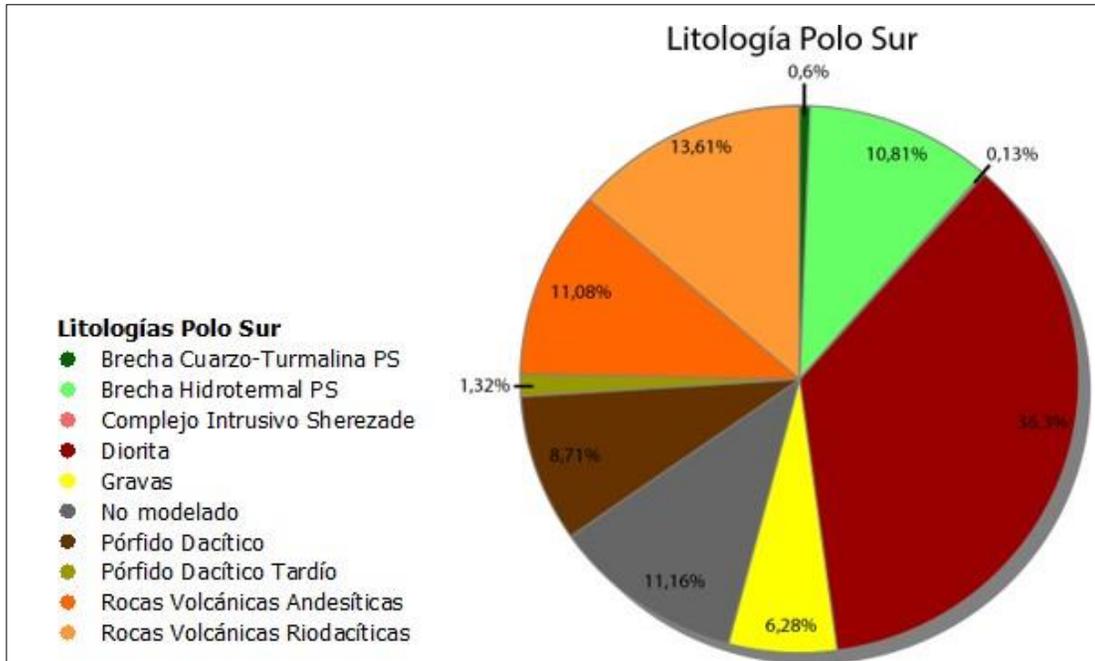


Figura 5.1: Unidades litológicas del depósito Polo Sur. Según su abundancia en mapeo de sondajes.

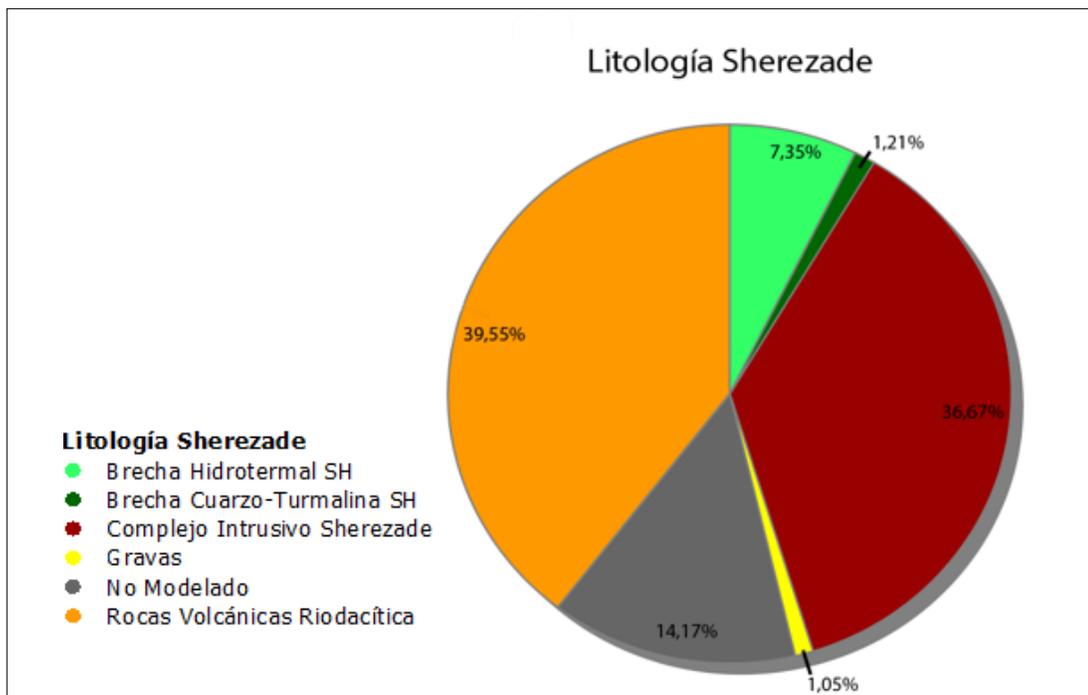


Figura 5.2: Unidades litológicas del depósito Sherezade. Según su abundancia en sondajes mapeados.

5.1.2. MINERALOGÍA

5.1.2.1. Óxidos de Cu.

Los Óxidos de Cu incluye minerales de cobre que se formaron a partir de la oxidación de sulfuros de cobre. Esto quiere decir que además de los óxidos de cobre (en sentido estricto) también incluye a sulfatos, cloruros, carbonatos, arcillas con cobre y mineraloides. Los óxidos que han sido reconocidos en el proyecto son: atacamita, brochantita, crisocola, arcillas con cobre, limonitas con cobre, cobre nativo, cuprita, óxidos negros, chalcantita, antofagastita y tenorita.

Se cuantifica su abundancia porcentual global en la roca y luego su abundancia porcentual relativa para cada óxido reconocido respecto al total de óxidos presentes, además de registrar el porcentaje de ocurrencia mineral de cada uno.

En la Figura 5.3 se muestran gráficos de probabilidad de las menas de óxidos de cobre en porcentajes relativos, donde es posible determinar que las principales menas para el depósito Polo Sur son la atacamita/brochantita, arcillas con cobre y limonitas con cobre, seguido de los óxidos negros y crisocola, mientras que el cobre nativo/cuprita, la chalcantita y tenorita tienen presencia muy baja a nula. La antofagastita se omite debido a que tiene porcentaje igual a cero en los sondeos mapeados.

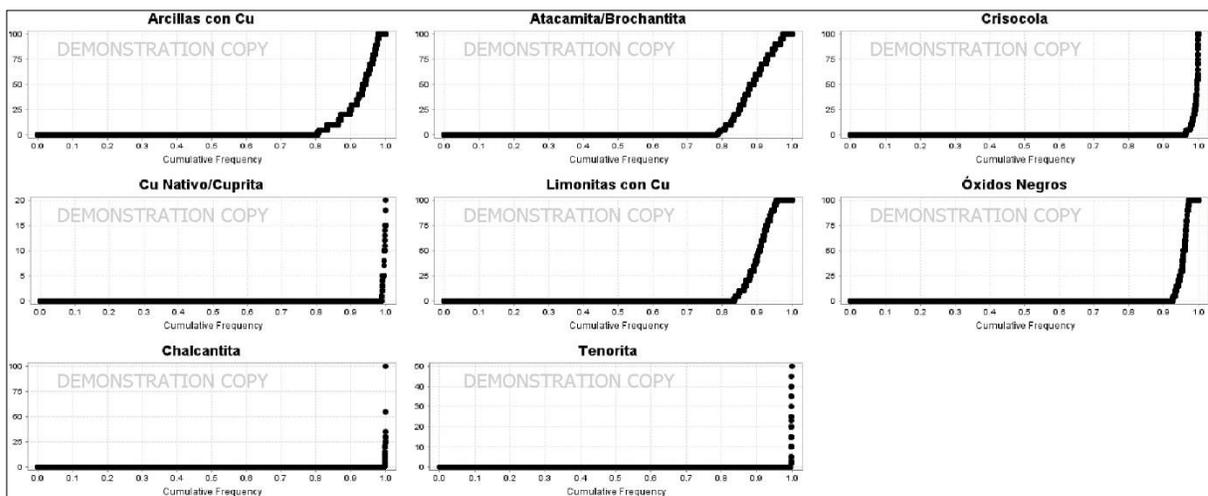


Figura 5.3: Gráficos de porcentajes relativos de óxidos de cobre del depósito Polo Sur. Eje vertical porcentaje relativo en volumen, eje horizontal frecuencia acumulada.

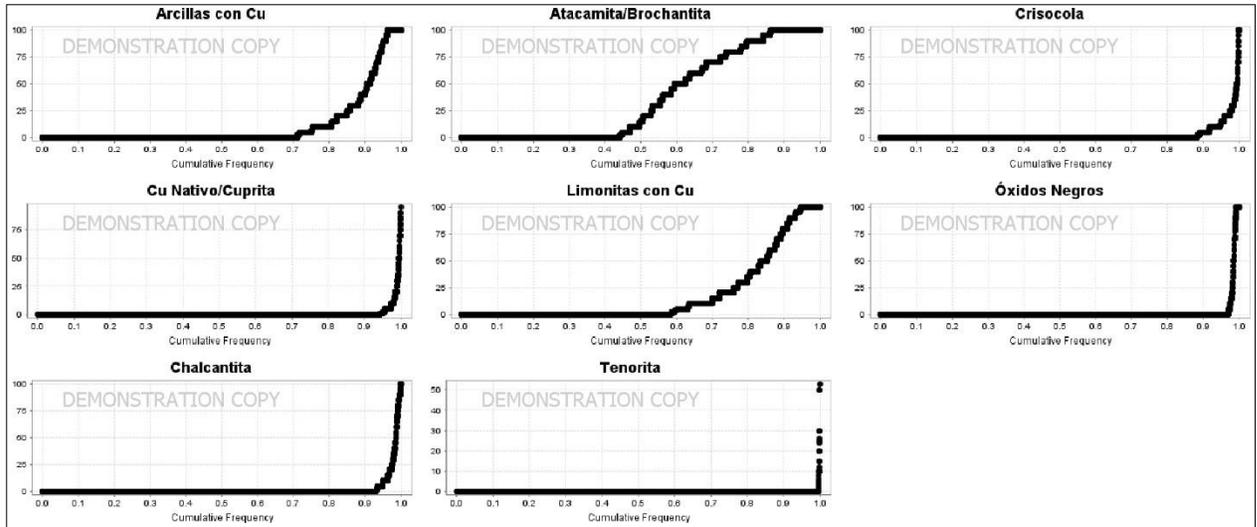


Figura 5.4: Gráficos de porcentajes relativos de óxidos de cobre del depósito Sherezade. Eje vertical porcentaje relativo en volumen, eje horizontal frecuencia acumulada.

Para el depósito de Sherezade (Figura 5.4) se observa gran presencia de atacamita/brochantita que representa la mena principal junto a las limonitas con cobre y arcillas con cobre, seguido de crisocola, cobre nativo/cuprita, chalcantita, óxidos negros y muy baja o nula presencia de tenorita. La antofagastita se omite debido a que tiene porcentaje igual a cero en los sondeos mapeados.

5.1.2.2. Sulfuros de Cu y Pirita

Los sulfuros de Cu en conjunto con la pirita se describen en forma global con abundancia porcentual de la roca, para luego ser cuantificados con el porcentaje de abundancia relativa de cada especie mineral y su ocurrencia. Los sulfuros identificados en el proyecto son: pirita, calcopirita, bornita, digenita, calcosina, covelina, tetraedrita/tenantita y enargita.

En el depósito Polo Sur los sulfuros más abundantes son la pirita (ganga) y calcopirita (mena), seguido de covelina y calcosina, bornita y digenita, que está presente en porcentajes muy bajos (Figura 5.5). La tetraedrita/tenantita se omite debido a que tiene porcentaje igual a cero en los sondeos mapeados.

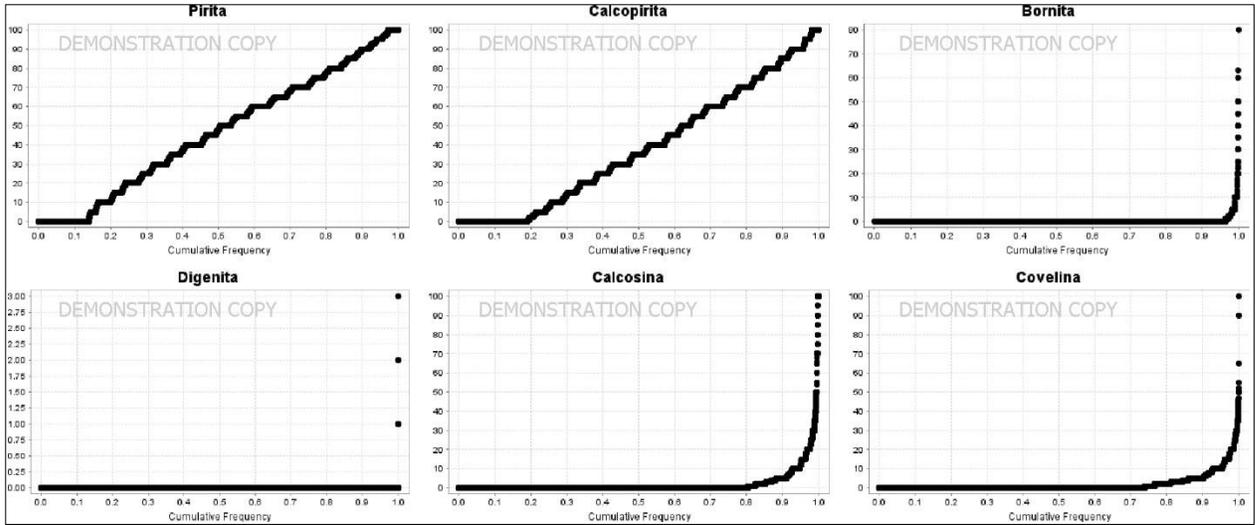


Figura 5.5: Gráficos de porcentajes relativos de sulfuros de cobre del depósito Polo Sur. Eje vertical porcentaje relativo en volumen, eje horizontal frecuencia acumulada.

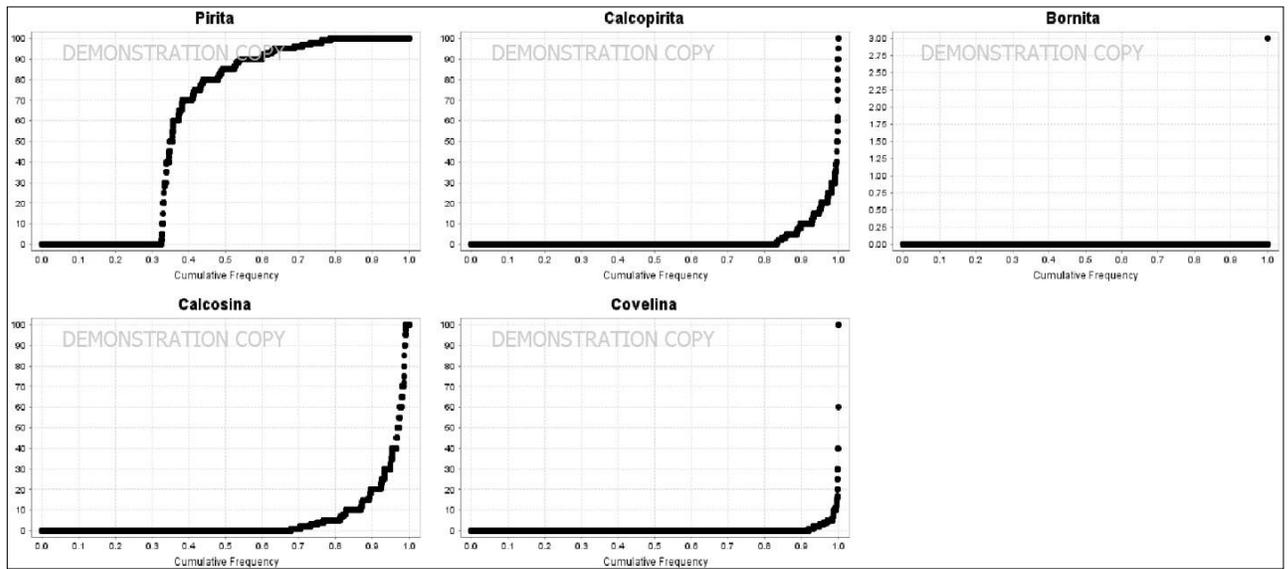


Figura 5.6: Gráficos de porcentajes relativos de sulfuros de cobre del depósito Sherezade. Eje vertical porcentaje relativo en volumen, eje horizontal frecuencia acumulada.

En el depósito Sherezade ocurre algo similar, los sulfuros principales son la pirita (ganga) y calcopirita (mena), seguido de calcosina y covelina, la bornita aparece en porcentajes muy bajos (Figura 5.6). La digenita y la tetraedrita/tenantita se omiten debido a que tiene porcentaje igual a cero en los sondeos mapeados.

5.1.2.3. Otros Sulfuros

Esta asociación de sulfuros a diferencia de los sulfuros de Cu se mapea según el porcentaje global en la roca para cada especie mineral, y su ocurrencia mineral se registra según el porcentaje relativo de cada mineral. Se incluyen en esta división la molibdenita, galena, esfalerita y pirrotina.

5.1.2.4. Óxidos de Fe

Los óxidos de Fe se registran como un porcentaje de limonitas presentes en la roca, que se cuantifica en porcentajes relativos de especies minerales que normalmente son mezclas, identificadas como hematita, goethita y jarosita.

5.1.2.5. Minerales de Ganga

Los minerales de ganga son anhidrita, yeso, hexahidrita, dufrenita, magnetita, turmalina y alunita. Estos minerales se mapean según su porcentaje global presente en la roca.

5.1.3. ALTERACIONES

Las alteraciones se registran en una matriz de alteración (Figura 5.7), donde se cuantifican a partir de los porcentajes de los minerales que definen cada alteración. Estos minerales deben sumar 100% igual que la asociación de las alteraciones. Las asociaciones que se consideran son las definidas para un típico ambiente de pórfido cuprífero según Sillitoe (2010).

En términos del modelamiento se agrupan diferentes códigos según la cartilla o mapeo histórico que representan una misma alteración (Tabla 5.3). Para la alteración Cuarzo-Sericítica (QS) se agregan los códigos ARG, ARGO y ARGS que corresponde a la alteración argílica, esto porque se encuentra de manera puntual y no representa un cuerpo modelable. También se agrega la silicificación (SIL), alteración mapeada en cartillas históricas que al ser revisados contienen vetillas tipo D con alto contenido de pirita que son típicas de la alteración Cuarzo-Sericítica.

Alte_Minerales v/s Alte_Asoociaciones														
Aceptar	Cancelar	Limpiar												
	DATC	Gr %	Px %	Alb %	Bt %	KFeld %	Ep %	Cl %	Ser %	Al sil (And - Pir) %	Arc %	Alun %	Sil %	<= 100
= 100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Arg Avan %									0	0	0	0	0	0
Arg %									0		0			0
Silicif %													0	0
Ser %								0	0	0	0		0	0
Cuarzo-Sericita									0		0		0	0
Ser-Verde %									0					0
Hf %							0	0	0	0			0	0
Cl-Ser %								0	0	0				0
Cl %								0	0					0
Prop %				0	0		0	0	0					0
KFeld %				0	0	0							0	0
KBt %				0	0	0							0	0
Sod-Ca %		0	0	0			0	0						0

Figura 5.7: Matriz de alteración del software Xilab MAP.

Tabla 5.3: Alteraciones del Proyecto Polo Sur.

NOMBRE	CÓDIGO AGRUPADO	CÓDIGO OFICIAL
Alteración Potásica Biotítica	KBT	KBT
Alteración Potásica Feldespática	KF	KF
Alteración Propilítica	PROP	CL
		PROP
Alteración Cuarzo-Sericítica	QS	QS
		SER
		ARG
		QTU
		SIL
		ARGS
		ARGO
Alteración Clorítica-Sericítica	SC	SC
		CLSER
Sin Alteración	SIN_ALT	SA
		SINALT
No Modelado	NO_MODEL	SI
		NOMAP
		SR

El depósito Polo Sur presenta desarrollo de la alteración potásica biotítica y potásica feldespática característico de depósitos de tipo pórfido cuprífero, mientras que en el depósito Sherezade solo es posible encontrar la alteración potásica biotítica en un porcentaje muy reducido. Por su parte las alteraciones cuarzo-sericítica y clorita-sericítica son las predominantes en ambos depósitos (Figura 5.8 y 5.9).

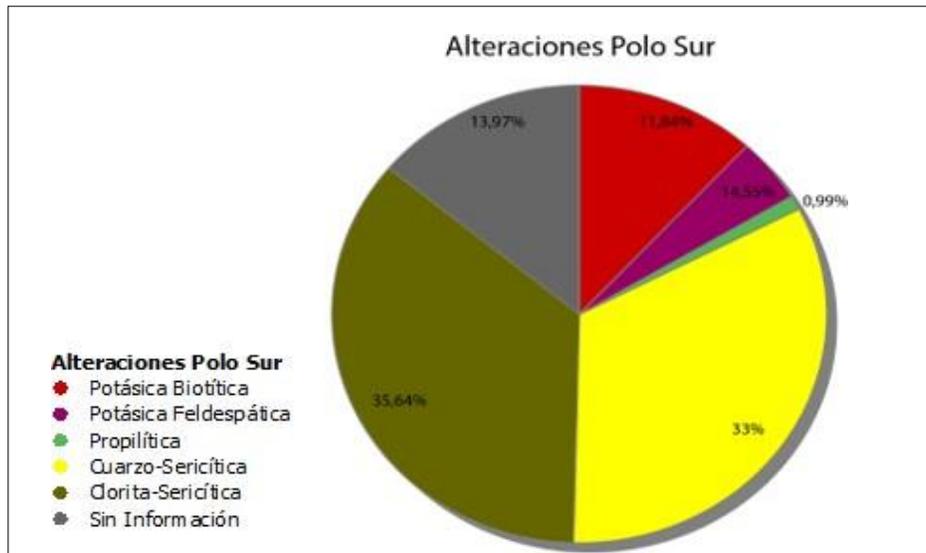


Figura 5.8: Alteraciones del depósito Polo Sur. Según su abundancia en mapeo de sondajes.

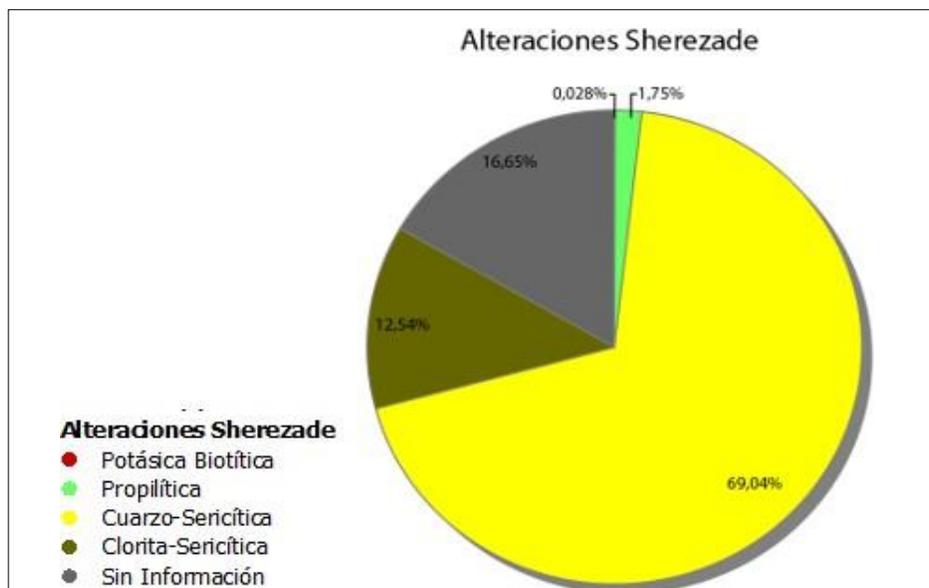


Figura 5.9: Alteraciones del depósito Sherezade. Según su abundancia en mapeo de sondajes.

5.1.4. ZONAS MINERALES

Las zonas minerales corresponden al tipo de mineralización de mena existente. En el Proyecto Polo Sur hay 12 zonas minerales definidas por criterios relacionados a la mineralogía presente y leyes visuales de CuT (Tabla 5.4), las que son validadas posteriormente con leyes de laboratorio.

Tabla 5.4: Zonas minerales y definición.

Zona Mineral	Código	Definición
Estéril	EST	Gravas no mineralizadas.
Exótico	GRM	Grava mineralizada; CuT $\geq 0,1$
Lixiviado	LIX	Hm+Go+Jr=100; CuT $< 0,1$
Parcial Lixiviada	PLIX	Limonitas + Sulfuros; CuT $< 0,1$
Óxidos Negros	OXN	Óx. Negros + LimCu + ArCu \pm Py; CuT $\geq 0,1$; CuS/CuT= 0,45-0,2
Óxidos Verdes	OXV	Óx. Verdes \pm Py; CuT $\geq 0,1$; CuS/CuT $\geq 0,45$
Mixto	MX	Óxidos de Cu + Sulfuros de Cu; CuT $\geq 0,1$
Sulfuro Secundario Débil	SSD	$10 \leq Cs+Cv+Dg < 30$; CuT $\geq 0,1$
Sulfuro Secundario Fuerte	SSF	$Cs+Cv+Dg \geq 30$; CuT $\geq 0,1$
Primario Pirítico	PPY	Py+Cpy+Bo > 90 ; Py ≥ 80
Primario Pirítico - Calcopirítico	PY-CPY	Py+Cpy+Bo > 90 ; $50 \leq Py < 80$
Primario Calcopirítico - Pirítico	CPY-PY	Py+Cpy+Bo > 90 ; $20 \leq Py < 50$
Primario Calcopirítico	PCPY	Py+Cpy+Bo > 90 ; Cpy ≥ 80

El depósito Polo Sur está caracterizado por tener casi un 50% de las zonas minerales concentradas en la zona primaria y en Sherezade esta zona presenta cerca de un 13%. Por el contrario, Sherezade tiene cerca del 60% entre las zonas de lixiviación y oxidación, y Polo Sur un 25% en estas zonas (Figura 5.10 y 5.11).

5.1.5. ESTRUCTURAS

En el mapeo geológico se registran todas las estructuras que son observadas en los sondeos analizados, tomando en consideración si posee o no alguna estructura. Luego, si se presentan estructuras se registran de la siguiente manera

- **Fallas:** con el tipo de roca asociada brecha de falla, salbanda de falla, cataclasita o milonita.

- **Zona de diaclasas:** si es que tienen algún tipo de cemento con origen hidrotermal con minerales de mena o ganga se pueden generar vetas.

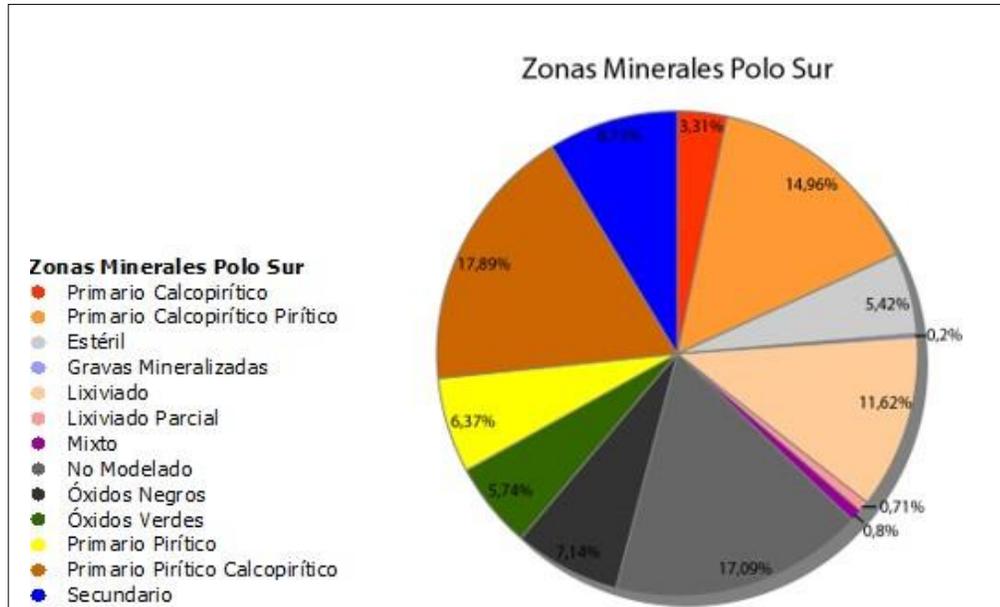


Figura 5.10: Zonas Minerales del depósito Polo Sur.

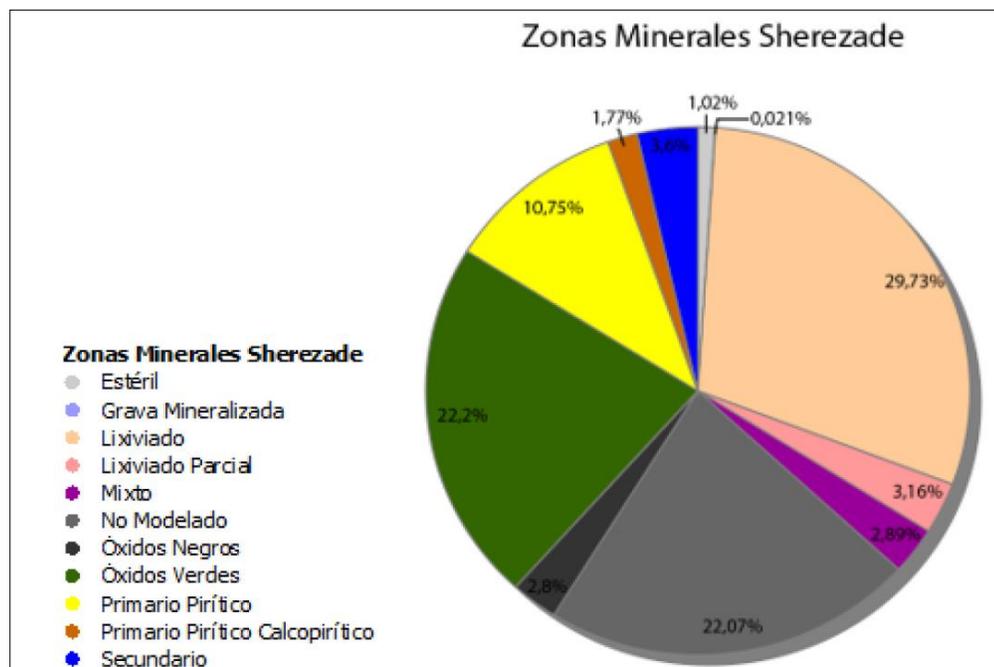


Figura 5.11: Zonas Minerales del depósito Sherezade.

- **Vetas:** para vetas con mineralogía de ganga estas se registran si tienen una potencia mínima de 10 cm y para las vetas con mineralogía de mena con una potencia mínima de 5 cm.

Además, se registra el ángulo entre la estructura y el eje del sondaje, y si este está orientado se debe indicar la orientación relativa de las estructuras respecto a la línea de orientación del sondaje (se indica si son paralelas, perpendiculares u oblicuas).

Las tendencias registradas en el proyecto son tres: la primera corresponde a una serie de fallas de rumbo N40°-60°E con manteo al este a subverticales, cruza ambos depósitos y controla el emplazamiento de los pórfidos y la mineralización de óxidos en Sherezade. Una segunda tendencia estructural de fallas con rumbo N80°E a N80°W y manteos desde 60°S a subverticales; y una última representada por fallas con rumbo N30°-60°W y manteos entre 45° a 80°NE.

5.2. CARACTERIZACIÓN GEOMETALÚRGICA

La información de caracterización geometalúrgica cuenta con análisis químicos de mineralogía QEMSCAN y difracción de rayos X (DRX), además pruebas de botellas Iso pH e Iso pH-Fe, y pruebas de columnas unitarias.

5.2.1. QEMSCAN

QEMSCAN es un sistema automatizado que permite realizar análisis químicos y mapas minerales, esto funciona ya que integra un SEM (*Scannig Electron Microscope*) y cuatro espectrómetros de rayos X (EDS: *energy-dispersive X-ray spectrometers*). La imagen BSE (electrones retrodispersados) se forma a partir del haz de electrones desde el SEM que inciden en la muestra y que por la interacción cambian la dirección de trayectoria y pueden ser captados por el detector de electrones retrodispersados.

La data cuenta con análisis de mineralogía QEMSCAN de los años 2014, 2017, 2021 y 2022. Son 331 muestras analizadas en tramos de sondajes de medida variable, que entrega la mineralogía en porcentaje en peso para cada uno, la Tabla 5.5 muestra el resumen de los datos utilizados para los

análisis. El problema de esta base de datos es que los resultados al corresponder a diferentes laboratorios, la mineralogía determinada se encuentra con distintos nombres, ya sea en inglés/español o con nombres que pueden variar en una sola letra, lo que provoca que estén distribuidos en varias columnas en la planilla Excel. Para resolver esto y trabajar la base de datos es que se agruparon en una sola columna aquellas que corresponden a un mismo mineral, y aquellos minerales de menor interés particular que pueden ser sumados en la misma clase mineral (Tabla 5.6).

Tabla 5.5: Datos QEMSCAN para el uso de análisis.

Campaña	Muestras	Cabeza	Duplicados	Ripio	Cabeza (serie 1)	Utilizado en análisis
PLS 2013 LI/CO OXI(HIST)	100	100	4	0	0	96
PLS 2017 LI FASEIII	123	110	0	13	0	110
PLS 2019 F4 PS	16	8	0	0	8	8
PLS 2019 F4 SH	18	9	0	0	9	9
2019	8	8	0	0	0	8
2021	66	66	0	0	0	66
Total	331	301	4	13	17	297

Tabla 5.6: Agrupación QEMSCAN de diferentes laboratorios.

Código agrupado	Código antiguo (año análisis)	Código agrupado	Código antiguo (año análisis)
(Cu,Al)PO₄	(Cu,Al)PO ₄	Fe-Ti Oxides	Fe-Ti Oxides (2014/2017) Illenite (2021) Illmenita+Titanomagnetita (2022)
Albite	Albite (2017) Feldspar Albite (2021)	Hematite/Magnetite	Hematita/Magnetita (2022)
Alunite	Alunite (2017/2021) Sulphate (Alunite) (2014) Alunita (2022)	Jarosite	Jarosite (2014/2021) Jarosita (2022)
Amphibole	Anfíbol (2022)	K-Feldspar	K-Feldspar (2014/2017/2021) Feldespatos K (2022)
Anhydrite/Gypsum	Anhydrite/Gypsum (2021) Ca Sulphates (2014) Gypsum/Anhydrite (2017) Anhidrita/Yeso (2022)	Limonite Hydroxides (Fe)	Limonite (Fe Hydroxides) (2014/2017) Fe Oxides/ Hidróxidos (2021)
Apatite	Apatite (2017/2021) Apatito (2022)	Limonites- Cu	Cu- Limonites (2021) Limonites- Cu (2017) Limonita (Cu) (2022)
Atacamite	Atacamite (2014/2017/2021) Atacamita (2022)	Malachite/Azurite	Malachite/Azurite (2017) Malaquita/Azurita (2022)
Barite	Baritina (2022)	Mn-Fe Wad	Mn-Fe Wad (2017)

Biotite	Biotite/Phlogopite (2017) Fe-Mg Biotite (2021) Biotita/Flogopita (2022)	Monazite	Monacita (2022)
Black Copper Oxides	Mn-Cu Black Copper (2021) Mn-Cu-Black Copper + Fe-Cu Black Copper (2014/2017) Ox (Mn, Cu, Fe) + Pitch-Cu + Wad Cu (2022)	Muscovite/Sericite	Muscovite/Sericite (2017) Sericite/Muscovite (2021) Muscovita/Illita (2022)
Bornite	Bornite (2014/2017/2021) Bornita (2022)	Native Copper	Native Copper (2021) Cobre Nativo (2022)
Brochantite	Brochantite (2021) Brochantite/Antlerite (2014/2017) Brochantita/Antlerita (2022)	Other	Others Gangue (2014) Other (2017) Others (2021) Otros (2022)
Carbonates	Calcite (2021) Carbonates (2014/2017) Ankerita/Siderita + Calcita (2022)	Other APS Minerals	Other APS Minerals (2017)
Chalcocite/Digenite	Chalcocite/Digenite (2014/2017) Chalcocite (2021) Calcosina/Digenita (2022)	Other Cu Oxides	Other Cu Oxides (2017) Other Cu oxides ³ (2021) Others Cu Oxides (2014)
Chalcopyrite	Chalcopyrite (2014/2017/2021) Calcopirita (2022)	Phosphates	Phosphates (2014) Other Phosphates (2021)
Chalcosiderite	Chalcosiderite (2017)	Other Silicates	Other Silicates (2014/2017/2021)
Chlorite	Chlorite (2017/2021) Clorita (2022)	Other Sulphates	Other Sulphates (2021)
Chrysocolla	Chrysocolla (2014/2017/2021) Crisocola (2022)	Other Sulphides	Other Sulphides (2014/2017/2021)
Clays	Clays (2017/2021) Arcillas Al (2022)	Phyllosilicates	Phyllosilicates (2014)
Covellite	Covellite (2014/2017/2021)	Plagioclase	Plagioclase (2017) Plagioclase Feldspar (2014/2021) Plagioclase (2022)
Cu Clays	Cu Clays (2017) Cu- Clays (2014)	Pseudomalachite	Pseudomalachite (2017) Pseudomalachite/Libetinite (2014) Psuedomalachite (2021) Pseudomalaquita (2022)
Cu-Biotite	Cu-Biotite (2017/2014)	Pyrite	Pyrite (2014/2021) Pyrite/Pyrrhotite (2017) Pirita (2022)

Cu-Chlorite/Clinichlore	Cu-Chlorite/Clinichlore (2014/2017)	Piroxeno	Piroxeno (2022)
Cu-Muscovite/Sericite	Cu-Muscovite/Sericite (2017/2014)	Quartz	Quartz (2014/2017/2021) Cuarzo (2022)
Cuprite/Tenorite	Cuprite/Tenorite (2021)	Rutile/Anatase	Rutile/Anatase (2021) Rutilo/Anatasa (2022)
Dufrenite	Dufrenite (2017)	Sphalerite	Esfalerita (2022)
Enargita/Tenantita	Enargita/Tenantita (2022)	Tourmaline	Tourmaline (2017) Turmalina (2022)
Epidote	Epidote (2021) Epidota (2022)	Zircon	Zircon (2021) Circon (2022)

5.2.2. DRX

La data cuenta con 470 muestras de las que se utilizan 311 para el análisis (Tabla 5.7), entregando información de la mineralogía de cada muestra y la estimación de porcentaje en peso para cada fase mineral. La difracción de rayos X (DRX) es una técnica analítica que permite determinar minerales a través de la identificación de su estructura cristalina. Consiste en el bombardeo de rayos X, sobre una muestra pulverizada dispuesta al azar, para medir los ángulos de difracción de los rayos X según la ley de Bragg. Estos ángulos dependen de las distancias interatómicas de las redes cristalinas que son específicas para cada mineral, lo que permite su identificación. Este método logra identificar fases de grano fino que son difíciles de identificar mediante otras técnicas.

Tabla 5.7: Datos DRX para el uso de análisis.

Campaña	Muestras	Cabeza	Duplicados	Concentrados	Ripio	Vacías	Utilizado en análisis
PLS_2013_LI/CO_OXI (HIST)	346	294	14	0	50	0	282
PLS_2013_FL/CO_SUL (HIST)	58	29	0	29	0	0	29
PLS_2014_LI_PFS	66	0	0	0	0	66	0
Total	470	323	14	29	50	66	311

5.2.3. PRUEBAS ISO PH

Las pruebas de botellas Iso pH, son ensayos de laboratorio que consiste en simular condiciones de lixiviación en muestras seleccionadas para obtener información de consumo de ácido, leyes de cobre, cobre soluble, extracción de cobre, entre otros parámetros. Las pruebas son realizadas con granulometría 100% bajo 10# Ty y tiempo de lixiviación de 72 horas, manteniendo un pH de 1,5 ajustado cada cierto tiempo con H₂SO₄ para las pruebas de Iso pH. La metodología es similar para

las pruebas de Iso pH-Fe, con la diferencia que se adiciona ion Fe^{+3} para aquellas muestras que contienen sulfuros según la mineralogía del mapeo geológico. La base de datos de análisis químico de botellas Iso pH cuenta con 420 muestras, 375 en el depósito Polo Sur y 45 en Sherezade. Se dividen en 240 de Iso pH y 180 de Iso pH-Fe, en tramos de sondajes con metraje de 2, 4, 8, 10, 16 y 22, donde solo se consideran los soportes de 2, 4 y 8 metros para efectos estadísticos (Tabla 5.8), además se eliminan las muestras de botellas Iso pH-Fe, pues son tratadas con otro estándar.

Tabla 5.8: Datos botellas Iso pH para el uso de análisis.

Campaña	Muestras	Duplicados	Iso pH-Fe	Soporte 10-16-22	Utilizado en análisis
PLS_2013_LI/CO_OXI(HIST)	300	12	136	18	134
PLS_2013_FL/CO_SUL(HIST)	5	0	0	1	4
PLS_2014_LI_PFS	115	9	31	0	75
Total	420	21	167	19	213

5.2.4. PRUEBAS COLUMNAS UNITARIAS

Las pruebas de columnas unitarias al igual que las botellas intenta simular condiciones de lixiviación, en este caso más parecido a la realidad simulando una lixiviación en pilas. Las muestras de granulometría 1/2" a 3/4", son apiladas en columnas de 1 y 3 metros de altura con diámetro aproximado de 15 cm, estas son regadas con soluciones de H_2SO_4 en tiempos de lixiviación entre 9 y 290 días. Este tipo de análisis entrega información de las concentraciones iniciales y finales de Cu, Fe, Fe^{+2} Fe^{+3} Cl-; extracción de cobre, consumo de ácido. La base de datos cuenta con información de columnas unitarias de 172 muestras, 128 pertenecientes al depósito Polo Sur y 44 a Sherezade, en tramos de sondaje de 14, 16, 20, 22, 30, 32 y 34 metros, que para efectos estadísticos se analizan solo los tramos de 14 y 16 metros.

Tabla 5.9: Datos resultados de columnas unitarias para el uso de análisis.

Campaña	Muestras Columnas Balance	Soporte 12-20-22-32-34	Utilizado en análisis
PLS_2013_LI/CO_OXI(HIST)	20	4	16
PLS_2017_LI_FASEIII	152	11	141
PLS_2019_F4_PS	9	2	7
PLS_2019_F4_SH	9	1	8
Total	190	18	172

6. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

6.1. ANÁLISIS LEYES DE COBRE

La ley de corte para el proyecto es de 0,2% de cobre, por lo que para realizar el análisis de leyes de cobre por litología y alteraciones se utiliza la base de datos del modelo geológico del proyecto “ps_2021” que contiene leyes de CuT determinadas a partir de espectrometría de absorción atómica. Se realiza un filtro de los datos descartando aquellos que cuentan con las siguientes condiciones: 1) Leyes de cobre menores a 0,2%, 2) celdas vacías y/o sin información, 3) las gravas por no ser una litología de interés para el proyecto y 4) las zonas minerales Estéril, Lixiviado y Lixiviado Parcial por tener leyes de cobre menores a 0,1%.

6.1.1. LEYES DE COBRE POR LITOLOGÍAS

Al contrastar las leyes de cobre por litología en el depósito Polo Sur (Figura 6.1), se evidencia que las mayores leyes están en las brechas hidrotermales seguido de las rocas volcánicas andesíticas y riódacíticas, dioritas y pórfido dacítico. En el depósito Sherezade (Figura 6.2) se evidencia también las mayores leyes en las brechas hidrotermales, seguido del Complejo Intrusivo Sherezade, las rocas volcánicas riódacíticas. Las brechas de cuarzo-turmalina en el depósito Polo Sur tienen leyes cercanas a 0,5% mientras que en el depósito Sherezade ~0,3%.

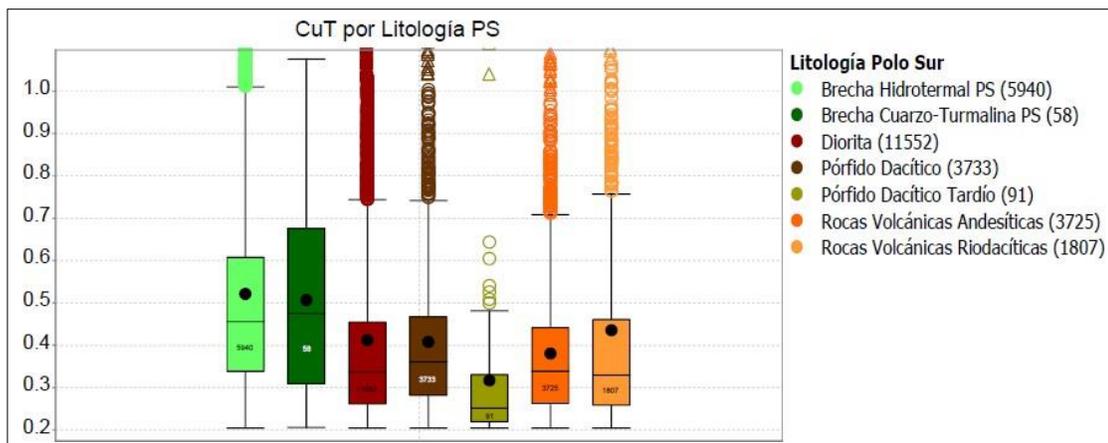


Figura 6.1: Leyes de CuT por litologías del depósito Polo Sur.

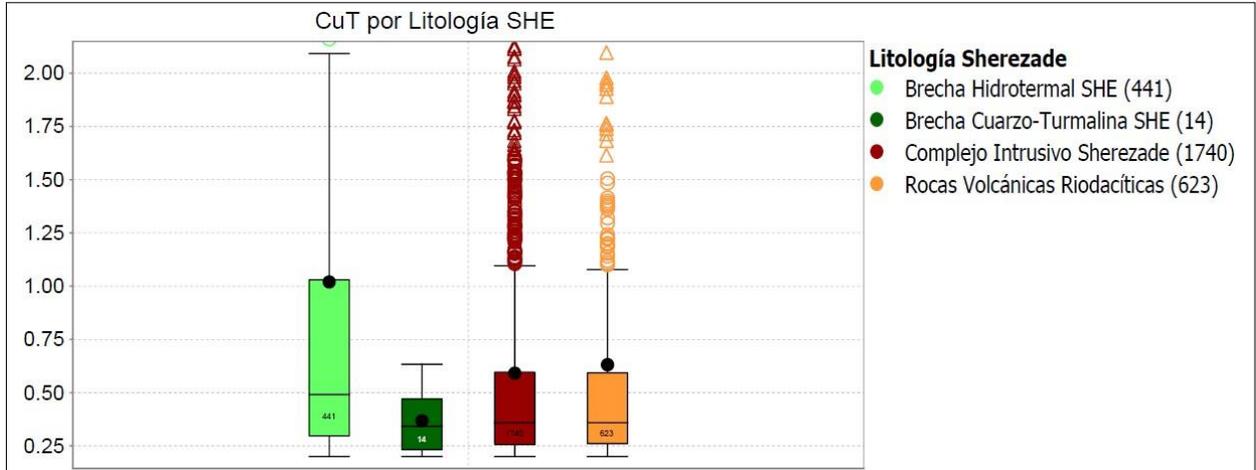


Figura 6.2: Leyes de CuT por litologías del depósito Sherezade.

6.1.2. LEYES DE COBRE POR ALTERACIONES

Las leyes más altas del depósito Polo Sur están distribuidas entre la alteración potásica feldespática y la cuarzo-sericítica, seguido por sericita-clorita y la potásica biotítica. La alteración propilítica posee las menores leyes, por lo que no es de interés en el proyecto (Figura 6.3). En el depósito Sherezade la alteración principal es la cuarzo-sericítica y es donde se encuentran las mayores leyes, seguido por la sericita-clorita, la alteración potásica por su parte está restringida en este depósito, y con baja cantidad de datos por lo que no serían representativas las leyes que muestra (Figura 6.4).

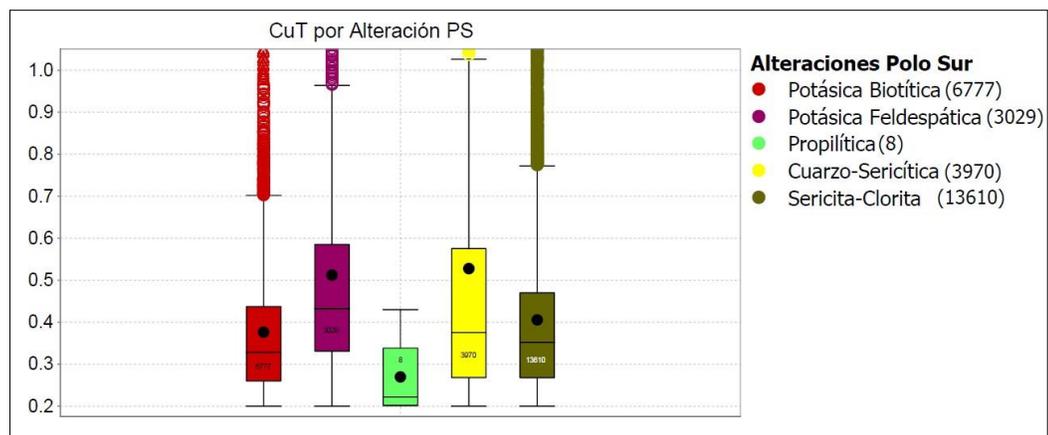


Figura 6.3: Leyes de CuT por alteraciones del depósito Polo Sur.

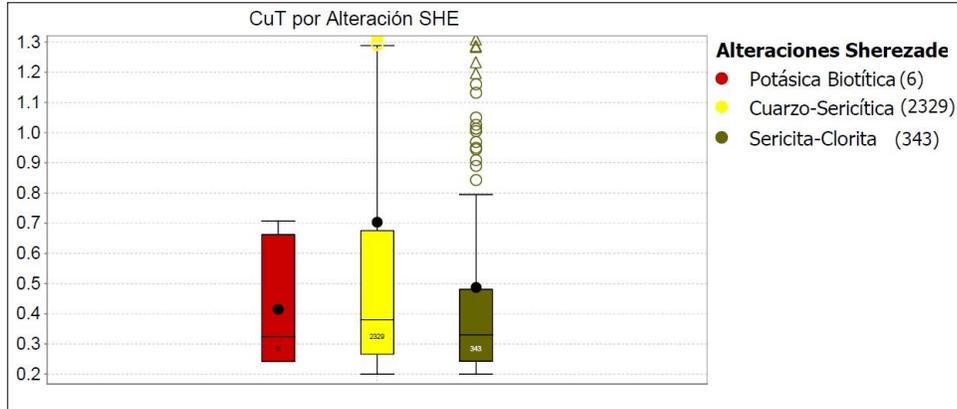


Figura 6.4: Leyes de CuT por alteraciones del depósito Sherezade.

6.1.3. LEYES DE COBRE POR ZONAS MINERALES

En el depósito Polo Sur las leyes más altas están en las zonas minerales primario calcopirítico junto a la zona de óxidos verdes, secundarios y mixtos leyes intermedias, y zonas con presencia de pirita son las que tienen las menores leyes de cobre (Figura 6.5). En el depósito Sherezade la zona mixta tiene las mayores leyes seguido de la zona de enriquecimiento secundario y de óxidos verdes, y las zonas con menores leyes de cobre son las primarias piríticas y la zona de óxidos negros (Figura 6.6).

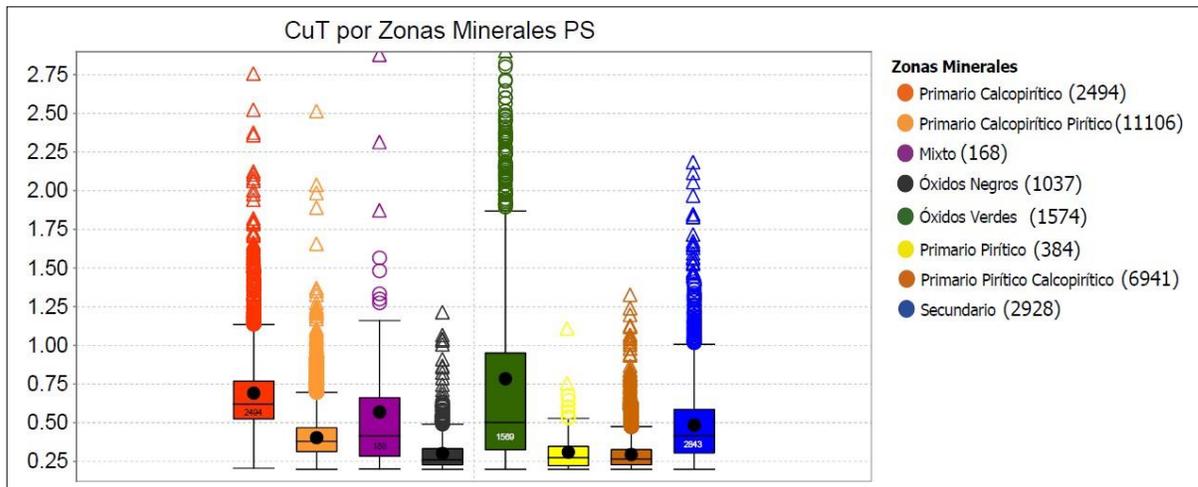


Figura 6.5: Leyes de CuT por zona mineral del depósito Polo Sur.

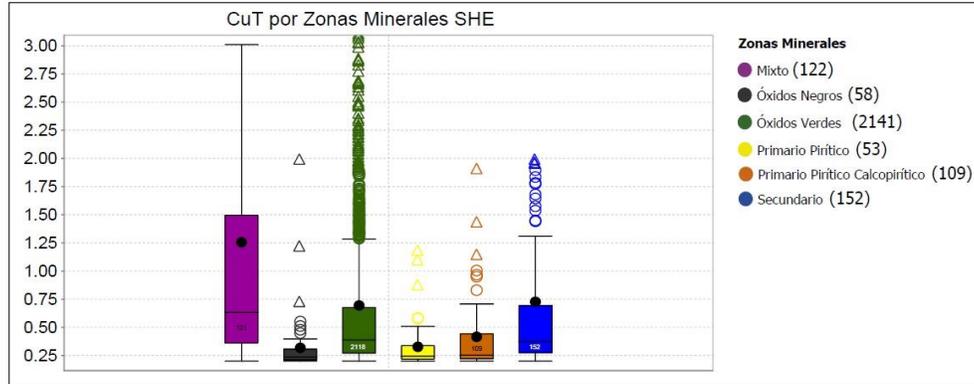


Figura 6.6: Leyes de CuT por zona mineral del depósito Sherezade.

6.2 VALIDACIÓN BASE DE DATOS

6.2.1 VALIDACIÓN MAPEO GEOLÓGICO

La base de datos del mapeo geológico contiene información histórica de diferentes campañas de sondajes, por ello los datos están mapeados según el criterio de los geólogos responsables y existen diferencias en la forma de registro entre algunas campañas. En las planillas de minerales de alteración, otros sulfuros y ganga de la cartilla de mapeo “DMC_POLO_SUR”, los minerales están registrados como porcentajes relativos en su mayoría, sin embargo, hay campañas donde están registrados según intensidad (fuerte, débil, moderada, traza o ausente), lo que hace que la información sea aún más subjetiva, por lo tanto, estos datos no son considerados para el análisis estadístico.

6.2.1.1. Zonas de alteración

Las zonas de alteración son definidas por los minerales que son mapeados a partir de los sondajes de acuerdo con su abundancia en porcentajes relativos. Al analizar las alteraciones del depósito Polo Sur (Figura 6.7), se observa que la alteración cuarzo-sericítica (QS) está bien definida según los porcentajes relativos de cuarzo y sericita que se encuentran en altas concentraciones con respecto a las demás alteraciones. Al comparar las alteraciones propilítica (PROP) y sericita-clorita (SC), se puede determinar que, si bien la PROP tiene mayor concentración de clorita y de sericita, el mineral que las diferencia es la epidota, que se concentra en mayor proporción en la alteración

PROP mientras que en la alteración SC está prácticamente ausente. Al realizar gráficos de frecuencia acumulada (Figura 6.8) puede observar que en las alteraciones potásicas la biotita y el feldespato potásico que son los minerales principales que definen estas alteraciones están presentes en menos de un 5% de los datos asignados a estas zonas.

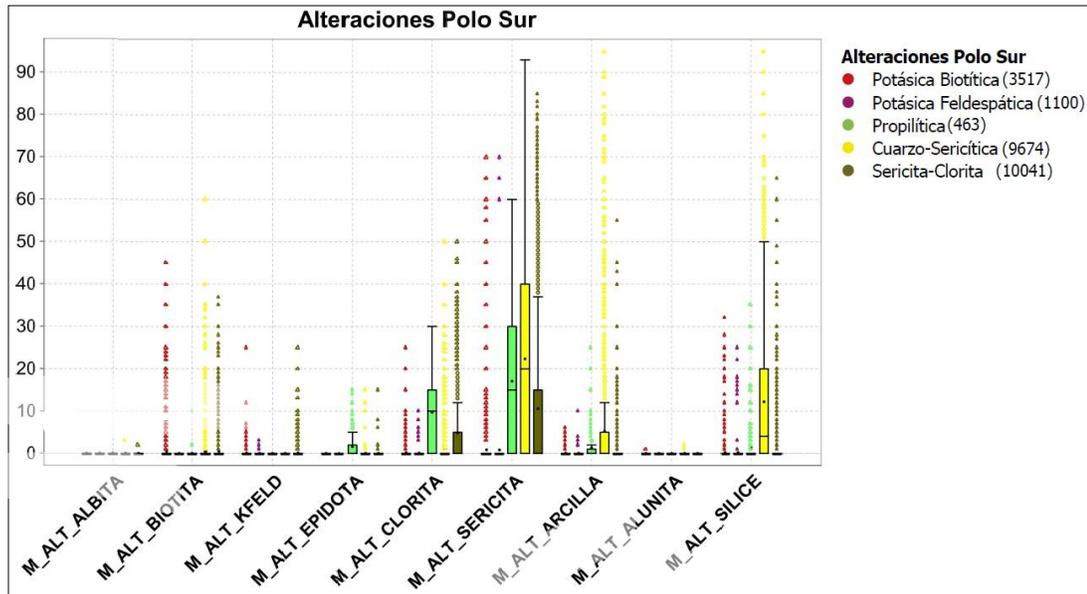


Figura 6.7: Minerales de alteración mapeados por zona de alteración en porcentajes relativos para el depósito Polo Sur.

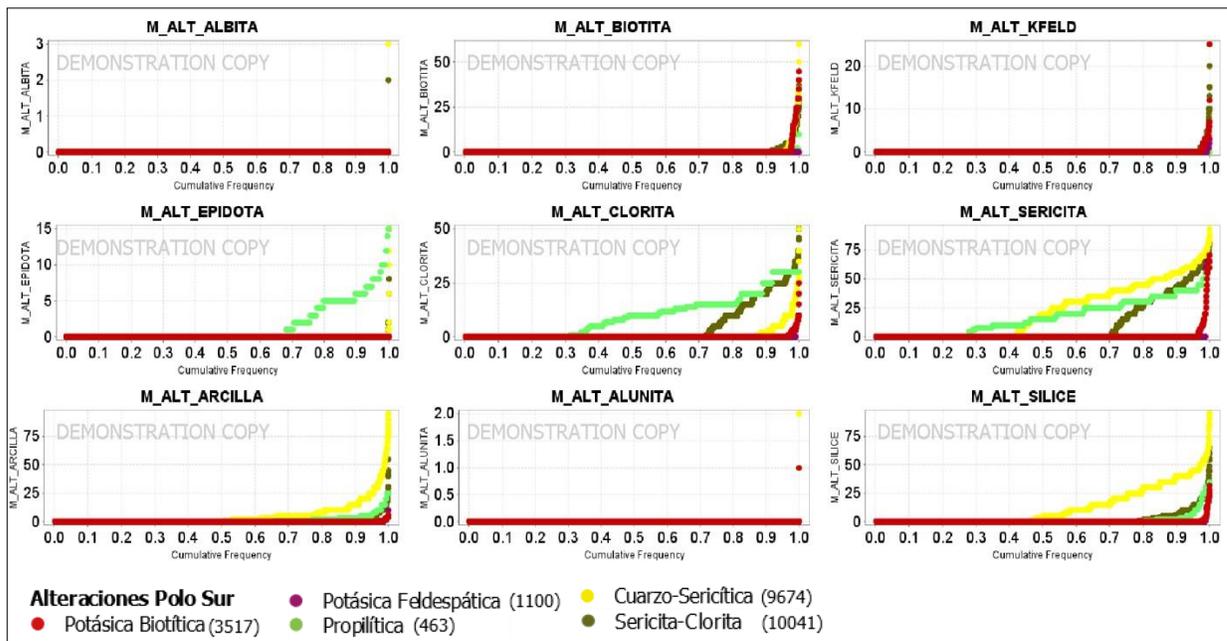


Figura 6.8: Gráficos de frecuencia acumulada de mineralogía de alteración por zona de alteración para el depósito Polo Sur.

En el depósito Sherezade predominan las alteraciones QS y SC, mientras que las potásicas están muy reducidas. Al observar la Figura 6.9 se observa una mejor definición de las alteraciones por minerales que en el depósito Polo Sur, la alteración SC contiene mayores concentraciones de sericita que la alteración PROP, y similares de clorita, en tanto la epidota sigue estando casi ausente en SC.

La alteración QS presenta las mayores concentraciones de sílice y sericita que son los minerales que definen esta alteración. Los gráficos de frecuencia acumulada (Figura 6.10) muestran que hay mayor cantidad de datos que contienen los minerales que definen cada una de las alteraciones, caso contrario a lo que ocurre en el depósito Polo Sur, donde hay gran cantidad de datos sin los minerales que las definen, por lo que la asignación de alteraciones estaría mejor definida en el depósito Sherezade.

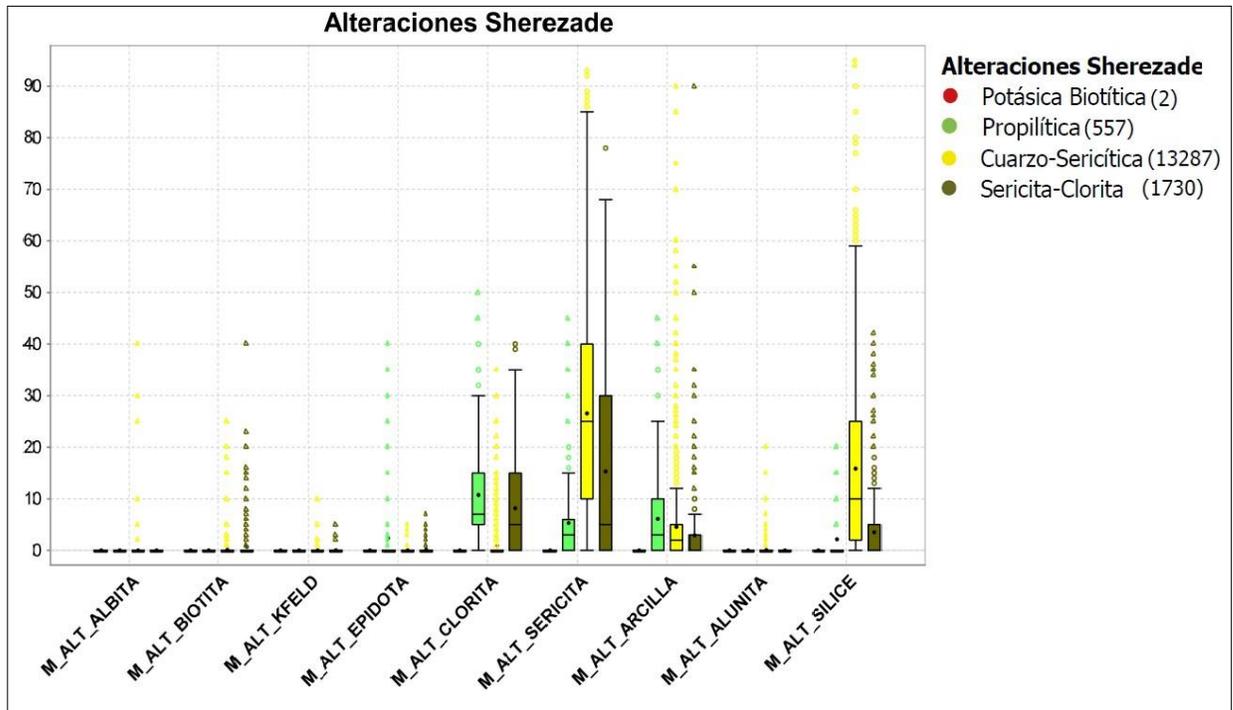


Figura 6.9: Minerales de alteración mapeados por zona de alteración en porcentajes relativos para el depósito Sherezade.

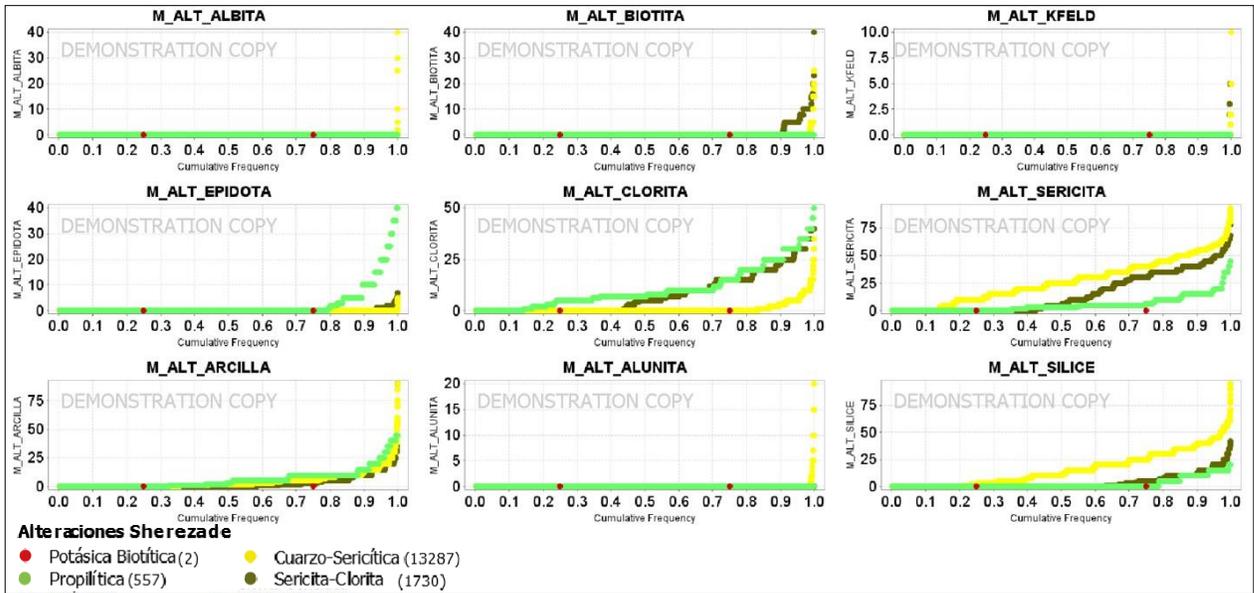


Figura 6.10: Gráficos de frecuencia acumulada de mineralogía de alteración por zona de alteración para el depósito Sherezade.

Los resultados mineralógicos de DRX y QEMSCAN sirven para validar la asignación de las zonas de alteración del mapeo geológico, para esto se cruzó la base de datos de los análisis mineralógicos con la base de datos del modelo geológico para obtener las alteraciones en el tramo donde se realizó el análisis en laboratorio. Primero se compara la mineralogía QEMSCAN por zona de alteración para el depósito Polo Sur (Figura 6.11) donde se observa una buena relación entre la mineralogía y la zona asignada en el modelo, con altos contenidos de cuarzo, sericita y bajos de clorita y arcillas para la alteración QS. La definición de la alteración SC tiene altos porcentajes de cuarzo y sericita (pero menos que QS), plagioclasa cercana al 15% y clorita con aproximadamente un 5%, las alteraciones potásicas tienen muy pocos datos por lo que su análisis no sería representativo. En la Figura 6.12 se observa los resultados para el depósito de Sherezade donde la definición de las alteraciones QS y SC son muy similares en porcentajes a lo visto en el depósito de Polo Sur (Figura 6.11).

Al analizar la mineralogía de alteración según los resultados de DRX se observa que para el depósito Polo Sur (Figura 6.13) tanto la alteración QS como SC tienen definiciones coherentes en cuanto al porcentaje de los minerales característicos para cada una, alto contenido de cuarzo y sericita para QS y menor porcentaje para SC, pero con plagioclasa y clorita en mayor proporción. En el depósito Sherezade la mayoría de las muestras analizadas bajo este método corresponden a

la alteración QS (Figura 6.14), y se observa una buena definición en cuanto a los minerales de cuarzo y sericita como minerales principales.

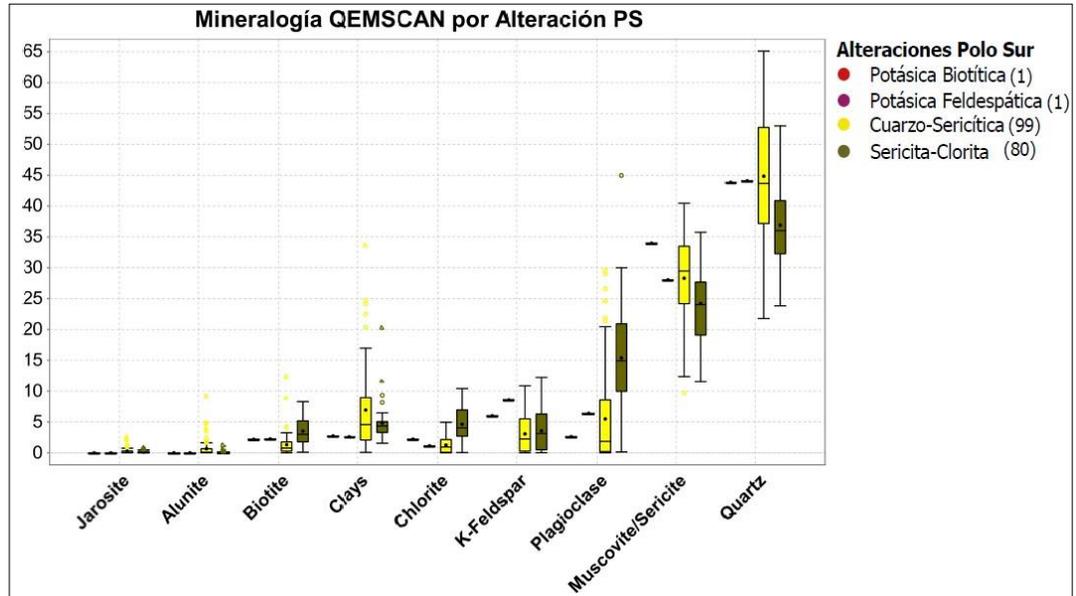


Figura 6.11: Mineralogía de alteración QEMSCAN por zonas de alteración de Polo Sur.

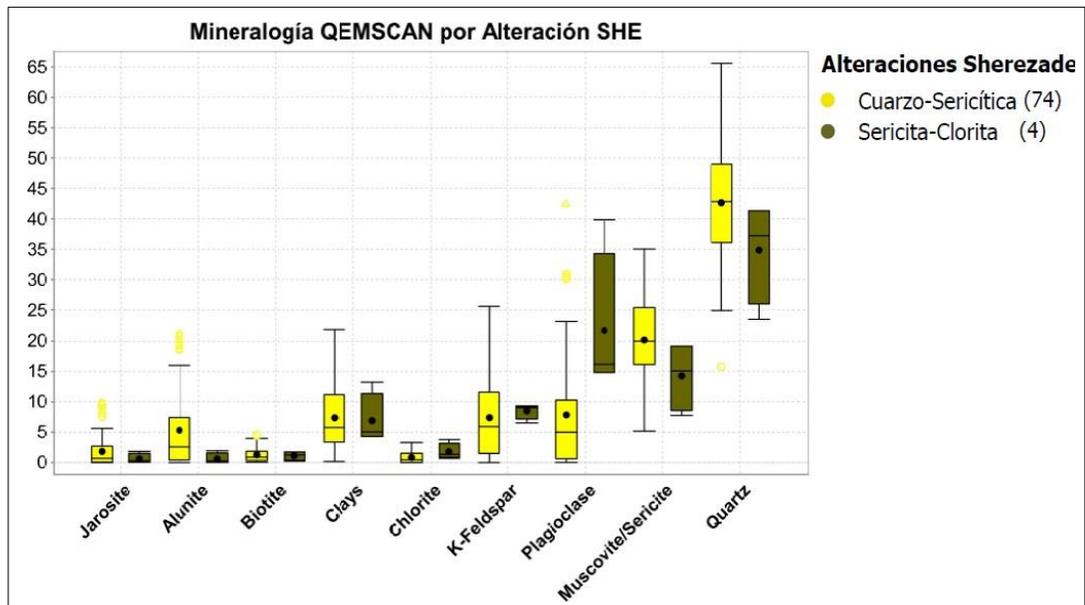


Figura 6.12: Mineralogía de alteración QEMSCAN por zonas de alteración de Sherezade.

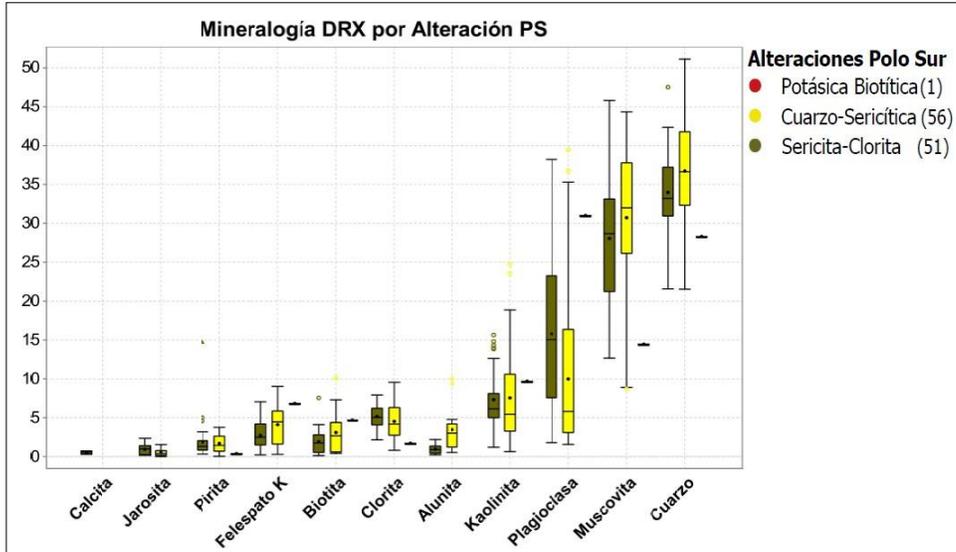


Figura 6.13: Mineralogía de alteración DRX por zonas de alteración de Polo Sur.

Al comparar ambos depósitos bajo este método se puede determinar que, si bien las alteraciones están bien definidas, existen algunas variaciones porcentuales en algunos minerales, el cuarzo tiene porcentajes muy similares en ambos depósitos, la muscovita en cambio en el depósito Sherezade tiene un promedio de ~17%, mientras que en el depósito Polo Sur este promedio llega a casi un 31%, lo que muestra una diferencia de casi el doble. Otros minerales que muestran diferencias son la kaolinita y la alunita, que tienen mayor proporción en el depósito Sherezade.

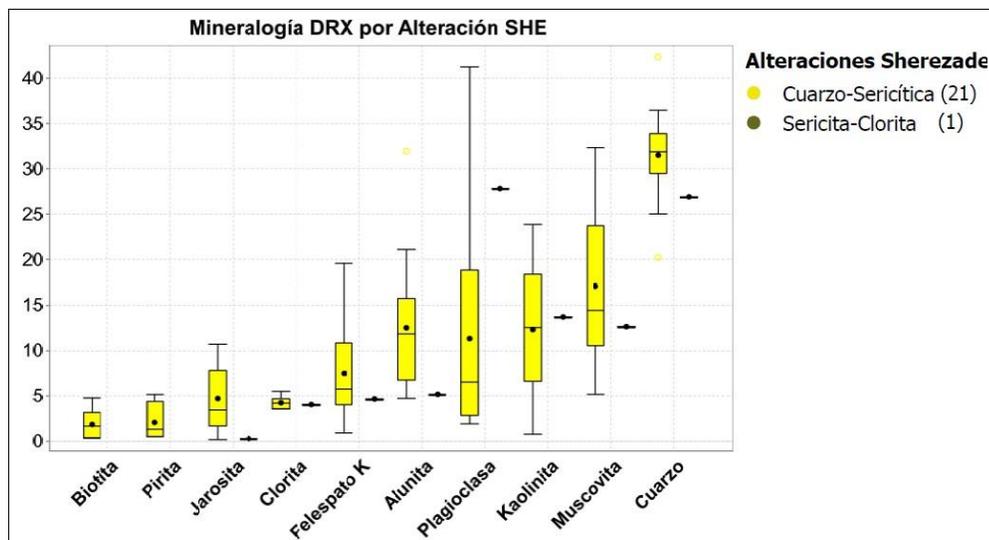


Figura 6.14: Mineralogía de alteración DRX por zonas de alteración de Sherezade.

Los resultados QEMSCAN y DRX dan cuenta de una buena definición de las alteraciones con mayor presencia en ambos depósitos, que es la alteración QS y SC, con respecto a la definición realizada en el mapeo geológico. Los porcentajes de los minerales en el depósito Polo Sur generalmente son similares en ambos métodos con diferencias porcentuales de pocas unidades. En el depósito Sherezade la mayoría de las muestras son de la alteración QS, que bajo ambos métodos tienen la misma tendencia de los minerales característicos de esta alteración, con diferencias porcentuales de pocas unidades, similar a lo que ocurre en el depósito Polo Sur.

6.2.1.2. Zonas Minerales

Las zonas minerales se definen de acuerdo con la abundancia en porcentajes relativos de minerales de mena que se realiza en el mapeo geológico, las leyes de CuT y razones de solubilidad con análisis químicos. En la Figura 6.15 se puede observar que la zona de OXV está bien definida, siendo los minerales principales la atacamita/brochantita, mientras que la zona de OXN está definida por limonitas y arcillas con Cu, donde los óxidos negros están en bajas cantidades, pero al ver los gráficos de frecuencia acumulada (Figura 6.16) se puede notar que estos mineraloides se encuentran en aproximadamente un 20% de las muestras asociadas a esta zona. Por otra parte, la zona MX se caracteriza por tener porcentajes similares entre atacamita/brochantita y arcillas con Cu, calcosina como mena y pirita. La zona CPY tiene el mayor porcentaje de calcopirita ~70% y pirita ~ 25%, le sigue la zona CPYPY con promedio ~ 60% de calcopirita y ~ 38% de pirita, y la zona SEC con pirita ~70%, calcosina, covelina y calcopirita como menas. En general se observan buenas definiciones de zonas minerales según el mapeo geológico.

En el depósito Sherezade se observa (Figura 6.17) que la zona de OXV tiene como minerales principales atacamita/brochantita, menores cantidades de arcillas y limonitas con Cu, al igual que en el depósito Polo Sur. La zona de OXN se caracteriza por la presencia de arcillas y limonitas con Cu y menores porcentajes de atacamita/brochantita, mientras que los óxidos negros están en bajas cantidades, en el gráfico de frecuencia acumulada (Figura 6.18) se puede observar que los óxidos negros están mayoritariamente en la zona de OXN en el 10% de las muestras de esta zona mineral. La zona de MX posee gran concentración de atacamita/brochantita (pero menor que en OXV), además de pirita, calcosina y limonitas con Cu que en el depósito Polo Sur están restringidas a un

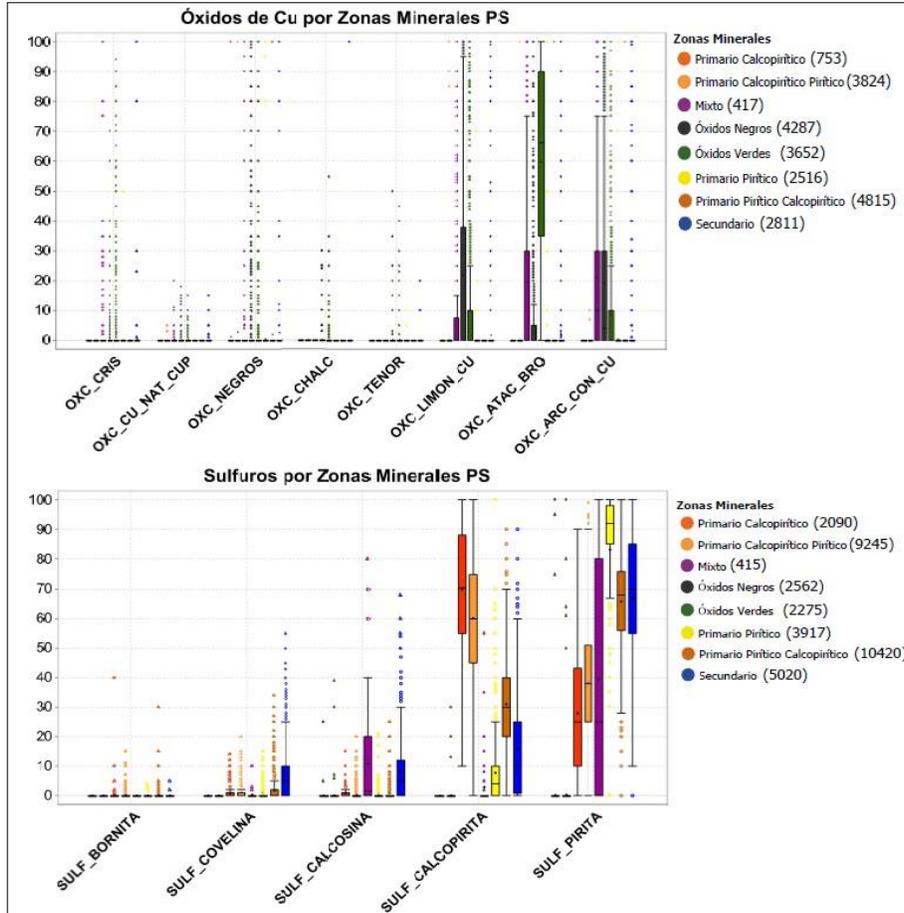


Figura 6.15: Minerales de mena por zonas minerales en porcentajes relativos, depósito Polo Sur.

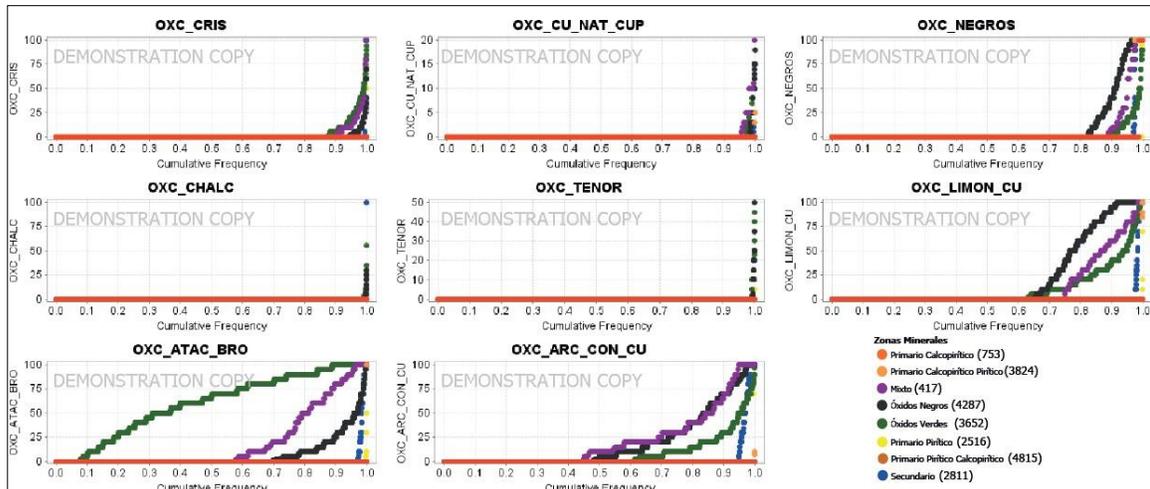


Figura 6.16: Gráficos de frecuencia acumulada de minerales de mena por zonas minerales en porcentajes relativos, depósito Polo Sur.

5% de las muestras de esta zona mineral. Al comparar Polo Sur con Sherezade se observa que la zona PY es muy similar en ambos depósitos y la zona PYCPY tiene mayor porcentaje de pirita: cerca de un 80% en SHE y 68% en PS, y menor porcentaje de calcopirita: 15% en SHE y 30% en PS. Se puede determinar que las zonas minerales tienen una buena definición en cuanto a los minerales mapeados en el modelo geológico.

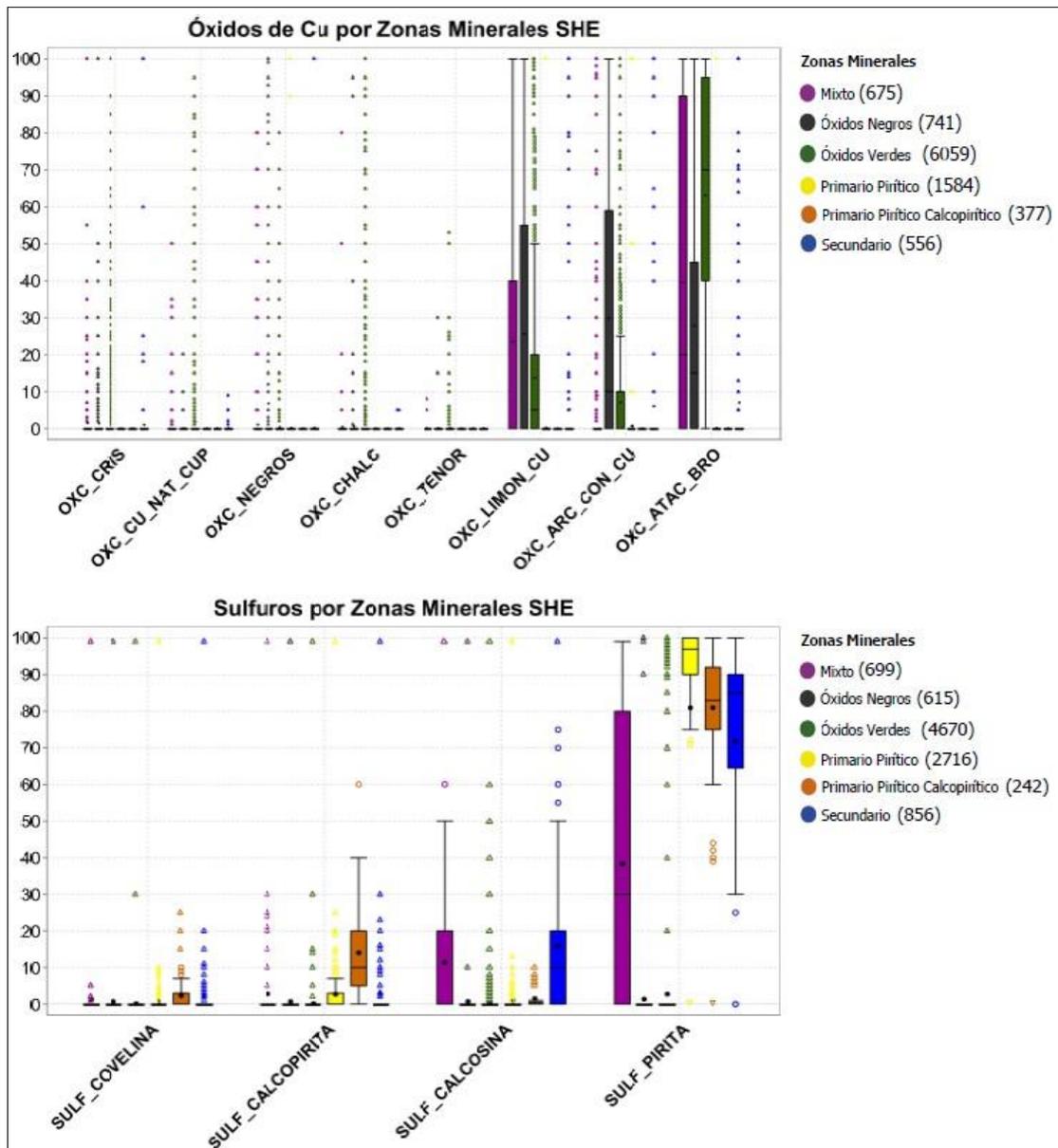


Figura 6.17: Minerales de mena por zonas minerales en porcentajes relativos, depósito Sherezade.

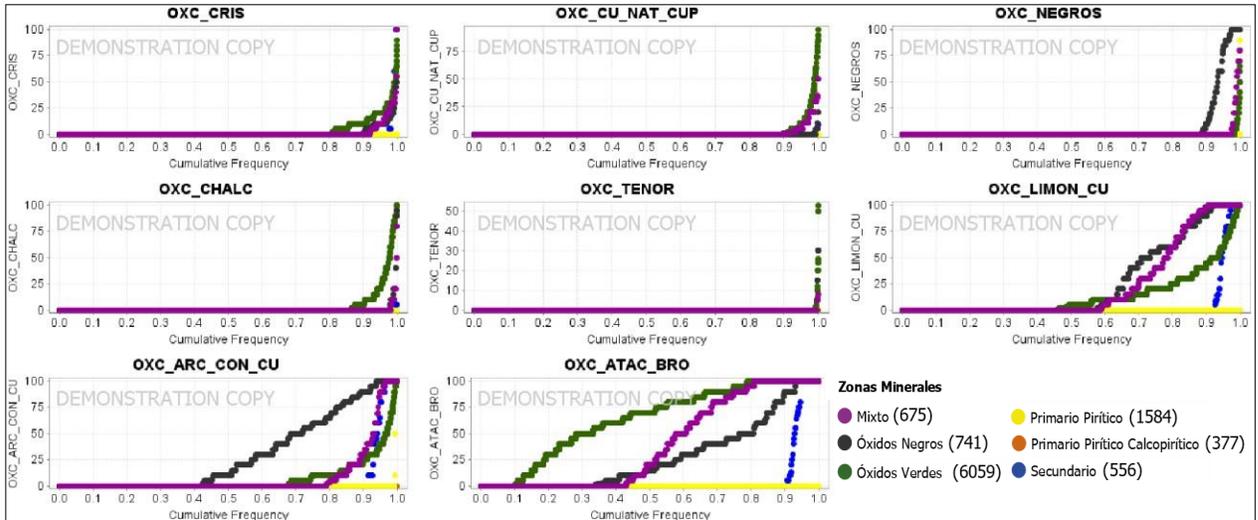


Figura 6.18: Gráficos de frecuencia acumulada de minerales de mena por zonas minerales en porcentajes relativos, depósito Sherezade.

En los análisis QEMSCAN para el depósito Polo Sur (Figura 6.19) se puede diferenciar la zona de OXV de las demás por tener mayores concentraciones de atacamita y brochantita/antlerita. Los minerales que están definiendo la zona de OXN son los óxidos negros, biotita con cobre, clorita/clinocloro con Cu y arcillas con Cu. Si bien la definición de zona de OXN incluye limonitas con Cu, se observa que estas tienen un porcentaje levemente mayor en la zona de OXV. La zona mixta contiene calcosina principalmente y la zona SEC calcosina y covelina.

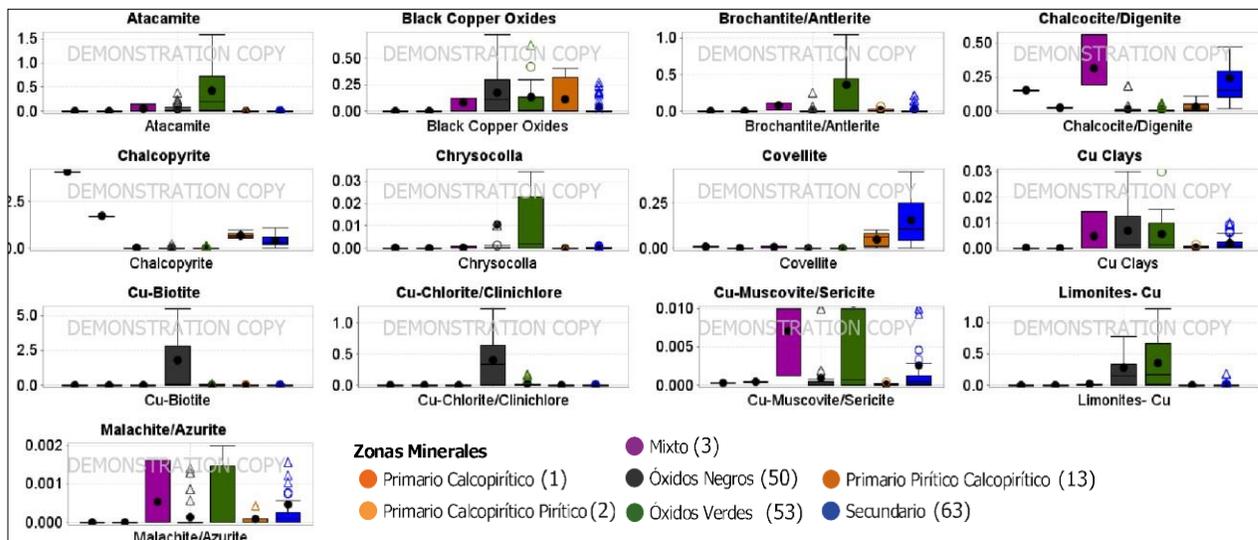


Figura 6.19: Mineralogía de mena QEMSCAN por zonas minerales, depósito Polo Sur.

En el depósito Sherezade (Figura 6.20) se advierte que en la zona de OXV siguen siendo predominantes los minerales de atacamita y brochantita/antlerita por sobre los demás. La zona SEC contiene principalmente calcosina en porcentaje similar que en la zona MX y la covelina aparece en muy bajos porcentajes. La comparación de ambos depósitos da cuenta que la definición de la zona de OXV es semejante en cuanto a minerales y los porcentajes de estos, a excepción de las limonitas con Cu, que tiene mayor proporción en el depósito Polo Sur y en la zona SEC el mineral principal es la calcosina con porcentaje $\sim 0,25\%$ mayor en el depósito Sherezade.

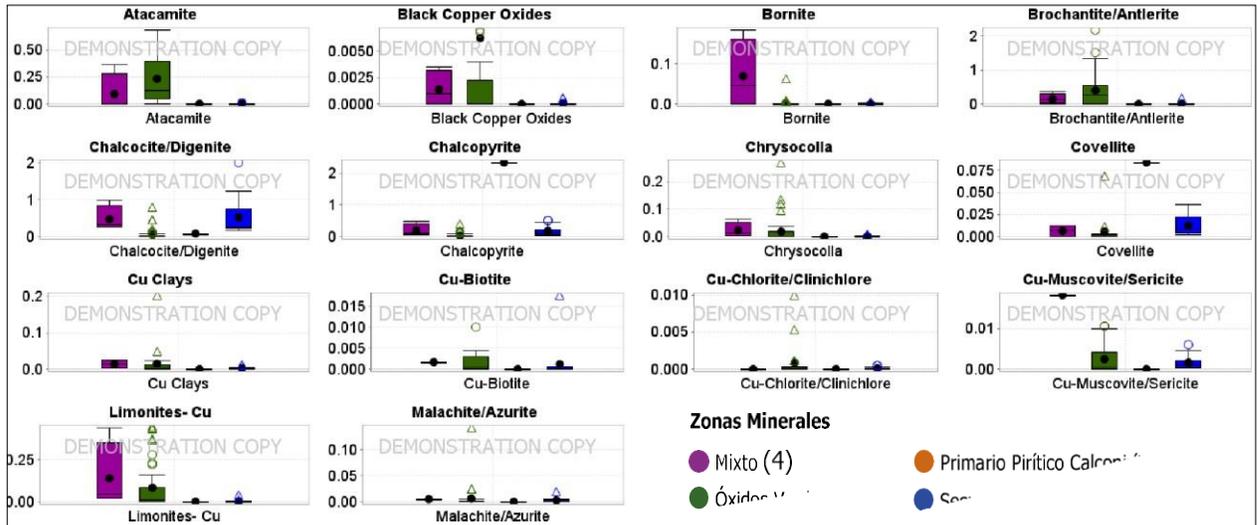


Figura 6.20: Mineralogía de mena QEMSCAN por zonas minerales, depósito Sherezade.

En el depósito Polo Sur los análisis DRX (Figura 6.21) muestran en general buenas definiciones para las zonas minerales, a excepción de la zona de OXN debido que a que esta zona agrupa mineraloides lo que no son reconocidos mediante este método. Existen variaciones porcentuales entre los análisis DRX y QEMSCAN, la calcosina tiene promedios más altos en los análisis DRX, y levemente mayores de atacamita. El DRX incorpora de manera aislada la antlerita, mientras que en QEMSCAN se muestra en conjunto a la brochantita, este mineral tiene promedio 1,5% en DRX en la zona de OXV, y al observar la brochantita/antlerita en la misma zona en QEMSCAN este porcentaje llega a un 0,4% (Figura 6.19).

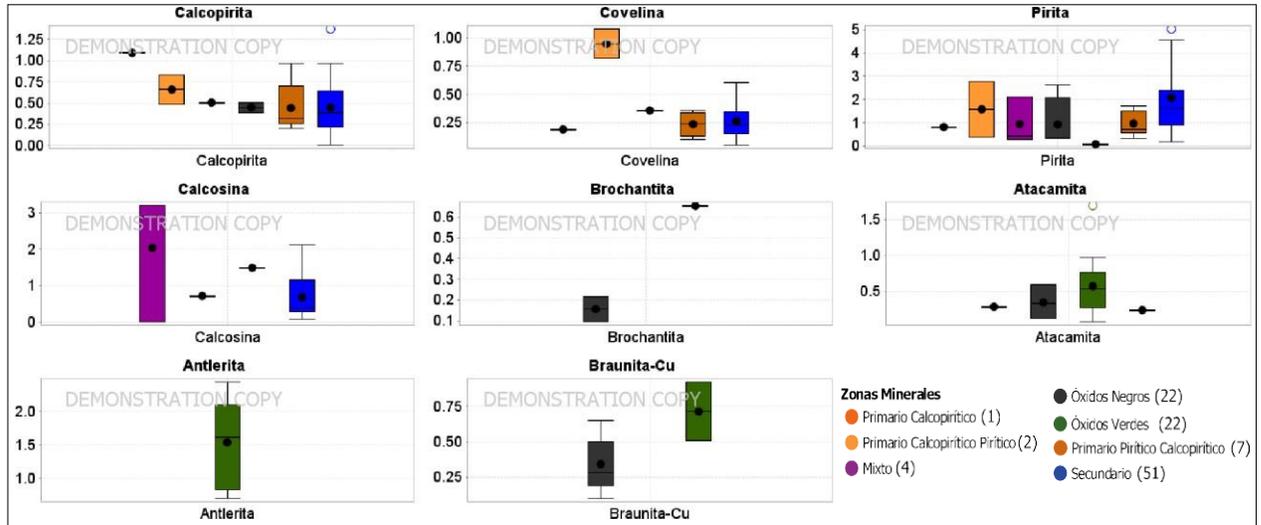


Figura 6.21: Mineralogía de mena DRX por zonas minerales, depósito Polo Sur.

El depósito Sherezade tiene solo 22 muestras con análisis DRX (Figura 6.22) asignadas a alguna zona mineral, con 20 de ellas en la zona de OXV que está definida con brochantita, antlerita y atacamita en porcentajes mayores que en análisis QEMSCAN (Figura 6.20), pero menores que en el depósito de Polo Sur.

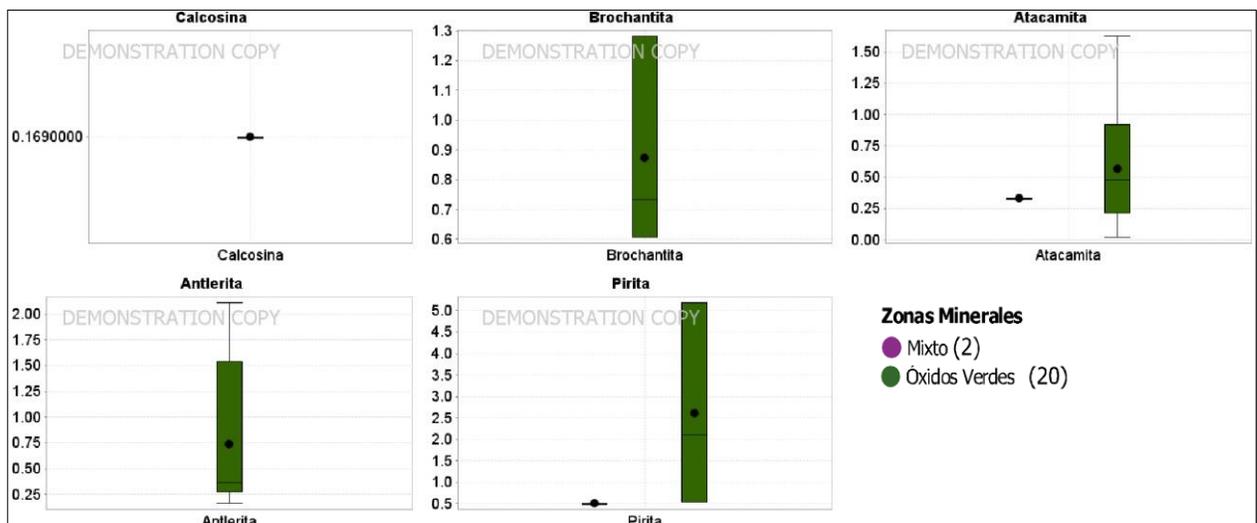


Figura 6.22: Mineralogía de mena DRX por zonas minerales, depósito Sherezade.

6.3. RESULTADO DE COLUMNAS UNITARIAS Y BOTELLAS ISO PH

6.3.1. COLUMNAS UNITARIAS

Los resultados de columnas unitarias se cruzan con la base de datos del modelo geológico disponible para analizar leyes de Cu, extracción de Cu, el consumo de ácido neto (CAN) y razón de solubilidad (RS). Esta última se calcula dividiendo el cobre soluble en el cobre total, multiplicado por cien, para obtener el porcentaje de cobre soluble en el ácido sulfúrico. Los análisis se realizan para las alteraciones, zonas minerales y litologías, para así obtener una visión en depósitos Polo Sur y Sherezade del comportamiento a la lixiviación.

6.3.1.1. Resultados por Alteraciones

La Figura 6.23 indica que las mayores leyes en el depósito Polo Sur están en las pocas muestras de las alteraciones potásicas, mientras que las alteraciones QS y SC tienen leyes muy similares con promedios 0,47 y 0,43 CuT respectivamente. En relación con el CAN se observa diferencias entre las alteraciones, donde la alteración SC muestra una tendencia de mayor consumo que la alteración QS. La extracción de Cu es mayor en la alteración QS con promedio de 57,1%, menor es en SC con promedio de 48,3%. La razón de solubilidad es mayor en la alteración QS, lo que explica que se extraiga más porcentaje de cobre desde esta.

En el depósito de Sherezade (Figura 6.24) la mayoría de las muestras corresponden a la alteración QS, por lo tanto, la comparación con el depósito Polo Sur será solo en base a esta alteración. En cuanto a la ley de CuT, en ambos depósitos son similares con un promedio de 0,51 en Sherezade y 0,47 en Polo Sur. El promedio de CAN es menor en el depósito Sherezade, con un promedio de solo 2,6 *kg/t*, en comparación al depósito Polo Sur que llega a 6,5 *kg/t*. La extracción de cobre y la razón de solubilidad aumentan en este depósito llegando a 77,5% y 52,2% respectivamente.

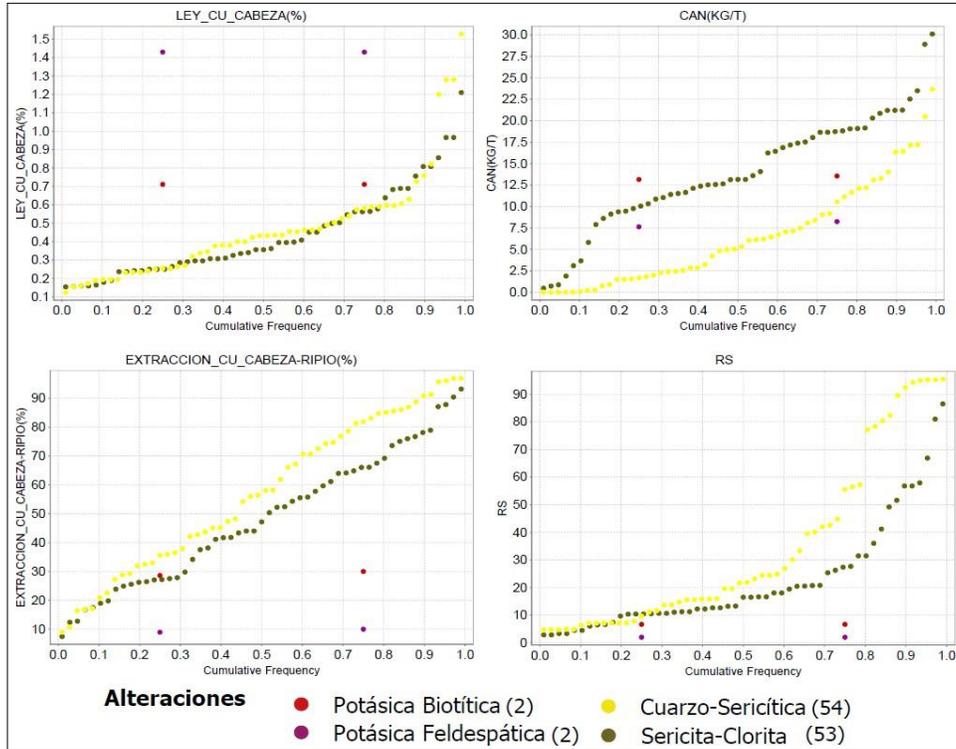


Figura 6.23: Resultados por alteración para el depósito Polo Sur. Ley de Cu, CAN (consumo de ácido neto), Extracción de Cu y RS (razón de solubilidad).

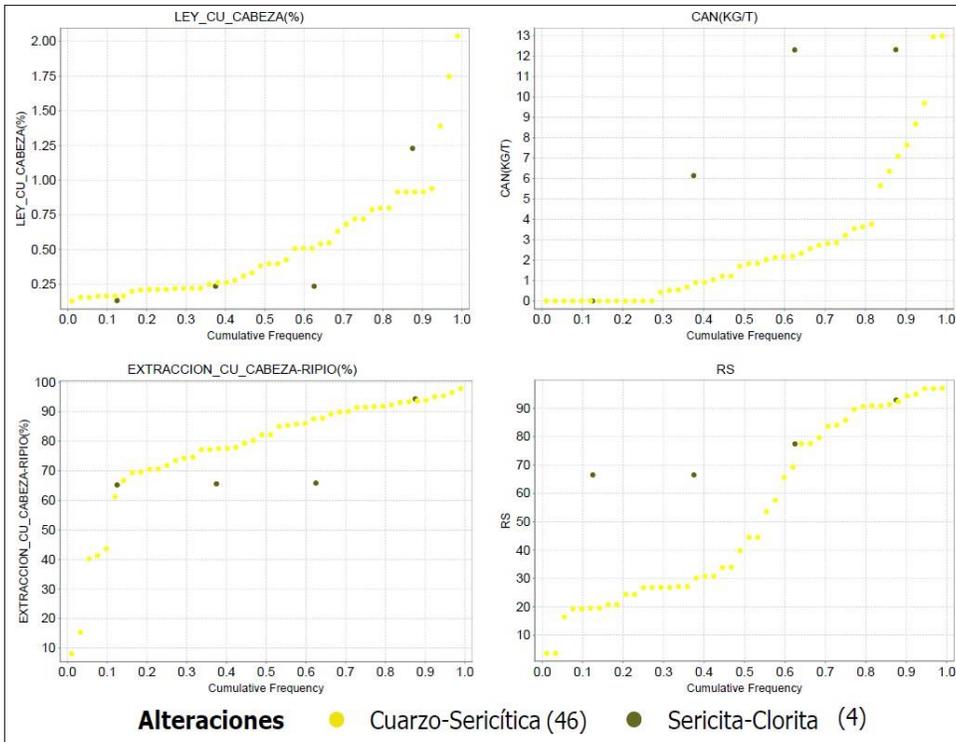


Figura 6.24: Resultados por alteración para el depósito Sherezade. Ley de Cu, CAN (consumo de ácido neto), Extracción de Cu y RS (razón de solubilidad).

6.3.1.2. Resultados por Litologías

La Figura 6.25 muestra los resultados de las columnas unitarias por litología en el depósito Polo Sur. Se puede observar que las litologías tienen mayor variabilidad en los parámetros utilizados en comparación con las alteraciones. Las leyes más altas se encuentran en la Brecha Hidrotermal y en la Diorita con 0,74 y 0,40 CuT respectivamente. Para CAN muestra claramente que la litología más consumidora es la Diorita y la menos consumidora de ácido son las rocas volcánicas riodacíticas. La extracción de Cu es mayor en las rocas volcánicas riodacíticas con un promedio de 64,4%, pero su razón de solubilidad es de 27,8%; las dioritas tienen mayor razón de solubilidad que las riodacitas con un promedio de 33,5%, pero menor extracción de Cu con un 51,5%.

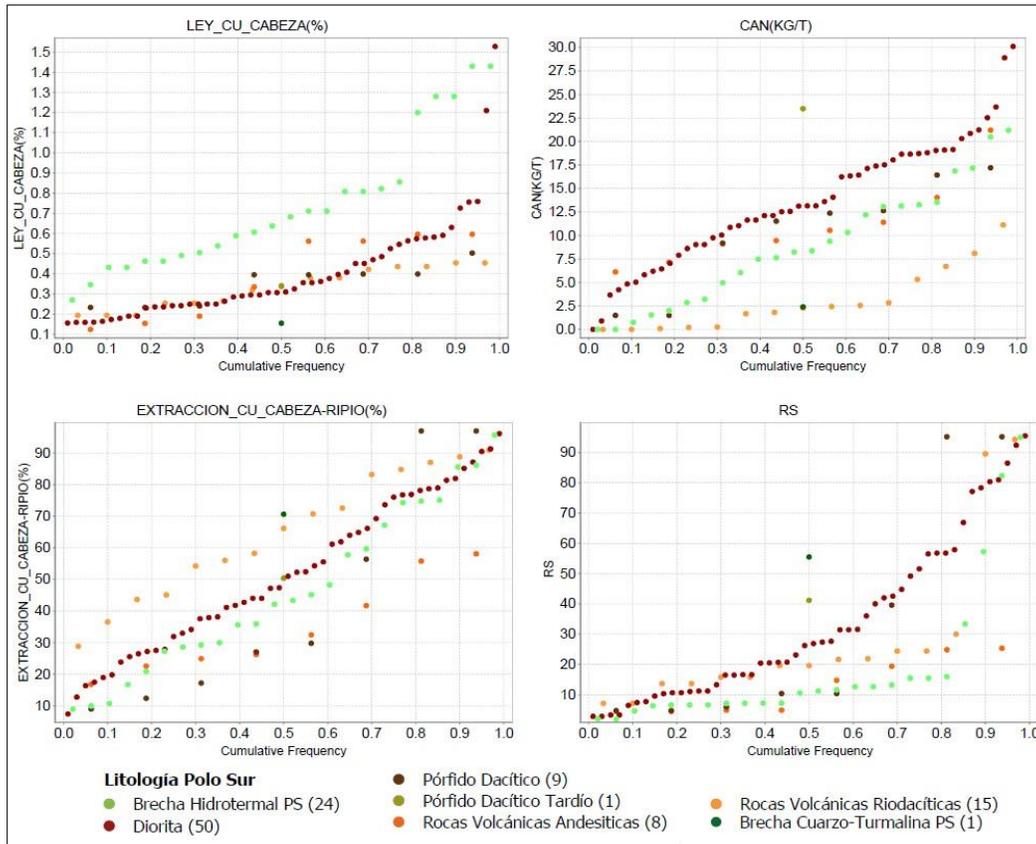


Figura 6.25: Resultados por litología para el depósito Polo Sur. Ley de Cu, CAN (consumo de ácido neto), Extracción de Cu y RS (razón de solubilidad).

En el depósito Sherezade (Figura 6.26) las mayores leyes están en las brechas hidrotermales y en el Complejo Intrusivo Sherezade, con leyes levemente mayores de 0,88 y 0,48 CuT promedios. El mayor CAN entre las litologías está en las rocas intrusivas al igual que en el depósito de Polo Sur. En lo que respecta a la extracción de Cu, en este depósito son muy similares entre litologías, y en general varían entre 60% y 97%, y la razón de solubilidad es mayor en el Complejo Intrusivo Sherezade con promedio de 70%.

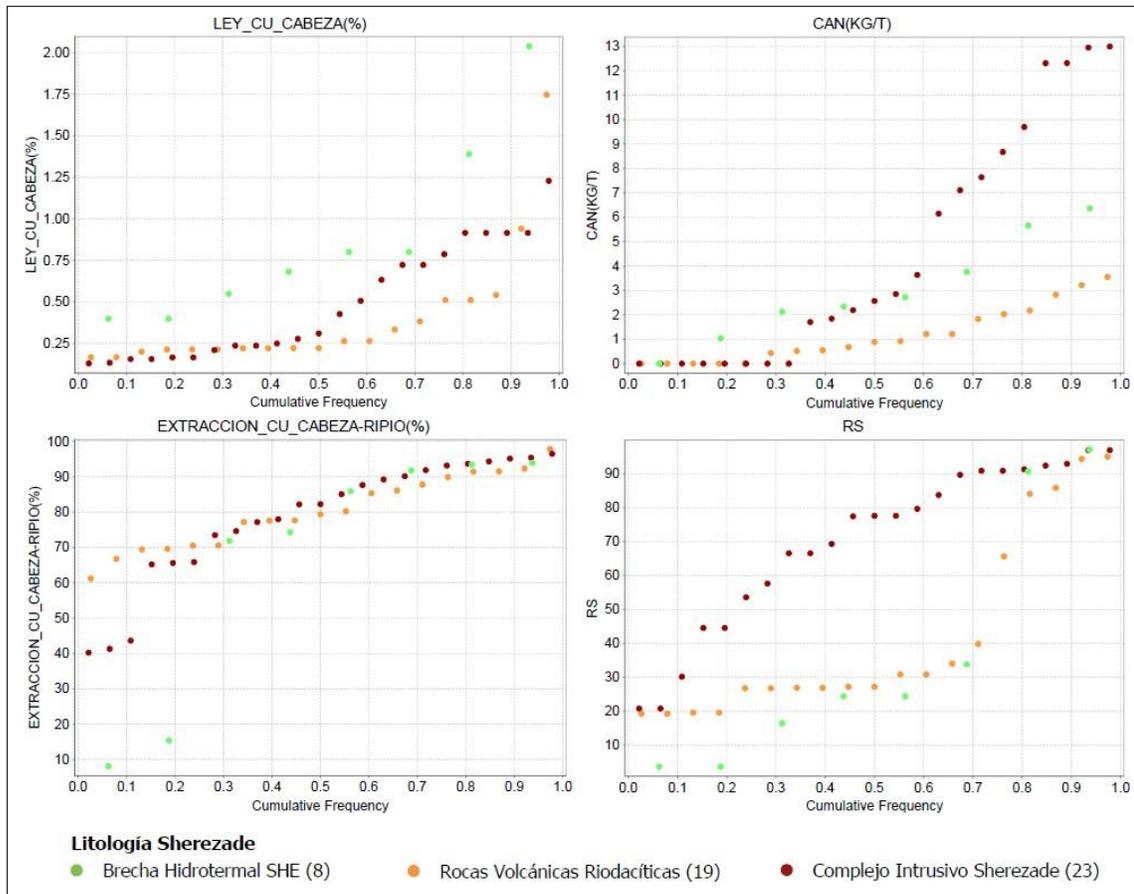


Figura 6.26: Resultados por litología para el depósito Sherezade. Ley de Cu, CAN (consumo de ácido neto), Extracción de Cu y RS (razón de solubilidad).

6.3.1.3. Resultados por Zonas Minerales

En el depósito Polo Sur (Figura 6.27) las mayores leyes están en las zonas minerales primarias calcopiríticas (con pocas muestras de columnas), seguido de zonas de óxidos verdes y zona secundaria. El CAN en la zona primaria pirítica calcopirítica y en la zona de óxidos negros son $16,6 \text{ kg/t}$ y $14,7 \text{ kg/t}$ en promedio respectivamente. Hay ciertas zonas minerales que se diferencian del resto por la extracción de Cu, la zona de óxidos verdes destaca con la mayor extracción llegando a un promedio de $87,7\%$, la zona secundaria con $49,6\%$ y óxidos negros $49,2\%$ muy similares entre sí, y las zonas primarias que no superan el 30% de extracción de Cu. La zona con mayor razón de solubilidad es la de óxidos verdes con promedio de $81,1\%$, óxidos negros $38,1\%$, secundario con $13,5\%$ y las zonas primarias con menos de 10% .

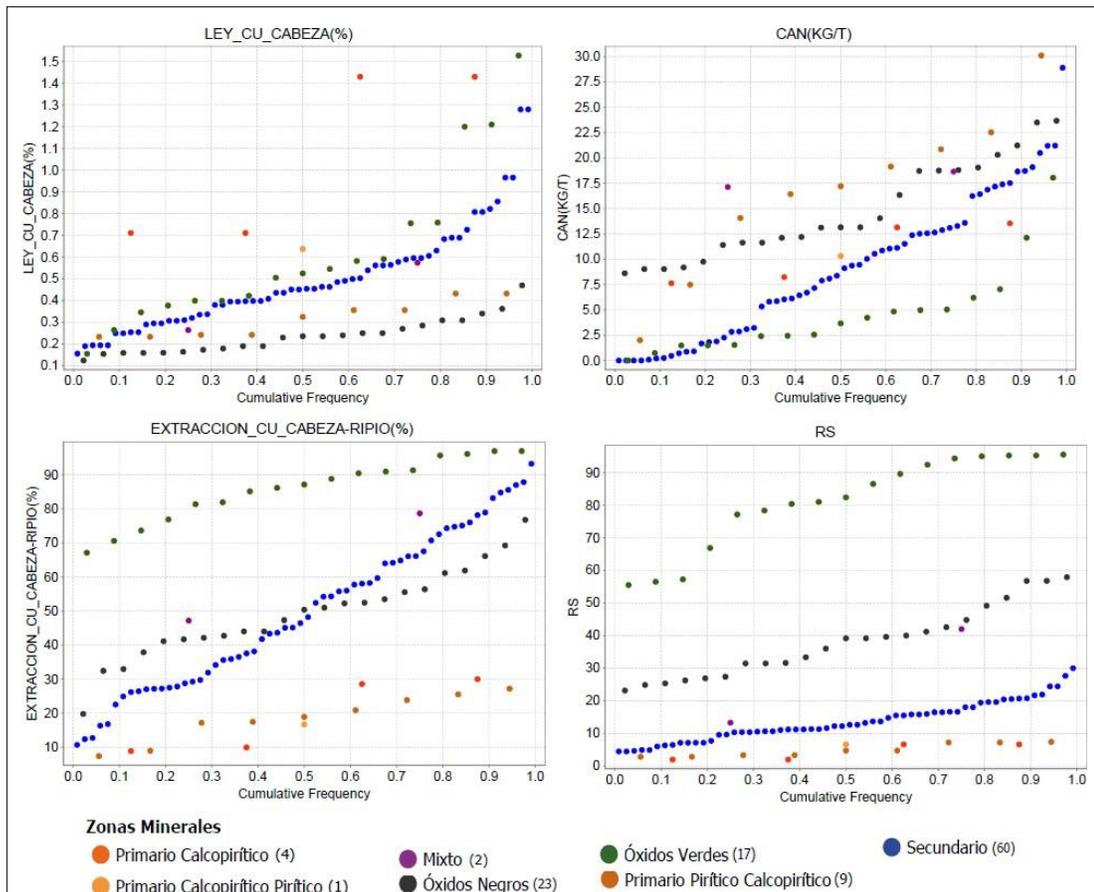


Figura 6.27: Resultados por zonas minerales para el depósito Polo Sur. Ley de Cu, CAN (consumo de ácido neto), Extracción de Cu y RS (razón de solubilidad).

En el depósito de Sherezade (Figura 6.28) los óxidos verdes destacan en una ley de 0,55 CuT, con un bajo CAN promedio de 3,44 kg/t, una alta extracción de Cu 85,7% en promedio y una razón de solubilidad de 82,1%, datos muy similares a lo que ocurre en el depósito Polo Sur. La zona de óxidos negros tiene bajas leyes 0,17 CuT promedio, con alto CAN 10,4 kg/t, y una extracción y solubilidad promedio de 41,7% y 39,7% respectivamente. En el depósito Polo Sur esta zona tiene mayor CAN, mientras que los demás parámetros son similares. En la zona secundario las leyes llegan a un promedio de 0,45 CuT, con bajo CAN 1,2 kg/t promedio, donde la extracción es de 77,1% y la razón de solubilidad 25,0% promedios, en comparación con el depósito Polo Sur, esta zona tiene una extracción de casi 25 puntos porcentuales mayor con un menor CAN.

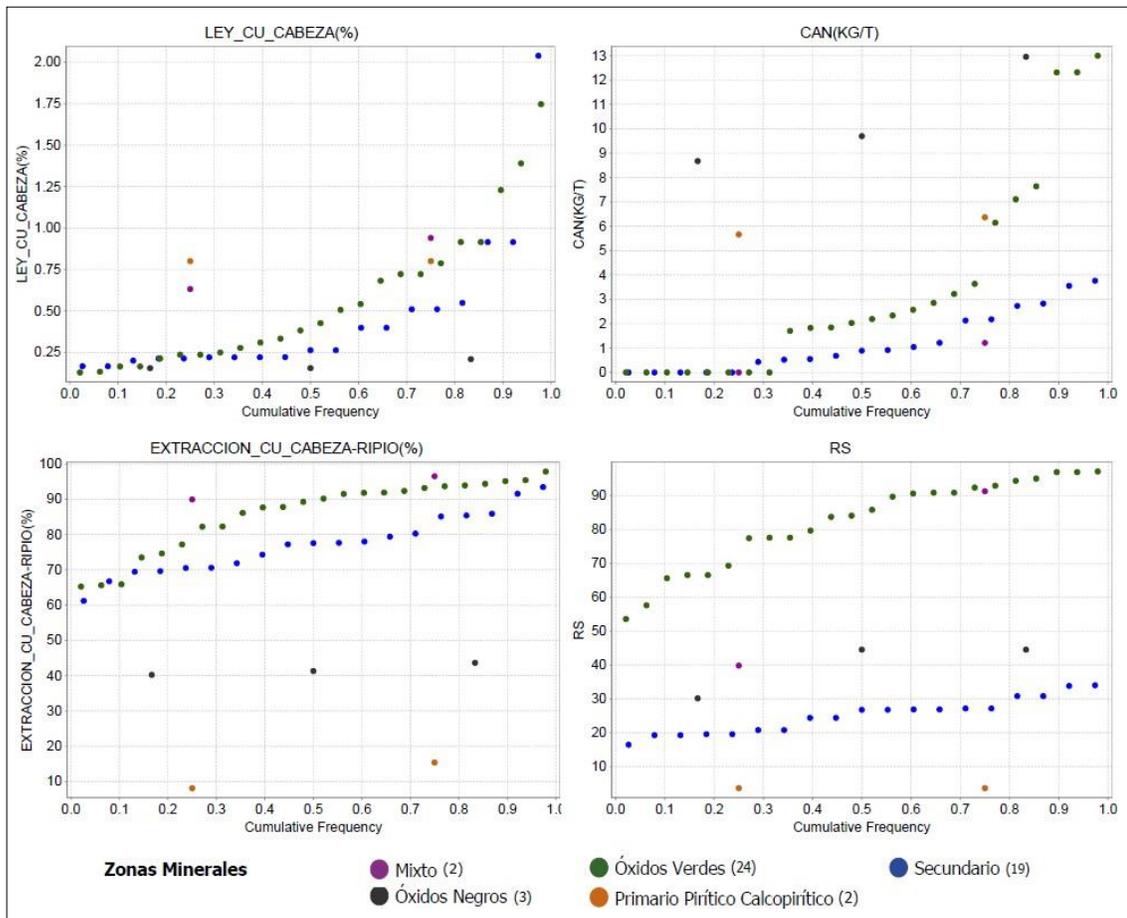


Figura 6.28: Resultados por zonas minerales para el depósito Sherezade. Ley de Cu, CAN (consumo de ácido neto), Extracción de Cu y RS (razón de solubilidad).

6.3.2. BOTELLAS ISO PH

Los resultados de botellas al igual que las columnas unitarias se cruzan con la base de datos del modelo geológico para analizar los datos de leyes de Cu, consumo de ácido neto (CAN), extracción de Cu y razón de solubilidad, para parámetros geológicos de litología, alteraciones y zonas minerales.

6.3.2.1. Resultados por Alteraciones

En el depósito Polo Sur (Figura 6.29) los resultados de botellas indican resultados similares a las columnas unitarias, con la mayoría de las muestras. Las leyes de CuT entre las alteraciones QS y SC tienen promedio de 0,48 y 0,42 CuT respectivamente, mientras que el CAN tiene algunas diferencias entre ellas, donde la alteración SC tiende a un mayor consumo con promedio de 10,5 *kg/t* y la alteración QS un consumo menor 7,6 *kg/t* en promedio. La extracción de Cu tiene promedios de 46,9% y 37,7% en las alteraciones QS y SC respectivamente, y la razón de solubilidad es mayor en QS que en SC.

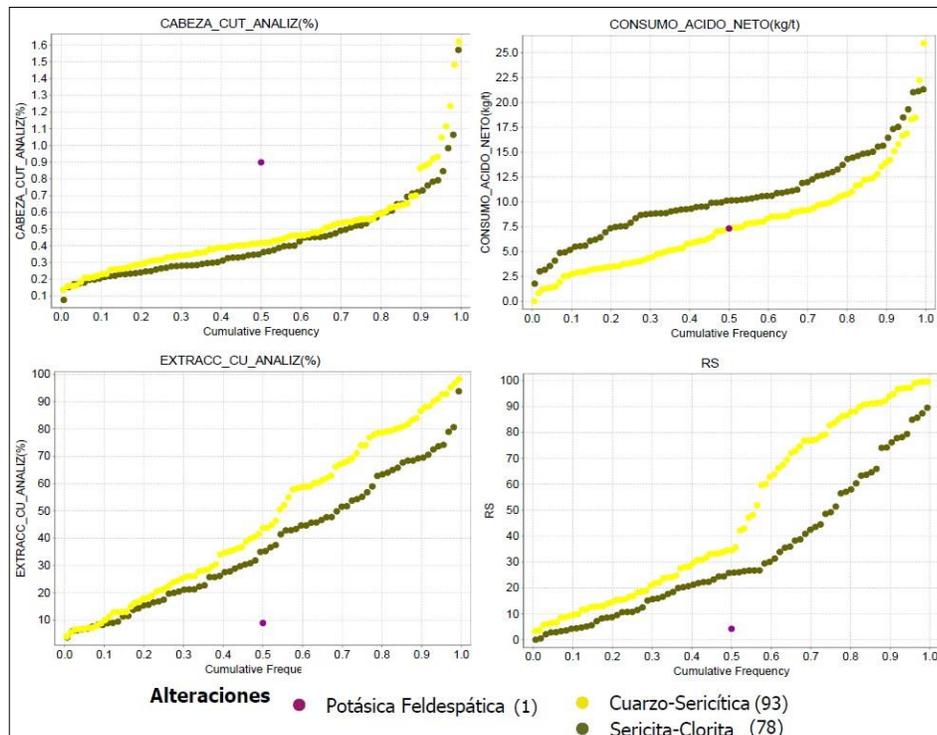


Figura 6.29: Resultados por alteración para el depósito Polo Sur. Ley de Cu, Consumo de ácido neto, Extracción de Cu y RS (razón de solubilidad).

En el depósito Sherezade (Figura 6.30) la gran mayoría de las muestras con resultados de botellas están en la alteración QS, que es la alteración predominante en este depósito. Las leyes llegan en promedio a 0,36 CuT igual que en Polo Sur, pero el CAN es menor con un promedio de 4,5 kg/t. La extracción de Cu y la razón de solubilidad son mucho mayores en este depósito llegando a promedios de 74,7% y 77,8% respectivamente.

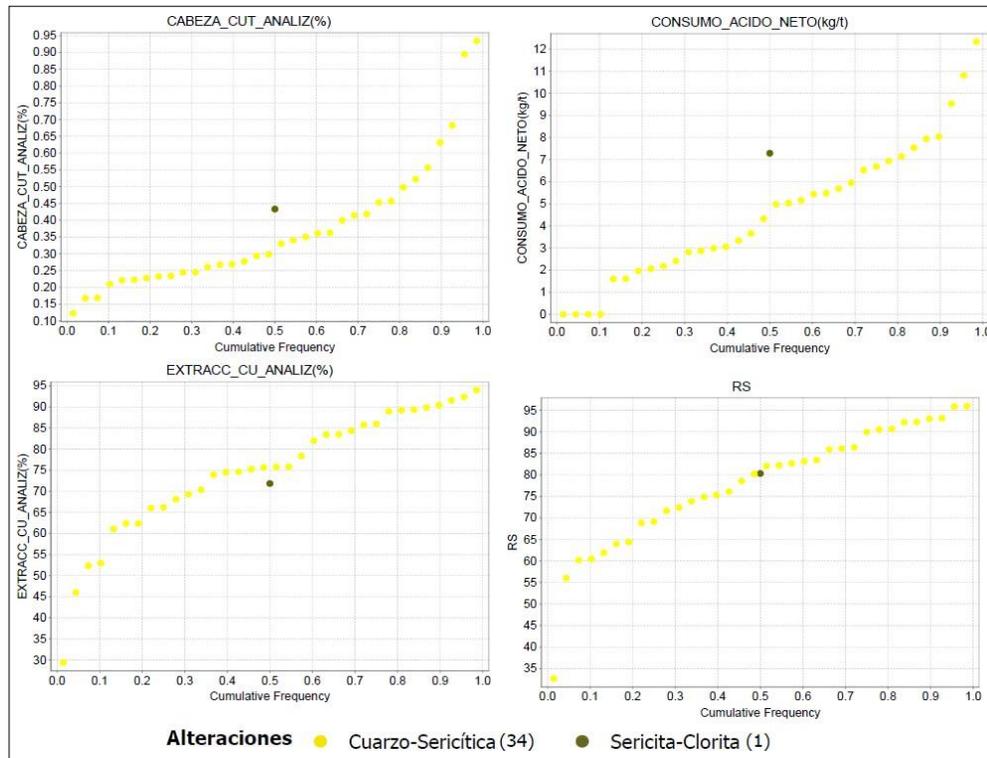


Figura 6.30: Resultados por alteración para el depósito Sherezade. Ley de Cu, Consumo de ácido neto, Extracción de Cu y RS (razón de solubilidad).

6.3.2.2. Resultados por Litologías

En la Figura 6.31 se observan los resultados de botellas por litología para el depósito Polo Sur, a diferencia de lo que pasa con los resultados de columnas las leyes muestran poca variabilidad entre litologías, siendo la de mayor ley las brechas hidrotermales, el mayor consumo de CAN está en las dioritas y en las rocas volcánica andesíticas. En cuando a la extracción de Cu se observa que la litología desde donde más se extrae son las rocas volcánicas riodacíticas con un promedio de 60,3% al igual que la razón de solubilidad con promedio de 53,5%.

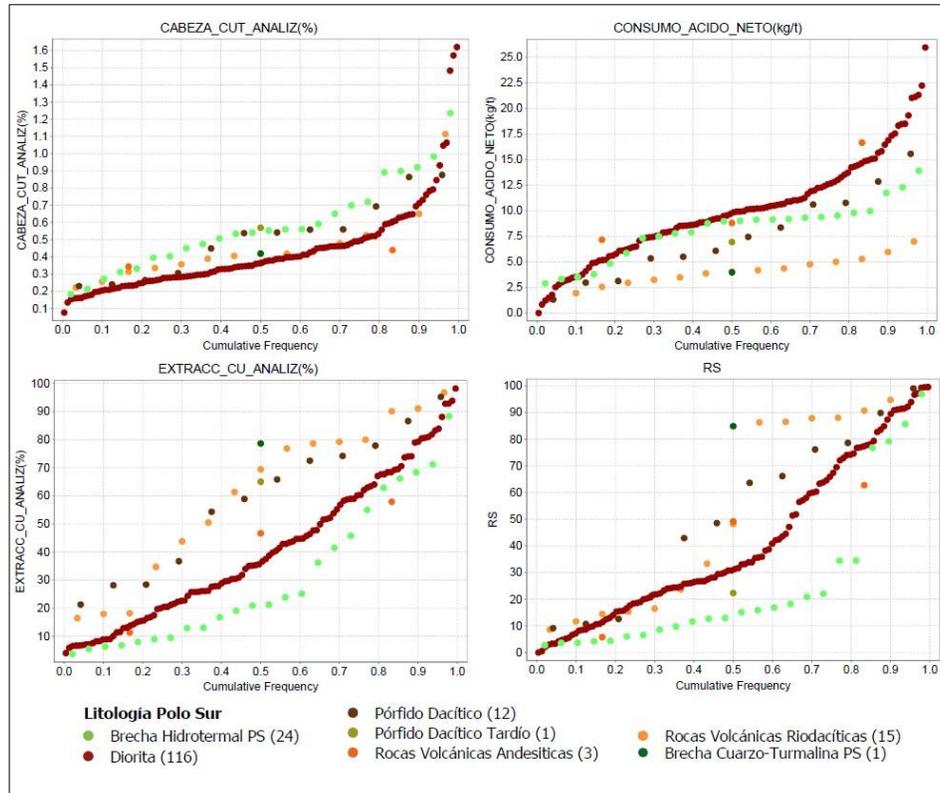


Figura 6.31: Resultados por litología para el depósito Polo Sur. Ley de Cu, Consumo de ácido neto, Extracción de Cu y RS (razón de solubilidad).

En el depósito Sherezade los resultados de botellas por litologías mostrados en la Figura 6.32 detallan las leyes de CuT donde tanto las brechas como el Complejo Intrusivo Sherezade tienen leyes similares, al igual que el CAN donde sus promedios son $4,7 \text{ kg/t}$ y $5,2 \text{ kg/t}$ respectivamente. En cuanto a la extracción de Cu se observa que son muy similares entre sí, al igual que la razón de solubilidad.

6.3.2.3. Resultados por Zonas Minerales

En el depósito Polo Sur (Figura 6.33) las zonas minerales muestran gran variabilidad en la extracción de Cu y en la razón de solubilidad. Las mayores leyes de CuT están en la zona de OXV, SEC y CPY, mientras que el mayor CAN lo tiene la zona de óxidos negros con $11,5 \text{ kg/t}$ en promedio. En extracción de Cu se pueden observar tres tendencias, la primera y con mayor extracción involucra a las zonas de OXV y la zona de MX con promedios de 71,3% y 45,1% respectivamente, la de extracción intermedia con la zona SEC con promedio de 28,8% y de OXN

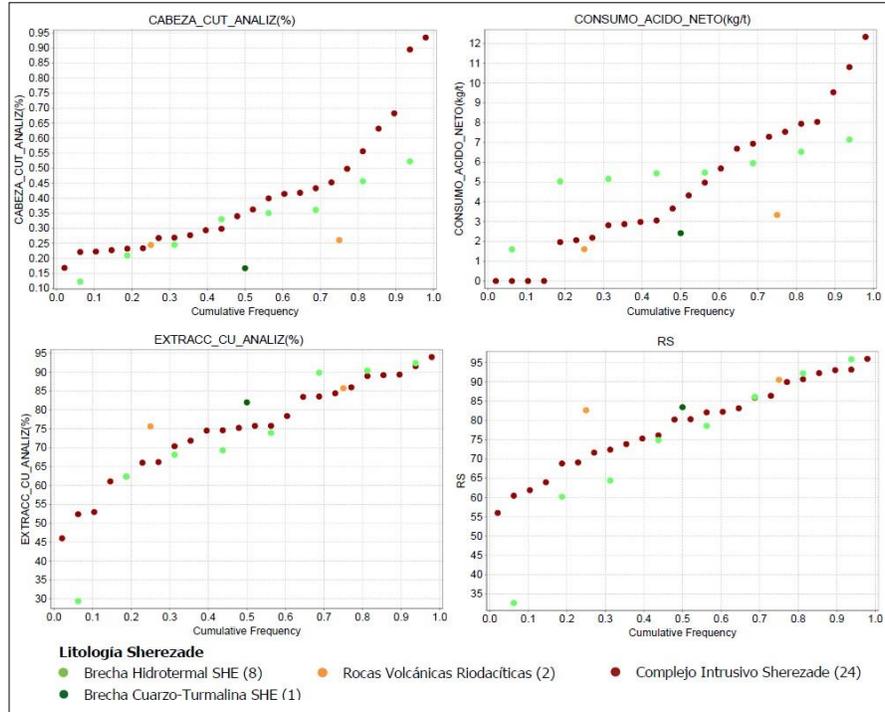


Figura 6.32: Resultados por litología para el depósito Sherezade. Ley de Cu, Consumo de ácido neto, Extracción de Cu y RS (razón de

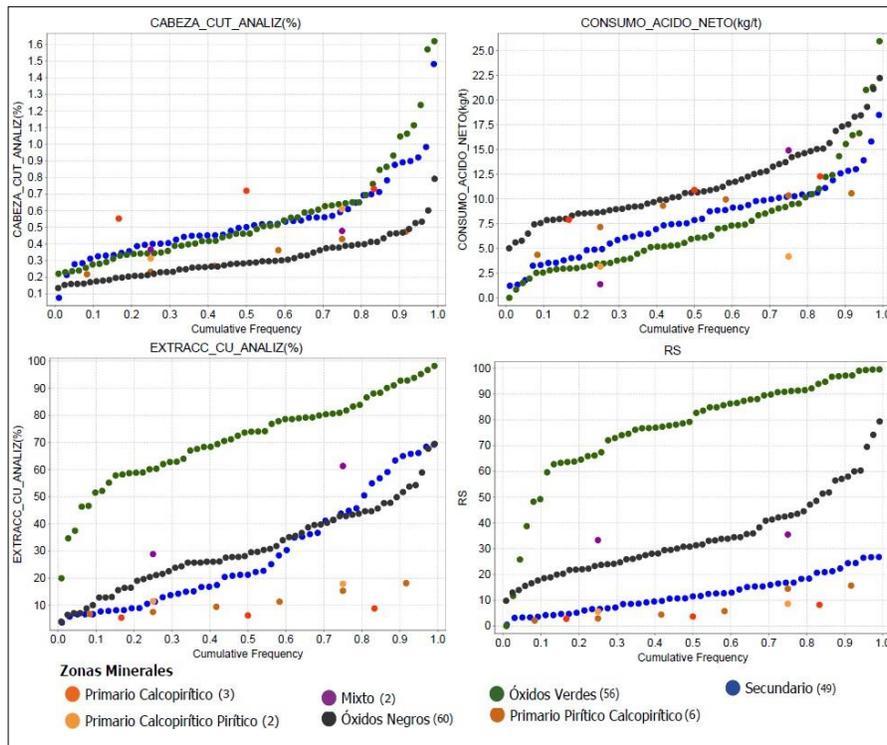


Figura 6.33: Resultados por zonas minerales para el depósito Polo Sur. Ley de Cu, Consumo de ácido neto, Extracción de Cu y RS (razón de solubilidad).

con 31,22%, y una última tendencia de menor extracción de Cu que tiene a las zonas primarias que no superan el 30% de extracción. Si se observa la razón de solubilidad para OXV esta es muy superior a cualquiera de las otras zonas, mientras que las zonas primarias tienen una razón de solubilidad muy baja que no supera el 20%.

En el depósito Sherezade (Figura 6.34) las muestras están enfocada en los OXV donde es posible observar que tienen leyes de 0,37 de CuT, CAN promedio 4,6 kg/t . Las extracciones de cobre son superiores a un 40% con promedio de 75,9% y razones de solubilidad de 79,22% promedio.

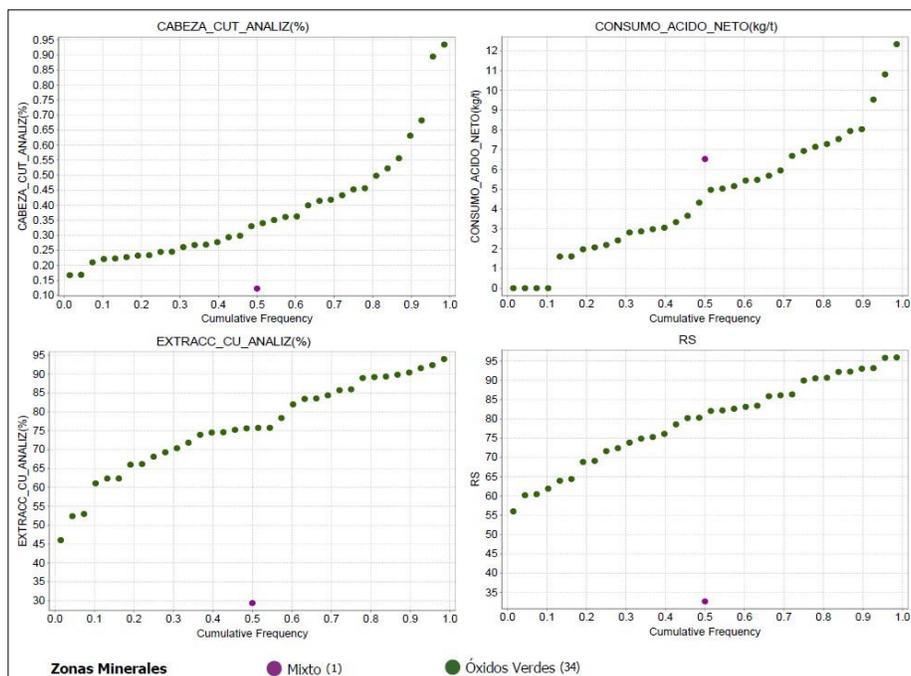
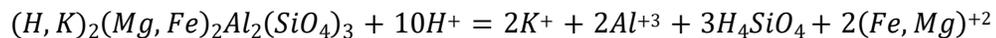


Figura 6.34: Resultados por zonas minerales para el depósito Sherezade. Ley de Cu, Consumo de ácido neto, Extracción de Cu y RS (razón de solubilidad).

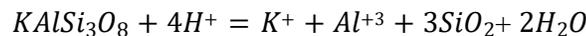
7. UGM DE CONSUMO DE ÁCIDO

La mineralogía de ganga es un importante consumidor de ácido sulfúrico en el proceso de lixiviación, que puede afectar significativamente en la recuperación de cobre. Los silicatos como feldespato potásico y sódico, plagioclasa y biotita se descomponen en ácido ortosilícico (H_4SiO_4) y cationes metálicos como Na^+ , K^+ , Al^{+3} , Ca^{+2} , Fe^{+2} , Fe^{+3} y Mg^{+2} . Además, pueden formar subproductos como yeso, pirofilita, magadiita, vermiculita, jarosita o sílice (Jansen & Taylor, 2003). Ejemplo de reacciones de descomposición de la biotita, feldespato potásico y clorita:

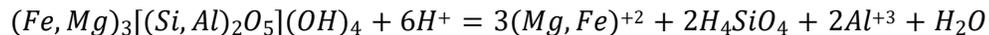
Biotita



Feldespato K

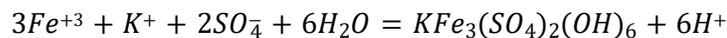


Clorita

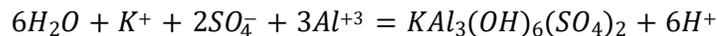


Los productos descompuestos pueden regenerar ácido por reacciones entre sí durante la generación de los precipitados. El consumo de ácido neto es entonces el equilibrio entre el consumo de ácido y la regeneración de este en el proceso (Jansen & Taylor, 2003). Por ejemplo, la regeneración de ácido se puede dar en la formación de jarosita, alunita y magadiita:

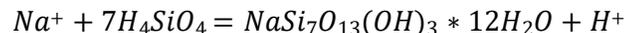
Jarosita



Alunita



Magadiita



7.1. DEFINICION DE UNIDADES

La definición de unidades de consumo de ácido neto (CAN) se realiza en base a los resultados de las pruebas de lixiviación de Columnas Unitarias que tiene asociada mineralogía QEMSCAN y de

pruebas de Botellas Iso pH que tiene asociada mineralogía DRX. Para realizar la separación de unidades es necesario determinar bajo qué parámetros el consumo puede ser agrupado en asociaciones características.

El análisis de la información se realiza con ambos depósitos (Polo Sur y Sherezade) en conjunto, viendo las diferencias y similitudes entre los resultados de botellas y columnas para generar unidades en común entre el depósito Polo Sur y Sherezade.

En primer lugar, se lleva a cabo un análisis de mineralogía de alteración con respecto al CAN. Se realizan gráficos de frecuencia acumulada por mineral, donde el CAN se analiza con dos grupos, uno de alto consumo y uno de bajo consumo. La Figura 7.1 muestra el CAN de resultados de columnas con mineralogía QEMSCAN para el depósito Polo Sur, donde se puede observar que los minerales de mayor consumo corresponden a la biotita, clorita y plagioclasa, minerales que por definición corresponden a la alteración SC. Mientras que los minerales que están en el grupo de

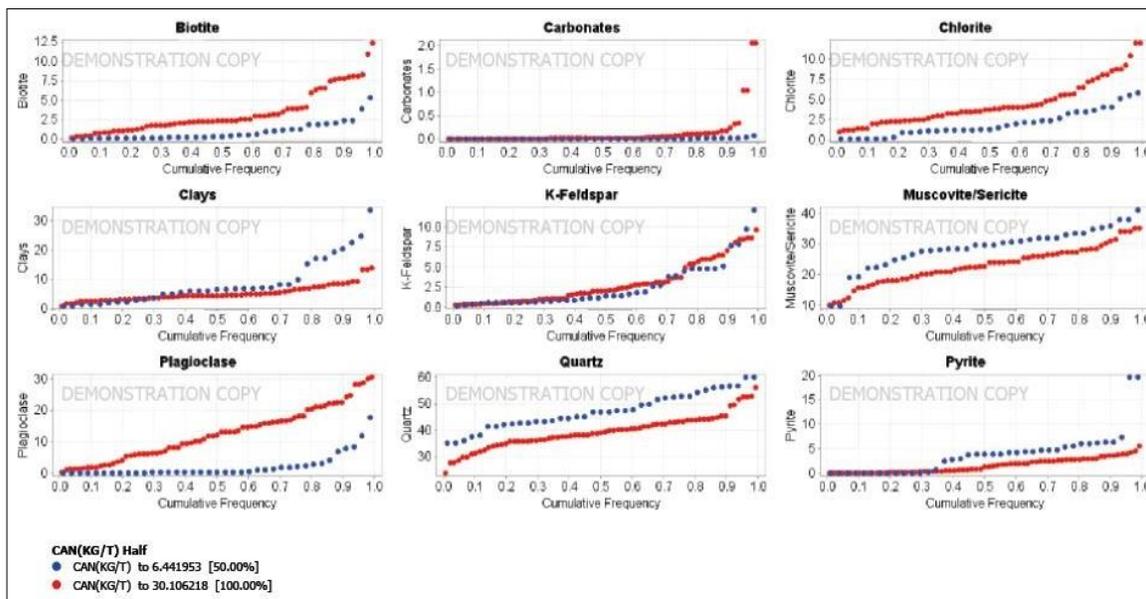


Figura 7.1: Comportamiento de la mineralogía QEMSCAN de alteración al CAN, depósito Polo Sur.
Resultados de columnas unitarias.

menor consumo de ácido son el cuarzo y la muscovita/sericita mineralogía típica de la alteración QS. La Figura 7.2 evidencia que en el depósito Sherezade la mayoría de las muestras están en el grupo de menor CAN, pero se sigue observando la tendencia que la clorita y plagioclasa son minerales de gran CAN y los carbonatos marcan tendencia, pero no están en gran abundancia.

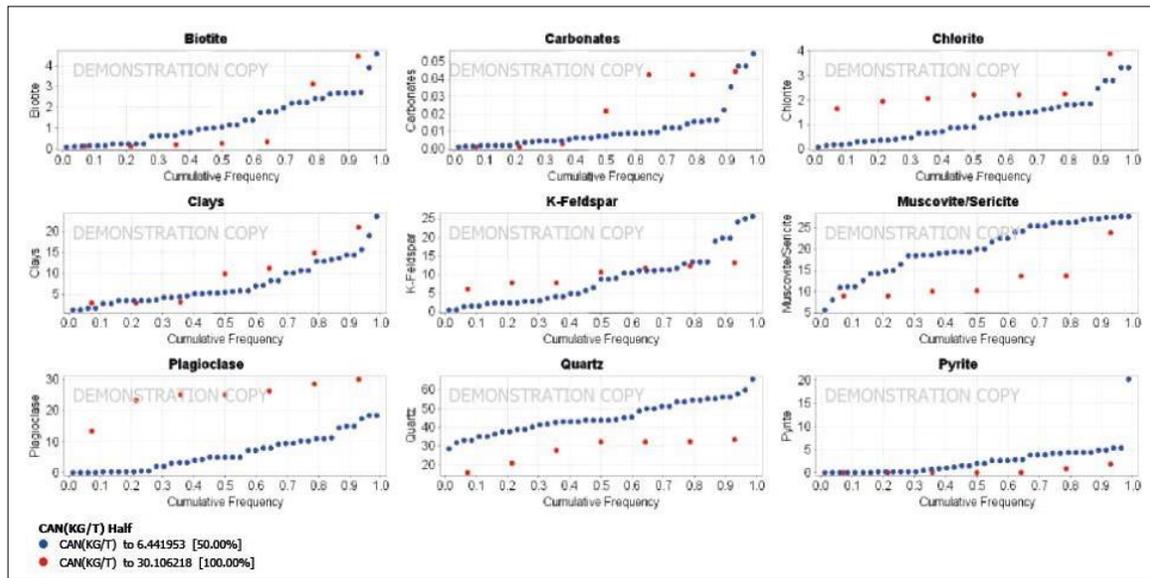


Figura 7.2: Comportamiento de la mineralogía QEMSCAN de alteración al CAN, depósito Sherezade. Resultados de columnas unitarias.

La Figura 7.3 corresponde a los resultados de botellas con mineralogía DRX para el depósito Polo Sur, a partir de estos se puede observar una misma tendencia al mayor consumo por parte de la clorita y plagioclasa, mineralogía asociada a la alteración SC, en este caso la biotita no representa un mineral que marca una diferencia en cuanto al CAN. El depósito Sherezade (Figura 7.4) posee pocas muestras de botellas lo que hace que el análisis no sea muy claro, aun así, la plagioclasa y clorita muestran la misma tendencia en el grupo de mayor CAN, mientras que el cuarzo y la muscovita son de menor CAN. Al igual que en los resultados de las columnas, los minerales de menor consumo son el cuarzo y la muscovita/sericita, correspondientes a la alteración QS.

Observando este comportamiento, es que el parámetro geológico que se usará para definir las unidades son las alteraciones hidrotermales, principalmente en la QS y SC que son las que tienen mayor número de muestras. En la Figura 7.5 puede observarse que estas alteraciones tienen tendencias claras, que sirven para separar cada una de ellas en una unidad de consumo independiente una de la otra. La alteración SC muestra una clara tendencia a un mayor CAN, mientras que la alteración QS por su parte es la de menor consumo, tal como lo indicaban sus minerales característicos. De esta forma es que se definen dos unidades de consumo de ácido:

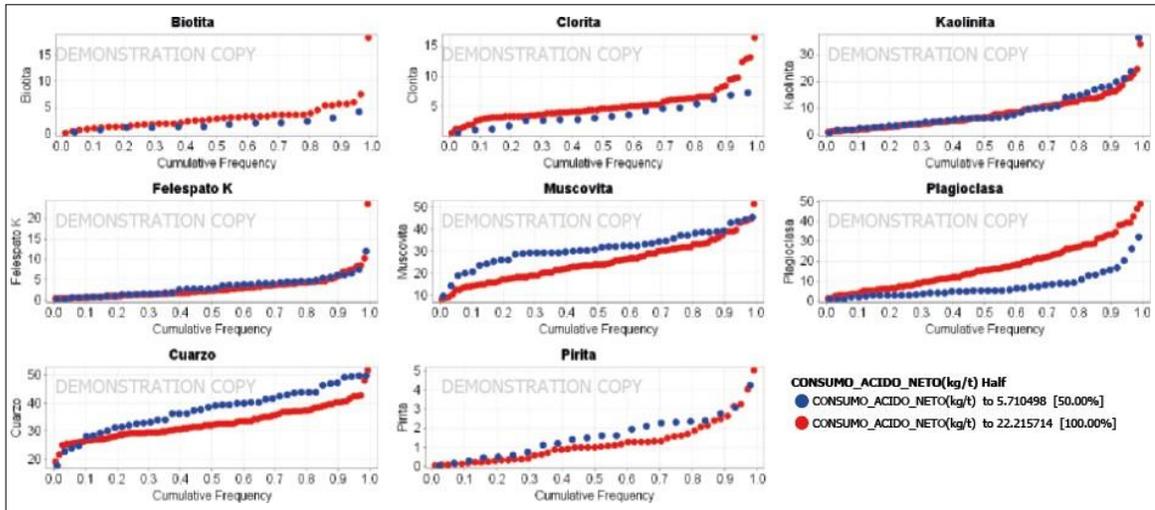


Figura 7.3: Comportamiento de la mineralogía DRX de alteración al CAN, depósito Polo Sur. Resultados de botellas Iso pH.

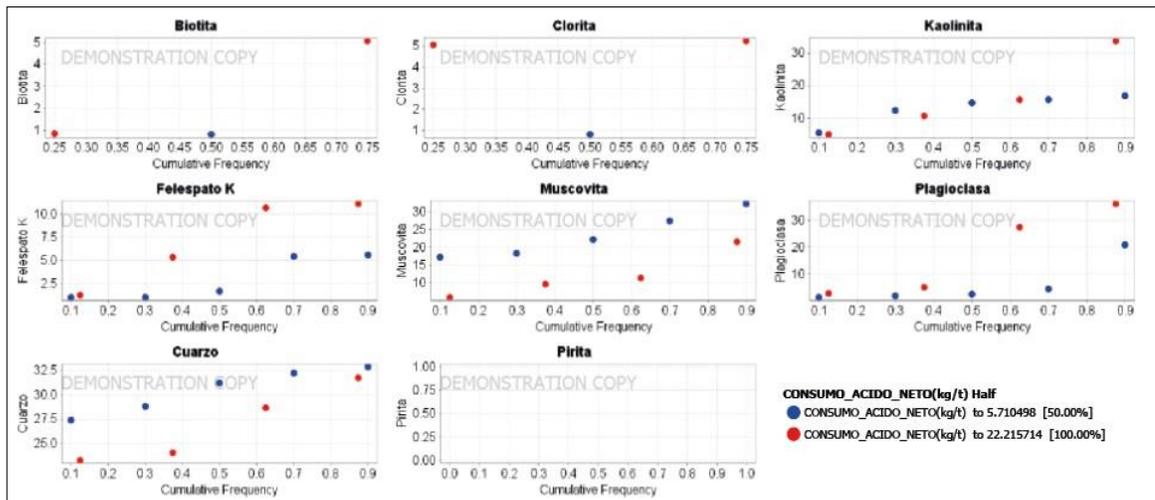


Figura 7.4: Comportamiento de la mineralogía DRX de alteración al CAN, depósito Sherezade. Resultados de botellas Iso pH.

- **Unidad 1 QS:** esta unidad está definida de acuerdo con la alteración cuarzo-sericita, donde el conjunto de minerales presentes tiene un comportamiento que tiende a un consumo menor que la asociación de minerales de la alteración sericita-clorita. Esta unidad puede ser dividida en subunidades si se considera el tipo de litología afectada por la alteración, pero para efectos de este trabajo no será considerado.

- **Unidad 2 SC:** la segunda unidad es definida por la alteración sericita-clorita, que por la asociación mineral y condiciones de formación muestran una inclinación a un mayor consumo.

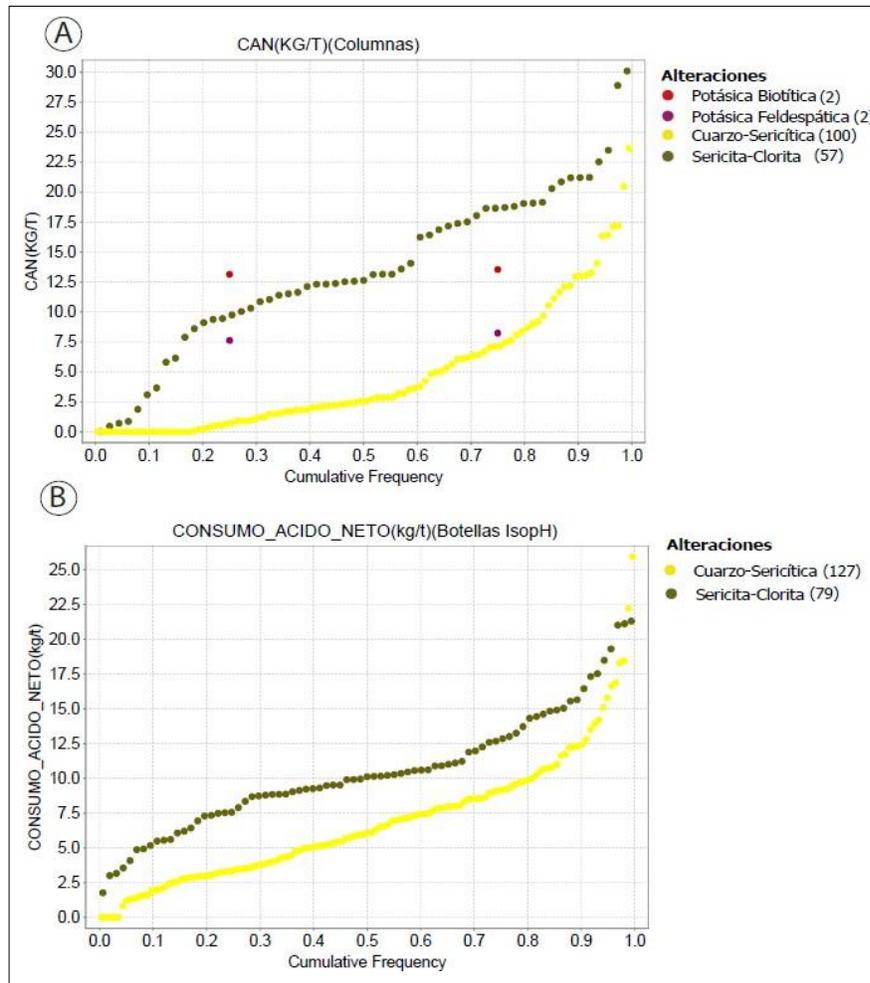


Figura 7.5: CAN (kg/t) por tipo de alteración. A) CAN por resultado de columnas unitarias. B) CAN por resultado de Botellas Iso pH.

La alteración potásica biotítica y feldespática tienen pocas muestras y sin un comportamiento que se pueda asociar con alguna de las unidades definidas. La otra alteración que está presente en el proyecto es la propilítica, que no tiene asociadas pruebas de columnas ni de botellas, por no ser una alteración con importancia de mena.

7.2. CARACTERIZACIÓN DE UNIDADES

La Figura 7.6.A muestra el CAN por las unidades definidas anteriormente en resultado de Columnas Unitarias. Se puede observar que el gráfico de frecuencia acumulada diferencia ambas unidades, donde la Unidad 1 QS tiene un promedio de $4,71 \text{ kg/t}$, mientras que la Unidad 2 SC marca un promedio de CAN de $13,41 \text{ kg/t}$. Esto muestra que la Unidad 2 SC tiene en general una clara señal de un mayor CAN, a pesar de que en la Unidad 1 QS hay muestras que tienden a un alto consumo.

En la Figura 7.6.B se pueden visualizar los resultados de botellas Iso pH, en donde las unidades definidas muestran la misma inclinación que las columnas unitarias, pero en este caso las unidades muestran una tendencia mucho más estrecha entre ambas. La Unidad 1 QS tiene un CAN promedio de $6,85 \text{ kg/t}$, mientras que la Unidad 2 SC tiene un promedio de $10,48 \text{ kg/t}$. Donde se sigue marcando que la unidad de mayor consumo es la Unidad 2 SC. Para visualizar de mejor forma estos resultados. se realiza la Tabla 7.1 como resumen.

Tabla 7.1: Resumen resultados CAN por Unidad.

	Unidad 1 QS		Unidad 2 SC	
Prueba	Columna	Botella	Columna	Botella
Promedio	4,71 kg/t	6,85 kg/t	13,41 kg/t	10,48 kg/t

El consumo de ácido en ensayos de botellas Iso pH es considerado semicuantitativo (Azmayandeh, 2017) y tienden a sobreestimar los valores de consumo (Jansen & Taylor, 2003), esto porque los minerales poseen mayor superficie expuesta para interactuar con el ácido debido a que se realizan a una menor granulometría que las columnas unitarias (pruebas que muestran un consumo más cercano a la realidad de las pilas de lixiviación). En las Figuras 7.4 A y 7.4 B se observa que para la Unidad 1 QS se cumple esta condición donde el promedio de las columnas es $4,71 \text{ kg/t}$, mientras que en las botellas, este es mayor llegando a $6,85 \text{ kg/t}$; esto no se cumple para la Unidad 2 SC donde el promedio de las columnas es mayor llegando a un CAN de $13,41 \text{ kg/t}$ y en las botellas $10,48 \text{ kg/t}$.

El estudio de Free (2010, en Chetty, 2018) demuestra que, al comparar la clorita con la biotita, esta última consume ácido mucho más rápido a un pH bajo, mientras que los estudios de Jansen &

Taylor (2003) concluyen que la clorita es un alto consumidor de ácido a largo plazo. Esto puede explicar los resultados de columnas y botellas para la Unidad 2 SC perteneciente a la alteración sericita clorita, donde las columnas muestran un mayor consumo, pues tienen más tiempo de lixiviación que las botellas.

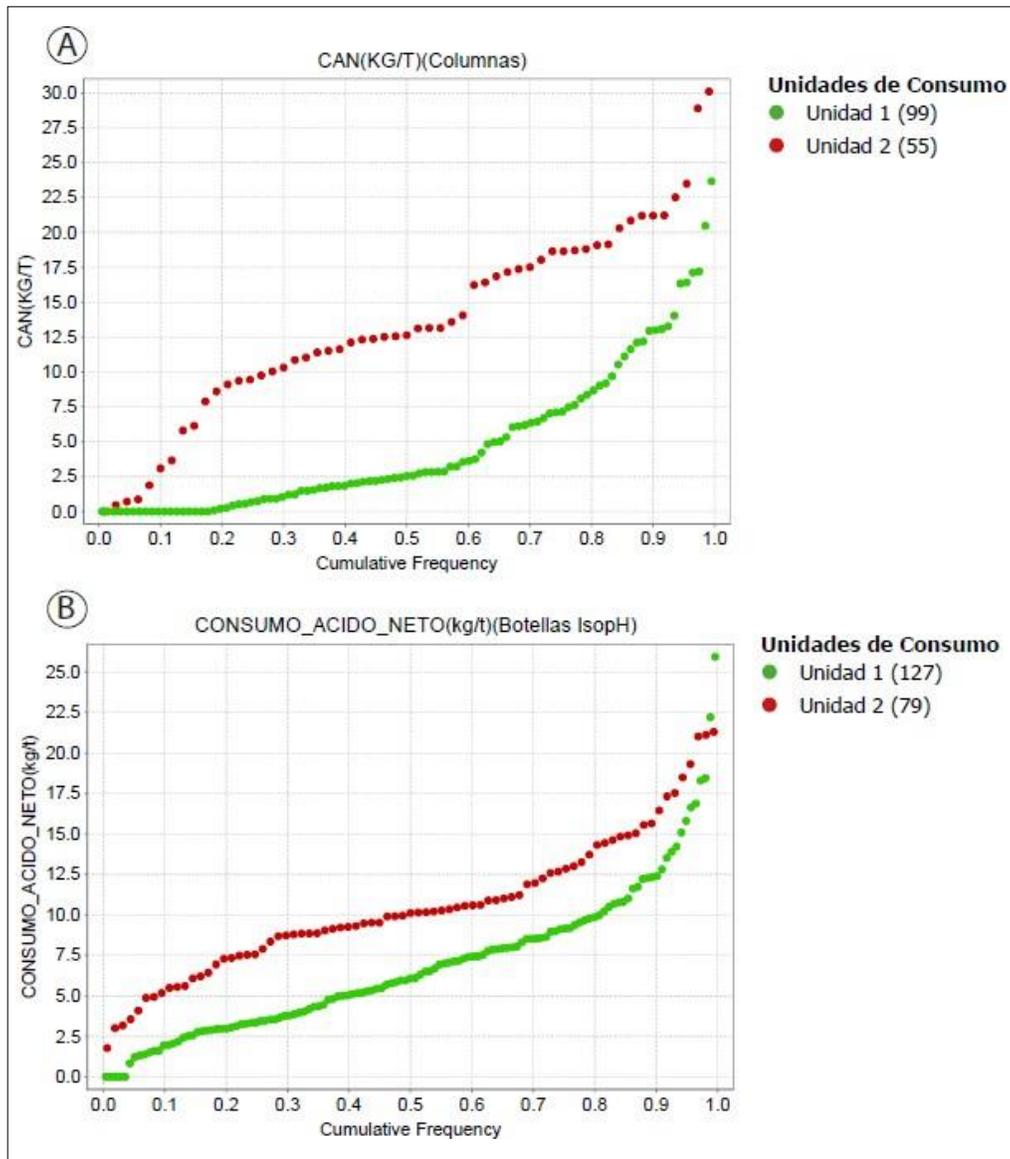


Figura 7.6: CAN (kg/t) por Unidad de Consumo. A) CAN por resultado de columnas unitarias. B) CAN por resultado de Botellas Iso pH.

Al graficar los minerales de ganga bajo análisis QEMSCAN con las unidades de consumo de ácido (Figura 7.7) se refleja lo mencionado anteriormente, que para la Unidad 1 QS en general la

asociación mineral tiene un consumo menor a la Unidad 2 SC, esto está determinado por los minerales y sus proporciones que definen las alteraciones. La clorita tiene un alto consumo cuando mayor es su proporción, lo mismo ocurre con la biotita y la plagioclasa (aunque en esta última es menos claro), donde son estos minerales los que diferencian la alteración SC de la alteración QS.

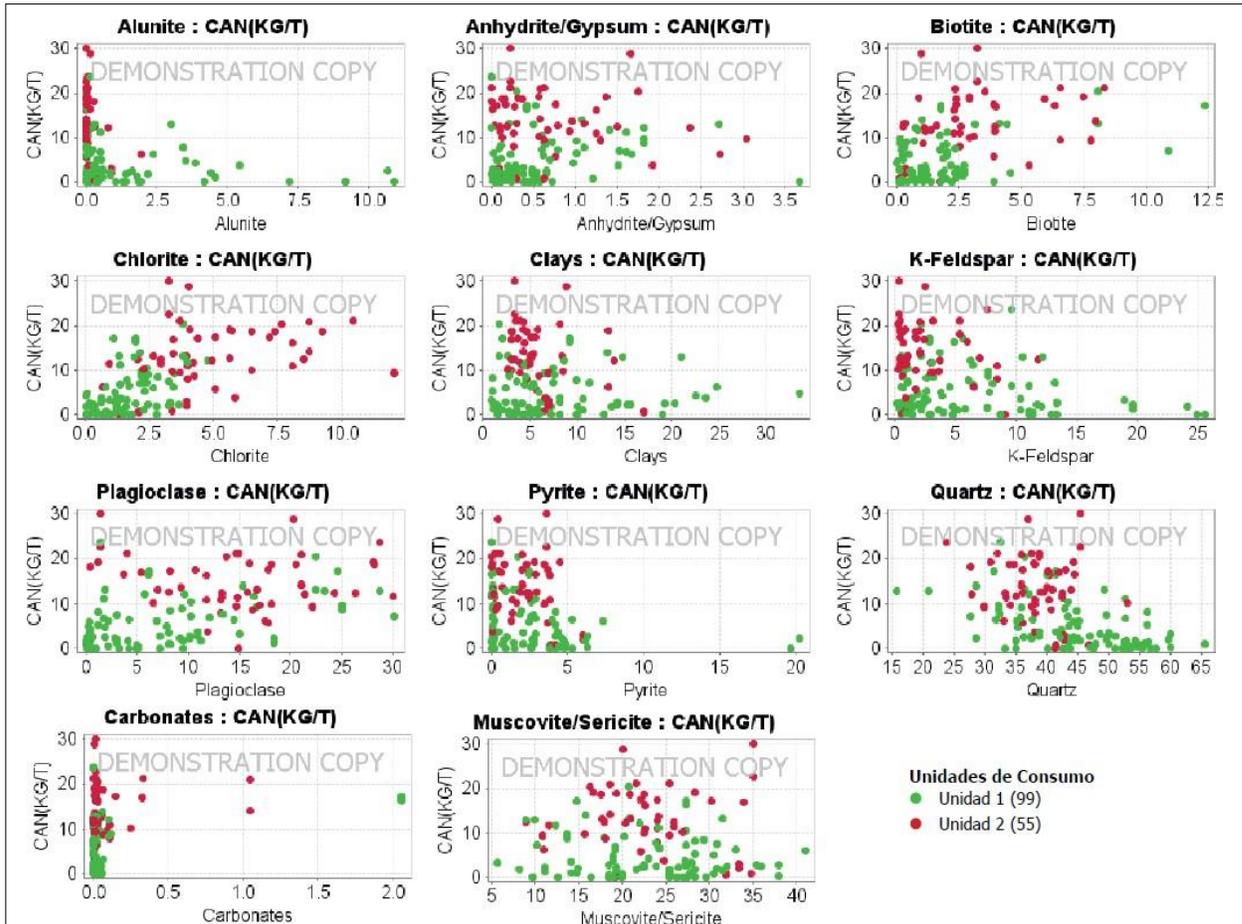


Figura 7.7: CAN por mineralogía de ganga QEMSCAN. Resultado de columnas unitarias.

Al revisar la mineralogía DRX de los análisis de botellas (Figura 7.8), no hay una buena separación entre mayor o menor consumo entre las unidades y la mineralogía, aun así, se logra evidenciar que la Unidad 2 SC tiende a un mayor consumo, con los minerales más característicos de la alteración SC como la biotita, clorita y plagioclasa.

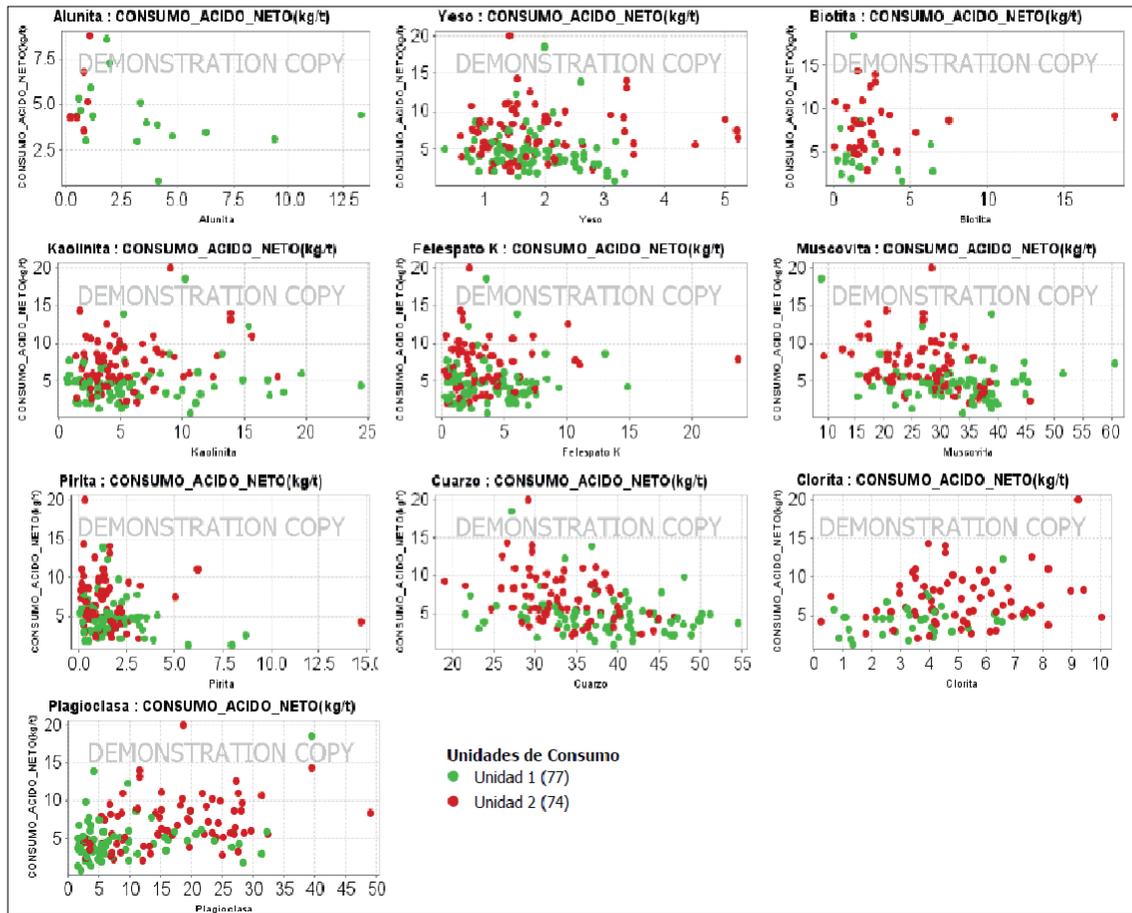


Figura 7.8: CAN por mineralogía de ganga DRX. Resultado de Botellas Iso pH.

Lo anterior mencionado puede verse mejor en la Figura 7.9, donde se muestra la mineralogía promedio de ganga asociada a cada unidad de consumo en QEMSCAN (7.7A) y DRX (7.7B). La mineralogía asociada a la Unidad 2 SC se diferencia de la Unidad 1 QS principalmente por los porcentajes de clorita, plagioclasa y biotita, además de tener menor contenido de cuarzo y sericita, que son mineralogía asociada a menor consumo de ácido (Tabla 7.2).

Tabla 7.2: Mineralogía promedio de ganga QEMSCAN y DRX.

QEMSCAN	Unidad 1 QS	Unidad 2 SC	DRX	Unidad 1 QS	Unidad 2 SC
Cuarzo	44,63	38,19	Cuarzo	37,99	33,46
Muscovita	22,89	22,75	Muscovita	32,47	27,30
Clorita	1,59	5,05	Clorita	3,52	5,00
Plagioclasa	6,39	13,49	Plagioclasa	8,55	16,86
Biotita	1,62	2,9	Biotita	2,20	2,74

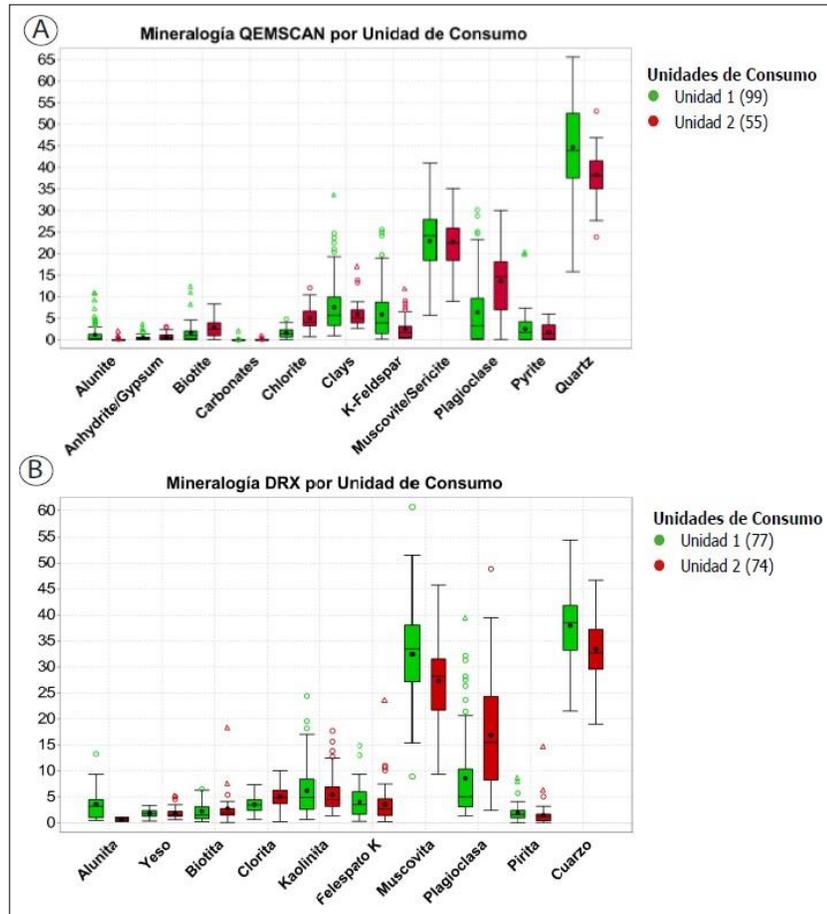


Figura 7.9: Mineralogía de ganga por Unidad de Consumo. A) Mineralogía QEMSCAN, B) Mineralogía DRX.

7.3. COMPORTAMIENTO DE LA GANGA EN LA LIXIVIACIÓN

Las unidades de consumo definidas tienen asociaciones minerales distintivas una de otra con un comportamiento particular en el proceso de lixiviación. Como se describe en el Capítulo 4.1.1, el consumo de ácido depende de varios factores como la granulometría, la cristalinidad de los minerales, la porosidad, etc. (Chetty, 2018). En la Unidad 2 SC destaca una mayor concentración

de clorita, biotita y plagioclasa, minerales de la alteración sericita clorita que presentan un mayor consumo de ácido, mientras que la Unidad 1 QS tiene mayores concentraciones de cuarzo y sericita. Dreier (1998, en Scheffel y otros, 2016) menciona que la disolución de los silicatos de ganga sigue la continuidad de la serie de Bowen (Figura 7.10), donde los minerales de composición más básicas tienen mayor consumo que los minerales de composiciones más ácidas, lo que estaría relacionado con la disposición de la unidad tetraédrica SiO_4 .

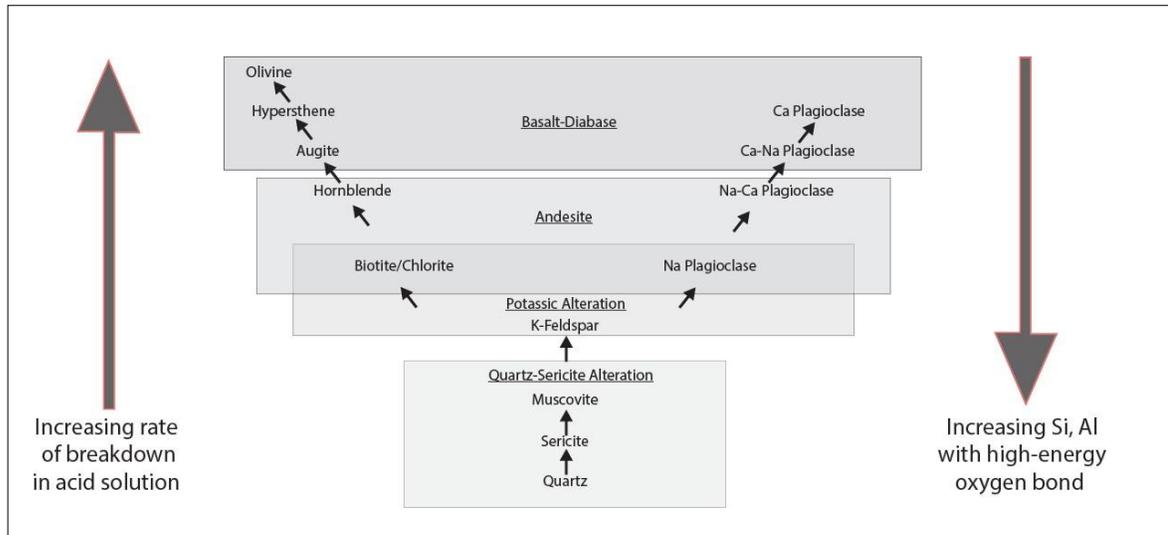


Figura 7.10: Serie de Bowen, con cinética de lixiviación. Extraído y modificado de Scheffel y otros, 2016.

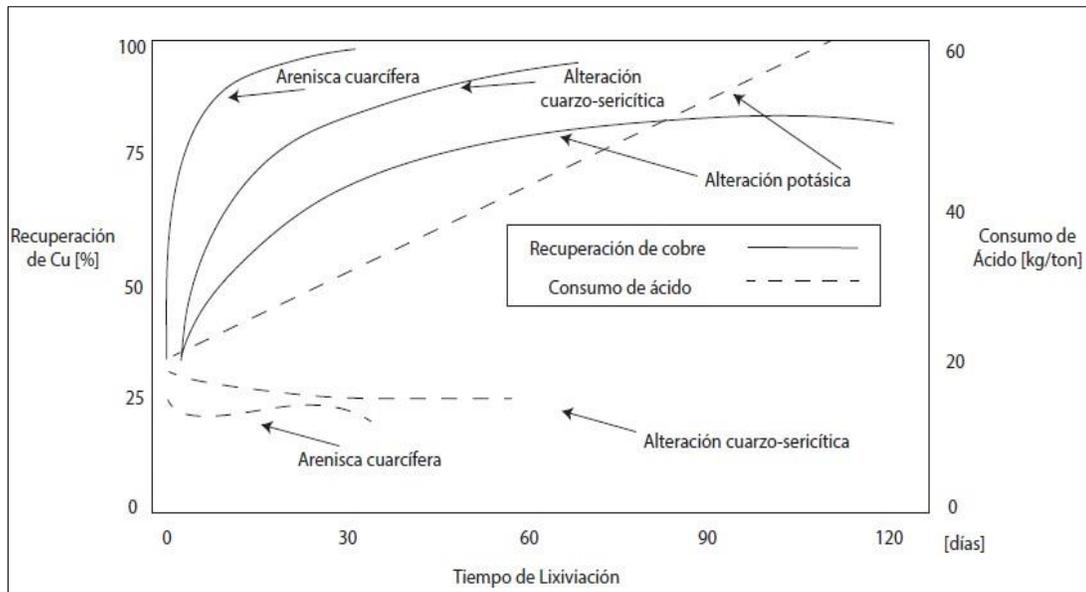
Si bien la muscovita y biotita tienen estructuras y fórmulas químicas similares, el consumo de ácido es muy diferente. Esto se debe a la energía de enlace entre el Al-O de la muscovita, el Fe-O y Mg-O de la biotita (Tabla 7.3), basado en observaciones experimentales realizadas por Snäll y Liljefors (2000, en Chetty, 2018), donde la biotita fue disuelta completamente en ácido, mientras que la muscovita solo se disolvió en un 5,6%-8,7%, esto puede explicar la diferencia entre los consumos de ácido entre la Unidad 1 QS con mayor concentración de muscovita/sericita y Unidad 2 SC con mayor concentración de biotita y clorita.

Otro aspecto relevante es la liberación de ion ferroso desde la biotita u otros minerales que contienen hierro que pueden ser útil en la extracción de Cu, donde el Fe^{+2} actúa como un agente reductor lo que aumenta el potencial de oxidación ayudando a disolver minerales sulfurados (Chetty, 2018).

Tabla 7.3: Energía de enlace metal-oxígeno. Extraído de Chetty (2018).

Ion	Metal-Bond Energy ($kJ * mol^{-1}$)	Ion	Metal-Bond Energy ($kJ * mol^{-1}$)
Si^{+4}	13.012-13.146	Mg^{+2}	3.816
Ti^{+4}	12.058	Mn^{+2}	3.745
Zr^{+4}	11.033	Cu^{+2}	3.598
Al^{+3}	7.201-7.858	Ca^{+2}	3.510
Cr^{+3}	7.092	Pb^{+2}	3.469
Y^{+3}	6.552	Sr^{+2}	3.347
Be^{+2}	4.774	Ba^{+2}	3.213
Zn^{+2}	3.937	Li^{+}	1.469
Ni^{+2}	3.887	Na^{+}	1.347

Domic (2001) menciona que la ganga silicatada puede ser clasificada en categorías por la velocidad con que reaccionan con el ácido según la mineralogía presente, que sigue la serie de Bowen (Figura 7.10). La diferencia en la velocidad, consumo de ácido y recuperación se puede observar en la Figura 7.11, realizado a partir de resultados experimentales. Esto demuestra de forma experimental que la alteración cuarzo sericita (Unidad 1 QS) es menos consumidora que la alteración sericita clorita (Unidad 2 SC) alteración de transición entre la alteración potásica y cuarzo sericita.

**Figura 7.11: Resultados experimentales de extracción de Cu y consumo de ácido.** Extraído y modificado de Domic (2001).

Las categorías de velocidad de reacción que define Domic (2001) se resumen a continuación según su mineralogía:

- **Ganga altamente reactiva:** con especies carbonatadas como calcita, dolomita y siderita.
- **Ganga medianamente reactiva:** con cantidades significativas de hornblenda, piroxeno y plagioclasa cálcica.
- **Ganga moderadamente reactiva:** mineralogía principal compuesta por ortoclasa, biotita, albita.
- **Ganga levemente reactiva:** rocas alteradas a cuarzo, sericita o caolinita.
- **Ganga no reactiva:** areniscas cuarcíferas.

7.3. MODELAMIENTO DE UGM DE CONSUMO

El modelo de las unidades de consumo de ácido se trabaja con el *software* de modelamiento implícito Leapfrog Geo 2021.2.5. Este software crea modelos geológicos a partir de datos de entrada, sin que se tenga que digitalizar cada nodo de triangulación, de forma que puede ser manipulado y refinado, pero esencialmente va generando algoritmos informáticos de la combinación entre datos medidos e interpretados por el usuario (Cowan y otros, 2003).

Para generar los cuerpos 3D de las unidades se toma el modelo geológico del proyecto llamado “Modelo_Geológico_FS_PoloSurSherezade_20220401”, que posee los volúmenes de alteraciones, litologías y zonas minerales, que son la base para la construcción del modelo de unidades de consumo y de extracción de cobre.

Como se analizó anteriormente, las unidades de consumo se definieron a partir de la mineralogía de ganga, mostrando que las tendencias de consumo y sus asociaciones tienen relación con las alteraciones cuarzo sericita para la Unidad 1 QS y sericita clorita para la Unidad 2 SC. De esta forma se crean modelos geológicos con la herramienta “*New Geological Model*” tomando como límites los volúmenes de las alteraciones QS y SC:

- ALTE_TRABAJO: QS
- ALTE_TRABAJO: QS_BXH_SHE

- ALTE_TRABAJO: SC
- ALTE_TRABAJO: SC_SHE
- ALTE_TRABAJO: SC_BXH_SHE

Se toman los volúmenes ALTE_TRABAJO: QS y ALTE_TRABAJO: QS_BXH_SHE, que corresponden a la alteración QS y de esta forma se establecen los cuerpos para la Unidad 1 QS de consumo. Los volúmenes ALTE_TRABAJO: SC, ALTE_TRABAJO: SC_SHE y ALTE_TRABAJO: SC_SHE pertenecen a la alteración SC y con estos se establecen los volúmenes para la Unidad 2 SC.

La Figura 7.12.A muestra una imagen en planta de las unidades, en gris la alteración que las rodea que corresponde a la alteración propilítica que muestra los límites de trabajo para las alteraciones. Se observa un mayor desarrollo de la Unidad 1 QS con tendencia NE que evidencia las estructuras principales que controlan gran parte de la geología de los yacimientos. En la Figura 7.12.B se observa que la Unidad 2 SC aparece a mayor profundidad y con mayor desarrollo en la cota 1850, mientras que la Unidad 1 QS sigue a pareciendo hacia el sector SW.

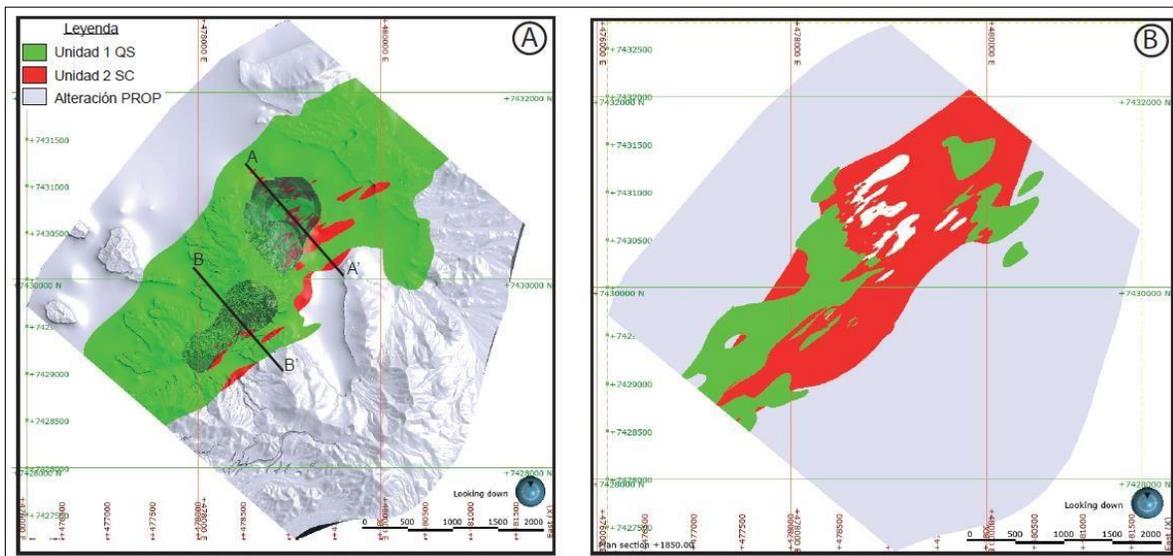


Figura 7.12: Modelo en planta de Unidades de Consumo de ácido. A) Vista en superficie, *pit* norte depósito Polo Sur, *pit* sur depósito Sherezade. B) Vista a la cota 1850.

La Figura 7.13 muestra secciones de ambos depósitos, en el *pit* del depósito Polo Sur un desarrollo relativamente parejo entre las Unidades de Consumo, donde la Unidad 1 QS se posiciona en sectores más superficiales del depósito, mientras que la Unidad 2 SC tiene un desarrollo más amplio

y profundo. En el *pit* del depósito de Sherezade se observa mayor proporción de la Unidad 1 QS que a diferencia del depósito Polo Sur tiene mayor desarrollo y a mayor profundidad, la Unidad 2 SC está más restringida en el *pit* y su desarrollo se encuentra más profundo.

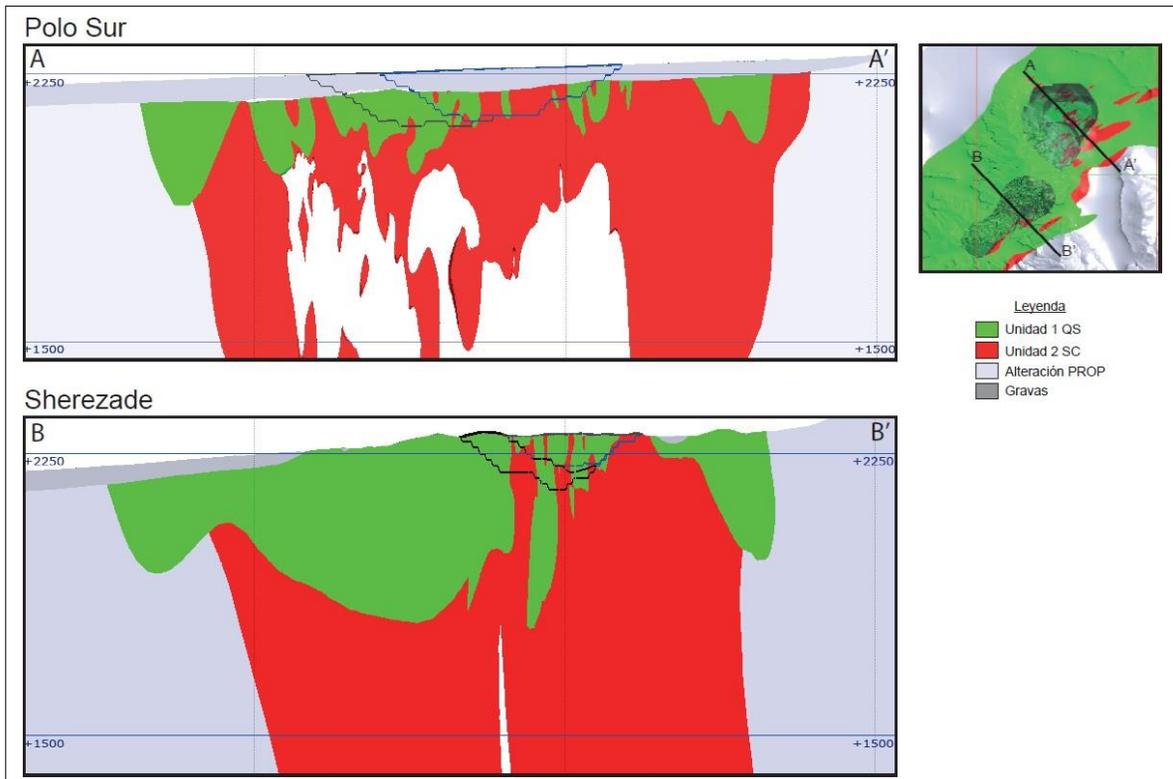


Figura 7.13: Secciones de los depósitos y Unidades de Consumo.

8. UGM DE EXTRACCIÓN DE COBRE

Para definir UGM de extracción de cobre es necesario conocer en detalle las pruebas geometalúrgicas, el comportamiento a la lixiviación de los minerales de mena, las asociaciones minerales, razón de solubilidad, leyes de cobre, entre otros parámetros. La extracción de cobre requiere que el proceso de lixiviación tenga las condiciones necesarias para un óptimo desempeño y extraer la mayor cantidad posible. Jansen & Taylor (2003) describen algunos factores que influyen en la recuperación de cobre como el tamaño de la partícula, la liberación/bloqueo de los minerales de cobre, la concentración de ácido en la solución; para mejorar este proceso proponen algunos métodos como:

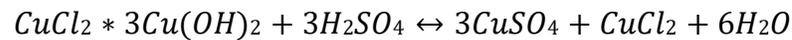
- Mezcla de minerales.
- Mayor tiempo de lixiviación.
- Mayor concentración de ácido en la solución lixivante.
- Mejorar condiciones de percolación y de curado, con mayor adición de ácido y/o un curado más largo.
- Relixiviación de zonas pobremente lixiviadas.

Por otra parte, la solubilidad de los compuestos metálicos es un factor importante en el proceso que depende de dos parámetros fundamentales; el pH y el potencial de oxidación de la solución (Ruiz, 2013), esto quiere decir que para solubilizar un mineral y liberar el elemento de interés es necesario modificar estos parámetros. En el caso de la extracción del cobre esto se logra con adición de ácido sulfúrico para modificar el pH acidificando la solución y un agente oxidante como el Fe^{+3} para modificar el Eh.

El diagrama Eh-pH (Figura 8.1) muestra la estabilidad de minerales de cobre y las condiciones para solubilizarlos, donde minerales como la malaquita, brochantita, antlerita, chalcantita solo necesitan condiciones ácidas para liberar el cobre, es decir disminuir el pH con ácido sulfúrico. Los sulfuros de cobre y la cuprita en cambio necesitan un medio ácido y oxidado para liberar el cobre, esto se logra disminuyendo el pH y aumentando el potencial de oxidación con Fe^{+3} que es incorporado a la solución o es liberado por la descomposición de minerales de ganga, pero este proceso es muy

La rapidez con la que se lixivia el cobre desde las especies minerales está directamente relacionada con los electrones que se necesitan remover para hacer soluble a cada mineral. Esta cinética relativa (Tabla 8.1) muestra que los minerales oxidados tienen una rapidez mayor que los minerales secundarios o primarios, que tiene incluso una disolución incompleta (Domic, 2001). Algunas de estas reacciones con ácido sulfúrico se muestran a continuación:

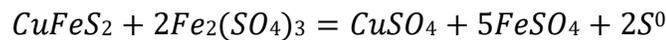
Atacamita:



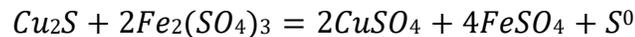
Brochantita:



Calcopirita:



Calcosina:



Covelina:



Tabla 8.1: Cinética de disolución relativa de minerales de cobre en ácido sulfúrico. Extraído de Domic (2001).

Cinética relativa	Tiempo de referencia	Especies minerales de cobre
Muy rápida (a temperatura ambiente)	Segundos a minutos disolución completa	Carbonatos (malaquita, azurita), sulfatos (chalcantita, brochantita y antlerita) y cloruros (atacamita)
Rápida (requiere mayor acidez)	Horas disolución completa	Óxidos cúpricos (tenorita), silicatos (crisocola y dioptasa)
Moderada (requieren oxidante)	Días a semanas disolución puede ser no completa	Cobre nativo, óxidos cuprosos (cuprita, delafosita), y algunos silicatos y óxidos complejos con manganeso (neotocita, copper wad/pitch)
Lenta (requieren oxidante)	Semanas a meses disolución puede ser completa	Sulfuros simples (calcosina, digenita, djurleita, covelina).
Muy lenta (requieren oxidante)	Años disolución es incompleta	Sulfuros complejos (bornita, calcopirita, enargita, tetrahedrita)

8.1. DEFINICIÓN DE UNIDADES

Las UGMs de extracción de Cu de los depósitos Polo Sur y Sherezade, responden principalmente a las asociaciones minerales que se formaron a partir de diferentes eventos geológicos, generando zonas que tienen comportamientos característicos al proceso de lixiviación y distribución espacial determinada.

Los datos que se utilizan para este análisis son los resultados de columnas unitarias con mineralogía QEMSCAN asociada. No se considera la mineralogía DRX, debido a que este método analítico no detecta mineraloides, que representan parte de las menas de cobre del proyecto como las limonitas con Cu, cloritas con Cu, biotitas con Cu, copper wad y copper pitch. A partir de esta información mineralógica, la extracción de cobre y razón de solubilidad resultan seis UGMs:

- Óxidos Verdes-Brochantita (OXV-BR): su mineralogía principal es la brochantita/antlerita con menor cantidad de atacamita, con tramos donde puede encontrarse bajas concentraciones de crisocola, óxidos negros (copper wad/pitch), limonitas con Cu y trazas de calcosina y calcopirita. Esta unidad se caracteriza por tener la más alta extracción de Cu y razón de solubilidad de todas las unidades, debido a que la brochantita como mineral principal tiene una disolución completa y más rápida que la atacamita.
- Óxidos Verdes-Atacamita (OXV-AT): unidad representada principalmente por atacamita, con tramos donde puede haber cantidades menores de crisocola, brochantita, limonitas con Cu, arcillas con Cu y trazas de calcosina o calcopirita. La alta proporción de atacamita que posee esta unidad hace que tanto la razón de solubilidad como la extracción de Cu sea alta, pero menor que la unidad de OXV-BR. Esta asociación se forma por la oxidación de sulfuros primarios en las partes superficiales de los depósitos, evidenciado por sulfuros relictos.
- Óxidos Negros (OXN): como mineralogía principal contiene óxidos negros (copper wad/pitch) y cloritas con Cu, en menor cantidad aparecen las biotitas con Cu. Esta

asociación se diferencia por poseer una razón de solubilidad y una extracción menor que los óxidos verdes.

- Óxidos Negros-Filosilicatos (OXN-PHY): representada principalmente por la asociación de biotitas con Cu y cloritas con Cu, donde además se incluyen tramos con limonitas con Cu y arcillas con Cu, y en algunas muestras aparecen trazas de calcopirita. La extracción de esta unidad es mayor que la de OXN, pero con menores leyes de cobre.
- Sulfuros Secundarios y Mixtos (SEC-MX): esta unidad tiene como mineralogía principal calcosina, covelina y calcopirita, muestras de mixtos que contienen atacamita y brochantita, y algunos tramos en donde la bornita se encuentra en trazas. Se caracteriza por tener bajas razones de solubilidad y extracción de cobre variable.
- Sulfuros Primarios (PRI): asociación con mineralogía primaria y profunda representada por calcopirita, cantidades menores de calcosina y covelina. Tanto la extracción de cobre como la razón de solubilidad son muy bajas debido a que se trata principalmente de calcopirita que tiene un comportamiento refractario.

8.2. CARACTERIZACIÓN DE UNIDADES

8.2.1. ÓXIDOS VERDES-BROCHANTITA (OXV-BR)

La Figura 8.2 muestra el comportamiento de la unidad OXV-BR, donde se evidencia que posee la extracción de cobre más alta de todas las UGMs definidas con un promedio de 90,18%, y con una razón de solubilidad promedio muy similar de 90,79%, esto debido a la mineralogía muy soluble que caracteriza a esta unidad. La Tabla 8.2 muestra un resumen estadístico de estos parámetros metalúrgicos.

Tabla 8.2: Resumen estadístico de la unidad OXV-BR.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
Extracción de Cu (%)	81,37	96,13	90,18	91,77
RS (%)	77,57	97,12	90,79	92,40

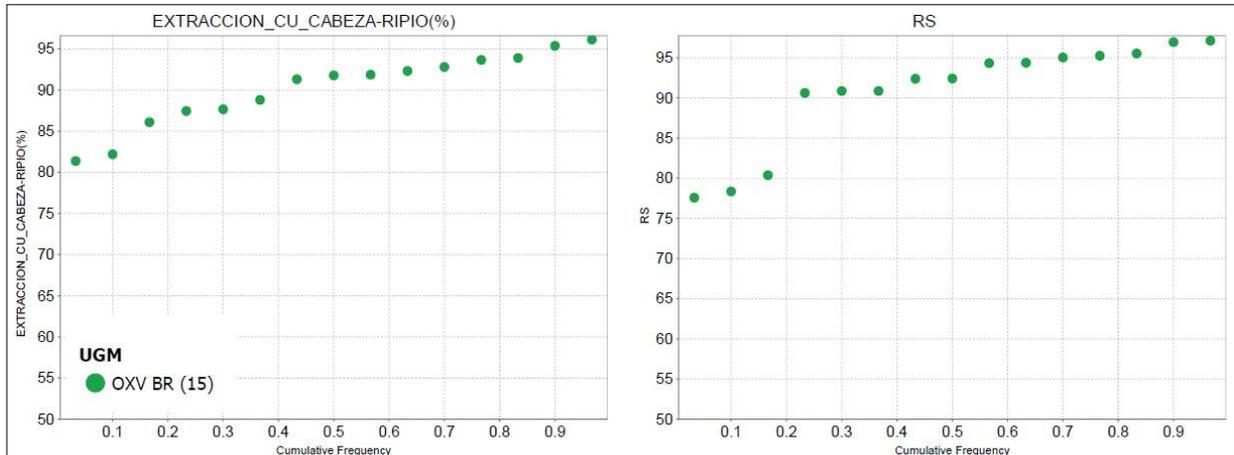


Figura 8.2: Gráficos de frecuencia acumulada de Extracción de Cu y Razón de solubilidad (RS) de la UGM OXV-BR.

La mineralogía de OXV-BR (Figura 8.3) tiene como mena principal la brochantita/antlerita, donde el porcentaje relativo mínimo es de un 40% con la mayor parte de las muestras por sobre el 60%, la segunda mena con mayor presencia en esta unidad es la atacamita con muestras que tienen hasta un 40%, también se evidencia relictos de sulfuros de cobre como calcopirita y calcosina con porcentajes que no superan el 10%. Es precisamente la brochantita, un mineral muy soluble que define esta unidad permitiendo diferenciarla de las demás por su comportamiento en la extracción y en la solubilidad, como puede observarse en el diagrama Eh- pH (Figura 8.1), la brochantita

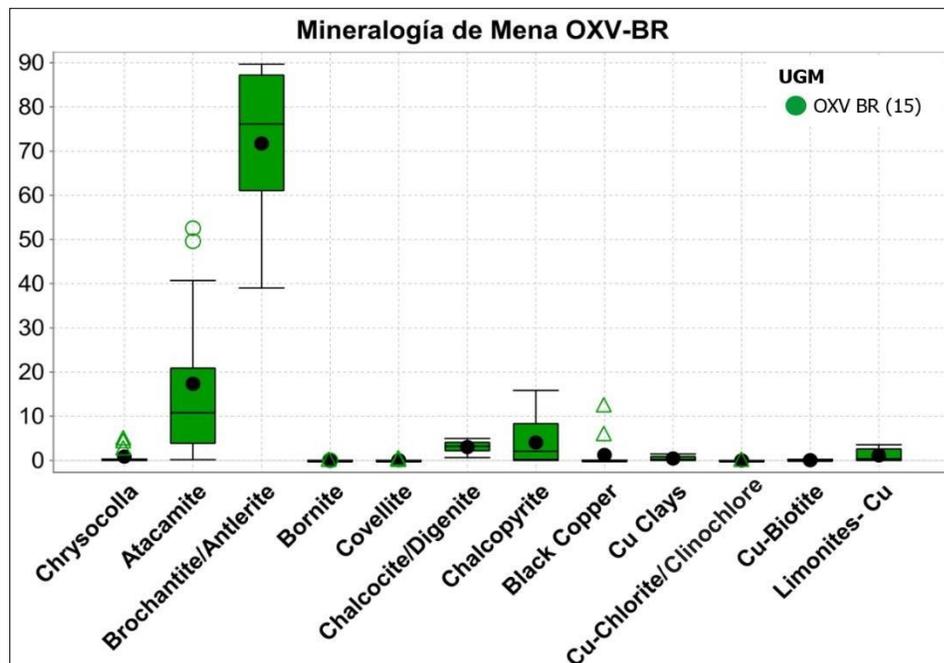


Figura 8.3: Mineralogía de mena de la unidad OXV-BR en porcentajes relativos.

necesita un leve cambio en el pH para solubilizarse, mientras que otros minerales como la atacamita necesitan reducir más su pH y en algunos casos también modificar el potencial de oxidación.

8.2.2. ÓXIDOS VERDES-ATACAMITA (OXV-AT)

La unidad de OXV-AT está caracterizada por tener extracciones y solubilidad altas, pero menores que la unidad de OXV-BR, sus promedios llegan al 82,52% y 72,77% respectivamente (Figura 8.4), con caso 10 punto porcentuales de diferencia. Resumen estadístico se muestra en la Tabla 8.3 donde destaca que las extracciones están sobre el 70%, mientras que el mínimo valor de la RS es un 53,55%.

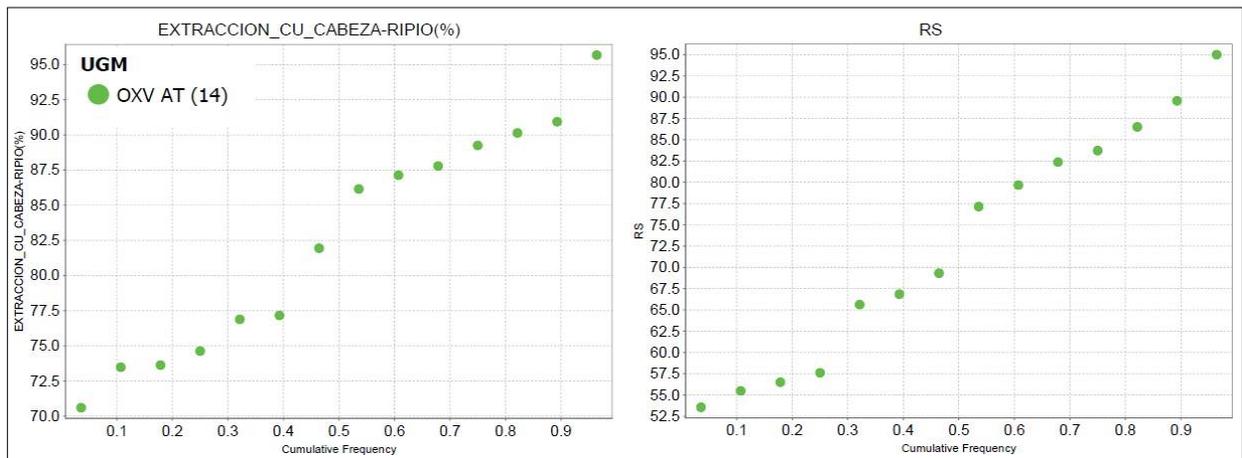


Figura 8.4: Gráficos de frecuencia acumulada de Extracción de Cu y Razón de solubilidad (RS) de la UGM OXV-AT.

La mineralogía de mena de la unidad OXV-AT se diferencia de la mineralogía de la unidad OXV-BR principalmente en la proporción de atacamita y brochantita/antlerita. En la Figura 8.5 se observa las menas que definen a esta unidad, donde la concentración de atacamita en porcentajes relativos muestra valores mayores al 60%, mientras que la segunda mena principal la brochantita/antlerita no supera el 30%. Minerales como la crisocola, calcosina, calcopirita, arcillas y limonitas con cobre se encuentran en porcentajes menores en las muestras. En tanto, las demás menas se encuentran prácticamente ausentes.

Tabla 8.3: Resumen estadístico de la unidad OXV-AT.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
Extracción de Cu (%)	70,60	95,67	82,52	84,04
RS (%)	53,55	95,00	72,77	73,22

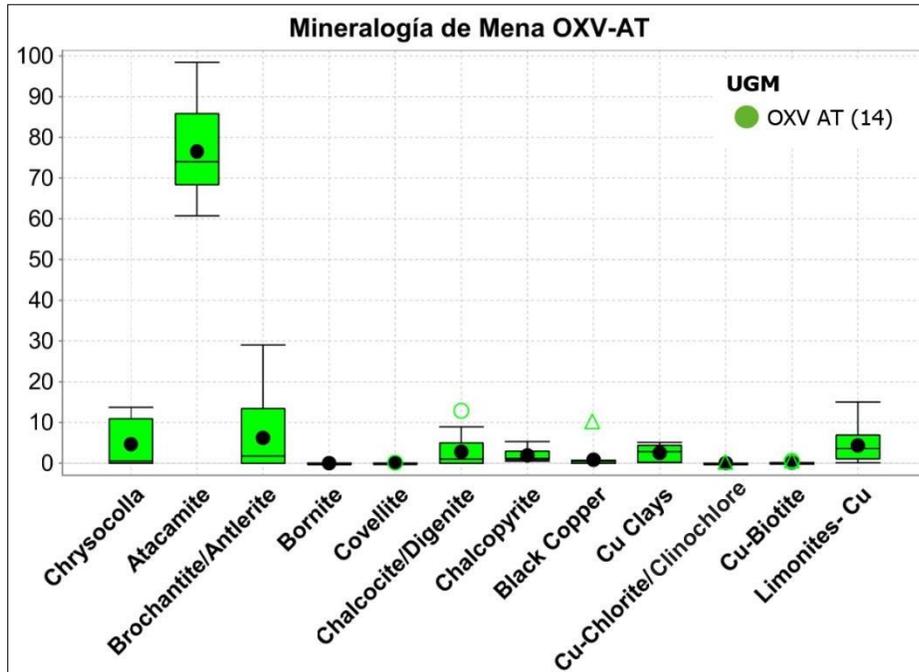


Figura 8.5: Mineralogía de mena de la unidad OXV-AT en porcentajes relativos.

8.2.3. ÓXIDOS NEGROS (OXN)

Esta unidad se distingue por su poseer mineraloides como mena principal y minerales que atraparon sobre en su red cristalina. Esta mineralogía se caracteriza por tener extracciones intermedias y ser poco solubles con promedios de 37,95% y 38,61% respectivamente (Figura 8.6). La Tabla 8.4 es un resumen estadístico, donde el mínimo para la extracción es 19,15% en una muestra que como se ve en la Figura 8.7 se escapa un poco de la tendencia general.

Tabla 8.4: Resumen estadístico de la unidad OXN.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
Extracción de Cu (%)	19,15	48,06	37,95	40,20
RS (%)	33,33	42,55	38,61	40,00

En la Figura 8.7 se observa la mineralogía de mena para esta unidad donde destaca como mena principal mineraloides poco solubles, con óxidos negros (copper wad/pitch), donde la mayor parte de los datos tienen sobre un 33% en porcentaje relativo, junto a la clorita con cobre que representa la segunda mena principal. Se diferencia la unidad OXV-PHY por la proporción de biotita con cobre que en esta unidad están por debajo del 20%.

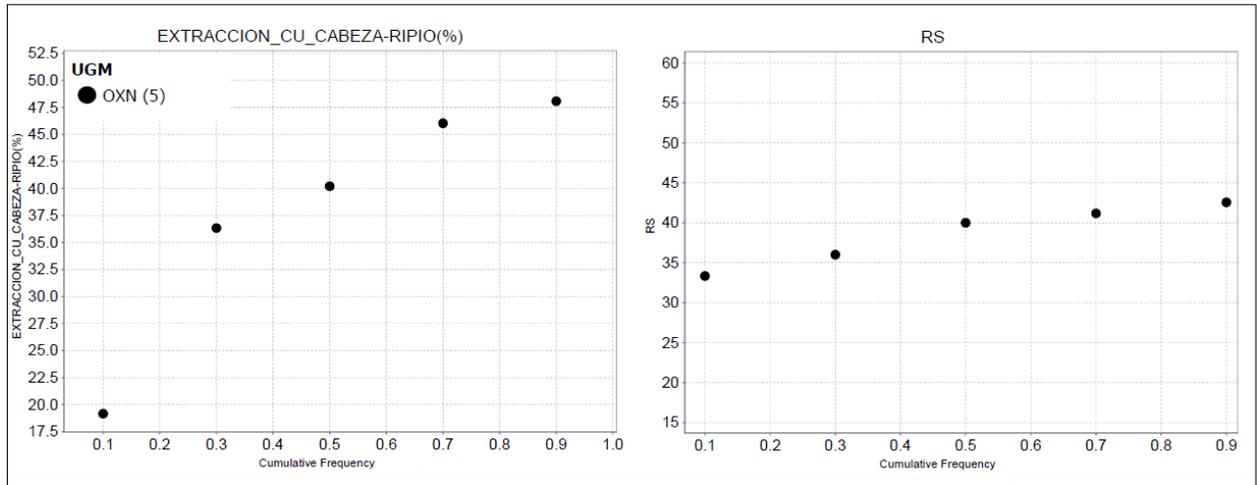


Figura 8.6: Gráficos de frecuencia acumulada de Extracción de Cu y Razón de solubilidad (RS) de la UGM OXN

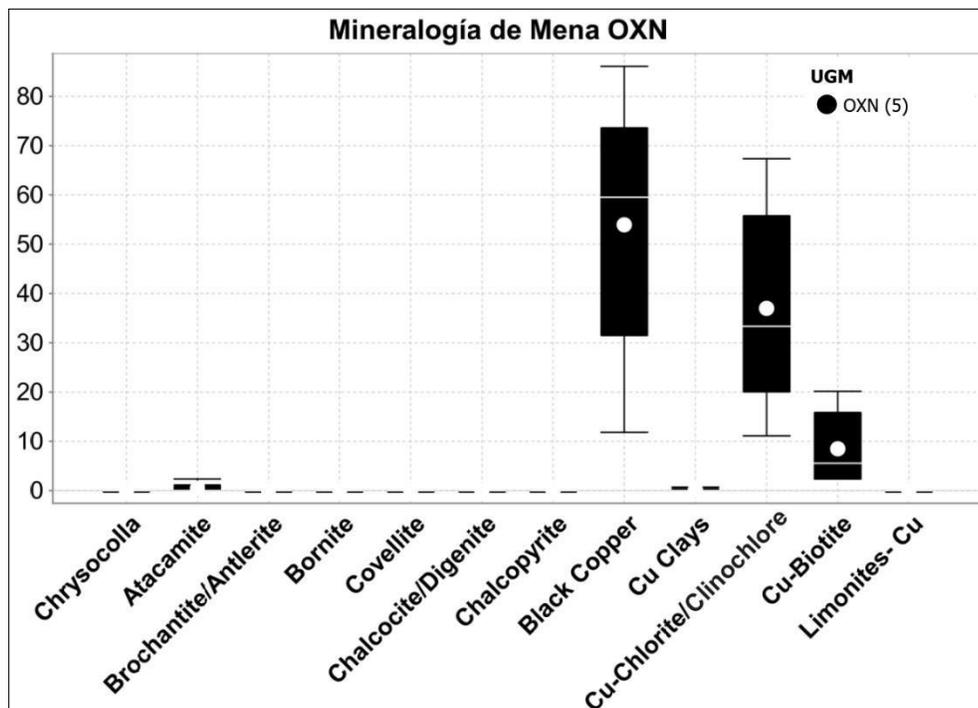


Figura 8.7: Mineralogía de mena de la unidad OXN en porcentajes relativos.

8.2.4. ÓXIDOS NEGROS FILOSILICATOS (OXN-PHY)

En la Figura 8.8 se puede observar la diferencia entre la extracción y la solubilidad de esta unidad, se evidencia en que la extracción es aproximadamente 12 puntos porcentuales mayor que la solubilidad con promedios que llegan a 53,02% y 41,34% respectivamente (Tabla 8.5), esto se debe al contenido de biotitas con cobre, que como se vio en el Capítulo 7, la biotita responde

rápidamente al ataque ácido, de esta forma las biotitas con Cu se solubilizan liberando más rápido el cobre que otros minerales como los óxidos negros (copper wad/pitch).

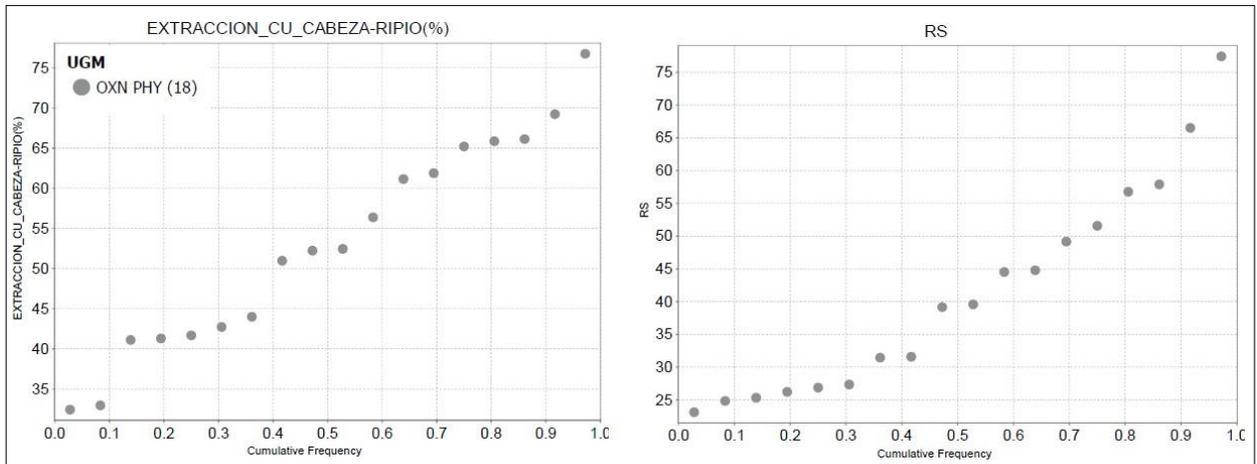


Figura 8.8: Gráficos de frecuencia acumulada de Extracción de Cu y Razón de solubilidad (RS) de la UGM OXN-PHY.

Esta unidad se separa de la unidad OXN por el contenido de biotitas con Cu y de óxidos negros *sensu stricto*, evidenciado en la Figura 8.9, donde se observa que la mayoría de las muestras tienen un contenido de biotitas con Cu en porcentaje relativo por sobre el 60%, mientras que los contenidos de óxidos negros (copper wad/pitch) son prácticamente nulos. La segunda mena

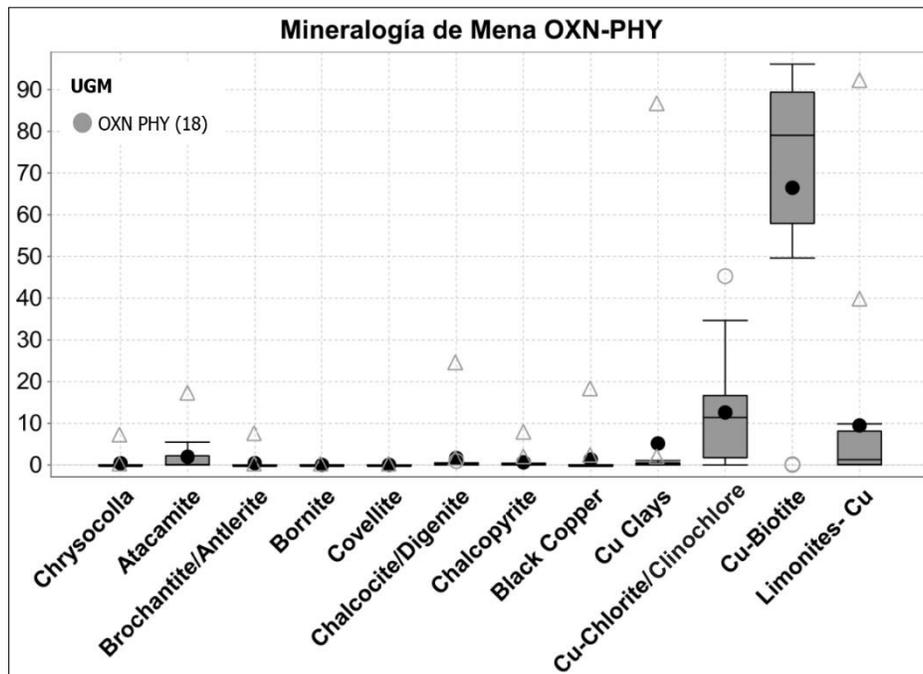


Figura 8.9: Mineralogía de mena de la unidad OXN-PHY en porcentajes relativos.

principal de esta unidad corresponde a las cloritas con Cu, que muestran un promedio aproximado de un 10%, las limonitas y arcillas con cobre se encuentran en porcentajes menores y la atacamita aparece en algunas muestras en concentraciones mínimas.

Tabla 8.5: Resumen estadístico de la unidad OXN-PHY.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
Extracción de Cu (%)	32,43	76,75	53,02	52,34
RS (%)	23,12	77,44	41,34	39,37

8.2.5. SULFUROS SECUNDARIOS-MIXTOS (SEC-MX)

La unidad de SEC-MX contiene en su mayoría muestras de sulfuros secundarios y en menor medida mixtos que son evidenciados por las altas razones de solubilidad que responden al contenido de atacamita y brochantita/antlerita presente. Esta unidad muestra una gran diferencia entre la razón de solubilidad y la extracción de cobre (Figura 8.10), con bajos valores de solubilidad debido al alto contenido de sulfuros secundarios y primarios, mostrando un promedio de RS 18,73%. Por el contrario, la extracción de cobre tiene alta variación, con valores que van desde 10,67% a 96,49%, y un promedio de 58,23% (Tabla 8.6), esta variación se debe a que las columnas son tratadas con CuproChlor®, lo que potencia la extracción llegando a valores muy altos.

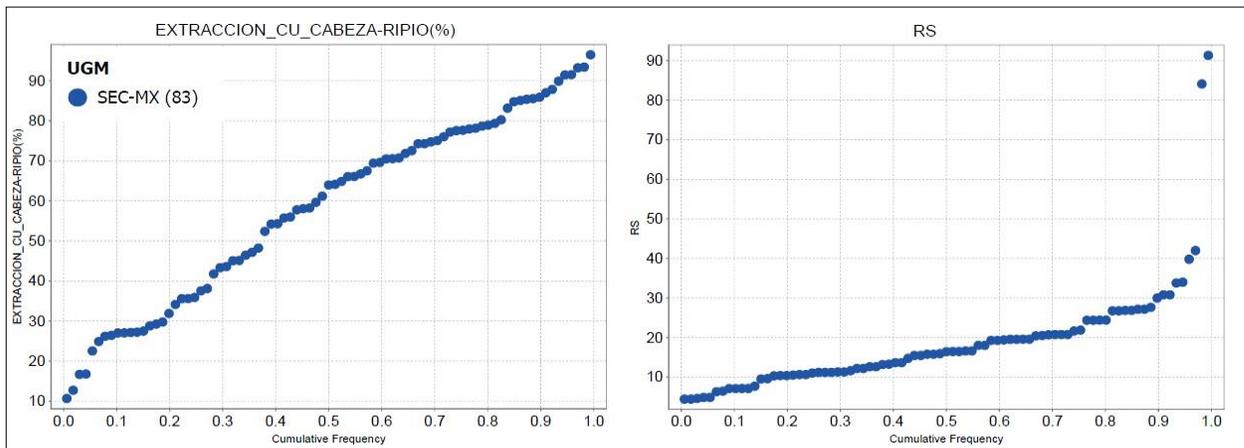


Figura 8.10: Gráficos de frecuencia acumulada de Extracción de Cu y Razón de solubilidad (RS) de la UGM SEC-MX.

Tabla 8.6: Resumen estadístico de la unidad SEC-MX.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
Extracción de Cu (%)	10,67	96,49	58,23	63,98
RS (%)	4,44	91,29	18,73	16,42

La mineralogía de mena en esta unidad está restringida a tres minerales principales con porcentajes muy menores de las demás menas. Como se observa en la Figura 8.11 la mineralogía principal es la calcosina junto a la calcopirita con la mayoría de las muestras sobre el 20% hasta 70-80% en porcentaje relativo, en tanto la covelina representa otra mineralogía de mena, pero con los porcentajes bajo el 20% aproximadamente.

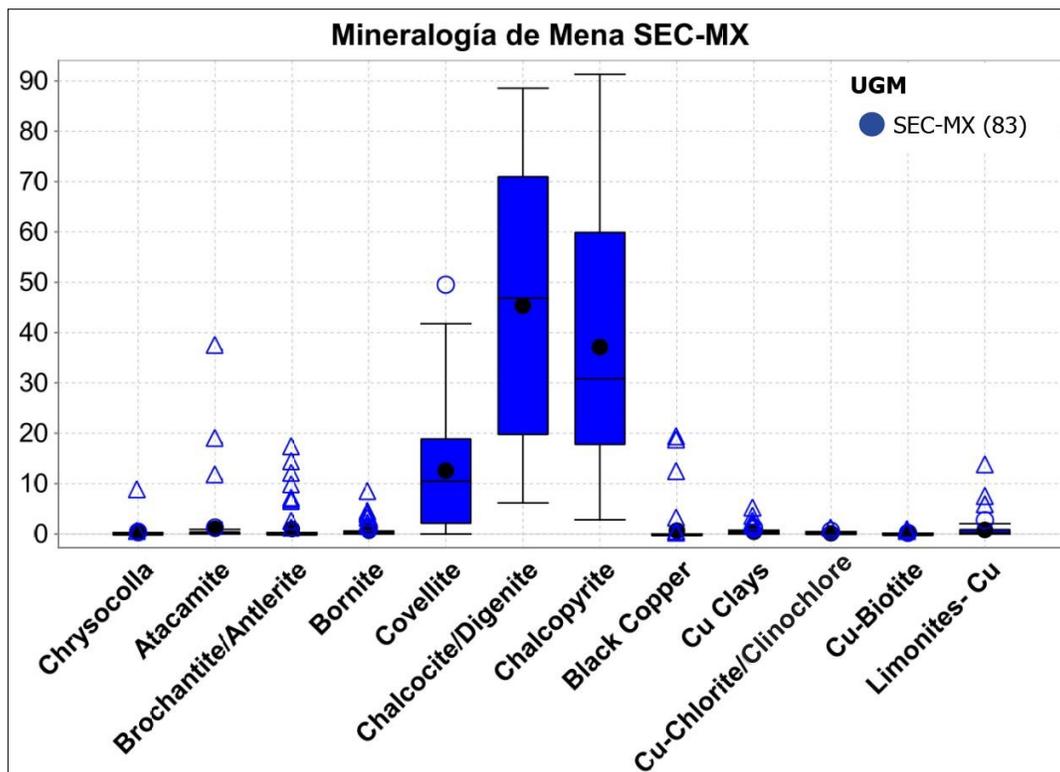


Figura 8.11: Mineralogía de mena de la unidad SEC-MX en porcentajes relativos.

En la Figura 8.12 se observan gráficos de extracción de cobre versus la mineralogía de mena, donde se evidencia que mientras mayor es la concentración de calcosina, la extracción aumenta considerablemente, por el contrario, a medida que aumenta la concentración de calcopirita la extracción se ve disminuida debido a que es un mineral refractario. La covelina muestra que a mayor concentración menor es la extracción, aunque no muestra una tendencia tan clara como la calcosina y la calcopirita. Esto explica la gran variación en los valores de extracción de esta unidad, además de las condiciones especiales para minerales sulfurados.

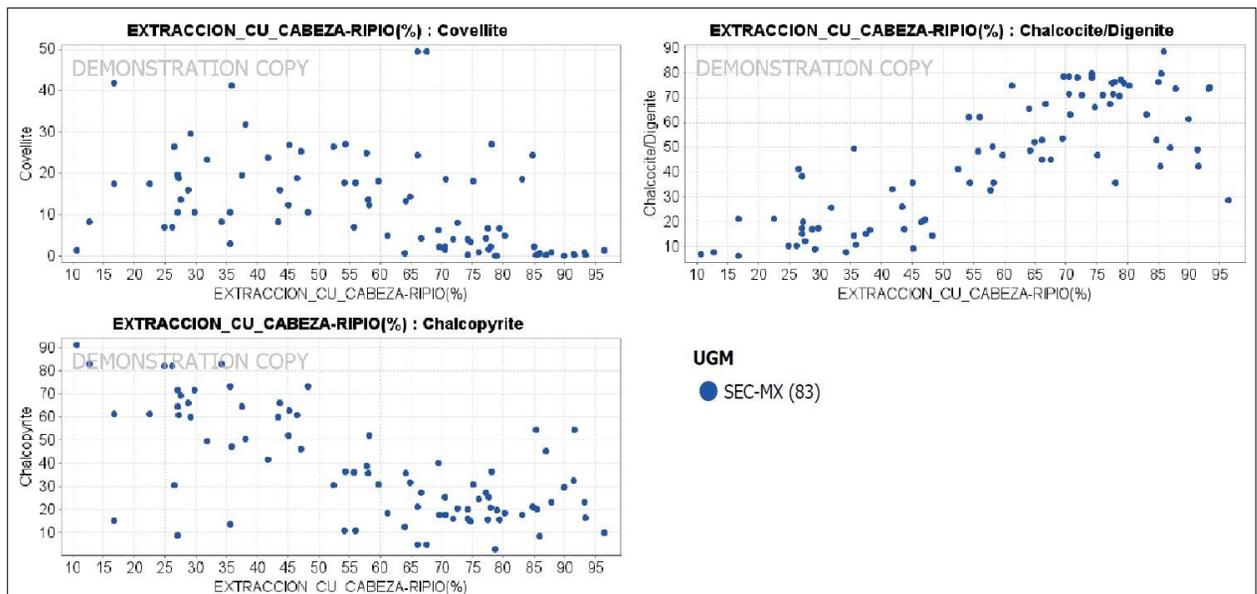


Figura 8.12: Extracción de cobre versus mineralogía de mena de la unidad SEC-MX.

8.2.6. SULFUROS PRIMARIOS (PRI)

La unidad PRI se diferencia de las demás por tener las razones de solubilidad y extracción más bajas por la mineralogía principal la calcopirita. En la Figura 8.13 se observa que las solubilidades están por debajo del 8%, y las extracciones alcanzan un máximo de 30% y un promedio de 19,13%. En la Tabla 8.7 se muestra el resumen estadístico de estos parámetros evidenciando las bajas extracciones y RS.

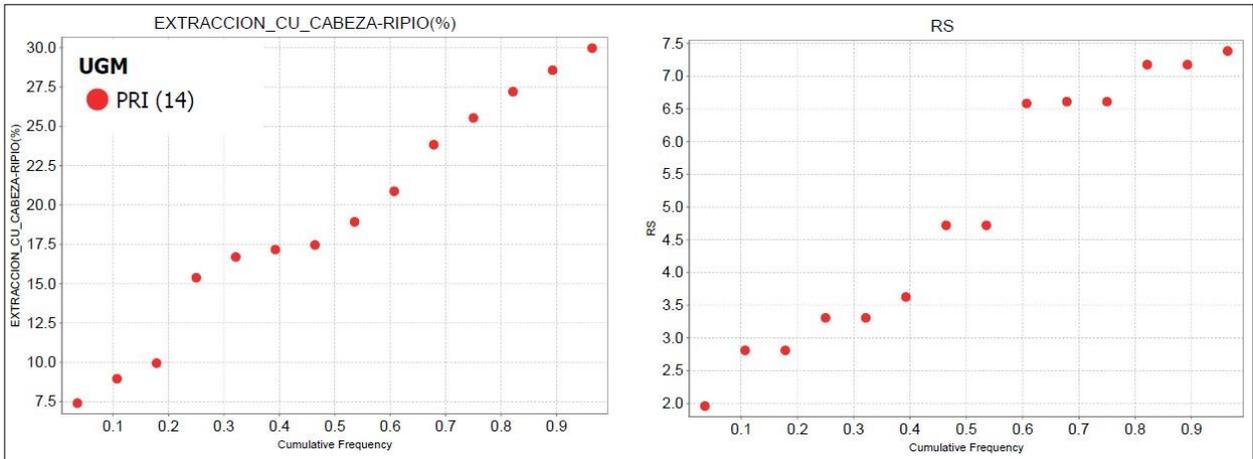


Figura 8.13: Gráficos de frecuencia acumulada de Extracción de Cu y Razón de solubilidad (RS) de la UGM PRI.

Tabla 8.7: Resumen estadístico de la unidad PRI.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
Extracción de Cu (%)	7,39	29,96	19,13	18,18
RS (%)	1,95	7,38	4,91	4,72

La mineralogía de mena de esta unidad está definida prácticamente solo por calcopirita (Figura 8.14), donde la mayoría de las muestras tienen un porcentaje superior a un 80% en porcentajes relativos. Los sulfuros como la covelina y calcosina también están presentes, pero en porcentajes menores al 10% y trazas de bornita.

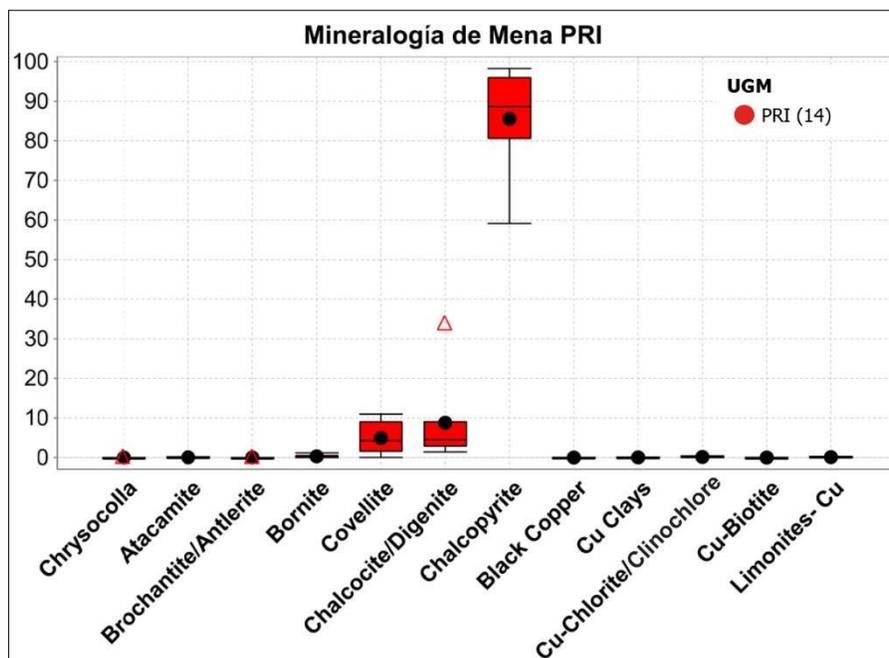


Figura 8.14: Mineralogía de mena de la unidad PRI en porcentajes relativos.

8.2.7. CONSUMO DE ÁCIDO POR UGM DE EXTRACCIÓN

La Figura 8.15 muestra el consumo de ácido por UGM de extracción de cobre, donde se observa que las unidades con mayor CAN son: OXN, PRI y OXN-PHY con promedios de 19,38 *kg/t*, 14,34 *kg/t* y 12,14 *kg/t* respectivamente (Tabla 8.8), esto debido a que la mayoría de sus muestras se encuentran asociadas a la Unidad 2 SC de consumo de ácido. Destaca la UGM de OXN con un gran consumo, esto porque es la unidad que tiene mayores concentraciones de filosilicatos biotita y clorita que como se analizó en el Capítulo 7, son minerales que tienen gran importancia en el consumo de ácido. Por otro lado, las unidades que menos consumen son las de óxidos verdes: OXV-BR con promedio de 4,00 *kg/t* y OXV-AT con 7,80 *kg/t* en promedio, y se encuentran mayormente asociadas a la Unidad 1 QS de menor consumo de ácido.

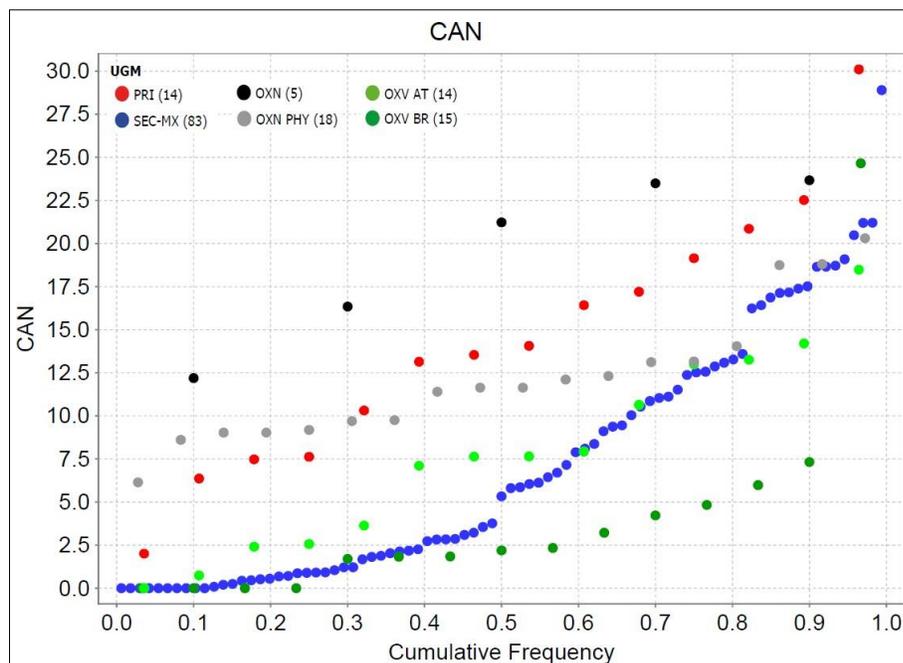


Figura 8.15: CAN por UGM de extracción de cobre.

Tabla 8.8. Resumen estadístico del CAN por UGM de extracción en *kg/t*.

UGM	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
OXV BR	0,00	24,65	4,00	2,19
OXV AT	0,00	18,48	7,80	7,64
OXN	12,18	23,66	19,38	21,22
OXN PHY	6,14	20,30	12,14	11,63
SEC-MX	0,00	28,89	7,13	5,32
PRI	2,00	30,10	14,34	13,80

8.3. DIFERENCIAS ENTRE POLO SUR Y SHEREZADE

A partir de las unidades geometalúrgicas de extracción de cobre definidas anteriormente, se realiza una comparación entre los depósitos Polo Sur y Sherezade para observar si existen diferencias mineralógicas que tengan implicancia en la razón de solubilidad y en la extracción. La UGM de OXN solo fue definida en muestras del depósito Polo Sur, por lo tanto, no se puede hacer una comparación entre depósitos. En tanto, la UGM PRI posee una muestra en Sherezade por lo que tampoco se puede hacer una comparación. Es importante destacar que el proyecto está enfocado en las zonas oxidadas, por lo tanto, hay un énfasis especial en esas zonas de los depósitos.

8.3.1. ÓXIDOS VERDES-BROCHANTITA (OXV-BR)

La extracción de cobre para la UGM de OXV-BR es muy similar entre los depósitos (Figura 8.16) al igual que la razón de solubilidad, aunque hay algunas muestras que tienen RS cercanas al 80% mientras que la mayoría de ellas están por sobre el 90%. La Figura 8.17 muestra las diferencias mineralógicas y se observa que son muy similares, pero el depósito de Sherezade tiene un porcentaje levemente mayores de calcopirita y atacamita, mientras que en el depósito Polo Sur aparecen cantidades menores de crisocola.

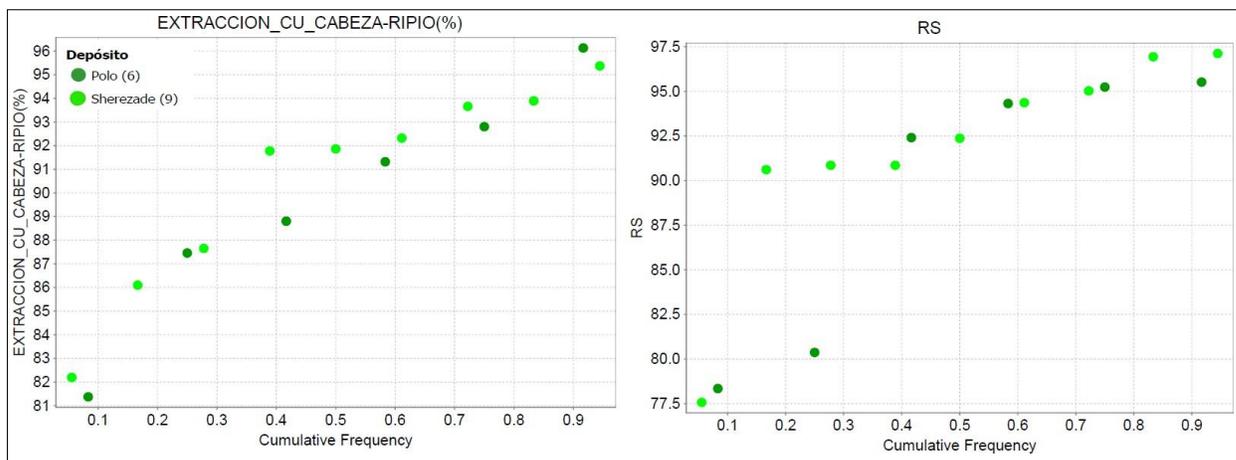


Figura 8.16: Extracción de Cu y RS para los depósitos Polo Sur y Sherezade en la UGM OXV-BR.

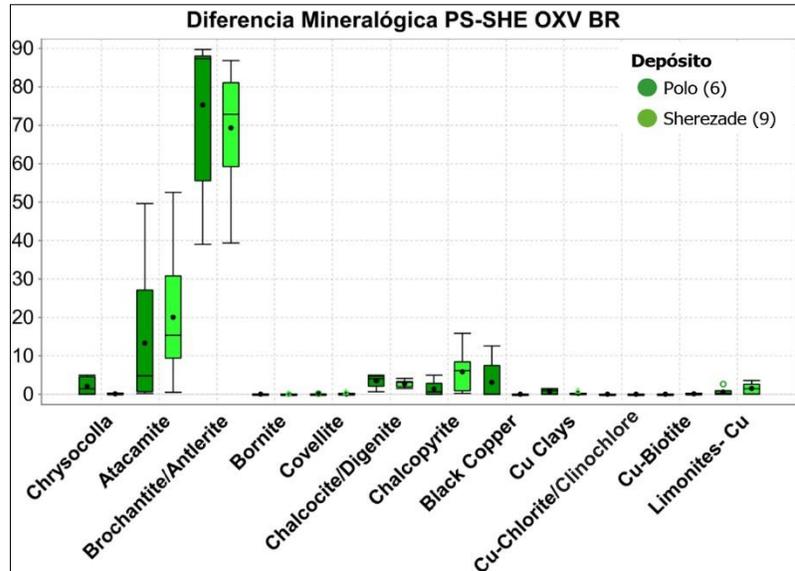


Figura 8.17: Diferencia mineralógica en porcentaje relativo de los depósitos Polo Sur y Sherezade, para UGM OXV-BR.

8.3.2. ÓXIDOS VERDES-ATACAMITA (OXV-AT)

En los gráficos de frecuencia acumulada (Figura 8.18) se puede observar que ambos depósitos tienen extracciones de cobre muy similares, mientras que la razón de solubilidad varía un poco siendo mayor en el depósito Polo Sur, esta variación se debe a la mineralogía presente principalmente a la concentración de calcosina que se encuentra en mayor porcentaje en el depósito Sherezade (Figura 8.19) y hace que baje la razón de solubilidad de la asociación mineralógica. El depósito Sherezade

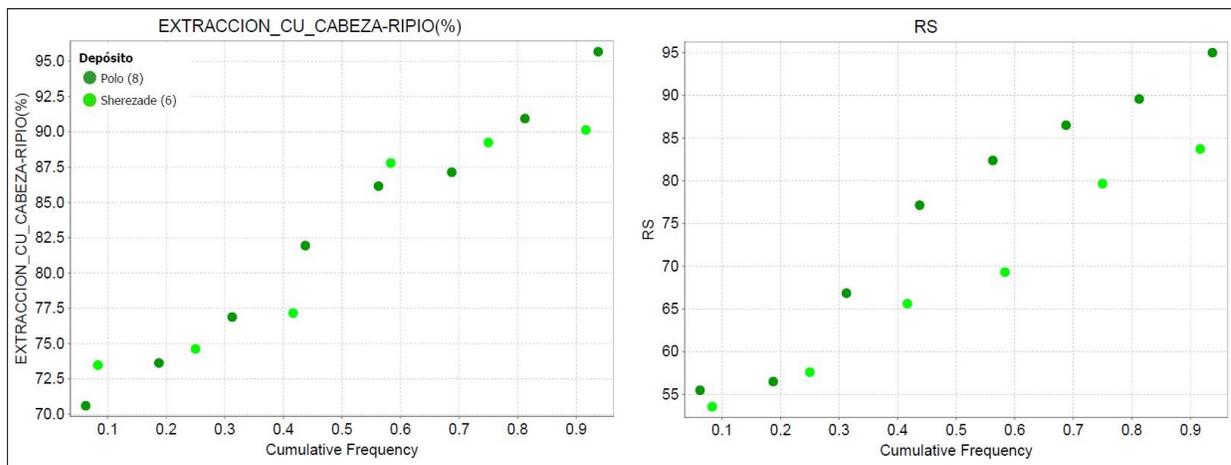


Figura 8.18: Extracción de Cu y RS para los depósitos Polo Sur y Sherezade en la UGM OXV-AT.

posee mayores concentraciones de brochantita/antlerita y menores de atacamita, la crisocola en esta UGM posee porcentajes similares.

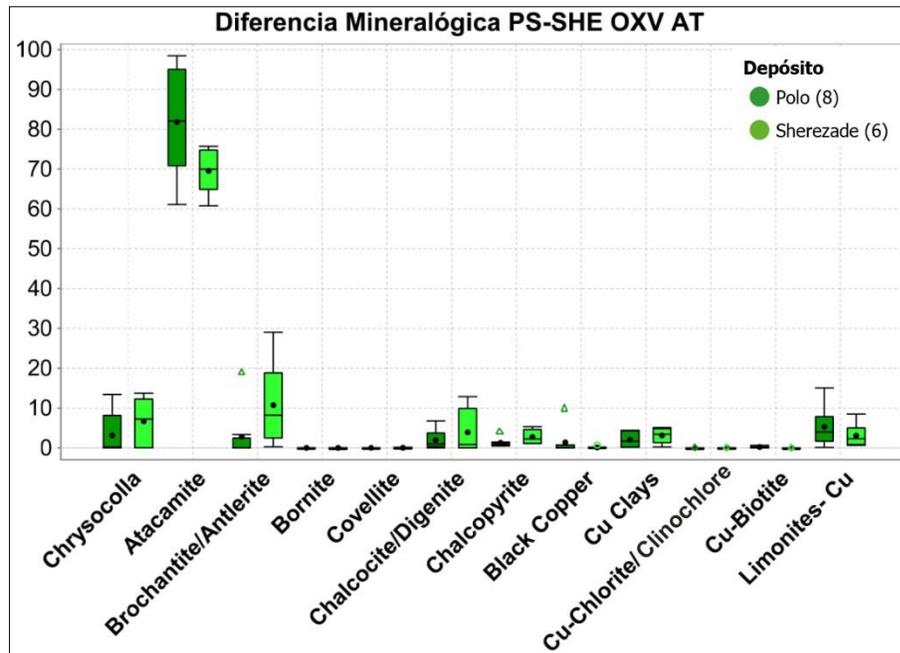


Figura 8.19: Diferencia mineralógica en porcentaje relativo de los depósitos Polo Sur y Sherezade, para UGM OXV-AT.

8.3.3. ÓXIDOS NEGROS FILOSILICATOS (OXN-PHY)

La mayoría de las muestras de esta UGM se encuentran en el depósito Polo Sur, sin embargo, las muestras que están en el depósito Sherezade muestran resultados similares en extracción de cobre (Figura 8.20), pero la razón de solubilidad sube en el depósito Sherezade, esto se debe a la mineralogía presente en esas muestras que contienen porcentajes de atacamita (Figura 8.21). Además, el depósito Polo Sur tiene mayores porcentajes relativos de cloritas con cobre y limonitas con cobre, mientras que en el depósito Sherezade muestra mayores concentraciones de biotitas con cobre y los porcentajes de atacamita previamente mencionados.

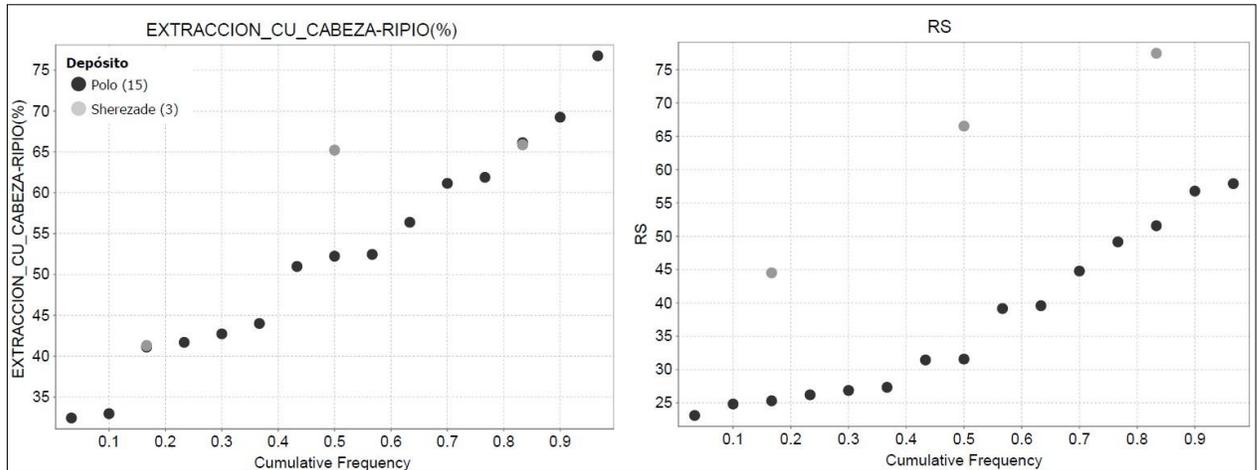


Figura 8.20: Extracción de Cu y RS para los depósitos Polo Sur y Sherezade en la UGM OXN-PHY.

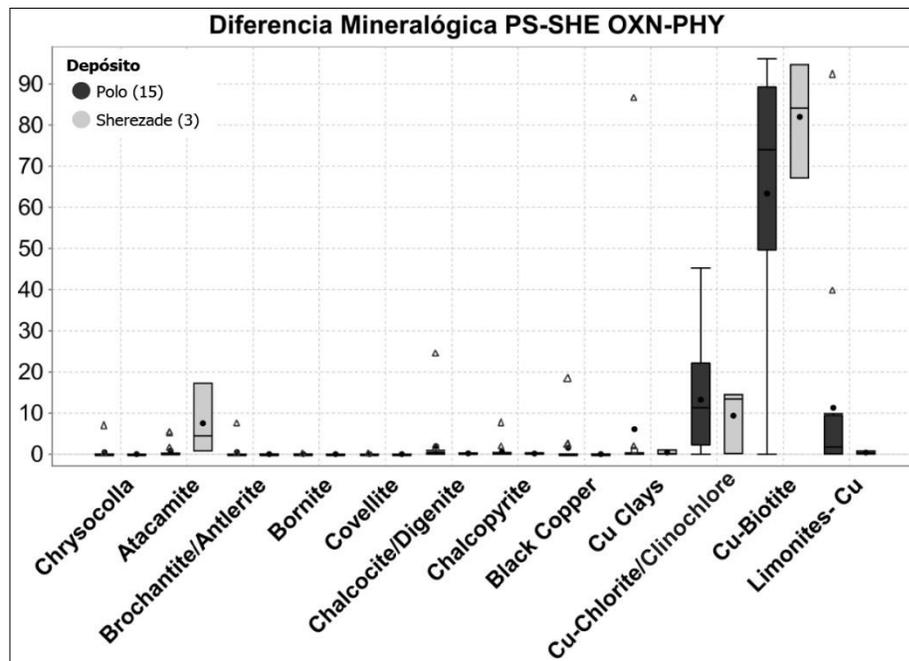


Figura 8.21: Diferencia mineralógica en porcentaje relativo de los depósitos Polo Sur y Sherezade, para UGM OXN-PHY.

8.3.4. SULFUROS SECUNDARIOS Y MIXTOS (SEC-MX)

La UGM de sulfuros secundarios y mixtos muestra las mayores variaciones entre los depósitos. Por una parte, la extracción de cobre en el depósito Sherezade es en promedio casi 30 puntos porcentuales mayor que en el depósito Polo Sur, mientras que la razón de solubilidad muestra la misma tendencia en casi 15 puntos porcentuales (Figura 8.22). Esto se debe principalmente a la

variación mineralógica que existe entre un depósito y otro, el depósito Polo Sur se caracteriza por poseer concentraciones similares de calcopirita y calcosina, mientras que el depósito Sherezade tiene como mineralogía principal la calcosina que es más soluble que la calcopirita que se encuentra en menores proporciones, además la covelina está más restringida en este depósito (Figura 8.23).

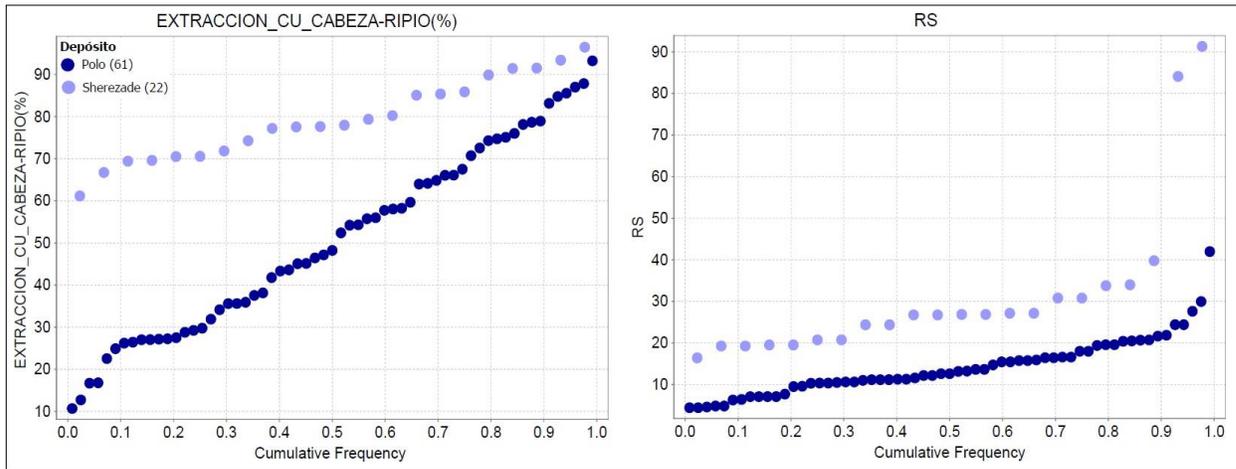


Figura 8.22: Extracción de Cu y RS para los depósitos Polo Sur y Sherezade en la UGM SEC-MX.

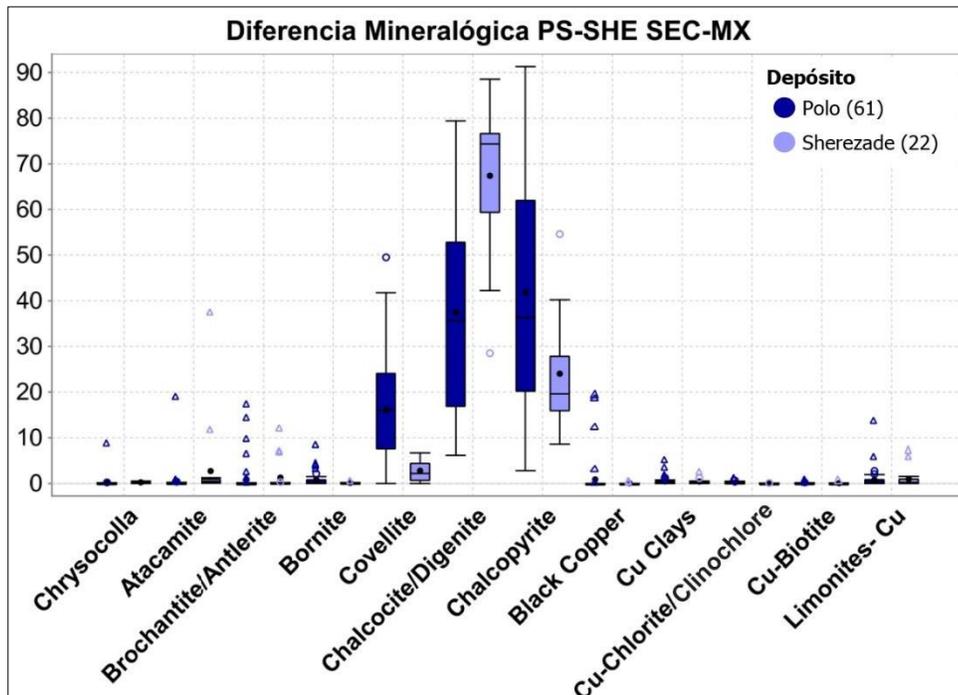


Figura 8.23: Diferencia mineralógica en porcentaje relativo de los depósitos Polo Sur y Sherezade, para UGM SEC-MX.

8.4. MODELAMIENTO DE UGM DE EXTRACCIÓN

El modelamiento de las unidades de extracción de cobre se realiza de la misma forma que las unidades de consumo, con el software *Leapfrog* 2021.2.5. Se toma el modelo geológico del proyecto: “Modelo_Geológico_FS_PoloSurSherezade_20220401”, y se trabaja específicamente con los volúmenes de las zonas minerales para la construcción de los cuerpos de las unidades de extracción.

Se importa la base de datos de columnas con mineralogía QEMSCAN con la que se definieron las unidades, para una revisión de la distribución espacial. Se crean modelos geológicos con la herramienta “*New Geological Model*” tomando como límites los volúmenes de las zonas minerales:

- ZMIN_TRABAJO: EST
- ZMIN_TRABAJO: LX
- ZMIN_TRABAJO: LXP
- ZMIN_TRABAJO: OXN
- ZMIN_TRABAJO: OXN_she
- ZMIN_TRABAJO: OXV
- ZMIN_TRABAJO: OXV_she
- ZMIN_TRABAJO: SEC
- ZMIN_TRABAJO: SEC_she
- ZMIN_TRABAJO: MX
- ZMIN_TRABAJO: MX_she
- ZMIN_TRABAJO: PRI

Como se vio anteriormente la zona de OXV fue dividida en dos UGM de extracción, al igual que la zona de OXN. Por otra parte, la zona de SEC y MX quedaron en una sola unidad, pero por la baja cantidad de muestras de la zona MX aparecen como zonas separadas. La zona PRI se divide en zonas según el contenido de calcopirita y pirita en zona CPY, CPYPY, PYCPY y PY, sin embargo, por la cantidad de muestras y debido a que el proyecto se enfoca en óxidos estas zonas

se agrupan en el sólido del PRI. Las zonas LX y LXP (lixiviado y lixiviado parcial, respectivamente) se integran para que ver la distribución espacial de las unidades definidas y darle consistencia al modelo.

Para generar los cuerpos que dividen las zonas de OXV y OXN, se trazan superficies de contacto que separan estas unidades mediante la herramienta *Surface Chronology*, y se selecciona el contacto “*New Intrusion*” que es el tipo de contacto más representativo para la forma de los cuerpos en este caso.

8.4.1. DIVISIÓN ENTRE LAS UNIDADES OXV-BR Y OXV-AT

La unidad de OXV-BR y OXV-AT se separa por una superficie de contacto generada a partir de la agrupación de las muestras que definen a cada unidad, formando un contacto en el cuerpo de la zona mineral OXV en ambos depósitos, lo que genera los cuerpos de estas unidades. En la Figura 8.24 se pueden observar los cuerpos generados, en el depósito Polo Sur la unidad OXV-AT abarcan

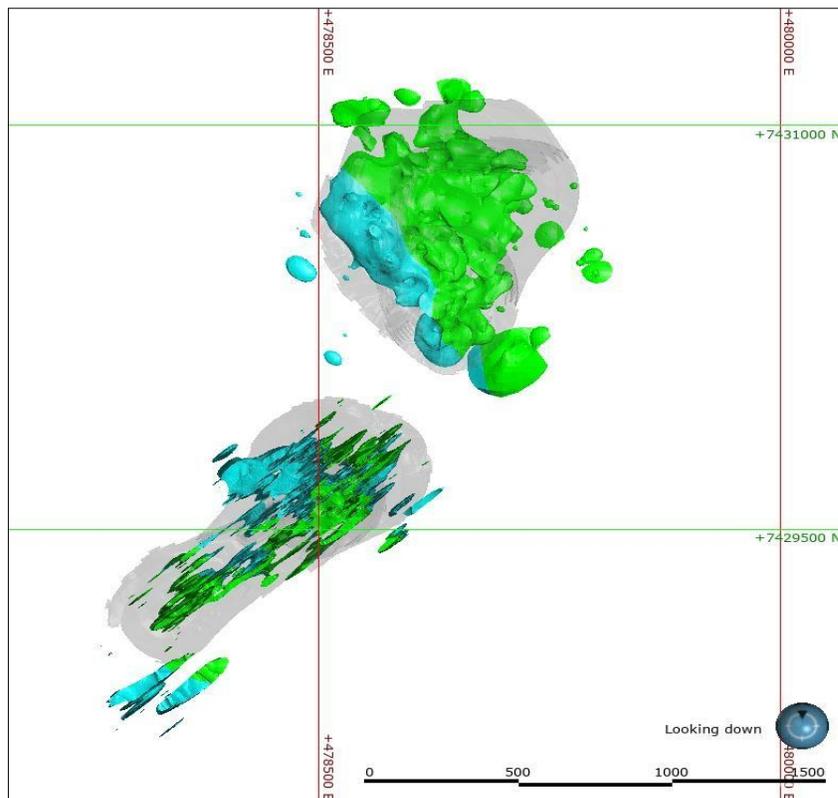


Figura 8.24. Modelo de UGM de OXV-BR y OXV-AT. Depósito Polo Sur sector NE y depósito Sherezade hacia SW.

gran parte del *pit* y está ubicada en el sector NE y la unidad de OXV-BR restringido a un cuerpo al SW del *pit* con una orientación NW-SE. Mientras que en Sherezade, ambas unidades están en proporciones similares, donde la unidad de OXV-AT se ubica en el sector SE y la unidad de OXV-BR hacia el sector NW del *pit*.

8.4.2. DIVISIÓN ENTRE LAS UNIDADES OXN Y OXN-PHY

Para las unidades de OXN y OXN-PHY se toma el volumen de la zona mineral de OXN en del depósito Polo Sur para generar una superficie de contacto con las muestras asignadas para cada unidad. En la Figura 8.25 se observa esta separación donde la unidad de OXN está restringida al depósito Polo Sur y se encuentra en el sector norte del *pit* y la unidad OXN-PHY está en el sector SE y gran parte del volumen se encuentra fuera del *pit* del proyecto. En el depósito Sherezade el cuerpo de la unidad OXN-PHY se ubica hacia el SE del *pit* y tiene un marcado control estructural asociado a la tendencia de fallas NE.

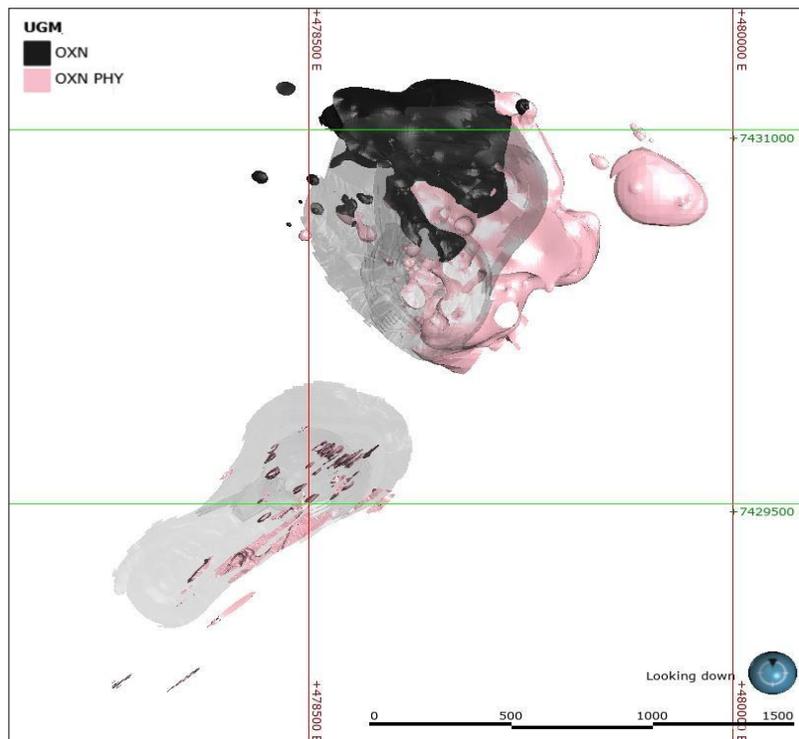


Figura 8.25. Modelo de UGM de OXN y OXN-PHY. Depósito Polo Sur sector NE y depósito Sherezade hacia SW.

8.4.3. MODELO COMPLETO

El modelo completo incluye los sólidos de las divisiones anteriores: las UGM de OXV-BR, OXV-AT, OXN y OXN-PHY, además de las UGM SEC-MX (que aparecen de forma separada), PRI, las zonas minerales LX y LXP, y las gravas que cubren parte de los depósitos.

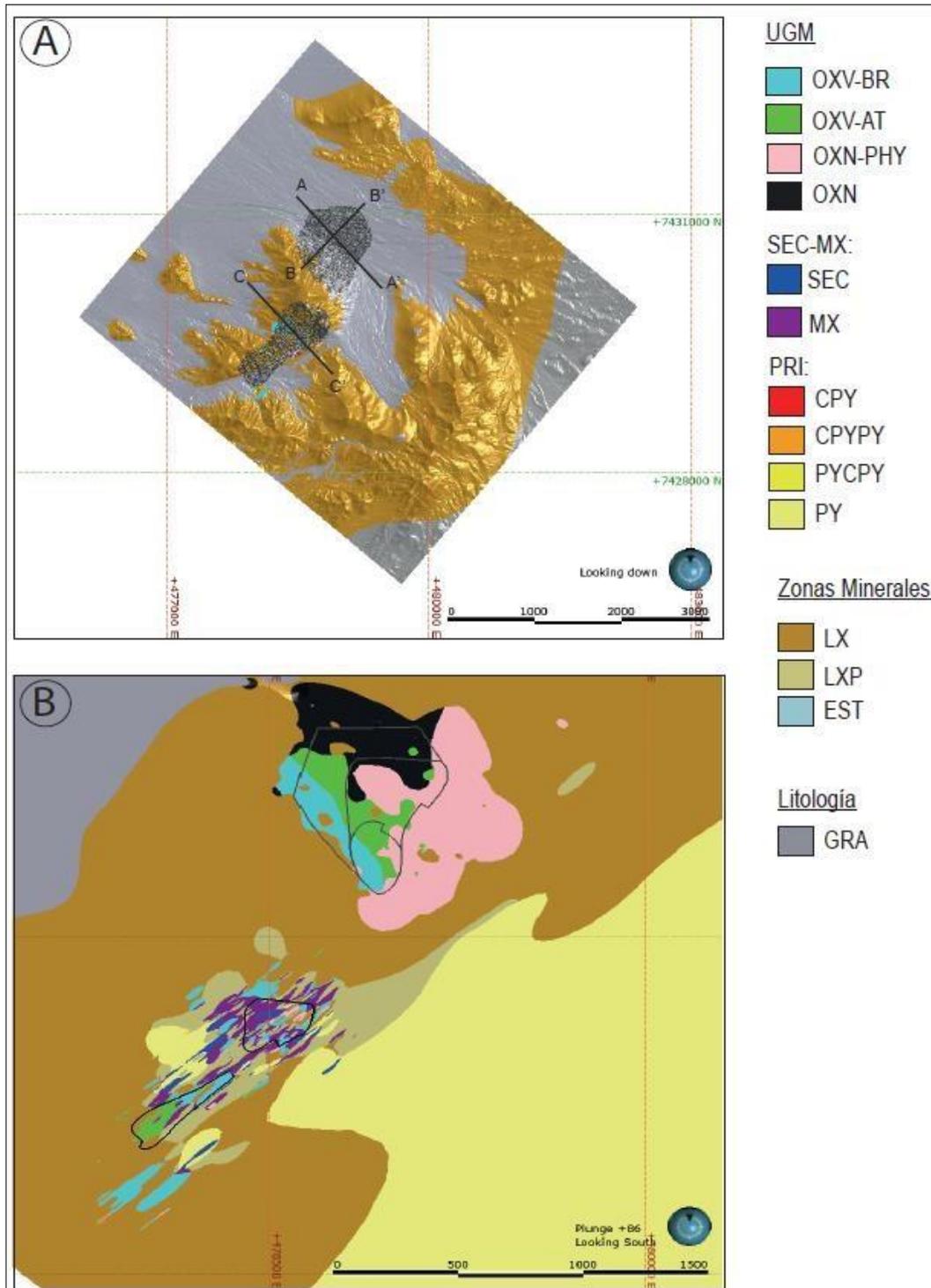
La Figura 8.26.A muestra las plantas del modelo en superficie donde se puede observar que el depósito Polo Sur se encuentra cubierto por una capa de gravas que en algunos sectores llega a un espesor de hasta 90 m, hacia el SW se encuentra el depósito Sherezade que está más descubierto mostrando en superficie parte de la zona mineral LX y las UGMs de OXV-BR, OXV-AT y OXN-PHY, ya que este depósito tiene un *pit* antiguo anteriormente explotado.

En la Figura 8.26 B se observa una planta del modelo a la cota 2150, donde se puede ver de mejor forma la distribución de las UGMs, en el depósito Polo Sur aparecen las UGMs oxidadas, hacia el norte la unidad de OXN, en el sector SE la de OXN-PHY, mientras que hacia el centro y al W predominan las unidades relacionadas a OXV (OXV-BR y OXV-AT); en el depósito Sherezade se observan las unidades de OXV-AT y OXV-BR, pero también la unidad de SEC-MX, con el marcado control estructural NE del depósito.

Las secciones de la Figura 8.27 muestran de mejor forma la disposición de las unidades, en la sección A-A' con dirección NW-SE del depósito Polo Sur se evidencia que los cuerpos de las unidades oxidadas (OXV-BR, OXV-AT, OXN, OXN-PHY) se encuentran en horizontes a lo largo del sistema, mientras que la unidad SEC-MIX muestra un control lateral y una clara continuidad estructural de tendencia NE, en cuanto al PRI este tiene una gran extensión espacial con zonas de mayor calcopirita al centro que lateralmente va disminuyendo y aumentando el contenido de pirita. La sección B-B' de dirección SW-NE fue realizado para mostrar la unidad de OXV-BR que se encuentra restringida al sector SW del depósito Polo Sur, en un cuerpo con dirección NW-SE.

El depósito Sherezade está representado por la sección C-C' con dirección NW-SE (Figura 8.27), donde se muestran que las unidades siguen la tendencia estructural NE característica de ese

depósito, que evidencia la marcada distribución vertical por sobre la distribución lateral de los cuerpos.



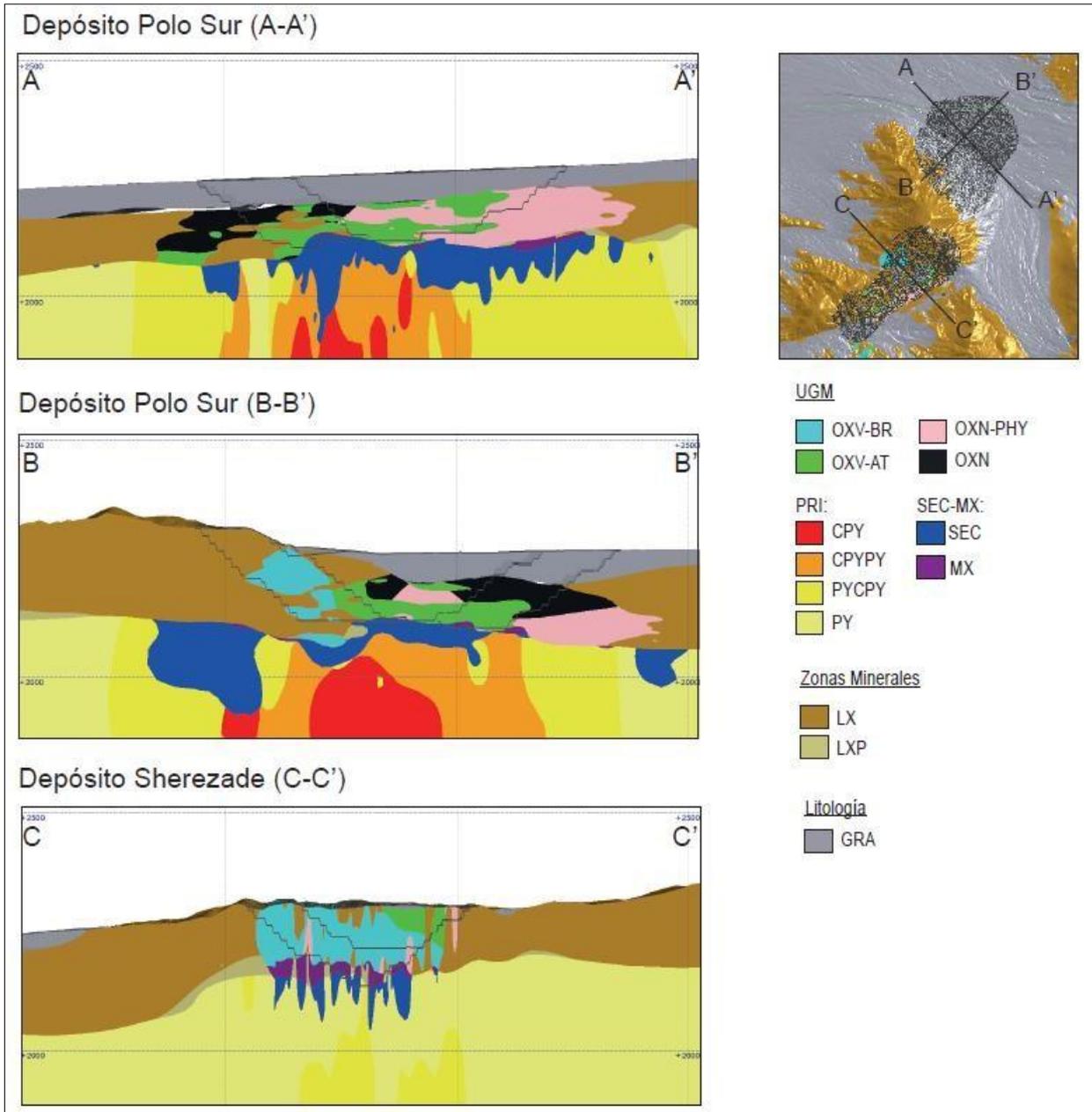


Figura 8.27. Secciones del modelo de UGMs de extracción. Sección A-A' y B-B' depósito Polo Sur con dirección NW-SE y SW-NE respectivamente, sección C-C' depósito Sherezade con dirección SW-NE.

8.5. RELACIÓN ENTRE LITOLOGÍAS Y UGM DE EXTRACCIÓN

La definición de las unidades de extracción se realizó en base a las zonas minerales mostrando comportamientos metalúrgicos particulares, sin embargo, en el depósito Polo Sur también tienen mucha relación con las litologías, muestra que la distribución de estas unidades obedece al emplazamiento del pórfido dacítico marcando la tendencia de agrupaciones minerales en las

litologías cajas. En la sección A-A' de la Figura 8.28 se observa la distribución de las UGMs de extracción y en la sección B-B' las litologías del mismo perfil, de esta forma se evidencia que la unidad de OXV-AT muestra una distribución en el sector más cercano al emplazamiento del pórfido donde se generaron la mayor cantidad de brechas hidrotermales, la unidad de OXN se ubica sobre los OXV-AT también asociado al sector del pórfido, sector donde hay mayor concentración de filosilicatos que lleva a un mayor consumo de ácido y promueve la lixiviación de la clorita que aportan Mg y Fe, permitiendo la formación de copper wad/pitch. Por otro parte, la unidad de OXN-PHY se emplaza hacia el sector donde las ramificaciones del pórfido son menores y se distribuye hacia rocas más básicas, en las dioritas, lo que puede explicar que las soluciones no fueron capaces de formar minerales de cobre, pero la mineralogía presente como biotitas y cloritas pudieron captar el cobre en sus estructuras cristalinas. Y la unidad SEC-MX muestra mayor desarrollo hacia en sector del pórfido dacítico, desarrollo que va disminuyendo hacia las dioritas.

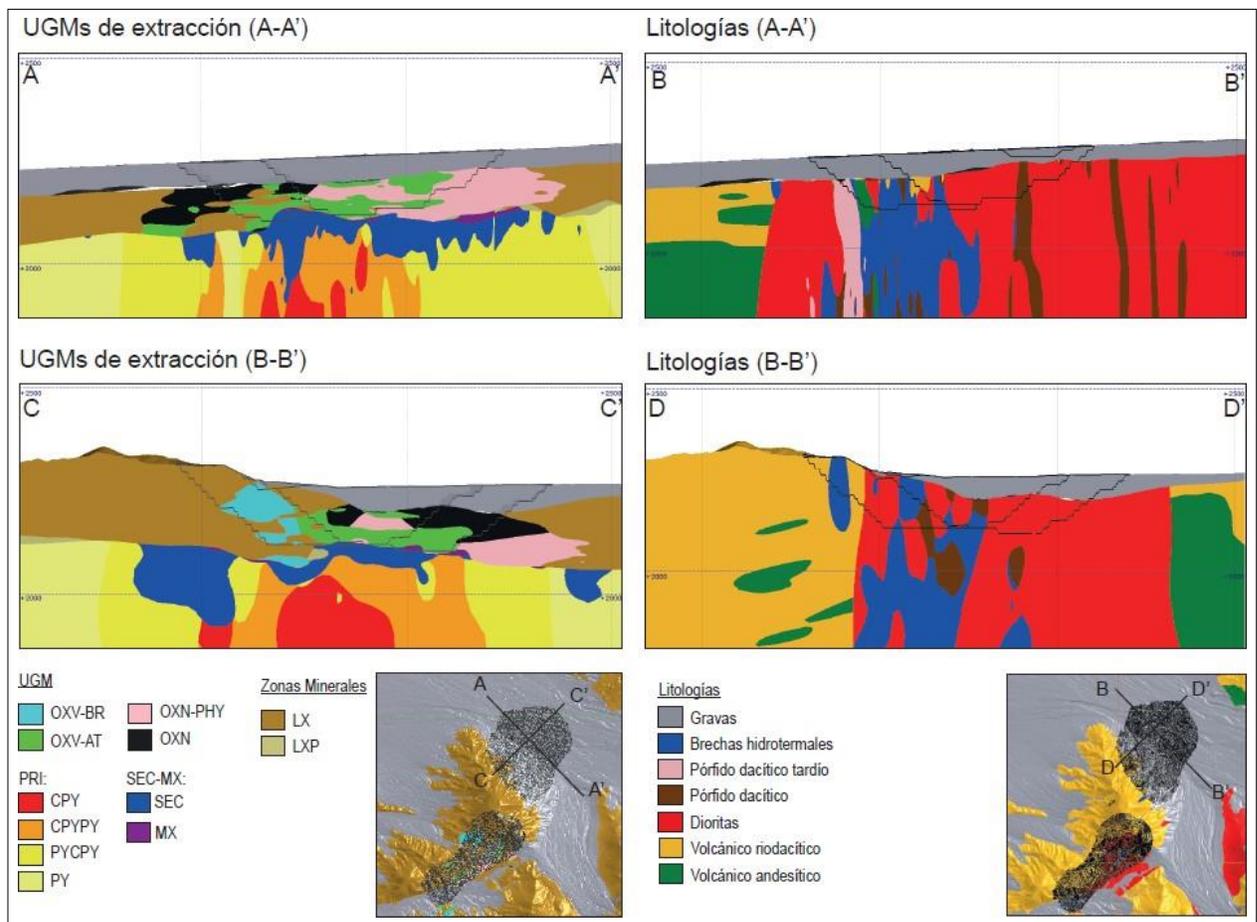


Figura 8.28. Secciones del modelo de UGMs de extracción vs litologías. Secciones A-A' y B-B' depósito Polo Sur con dirección NW-SE, y secciones C-C' y D-D' con dirección SW-NE.

La sección C-C' (Figura 8.28) se realizó para mostrar la distribución de la unidad de OXV-BR que comparándolo con la sección D-D' de las litologías, se puede observar que esta unidad se encuentra sobre rocas más ácidas cercano al contacto entre el emplazamiento del pórfido dacítico y la caja volcánica riódacítica. Mientras que las demás unidades siguen mostrando las mismas tendencias antes descritas.

8.6. VALIDACIÓN DEL USO DE BOTELLAS ISO-PH

La base de datos de las pruebas de botellas tiene asociado mineralogía DRX, análisis que no detecta todas las menas presentes en los depósitos, por lo que solo se usó las columnas con mineralogía QEMSCAN para la definición y para el modelamiento de UGMs de extracción de cobre. Entonces, para validar el uso de botellas las botellas como test para geometalurgia *in situ*, se utiliza el modelo 3D generado de las UGM de extracción. Se importa la base de datos de las botellas Iso pH al modelo 3D para determinar en qué sólido de estas unidades se encuentra cada una de ellas, para realizar el análisis. Se realiza el cruce de la data con los sólidos y se exporta la base de datos con las botellas y su UGM asociada.

En la Figura 8.29 se muestra la comparación de los resultados de las columnas unitarias y de las botellas Iso pH para la extracción de cobre y para la razón de solubilidad para cada una de las UGMs definidas anteriormente. Para la extracción se observa que tanto columnas como botellas tienen los mismos comportamientos, por una parte, están las unidades de OXV-BR y OXV-AT que muestran las mayores extracciones, mientras que las unidades del PRI y OXN tienen las menores extracciones. En los gráficos de RS se observa lo mismo en columnas y botellas, las tendencias indican que las unidades definidas tienen comportamientos similares independiente de la prueba aplicada.

Este análisis valida el uso de las pruebas de botellas Iso pH como un test para geometalurgia *in situ*, debido a que ambos test (tanto botellas como columnas) muestran respuestas metalúrgicas similares que sirven en conjunto para la determinación de unidades geometalúrgicas del proyecto.

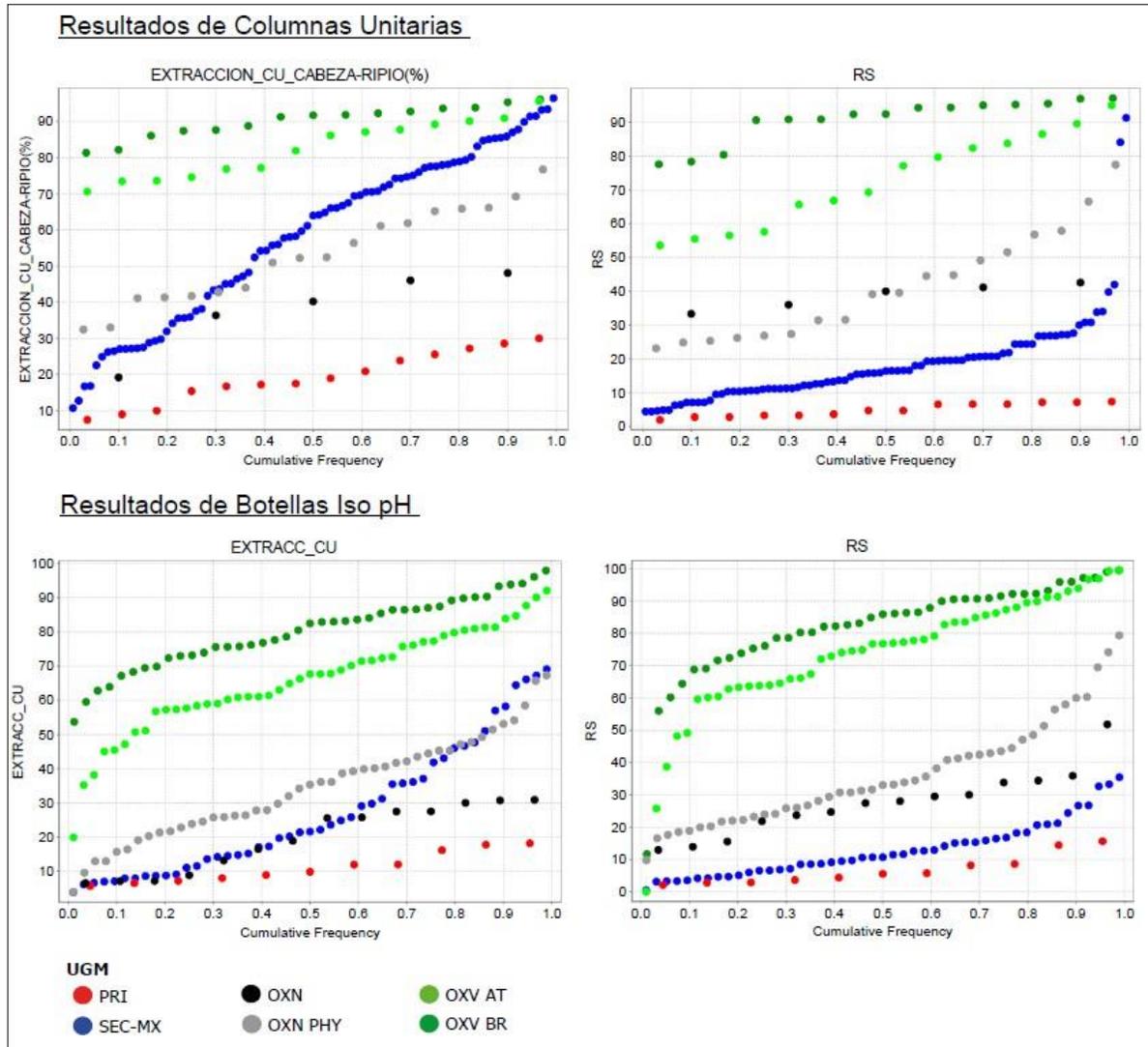


Figura 8.29.: Comparación de resultados de columnas unitarias y botellas Iso pH para UGMs de extracción.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La información disponible de test metalúrgicos y de mineralogía permitió realizar una caracterización de respuestas al consumo de ácido y a la extracción de cobre, para la definición de UGMs con resultados particulares.

Los análisis químicos de QEMSCAN y DRX permiten establecer las asociaciones de mineralogía de ganga que tienen implicancias en el consumo de ácido, sin embargo, para determinar las asociaciones de mena solo se puede utilizar los análisis QEMSCAN debido a que parte de la mineralogía de mena no tiene estructura cristalina definida o fórmula estable, por lo que no se puede usar el método analítico DRX para la definición de unidades de extracción, pues no detecta este tipo de mineralogía.

La caracterización de las unidades de consumo muestra una estrecha relación con las alteraciones hidrotermales que se generan por el emplazamiento de los pórfidos. Por una parte, los minerales críticos de mayor consumo resultaron ser la asociación mineralógica relacionada a la alteración sericita clorita, mientras que los minerales que muestran menor consumo de ácido corresponden a la asociación mineralógica relacionada a la alteración cuarzo sericita. La mineralogía de ganga silicatada sigue la continuidad de la serie de Bowen (Dreier 1998, en Scheffel y otros, 2016), donde la alteración cuarzo sericita va a tener una respuesta menos reactiva al consumo de ácido que la alteración sericita clorita, que tiene minerales más básicos, además se espera que las alteraciones potásicas muestren resultados con mayor consumo de ácido.

Para las unidades de extracción de cobre se analiza las columnas unitarias junto a la mineralogía QEMSCAN, donde las respuestas de extracción muestran relación con las zonas minerales definidas en el modelo geológico. Las zonas de OXN y OXV evidencian asociaciones mineralógicas que responden a diferencias en la extracción y razón de solubilidad, que permiten dividir cada una de las zonas en dos unidades de extracción diferentes. La zona de OXN fue separada en dos unidades: OXN con mineralogía principal de copper wad/pitch con extracción y razón de solubilidad similares, y OXN-PHY donde la mineralogía principal es biotitas y cloritas con cobre, con extracción mayor que razón de solubilidad. Por otra parte, la zona de OXV también

fue dividida en dos unidades: OXV-AT con mena principal atacamita, y muestra una alta extracción mayor que la razón de solubilidad, y la unidad OXV-BR con mineralogía principal la brochantita/antlerita con altas extracciones de cobre similares a la razón de solubilidad. La unidad SEC-MX posee menas de calcosina, calcopirita, covelina y menores de atacamita y brochantita/antlerita, con razones de solubilidad bajas y extracciones muy variables que responden principalmente al contenido de la calcosina y óxidos de cobre. La unidad PRI que tiene como mena principal la calcopirita tiene bajas extracciones de cobre y muy baja razón de solubilidad.

Con modelamiento tridimensional de las unidades es posible observar la distribución y control geológico que tiene cada una de ellas, a pesar de ser un modelo grueso debido a la cantidad de muestras. Por una parte, las unidades de consumo que tienen la relación con las alteraciones hidrotermales, muestran la distribución típica de pórfidos, donde la Unidad 1 QS tiene una distribución superficial y la Unidad 2 SC una distribución en profundidad, y por otra parte las unidades de extracción que se relaciona con las zonas minerales muestran la distribución espacial típica de pórfidos con las unidades oxidadas en sectores superficiales, luego las unidades mixto secundario y en mayor profundidad la unidad primario. Además, con el modelamiento fue posible reconocer relaciones espaciales de las unidades de extracción con las litologías en el depósito Polo Sur, que no era posible divisar analizando solo las bases de datos.

La definición de unidades de consumo de ácido evidencia que tanto las botellas Iso pH como las columnas unitarias muestran los mismos comportamientos en respuesta del consumo con la mineralogía y las alteraciones que fueron analizadas. A pesar de que los test de botellas no pudieron ser utilizados para la definición de las unidades de extracción, al realizar el modelamiento se pudo importar la base de datos para determinar en qué unidades estaba cada botella; de esta forma se pudo analizar el comportamiento de la extracción asociado a las unidades definidas, mostrando que ambos test metalúrgicos tienen las mismas tendencias de extracción y de razón de solubilidad. Con esto se valida el uso de las botellas Iso pH como test para geometalurgia *in situ*.

Para lograr mejorar las unidades de consumo de ácido se recomienda que a través de mediciones NIR se realice modelamientos de la mineralogía que responde fuertemente al consumo que para este proyecto corresponde a: biotita, clorita, plagioclasa en mayores consumos, cuarzo y

muscovita/sericita para menores consumos. En las unidades de extracción se requiere aumentar el análisis QEMSCAN con una misma librería mineralógica (mismo laboratorio de análisis), con énfasis en las nuevas unidades definidas para el proyecto OXV-BR, OXV-AT, OXN y OXN-PHY, para validar las diferencias observadas y darles una continuidad espacial en el modelamiento tridimensional en mayor detalle.

Si bien el trabajo está enfocado en yacimientos particulares, la metodología empleada puede ser utilizada en otro tipo de yacimientos, puesto que analizar la mineralogía en detalle da respuestas específicas tanto para el consumo de ácido como en la extracción de cobre, ayudando a mejorar los modelos geometalúrgicos de los proyectos.

10. REFERENCIAS

- ALFARO, J., GREGO, R., ARAYA, R., OGINO, P. Y OSORIO, J. 2013. Proyecto Polo Sur 2013, Informe Geológico. Informe Interno Antofagasta Minerals, Vicepresidencia de Recursos Mineros, Gerencia de Evaluación de Recursos. 157 pp. Santiago
- AZMAYANDEH, M., AGHAZADEH, V. Y ABDOLLAHI, H. 2017. *Investigation of Affecting Parameters on Heap Leaching Performance and Reducing Acid Consumption of Low Grade Oxide-Sulfide Copper Ore. Metallurgy*, 2(4), 40-45.
- 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 pp.
- COWAN, E.; BEATSON, R.; ROSS, H.; FRIGHT, W.; MCLENNAN, T.; EVANS, T.; CARR, J.; LANE, R.; BRIGHT, D.; GILLMAN, A.; OSHUST, P. Y TITLEY, M. 2003. *Practical implicit geological modelling. In Fifth International Mining Geology Conference. Australian Institute of Mining and Metallurgy*. 17-19. Bendigo.
- DOMIC, E. 2001. Hidrometalurgia fundamentos, procesos y Aplicaciones. 1ª edición. Santiago.
- GEOESTIMA, 2021. Modelo Geometalúrgico y Geotécnico Polo Sur 2020-2021, Informe Interno, Antofagasta Minerals, 110 pp. Santiago
- GUILBERT, J.M., PARK, C.F., 1986. *The Geology of Ore deposits. Freeman and Company*. 985 pp. New York.
- JANSEN, M., Y TAYLOR, A. 2003. *Overview of gangue mineralogy issues in oxide copper heap leaching. In Proceedings of the ALTA Conference, Perth*. 19-24. Australia.
- JENSEN, E., GUTIÉRREZ, P., ANSALDO, Y FUENZALIDA, S. (2014): Servicio de Modelamiento de Fallas en el Proyecto Polo Sur, Informe Interno, Antofagasta Minerals. 46 pp. Santiago.
- JENSEN, E. Y REBOLLEDO, A. 2020. Construcción Modelo Estructural Polo Sur, Informe Interno, Antofagasta Minerals. 62 pp. Santiago.
- LAZCANO, E Y MAMANI, I. 2020. Informe Geológico Polo Sur 2020, Informe Interno, Antofagasta Minerals. 75 pp. Santiago.
- LAZCANO, E Y MAMANI, I. 2022. Informe Geológico Polo Sur 2022, Informe Interno, Antofagasta Minerals. 75 pp. Santiago.

- LAZCANO, E., TAPIA, M. Y GONZÁLEZ, S. 2021. Definición del Proyecto: Geología y Recursos. Informe del Estudio de Prefactibilidad del Proyecto Polo Sur, Informe Interno, Antofagasta Minerals. 129 pp. Santiago.
- MARÍNOVIC, N. Y GARCÍA, M. 1999. Hoja Pampa Unión, Región de Antofagasta. Escala 1:100.000, Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, 9, Santiago.
- MONTAÑO, J. 1976. Estudio Geológico de la Zona de Caracoles y Áreas Vecinas, con Énfasis en el Sistema Jurásico, Provincia de Antofagasta, II Región, Chile. Memoria de Doctorado, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago.
- MPODOZIS, C., CEMBRANO, J. Y MORA, R. 2009. Deformación Compresiva-Oblicua Polifásica y Pórfidos Cupríferos Eocenos en el Sistema de Fallas de Domeyko: la Región de Esperanza-Caracoles (Distrito de Sierra Gorda). XII Congreso Geológico Chileno, Santiago.
- MPODOZIS, C. Y CORNEJO, P. 2012. *Cenozoic Tectonics and porphyry Copper Systems of the Chilean Andes. Society of Economic Geologists, Inc. Special Publications 16*, 329-360 pp.
- MPODOZIS, C. Y CORNEJO, P., 2015. Estado del Conocimiento en el Distrito Minero Centinela, Presentación Interna, Antofagasta Minerals. Santiago.
- MPODOZIS, C. Y CORNEJO, P., 2018. Mapa Geológico Distrital entre Sierra Limón Verde y el Salar de Los Morros. Escala 1:200.000. Documento Interno, Antofagasta Minerals S.A. Santiago.
- PERELLÓ, J. 2002. Geología del Área Polo Sur – Pilar, y Recursos Geológicos de Polo Sur, Informe Interno, Antofagasta Minerals. 46 pp. Santiago.
- PERELLÓ, J., MUHR, R., MORA, R., MARTINEZ, E., BROCKWAY, H., SWANECK, T., ARTAL, J., MPODOZIS, C., MUNCHMEYER, C., CLIFFORD, J., ACUÑA, E., VALENZUELA, D. Y ARGANDOÑA R. 2010. *Wealth Creation through Exploration in a Mature Terrain: The Case History of the Centinela District, Northern Chile Porphyry Copper Belt., Society of Economic Geologists, Inc., Special Publication, 15*, 229-252 pp.
- ROSE, A. W. 1976. *The effect of cuprous chloride complexes in the origin of red-bed copper and related deposits. Economic Geology, 71 (6), 1036-1048 pp.*

- RUBIO, B. 2012. Informe avance pruebas geometalúrgicas exploratorias de lixiviación y flotación Proyecto Polo Sur, Informe Interno, Antofagasta Minerals. 11 pp. Santiago.
- RUIZ, M. 2013. Hidrometalurgia. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica (Inédito): 199 pp. Concepción.
- SCHEFFEL, R. E., GUZMAN, A. Y DREIER, J. E. 2016. *Development metallurgy guidelines for copper heap leach. Minerals & Metallurgical Processing*, 33 (4), 187-199 pp.
- SILLITOE, R. H. (2010): *Porphyry copper systems. Economic Geology*, 105, 3-41 pp.
- VIEIRA, C. Y CEPEDA, A. 1995. Proyecto Polo Sur, Informe de Avance, Reporte Interno Shell. 23 pp. Chile.
- WONG, L. Y MARQUARDT, C. 2012. Geología, Geoquímica y Geofísica del Sector Polo Sur y Sherezade, Informe Interno, Antofagasta Minerals. 82 pp. Santiago.