



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES MINERARALÓGICAS DEL
YACIMIENTO EL SOLDADO PARA IDENTIFICAR PARÁMETROS
GEOMETALÚRGICOS QUE AFECTAN LA RECUPERACIÓN DE COBRE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

IGNACIO ANDRÉS LÓPEZ OLIVARES

PROFESOR GUÍA:

MAURICIO GARRIDO PALMA

PROFESOR CO-GUÍA:

BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

MIEMBRO DE LA COMISIÓN:

PÍA LOIS MORALES

SANTIAGO DE CHILE

2022

CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES MINERARALÓGICAS DEL YACIMIENTO EL SOLDADO PARA IDENTIFICAR PARÁMETROS GEOMETALÚRGICOS QUE AFECTAN LA RECUPERACIÓN DE COBRE

El yacimiento estratoligado El Soldado es un depósito metalífero de cobre ubicado en la cordillera de la costa de la V Región de Valparaíso, y es una propiedad minera perteneciente a Anglo American. Este yacimiento presenta un marcado control estructural y está formado por clusteres mineralizados de mediano y gran tamaño (Boric, R. et al. 2002), los que se hospedan en una intercalación de rocas volcánicas y sedimentarias estratificadas. En estas se presenta gran variabilidad en la distribución de la mineralización y ley de Cu mostrando una compleja respuesta metalúrgica.

La recuperación de cobre como respuesta metalúrgica es un parámetro cuantitativo que depende directa e indirectamente de la geología del yacimiento y es de gran importancia en minería pues determina cuanto cobre se obtiene después de procesar el mineral y con ello las utilidades del negocio minero.

Este trabajo identifica y caracteriza los parámetros geológicos que influyen mayoritariamente en la recuperación de cobre permitiendo definir Unidades de Estimación Geometalúrgicas (UGM). Estas pueden ser usadas para mejorar la estimación de la recuperación de cobre en el modelo de Largo Plazo, y a su vez pueden ser determinadas en terreno a través de la geología y identificación de las texturas/ocurrencias de mineralización en la roca.

Este estudio utilizó información numérica QEMSCAN para representar la mineralogía del yacimiento. Se utilizaron 1460 muestras de recuperación de cobre, 829 muestras con información litológica, 300 muestras de mineralogía modal y asociaciones minerales y 100 muestras con información de análisis de partículas. A partir de éstas, se confeccionaron matrices de correlación lineal entre la recuperación de cobre y las variables de mineralogía modal, asociación mineral y liberación de partículas. A partir de toda la data, mediante análisis estadístico multivariable, se obtuvieron coeficientes de correlación que permitieron seleccionar las variables utilizadas en la regresión lineal multivariable que estima la recuperación en cada UGM.

Los parámetros que controlan la recuperación de cobre en la mina, corresponden a Litología, Liberación de Partículas, Factor K (razón de solubilidad), asociaciones minerales entre mena y ganga, mineralogía de alteración y tamaño de partículas. A partir de estas variables se proponen 7 UGMs asociadas a cada una de las litologías. UGM1: Andesita Lo Prado con núcleos de Bornita y textura diseminada en la masa fundamental, presentando un límite superior de recuperación del 75%. UGM2: Andesita Lo Prado considerando todas sus texturas y zonas minerales, presentando codependencia con Pirita, Clorita, Calcosina Ocluida, Cobre soluble. UGM3: Riodacita Lo Prado dependiente de Calcopirita y Factor K. UGM4: Toba Lo Prado, en codependencia con minerales de alteración como Limonita, Clorita, Rutilo y la asociación de éstos con la mena. UGM5: Sedimentario Lo Prado en todas sus texturas y zonas minerales siendo afectado principalmente por la presencia de Calcopirita y Factor K. UGM6: Veta Negra con dependencia de la presencia de Calcosina y el grado de liberación de partículas. Finalmente UGM7: definida para las zonas de intercalaciones litológicas, considerando la dependencia con Factor K, Liberación Mineral, Bornita, Calcopirita, Limonitas y Arcillas.

Se midió además, la variación del coeficiente de correlación de la variable Factor K y en contraste con el percentil 90 de los datos se determina un nivel de influencia de esta variable en 14.4%, que puede ser incorporado en el modelamiento de las UGM 3, 5 y 7. Asimismo, la variable Liberación Mineral influye de forma directamente proporcional en la recuperación de cobre cuando las partículas de mena liberadas superan el 70%. Finalmente, el uso de las UGM permite mejorar la estimación de la recuperación de cobre en la mina. La UGM 2 exhibe un R2 ajustado de 0.8 y un error bajo el 5%, la UGM 3 exhibe un R2 ajustado de 0.78 y un error bajo el 10% y la UGM 5 un R2 ajustado de 0.73 con un error bajo el 5%.

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 | Formulación del problema..... | 3 |
| 1.2 | Objetivos..... | 4 |
| | Objetivo general..... | 4 |
| | Objetivos específicos..... | 4 |
| 1.3 | Ubicación y vías de acceso..... | 5 |
| 2. | METODOLOGÍA | 7 |
| 2.1 | Unificación Base de datos..... | 8 |
| 2.1.1 | Litología..... | 8 |
| 2.1.2 | Mineralización y Ocurrencia Mineral..... | 10 |
| 2.1.3 | Alteración..... | 14 |
| 2.1.4 | Estructuras..... | 15 |
| 2.2 | Depuración de la base de datos..... | 16 |
| 2.3 | Caracterización de la información QEMSCAN..... | 16 |
| 2.4 | Caracterización de cuerpos mineralizados..... | 17 |
| 2.5 | Selección de muestras para ensayo de Recuperación por Flotación..... | 17 |
| 2.5.1 | Criterios de Selección de muestras..... | 18 |
| 2.6 | Selección de muestras para cortes transparentes..... | 18 |
| 3. | MARCO GEOLÓGICO | 19 |
| 3.1 | Tipo de Depósito..... | 21 |
| 3.1.1 | Manto type or Stratabound Ore Deposit..... | 21 |
| 3.2 | Configuración geológica regional..... | 22 |
| 3.2.1 | Estratigrafía..... | 22 |
| 3.2.2 | Estructuras Regionales..... | 24 |
| 3.3 | Geología del Yacimiento..... | 24 |
| 3.3.1 | Litología..... | 24 |
| 3.3.2 | Sistemas Estructurales y Fallas..... | 28 |
| 4. | MARCO TEÓRICO | 31 |
| 4.1 | Geostatística..... | 31 |
| 4.2 | Box Splot..... | 31 |
| 4.3 | Scatter plot..... | 31 |
| 4.4 | Coefficiente de Correlación..... | 32 |
| 4.5 | Distribución de Probabilidad..... | 32 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.6 | Gráficos de Probabilidad | 32 |
| 4.7 | Transformación de variables | 33 |
| 4.8 | Geometalurgia..... | 33 |
| 4.9 | Flotación | 34 |
| 4.10 | Ensayo Rougher de recuperación | 35 |
| 4.11 | QUEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy). 37 | |
| 5. | ANTECEDENTES DE LA MINA..... | 38 |
| 5.1 | Base de datos | 38 |
| 5.1.1 | Geometalurgia | 38 |
| 5.1.2 | Ley química de Cu..... | 38 |
| 5.1.3 | Geoquímica multi-elementos | 39 |
| 5.1.4 | QEMSCAN | 39 |
| 5.2 | Geología | 42 |
| 5.2.1 | Modelo Litológico | 42 |
| 5.2.2 | Información Mineralógica..... | 43 |
| 5.2.3 | Estructuras..... | 44 |
| 5.2.4 | Leyes..... | 46 |
| 5.2.5 | Calcopirita | 47 |
| 5.2.6 | Bornita..... | 47 |
| 5.2.7 | Calcosina | 48 |
| 5.2.8 | Covelina | 49 |
| 5.2.9 | Recuperación de Cobre..... | 50 |
| 5.2.10 | Sección Transversal | 51 |
| 5.3 | Metalurgia | 54 |
| 6. | RESULTADOS | 55 |
| 6.1 | Control Litológico en la Recuperación de Cu..... | 55 |
| 6.2 | Correlaciones multivariantes y Regresión Lineal Multivariable | 58 |
| 6.3.1 | Determinación Nivel de Influencia Factor K..... | 70 |
| 6.4 | Liberación Mineral..... | 72 |
| 6.4.1 | Diferencias en la Recuperación de Cu por Zona y Ocurrencia Mineral..... | 75 |
| 6.5 | Control Estructural..... | 82 |
| 6.6 | Análisis de Partículas (PMA, QEMSCAN)..... | 84 |
| 6.6.1 | Distribución del Cu y Minerales de Mena Sulfurada según granulometría..... | 84 |
| 6.6.2 | Tamaño de Partículas de Mena de Cu | 89 |
| 6.6.3 | Partículas Ocluidas | 92 |
| 6.6.4 | Distribución Granulométrica..... | 94 |
| 6.6.5 | Distribución del Cu y Sulfuros de Cu..... | 95 |

| | | |
|--------------------|--|------------|
| 6.6.6 | Distribución de Tamaño de Sulfuros de Cu | 97 |
| 6.7 | Caracterización de Cuerpos Mineralizados..... | 99 |
| 6.7.1 | Distribución Espacial y Anisotropía..... | 101 |
| 6.7.2 | Selección de Muestras..... | 104 |
| 6.7.3 | Caracterización Mineralógica de sulfuros primarios..... | 108 |
| 6.7.4 | Zonificación mineral y textural | 122 |
| 6.7.5 | Conciliación Modelo Largo y Corto Plazo | 125 |
| 6.8 | Arquetipo de recuperación de cobre en base a Ocurrencia y Zona Mineral..... | 127 |
| 7. | ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 129 |
| 7.1 | Distribución y estadística | 129 |
| 7.2 | Control Litológico..... | 131 |
| 7.3 | Variables Numéricas de Interés y Regresión Lineal Multivariable | 132 |
| 7.3.1 | Toba Lo Prado | 132 |
| 7.3.2 | Riodacita Lo Prado | 133 |
| 7.3.3 | Andesita Lo Prado | 134 |
| 7.4 | Liberación Mineral y Efecto Textural en Andesita Lo Prado..... | 134 |
| 7.5 | Recuperación de Cu vs Factor K..... | 135 |
| 7.6 | Control Estructural..... | 136 |
| 7.7 | Análisis de partículas y Liberación Mineral..... | 137 |
| 8 | DISCUSIONES..... | 140 |
| 8.1 | Caracterización Geometalúrgica y UGM | 144 |
| 8.2 | Formulación Modelo Geometalúrgico para la Recuperación de Cobre | 147 |
| 9 | CONCLUSIONES | 148 |
| 10 | RECOMENDACIONES..... | 150 |
| 11 | BIBLIOGRAFÍA..... | 152 |
| ANEXOS..... | | 155 |
| ANEXO A: | Liberación vs Recuperación de Cu en Litologías | 155 |
| ANEXO B: | Distribución granulométrica del Cu Liberado y Ocluido..... | 157 |
| ANEXO C: | Estadística básica de las variables de interés..... | 159 |
| ANEXO D: | Relación entre las fases de mena y la Ley de Cu | 162 |
| ANEXO E: | Matrices de correlación..... | 163 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Ilustración que representa la ubicación de la mina El Soldado (a la izquierda). A la derecha se presenta una fotografía aérea de la mina, observándose el rajo, la planta y el tranque de relaves. | 5 |
| Figura 1.2. Mapa rutero de la V Región de Valparaíso. En el recuadro morado se muestra la zona de estudio. Tomado y modificado de Cartas Camineras del MOP..... | 6 |
| Figura 3.1: Figura 3 del trabajo de Boric, R. et al., 2002. representa la configuración geológica regional, ilustrando la ubicación del yacimiento el soldado. | 20 |
| Figura 3.2. Mapa de distribución espacial depósitos estratoligados tipo Mantos en la zona centro-norte de Chile, con el n° 24 se representa el yacimiento El soldado. Figura obtenida de Kojima, S. et al. (2009), corresponde a la Fig 1. | 22 |
| Figura 3.3: Mapa en planta de la mina el soldado, ilustrando las principales estructuras y sistemas estructurales presentes..... | 30 |
| Figura 4.1: Diagrama esquemático que intenta representar los principios involucrados en la flotación de la pulpa y la dinámica de las partículas dentro de la celda. (Haldar, S. K., 2018. Figura 13.35, pag 276)..... | 34 |
| Figura 4.2: Esquema del diagrama de flujo del proceso de flotación, el cual incluye las 4 etapas principales. (Haldar, S. K., 2018. Figura 13.37, pag 277)..... | 35 |
| Figura 4.3: Máquinas aireadoras del laboratorio metalúrgico de la mina el soldado, que permiten la agitación de la pulpa en un ensayo de flotación estándar..... | 36 |
| Figura 5.1: Modelo litológico de la mina el soldado, representa la estratigrafía correspondiente a las formaciones lo Prado y veta negra. desde el techo a la base las litologías involucradas son las siguientes, en color celeste la fm. veta negra, en café la unidad de toba superior Lp Prado, en azul la unidad de andesita norte superior y andesita sur inferior Lo Prado, en color rojo una intercalación de toba y arenisca de la fm. lo Prado, en color blanco y gris la unidad de riodacita norte y riodacita sur superior, en color amarillo la unidad de andesita sur superior y toba central, anaranjado la unidad de toba central inferior, morado riodacita sur inferior, azul la unidad de andesita sur inferior, y en verde el paquete sedimentario de la parte inferior de la fm. lo Prado..... | 43 |
| Figura 5.2: Representación de los sondajes con información mineralógica descrita. | 44 |
| Figura 5.3: Sondajes desplegados sobre la topografía de la mina el soldado. | 44 |
| Figura 5.4: Representación de los sondajes con información de leyes..... | 46 |
| Figura 5.5: Sondajes desplegados sobre la topografía de la mina el soldado. | 46 |
| Figura 5.6: Mapa de distribución de la presencia de calcopirita en el yacimiento el soldado. Intensidad de la variable representada según color y tamaño del punto identificador, escala de color ilustrada al costado derecho, mayor tamaño indica mayor valor de la variable..... | 47 |
| Figura 5.7: Mapa de distribución de la presencia de Bornita en el yacimiento el soldado. Intensidad de la variable representada según color y tamaño del punto identificador, escala de color ilustrada al costado derecho, mayor tamaño indica mayor valor de la variable..... | 48 |
| Figura 5.8: Mapa de distribución de la presencia de calcosina en el yacimiento el soldado. Intensidad de la variable representada según color y tamaño del punto identificador, escala de color ilustrada al costado derecho, mayor tamaño indica mayor valor de la variable..... | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.9: Mapa de distribución de la presencia de covelina en el yacimiento el soldado. Intensidad de la variable representada según color y tamaño del punto identificador, escala de color ilustrada al costado derecho, mayor tamaño indica mayor valor de la variable..... | 50 |
| Figura 5.10: Mapa de distribución de la Recuperación de cobre en el yacimiento el soldado. Intensidad de la variable representada según color y tamaño del punto identificador, escala de color ilustrada al costado derecho, mayor tamaño indica mayor valor de la variable..... | 51 |
| Figura 5.11: Sección transversal en la coordenada +0N de la mina El Soldado, ilustrando las leyes en sondajes. | 52 |
| Figura 5.12: Sondajes con visualización de leyes. S19805 corresponde al cuerpo mineralizado de morro. S23905 cuerpo de fase 2. S20307 cuerpo en veta negra..... | 52 |
| Figura 6.1: Diagrama de cajas y bigotes de la distribución de los principales grupos litológicos presentes en el soldado. veta negra presenta las mejores recuperaciones de cobre y menor dispersión, por el contrario, el sedimentario de lo Prado presenta la menor recuperación en promedio y mayor dispersión. | 55 |
| Figura 6.2: Distribución de probabilidad de la recuperación de cobre en los distintos grupos litológicos. | 56 |
| Figura 6.3: A: box plot de la recuperación de cobre en las diferentes litologías con factor k inferior a 14.4%. b: distribución de probabilidad de las distintas unidades litológicas con factor k inferior a 14.4%. | 57 |
| Figura 6.4: Gráfico de media vs dispersión de cada grupo litológico, representando la variabilidad de las unidades..... | 57 |
| Figura 6.5: Modelo de regresión lineal multivariable para el grupo litológico Toba Lo Prado.61 | |
| Figura 6.6: Distribución de probabilidad de los residuos obtenidos del modelo de regresión lineal multivariable..... | 61 |
| Figura 6.7: Modelo de regresión lineal multivariable para el grupo litológico Riodacita Lo Prado. | 63 |
| Figura 6.8: Distribución de probabilidad de los residuos obtenidos del modelo de regresión lineal multivariable..... | 64 |
| Figura 6.9: Modelo de regresión lineal multivariable para el grupo litológico Andesita Lo Prado. | 66 |
| Figura 6.10: Distribución de probabilidad de los residuos obtenidos del modelo de regresión lineal multivariable..... | 66 |
| Figura 6.11: Nube de dispersión entre la recuperación de cobre y la razón de solubilidad (factor k) para mostrar correlación entre estas variables. A: Scatter plot sin ajuste. B: scatter plot con ajuste logarítmico. C: scatter plot con ajuste potencial..... | 67 |
| Figura 6.12: Gráfico de scatter plot entre recuperación de cobre y la razón de solubilidad (factor K). el gráfico muestra la correlación par a par entre ambas variables, el coeficiente de correlación de Pearson es de -0.65, mostrando una buena correlación. En rojo se muestra la línea de identidad que en un caso ideal debería reflejar el máximo de cobre a recuperar. | 68 |
| Figura 6.13: Correlación entre el factor k y la recuperación de cobre visualizado en las distintas litologías del yacimiento. en rojo se presentan las muestras de veta Negra, en verde Andesita Lo Prado, en rosado Riodacita Lo Prado, en gris Toba Lo Prado y en amarillo el sedimentario de la parte | |

| | |
|---|----|
| inferior de lo prado. a ambos costados del grafico principal Se incorporan box plot de las diferentes categorias litologicas mostrando la dispersion y media de cada una de ellas. | 69 |
| Figura 6.14: Gráfico de variación porcentual de los datos que ilustra como varía el coeficiente de correlación de Pearson entre la recuperación de cobre y el factor k. Se resalta en color rojo el percentil al cual se dispara de forma exponencial este coeficiente. | 70 |
| Figura 6.15: Gráfico que ilustra el nivel de influencia lineal del factor k sobre la recuperación de cobre. se resalta en rojo el punto de influencia directa. | 71 |
| Figura 6.16: Box plots que resumen los niveles de liberacion de particulas y particulas ocluidas por especies sulfuradas de cobre..... | 72 |
| Figura 6.17: Gráfico de las liberaciones por fase mineral sulfurada de cobre calculado con las muestras de la unidad de Andesita Lo Prado. | 73 |
| Figura 6.18: Gráfico que ilustra la dependencia de la liberacion mineral con nivel de particulas ocluidas, debido a como se confeccionó esta variable. en color verde se representa la liberación mineral construida y en rojo la recuperacion de cobre. | 74 |
| Figura 6.19: Diagrama box splot que ilustra los niveles de recuperación de cobre en las distintas zonas minerales para la unidad de andesita lo prado. | 76 |
| Figura 6.20: Diagrama box splot que ilustra la diferencia en los niveles de recuperacion dentro de una misma zona mineral, en este caso nucleo de bornita – calcosina. | 77 |
| Figura 6.21: Box splot que ilustra el grado de liberacion de particulas minerales en cada una de las ocurrencias descritas para los nucleos de bornita. | 77 |
| Figura 6.22: Diagrama box splot que ilustra la diferencia en los niveles de recuperacion dentro de una misma zona mineral, en este caso nucleo de bornita. se reconoce como la ocurrencia definida como masa fundamental presenta los peores niveles de recuperación de cobre. | 78 |
| Figura 6.23: Box splot que ilustra el grado de liberacion de particulas minerales en cada una de las ocurrencias descritas para los nucleos de bornita. | 78 |
| Figura 6.24: Diagrama box splot que ilustra la diferencia en los niveles de recuperacion dentro de una misma zona mineral, en este caso zona bornita - calcopirita. no se reconocen diferencias definidas por ocurrencia. | 79 |
| Figura 6.25: Box splot que ilustra el grado de liberacion de particulas minerales en cada una de las ocurrencias descritas para la zona de bornita - calcopirita. | 79 |
| Figura 6.26: Diagrama box splot que ilustra la diferencia en los niveles de recuperacion dentro de una misma zona mineral, en este caso la zona de calcopirita. se reconoce como la recuperación aumenta levemente con una ocurrencia mas gruesa. | 80 |
| Figura 6.27: Box splot que ilustra el grado de liberacion de particulas minerales en cada una de las ocurrencias descritas para la zona de calcopirita. | 80 |
| Figura 6.28: Nube de dispersion entre la recuperación de cobre y la distancia a las fallas San José 16 e Isabel 12. A: San José 16. B: Isabel 12. los graficos muestran correlacion nula en la zona de influencia, | 82 |
| Figura 6.29: Distribución de arcillas en torno a cuerpos mineralizados específicos acorde a las fallas San José 16 e Isabel 12. A: mapa de distribución del cuerpo analizado en torno a la falla San José 16. B: mapa de distribución del cuerpo analizado en torno a la falla Isabel 12. C: comportamiento | |

| | |
|--|----|
| y distribución de la Arcilla en torno a la falla san José 16. D: comportamiento y distribución de la arcilla en torno a la falla Isabel 12..... | 83 |
| Figura 6.30: Gráfico de barras que muestra la distribución del Cu en un perfil granulométrico y mostrando diferencias según el grado de recuperación de Cu. | 85 |
| Figura 6.31: Gráfico de líneas que apoya la figura 6.30, mostrando que las recuperaciones de Cu altas presentan un contenido de Cu mayor en las fases granulométricas intermedias y menor en la fase fina respecto del grupo de recuperaciones bajas. | 85 |
| Figura 6.32: Gráfico de barras que muestra la distribución de la Cpy en un perfil granulométrico y mostrando diferencias según el grado de recuperación de Cu. | 86 |
| Figura 6.33: Gráfico de líneas que apoya la figura 6.32, mostrando que las recuperaciones de Cu altas se asocian a una Cpy distribuida mayoritariamente en las fases granulométricas intermedias y de menor forma en la fase fina respecto del grupo de recuperaciones bajas. | 86 |
| Figura 6.34: Gráfico de barras que muestra la distribución de la BN en un perfil granulométrico y mostrando diferencias según el grado de recuperación de Cu. | 87 |
| Figura 6.35: Gráfico de líneas que apoya la figura 6.34, mostrando que las recuperaciones de Cu altas se asocian a una BN distribuida mayoritariamente en las fases granulométricas intermedias y de menor forma en la fase fina respecto del grupo de recuperaciones bajas. | 87 |
| Figura 6.36: Gráfico de barras que muestra la distribución de la Cc en un perfil granulométrico y mostrando diferencias según el grado de recuperación de Cu. | 88 |
| Figura 6.37: Gráfico de líneas que apoya la figura 6.36, mostrando que las recuperaciones de Cu altas se asocian a una Cc distribuida mayoritariamente en las fases granulométricas intermedias y de menor forma en la fase fina respecto del grupo de recuperaciones bajas. | 88 |
| Figura 6.38: Gráfico de barras que muestra la distribución de tamaño de partículas de Cpy en un perfil granulométrico y mostrando diferencias según el grado de recuperación de Cu..... | 89 |
| Figura 6.39: Gráfico de líneas que apoya la figura 6.38, Reconociéndose un perfil de distribución inverso del tamaño de Cpy y la recuperación de Cu. a lo largo de todas las fases granulométricas se reconoce una mayor recuperación de Cu para un menor tamaño de grano. | 89 |
| Figura 6.40: Gráfico de barras que muestra la distribución de tamaño de partículas de bn en un perfil granulométrico y mostrando diferencias según el grado de recuperación de Cu..... | 90 |
| Figura 6.41: Gráfico de líneas que apoya la figura 6.40, Reconociéndose un perfil de distribución normal del tamaño de Bn y la recuperación de Cu. a lo largo de todas las fases granulométricas se reconoce una mayor recuperación de Cu para un mayor tamaño de grano. | 90 |
| Figura 6.42: Gráfico de barras que muestra la distribución de tamaño de partículas de Cc en un perfil granulométrico y mostrando diferencias según el grado de recuperación de Cu..... | 91 |
| Figura 6.43: Gráfico de líneas que apoya la figura 6.42, Reconociéndose un perfil de distribución normal del tamaño de Cc y la recuperación de Cu. a lo largo de casi todas las fases granulométricas se reconoce una mayor recuperación de Cu para un mayor tamaño de grano. | 91 |
| Figura 6.44: Gráfico de curvas de distribución de la masa de partículas ocluidas de Bn a lo largo de 4 fases granulométricas. | 92 |
| Figura 6.45: Gráfico de curvas de distribución de la masa de partículas ocluidas de Cpy a lo largo de 4 fases granulométricas. | 93 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.46: Gráfico de curvas de distribución de la masa de partículas ocluidas de Cpy a lo largo de 4 fases granulométricas. | 93 |
| Figura 6.47: Curvas de distribución granulométricas para Andesita Lo Prado, Sedimentario Lo Prado, Riodacita Lo Prado, Toba Lo Prado y Veta Negra. | 94 |
| Figura 6.48: Curvas de distribución granulométrica del Cu en Andesita Lo Prado, Riodacita Lo Prado, Toba Lo Prado y Veta Negra. | 95 |
| Figura 6.49: Curvas de distribución granulométrica de la Cpy en Andesita Lo Prado, Riodacita Lo Prado, Toba Lo Prado y Veta Negra. | 95 |
| Figura 6.50: Curvas de distribución granulométrica de la Bn en Andesita Lo Prado, Riodacita Lo Prado, Toba Lo Prado y Veta Negra. | 96 |
| Figura 6.51: Curvas de distribución granulométrica de la Cc en Andesita Lo Prado, Riodacita Lo Prado, Toba Lo Prado y Veta Negra. | 96 |
| Figura 6.52: Curvas de distribución de tamaño de la Cpy en Andesita Lo Prado, Riodacita Lo Prado, Toba Lo Prado y Veta Negra. | 97 |
| Figura 6.53: Curvas de distribución de tamaño de la Bn en Andesita Lo Prado, Riodacita Lo Prado, Toba Lo Prado y Veta Negra. | 97 |
| Figura 6.54: Curvas de distribución de tamaño de la Cc en Andesita Lo Prado, Riodacita Lo Prado, Toba Lo Prado y Veta Negra. | 98 |
| Figura 6.55: Ubicación espacial del cuerpo mineralizado estudiado, ubicado entre las cavidades califonia y santa clara. Vista hacia el Este. | 99 |
| Figura 6.56: Cuerpo mineralizado creado en Leapfrog, se despliegan los sondajes utilizados en la modelación. en el costado derecho se presenta una tabla mencioando cada uno de los sondajes. Vista hacia el Sur. | 100 |
| Figura 6.57: Cuerpo mineralizado superpuesto sobre la topografía para mostrar la dimensión de este. Tiene una extensión que contempla 3 bancos, dos simples de 15 metros y uno doble de 30 metros. | 101 |
| Figura 6.58: Vista superior del yacimeinto el soldado, se observa la fase 3 de la mina, y se proyectan las dos fallas controladoras que limitan el cuerpo mineralizado estudiado. | 102 |
| Figura 6.59: Control estructural sobre el cuerpo mineralizado. se reconocen las fallas isabel 3 y 4 a ambos costados. | 103 |
| Figura 6.60: Fotografía de la muestra MET-1 enfocada a apoyar la descripción macroscópica de la roca. | 108 |
| Figura 6.61: Fotografía de la muestra MET-2 enfocada a apoyar la descripción macroscópica de la roca. | 109 |
| Figura 6.62: Fotografía de la muestra MET-3 enfocada a apoyar la descripción macroscópica de la roca. | 110 |
| Figura 6.63: Fotografía de la muestra MET-4 enfocada a apoyar la descripción macroscópica de la roca. | 111 |
| Figura 6.64: Fotografía de la muestra MET-5 enfocada a apoyar la descripción macroscópica de la roca. | 112 |
| Figura 6.65: Fotografía de la muestra MET-6 enfocada a apoyar la descripción macroscópica de la roca. | 113 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.66: Fotografía de la muestra MET-7 enfocada a apoyar la descripción macroscópica de la roca..... | 114 |
| Figura 6.67: Fotografía de la muestra MET-8 enfocada a apoyar la descripción macroscópica de la roca..... | 115 |
| Figura 6.68: Fotografía de la muestra MET-9 enfocada a apoyar la descripción macroscópica de la roca..... | 116 |
| Figura 6.69: Fotografía de la muestra MET-10 enfocada a apoyar la descripción macroscópica de la roca..... | 117 |
| Figura 6.70: Fotografía de la muestra MET-11 enfocada a apoyar la descripción macroscópica de la roca..... | 118 |
| Figura 6.71: Fotografía de la muestra MET-12 enfocada a apoyar la descripción macroscópica de la roca..... | 119 |
| Figura 6.72: Fotografía de la muestra MET-14 enfocada a apoyar la descripción macroscópica de la roca..... | 120 |
| Figura 6.73: Fotografía de la muestra MET-15 enfocada a apoyar la descripción macroscópica de la roca..... | 121 |
| Figura 6.74: Zonas minerales definidas para los cuerpos mineralizados de El soldado. a: morfología del cuerpo modelado. B: sondajes involucrados en la modelación y descripción geológica, están ilustrando las zonas minerales identificadas, color morado núcleo de Bn, color rosado zona Bn-Cpy, color amarillo Zona Cpy, color verde zona Cpy-py y color celeste zona de py. | 123 |
| Figura 6.75: Modelación de las zonas minerales en el cuerpo mineralizado estudiado. A: Núcleo de bornita, en color rosado. B: zona externa con presencia de Bn-cpy y aumento de cpy hacia el exterior. c: superposicion concentrica d elas zonas minerales que forman los núcleos mineralizados en el soldado..... | 124 |
| Figura 6.76: Figura que ilustra la disposición del cuerpo mineralizado estudiado, además de las muestras realizadas para caracterizarlo y robustecer el modelo de largo plazo, como también los disparos involucrados y las respectivas muestras geometalúrgicas de recuperación que caracterizan cada disparo y robustecen el modelo de corto plazo..... | 126 |
| Figura 12.1: Liberación de Cu sulfurado graficado de forma ascendente, en comparación con la recuperación de Cu para la unidad Toba Lo Prado..... | 155 |
| Figura 12.2: Liberación de Cu sulfurado graficado de forma ascendente, en comparación con la recuperación de Cu para la unidad Riodacita Lo Prado..... | 156 |
| Figura 12.3: Liberación de Cu sulfurado graficado de forma ascendente, en comparación con la recuperación de Cu para la unidad Andesita Lo Prado..... | 156 |
| Figura 12.4: Liberación de Cu sulfurado graficado de forma ascendente, en comparación con la recuperación de Cu para la unidad Veta Negra. | 157 |
| Figura 12.5: Distribución del cobre liberado en las fases granulometricas <50um y 50-100um asociado a una recuperación de cobre entre 72.5 y 86%..... | 158 |
| Figura 12.6: Distribución del cobre ocluido en las fases granulometricas <50um, 50-100um, 100-140um y >140um asociado a una recuperación de cobre entre 72.5 y 90%..... | 158 |

Figura 12.7: Scatter Plot que muestra la correlación entre los sulfuros de cobre principales de la mina y la ley de cobre asociada. Superior (bornita vs Ley de Cu), Inferior izquierdo (Calcosina vs Ley de Cu), Inferior Derecho (Calcopirita vs Ley de Cu).162

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1: Muestras con incoherencias en la descripción geológica involucrada..... | 9 |
| Tabla 2.2: Litologías principales | 9 |
| Tabla 2.3: Resumen de las zonas minerales principales presentes en los cuerpos mineralizados de la Mina el soldado..... | 10 |
| Tabla 2.4: Tabla resumen de las ocurrencias minerales presentes en el soldado..... | 11 |
| Tabla 2.5: Tabla resumen de muestras con clasificación de mineralización y ocurrencia en las litologías principales del yacimiento. se expresa la cantidad de muestras con información numerica. | 12 |
| Tabla 2.6: Resumen caracterización de zonas minerales y ocurrencias dentre de los cuerpos mineralizados en la Andesita Lo Prado..... | 13 |
| Tabla 2.7: Resumen De las alteraciones presentes en el yacimiento el soldado. | 14 |
| Tabla 2.8: Tabla resumen de las muestras geometalurgicas con información estructural... .. | 15 |
| Tabla 3.1: Tabla resumen de las litologías sedimentarias presentes en el yacimiento el soldado, involucrando a la fm. lo Prado y la fm. veta negra..... | 25 |
| Tabla 3.2: Tabla resumen de las litologías volcánicas presentes en el yacimiento el soldado, involucrando a la fm. lo Prado y la fm. veta negra..... | 26 |
| Tabla 3.3: Tabla resumen de las litologías Piroclásticas presentes en el yacimiento el soldado, involucrando a la fm. lo Prado y la fm. veta negra..... | 27 |
| Tabla 3.4: Tabla resumen de las litologías intrusivas presentes en el yacimiento el soldado, involucrando a la fm. lo Prado y la fm. veta negra..... | 28 |
| Tabla 5.1: Fallas pricipales de la mina el soldado y consideradas las estructuras mineralizadoras. | 45 |
| Tabla 5.2: Resumen de las leyes a lo largo delos tramos mineralizados de los sondajes desplegados en la sección transversal +0n de la figura 5.12..... | 53 |
| Tabla 6.1: matriz de correlación de variables para el modelo regresión lineal en Toba Lo Prado. | 59 |
| Tabla 6.2: Tabla resumen de los parámetros que definen la regresión lineal multivariable en la toba lo Prado..... | 60 |
| Tabla 6.3: matriz de correlación de variables para el modelo regresión lineal en Riodacita Lo Prado. | 62 |
| Tabla 6.4: Tabla resumen de los parámetros que definen la regresión lineal multivariable en la riodacita lo Prado..... | 63 |
| Tabla 6.5: matriz de correlación de variables para el modelo regresión lineal en Andesita Lo Prado. | 64 |
| Tabla 6.6: Tabla resumen de los parámetros que definen la regresión lineal multivariable en la Andesita lo Prado..... | 65 |
| Tabla 6.7: Tabla resumen de la transformación en la distribución de los datos para encontrar el mejor ajuste. en color rojo se preseta el mejor ajuste que correlaciona las variables..... | 68 |
| Tabla 6.8: Tabla resumen de las diferencias por litologías. se muestra la distribución que caracteriza cada uno de los grupos litológicos. enfatizando la correlación entre la recuperación de cobre y la | |

| | |
|---|-----|
| razon de solubilidad en cada litología. En color rojo se muestra una muy buena correlacion para el sedimentario, la riodacitay la toba de la fm. lo prado..... | 69 |
| Tabla 6.9: Tabla resumen, indicando los parámetros estadísticos de los grupos mencionados en la figura 6.36. se reconoce que las particulas de cpy estan en promedio un 20% ocluidas..... | 73 |
| Tabla 6.10: Tabla resumen de los niveles de recuperacion de cobre por zona mineral caracterizada. | 76 |
| Tabla 6.11: Tabla resumen con la estadística básica de la recuperación de cobre en la distintas zonas minerales y ocurrencias..... | 81 |
| Tabla 6.12: Tabla resumen de la liberación mineral de cobre en la dstintas zonas minerales y ocurrencias..... | 81 |
| Tabla 6.13: Valores de material pasante asociado a cada litología para calcular las curvas de distribución granulométrica..... | 94 |
| Tabla 6.14: Tabla resumen de la descripción de muestras realizadas en el estudio del cuerpo miineralizado. involucra todos los sondajes descritos. | 104 |
| Tabla 6.15: Tabla resumen de las muestras seleccionadas para realizar ensayo de recuperación por flotación..... | 106 |
| Tabla 6.16: Tabla resumen de las propiedades metalúrgicas de cada muestra Met. | 107 |
| Tabla 6.17: Descripción macroscópica de la muestra MET-1. Conteniendo información litológica, de mineralización de mena y alteración..... | 108 |
| Tabla 6.18: Descripción macroscópica de la muestra MET-2. Conteniendo información litológica, de mineralización de mena y alteración..... | 109 |
| Tabla 6.19: Descripción macroscópica de la muestra MET-3. Conteniendo información litológica, de mineralización de mena y alteración..... | 110 |
| Tabla 6.20: Descripción macroscópica de la muestra MET-4. Conteniendo información litológica, de mineralización de mena y alteración..... | 111 |
| Tabla 6.21: Descripción macroscópica de la muestra MET-5. Conteniendo información litológica, de mineralización de mena y alteración..... | 112 |
| Tabla 6.22: Descripción macroscópica de la muestra MET-6. Conteniendo información litológica, de mineralización de mena y alteración..... | 113 |
| Tabla 6.23: Descripción macroscópica de la muestra MET-7. Conteniendo información litológica, de mineralización de mena y alteración..... | 114 |
| Tabla 6.24: Descripción macroscópica de la muestra MET-8. Conteniendo información litológica, de mineralización de mena y alteración..... | 115 |
| Tabla 6.25: Descripción macroscópica de la muestra MET-9. Conteniendo información litológica, de mineralización de mena y alteración..... | 116 |
| Tabla 6.26: Descripción macroscópica de la muestra MET-10. Conteniendo información litológica, de mineralización de mena y alteración..... | 117 |
| Tabla 6.27: Descripción macroscópica de la muestra MET-11. Conteniendo información litológica, de mineralización de mena y alteración..... | 118 |
| Tabla 6.28: Descripción macroscópica de la muestra MET-12. Conteniendo información litológica, de mineralización de mena y alteración..... | 119 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 6.29: Descripción macroscópica de la muestra MET-14. Conteniendo información litológica, de mineralización de mena y alteración..... | 120 |
| Tabla 6.30: Descripción macroscópica de la muestra MET-15. Conteniendo información litológica, de mineralización de mena y alteración..... | 121 |
| Tabla 6.31: Tabla resumen de la conciliación entre las muestras del corto y largo plazo.. | 125 |
| Tabla 6.32: Resumen de muestras que respaldan la definición del arquetipo 1..... | 128 |
| Tabla 7.1: tabla resumen del efecto de partículas sobre la recuperación de cobre..... | 139 |
| Tabla 8.1: tabla resumen de las unidades geometalúrgicas definidas..... | 145 |
| Tabla 12.1: Estadística básica de variables para muestras de Riodacita Lo Prado. | 159 |
| Tabla 12.2: Estadística básica de variables para muestras de Sedimentario Lo Prado..... | 160 |
| Tabla 12.3: Estadística básica de variables para muestras de Toba Lo Prado. | 160 |
| Tabla 12.4: Estadística básica de variables para muestras de Andesita Lo Prado..... | 161 |
| Tabla 12.5: Estadística básica de variables para muestras de Veta Negra..... | 161 |
| Tabla 12.6: Matriz de correlación entre sulfuros de cobre principales y Ley de Cu..... | 162 |
| Tabla 12.7: Matriz de correlación de variables para muestras de Andesita Lo Prado..... | 163 |
| Tabla 12.8: Matriz de correlación de variables para muestras de Riodacita Lo Prado..... | 164 |
| Tabla 12.9: Matriz de correlación de variables para muestras de Sedimentario lo Prado.. | 165 |
| Tabla 12.10: Matriz de correlación de variables para muestras de Toba Lo Prado..... | 166 |
| Tabla 12.11: Matriz de correlación de variables para muestras de Veta Negra..... | 167 |

1 INTRODUCCIÓN

La mina El Soldado, distrito perteneciente a Anglo American, es un yacimiento tipo estratoligado con un marcado control estructural (Boric, R. et al. 2002), ubicado en la cordillera de la costa de la V Región de Valparaíso, que presenta gran variabilidad en la distribución de la mineralización y ley de Cu, está inmerso en las Fm. Lo Prado y la parte inferior de la Fm. Veta Negra, ambas de carácter volcano-sedimentario con estratos dimensionados desde decenas hasta centenas de metros de espesor, por lo tanto, la roca mineralizada que se envía a planta trasciende una diversidad de litologías, siendo las principales andesitas, riocacitas, tobas e intercalaciones sedimentarias, con variaciones laterales en la mineralogía, tanto de mena, ganga y alteración.

Si bien la mineralogía de mena es importante para la recuperación mineral, cada día se va haciendo más evidente que la mineralogía de la ganga es igual e incluso más importante en el proceso de concentración mineral, pues es esta última la que afectará las condiciones fisicoquímicas del sistema, cuando se trata de concentrar y recuperar el Cu (Contreras, L. 2015 y Díaz, E. 2017). La ganga va a afectar en una diversidad de aspectos, ya sea en la etapa de conminución, puede aumentar el consumo de acero, cambiar el pH, potencial químico de la pulpa y disminuir la liberación mineral, o, directamente en la etapa de flotación podría disminuir la recuperación de Cu. Si bien los parámetros geometalúrgicos antes mencionados pueden ser importantes, se ha reconocido que para el yacimiento El Soldado los parámetros más influyentes sobre la recuperación de Cu tienen que ver directamente con las fases mineralógicas de mena, tanto su asociación mineral, tamaño y distribución. Como también el efecto textural, que ha sido estudiado por diversos autores, por un lado C. Lund (2015) le da énfasis a la caracterización mineral y a las zonaciones texturales de los cuerpos mineralizados, usando información de mineralogía modal para desarrollar un modelo de distribución mineralógica, bajo la hipótesis que materiales con las mismas características geológicas y texturales presentarán la misma respuesta frente al procesamiento mineral independiente de su ubicación espacial en el yacimiento, por otro lado, A.F. Cropp (2013) determina que la mineralogía y textura mineral definen las curvas teóricas de recuperación las cuales indican la recuperación máxima posible para un determinado material de alimentación.

Con el pasar de los años se ha puesto en evidencia que la geometalurgia es esencial para pronosticar el comportamiento del material enviado a planta, desarrollándose diversas metodologías y tecnologías en auge de lograr un mejor entendimiento del material en las etapas de procesamiento mineral, entre ellas se encuentra los métodos de análisis de partículas como lo es Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy o QEMSCAN; donde el yacimiento presenta 340 muestras geometalúrgicas con dicha información, y son la base para el desarrollo de este informe.

Según estudios de la Comisión Chilena del Cobre, plasmados en el informe de Consumo de energía y recursos hídricos en la minería al 2017, se indica que el proceso de concentración mineral

es la etapa de mayor gasto energético en la minería chilena, alcanzando un 57% del consumo de electricidad total del proceso minero, estimándose en un consumo de 49.809 TJ.

En base a lo anterior, es importante conocer los factores más influyentes en la recuperación de cobre por flotación, que permita identificar los minerales que afectan de forma negativa la producción, pues así se puede actuar de forma predictiva frente al envío de fases minerales específicas, y más aún optimizar la recuperación de cobre y ser eficientes frente al gasto energético.

Este trabajo busca definir el comportamiento de la recuperación de Cu y su relación con la caracterización geológica del yacimiento, como también, determinar cuáles son las fases minerales y parámetros geometalúrgicos que disminuyen la recuperación de Cu en el proceso de flotación, analizando directamente la concentración de las fases minerales involucradas en las muestras, la información de análisis de partículas y mineralogía modal entregada por el ensayo QEMSCAN.

Como menciona A. Cropp y W. Goodall en *Influence of Rock Texture on Mineral Processing* “all texture characteristics of the ore influence mineral processing, but it is the mineral grain size and bonding between grains that are the main characteristics influencing mineral breakage and mineral liberation” citando a Petruk (2000), se identificó qué, en El Soldado el parámetro que influye de forma mayoritaria en la recuperación de Cu es la liberación mineral de la mineralogía de mena, presentando un nivel de influencia limitado por 70% (Andesita Lo Prado, figura 6.18) y coeficiente de correlación de Pearson positivo igual a 0.41 (Toba Lo Prado, tabla 6.1) y 0.31 (Riodacita Lo Prado, tabla 6.3), sin embargo, la liberación se ve caracterizada de forma general según la litología presente y de forma más específica de la textura y ocurrencia mineral, como también de la presencia de arcillas y limonitas, las cuales influyen de forma negativa provocando que partículas liberadas no floten.

De acuerdo con C. Lund (2015) se logró demostrar que el material de alimentación con características geológicas similares tienen el mismo comportamiento en el procesamiento mineral independiente de la parte del yacimiento que provengan como se observa en las muestras G1362 y G1529. Finalmente se logró identificar que la recuperación de Cu en el yacimiento está directamente asociada a la zona y textura mineral, y presenta continuidad espacial acotada acorde a la continuidad del cuerpo mineralizado.

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El yacimiento El Soldado es complejo desde el ámbito geológico y más aún en lo que el procesamiento mineral respecta, debido principalmente a la variabilidad espacial de los parámetros geológicos que definen los cuerpos mineralizados, sin embargo, se logra determinar el control geológico sobre la recuperación de Cu. El análisis de las variables geometalúrgicas permite conocer y predecir la respuesta frente al procesamiento mineral del material enviado a planta.

La geometalurgia distingue entre propiedades primarias y secundarias del yacimiento (Coward et al. 2009). Por un lado, las propiedades primarias son intrínsecas de la roca y la geología del yacimiento, como lo son las leyes de Cu, las fases minerales involucradas y la textura que los cuerpos mineralizados puedan presentar, por otro lado, las propiedades secundarias corresponden a la respuesta de cada roca frente a un proceso determinado, es decir, describen el comportamiento de las variables involucradas, como lo es la recuperación de cobre por flotación, distribución de tamaño y moliendabilidad entre otras; estas propiedades secundarias son medidas mediante test geometalúrgicos como es el caso del ensayo de flotación rougher para medir la recuperación de cobre (Van den Boogart et al. 2018).

El yacimiento El Soldado se encuentra en una etapa de extracción de los cuerpos mineralizados profundos que no fueron explotados por la minería subterránea, los cuales presentan continuidad espacial acotada y zonaciones minerales específicas distintas a los grandes cuerpos mineralizados que ocupaban lo que son ahora las cavidades de la mina, es debido a esta variabilidad en las propiedades primarias que se requiere un mejor entendimiento en las propiedades secundarias y en específico, en lo que aborda este trabajo, del comportamiento de la recuperación de cobre.

1.2 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo es identificar parámetros geológicos que permitan definir Unidades de estimación Geo-Metalúrgicas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Consolidación de la base de datos, con la caracterización geológica (mapeo geológico de sondajes) e información QEMSCAN (caracterización mineral).
2. Definir correlaciones de la Recuperación de Cu con las distintas fases mineralógicas.
3. Determinar cuáles son los parámetros y fases minerales que disminuyen la recuperación de Cu en la flotación.
4. Correlacionar la información de liberación mineral (QEMSCAN) con la información de ocurrencia mineral en las distintas litologías.
5. Caracterizar cuerpos mineralizados en función de la Recuperación de Cu y liberación mineral.
6. Predecir la Recuperación de Cu a través de una regresión lineal multivariable.
7. Identificar y definir unidades de estimación en base a la recuperación de cobre y las relaciones encontradas (control litológico, textural, análisis de partículas entre otros).
8. Introducir un modelo de recuperación metalúrgica en función de las correlaciones encontradas.

1.3 UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

La zona de estudio es la mina El Soldado de Anglo American ubicada en la provincia de Quillota, V Región de Valparaíso. Se localiza a 123 km al norte de Santiago y a 7 km al noreste de la localidad El Melón.

Para acceder a la zona de estudio desde Santiago, se debe tomar la ruta 5 Norte para luego en el kilómetro 123 ingresar al desvío hacia el camino Carretera Ernesto Guzmán, donde se sigue por 2 km la carretera para luego empalmar al camino La Mina El Cobre siguiendo por 4,4 km hasta llegar a la barrera de entrada de la Mina El Soldado.

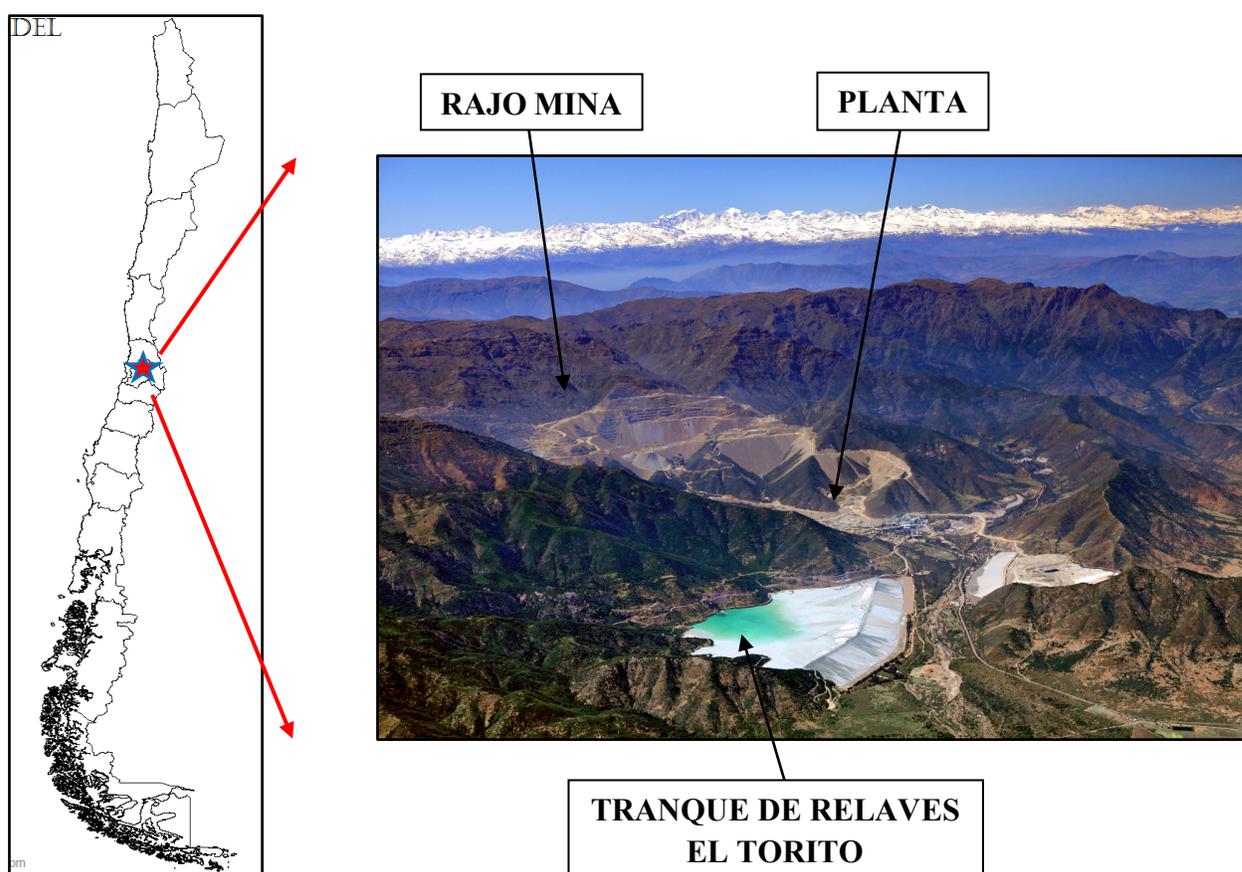


FIGURA 1.1. ILUSTRACIÓN QUE REPRESENTA LA UBICACIÓN DE LA MINA EL SOLDADO (A LA IZQUIERDA). A LA DERECHA SE PRESENTA UNA FOTOGRAFÍA AÉREA DE LA MINA, OBSERVÁNDOSE EL RAJO, LA PLANTA Y EL TRANQUE DE RELAVES.

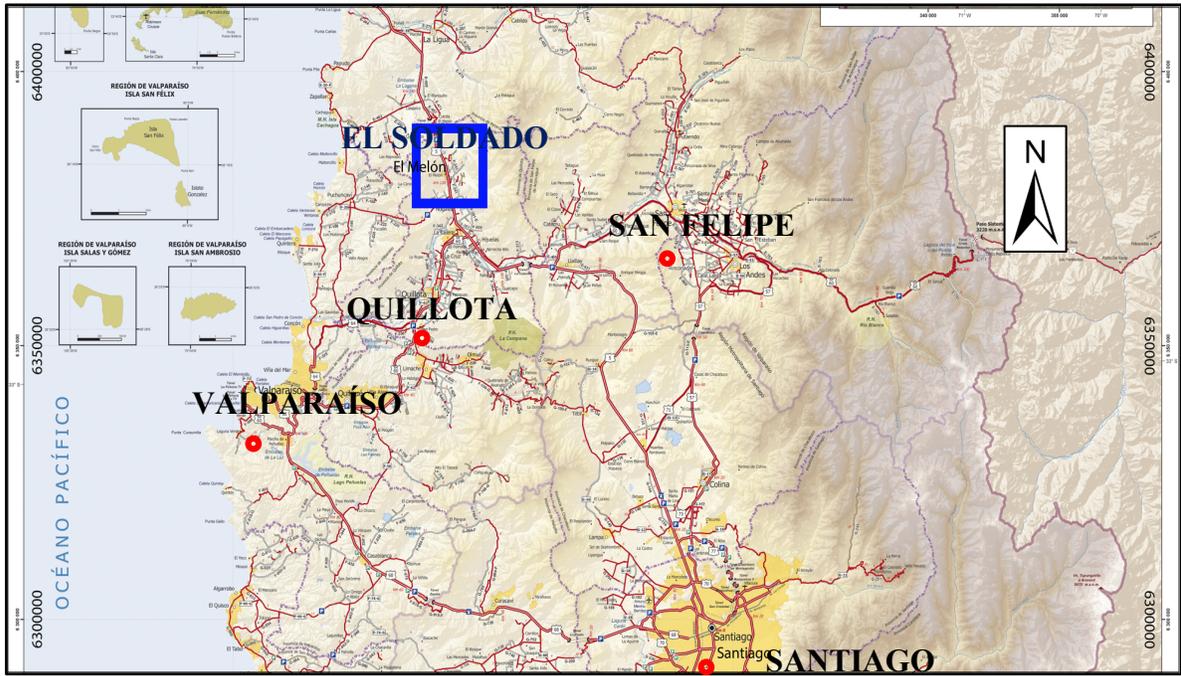


FIGURA 1.2. MAPA RUTERO DE LA V REGIÓN DE VALPARAÍSO. EN EL RECUADRO MORADO SE MUESTRA LA ZONA DE ESTUDIO. TOMADO Y MODIFICADO DE CARTAS CAMINERAS DEL MOP.

2. METODOLOGÍA

La metodología llevada a cabo en este trabajo de memoria de título consistió en realizar una revisión de toda la información disponible en el yacimiento El Soldado, para así categorizar la información útil, tanto numérica como categórica (información descriptiva), con el objetivo de identificar los factores principales que controlan la Recuperación de Cobre. Se unificó la información de acuerdo con las muestras de ensayos geometalúrgicos de recuperación rougher, donde se dispone de un total de 1460 muestras.

Las metodologías que serán empleadas en la realización del trabajo de memoria son las siguientes:

- Investigación bibliográfica, enfocada a recopilar todo tipo de información útil relacionada con el tema de memoria, tal como mapas de la zona, geología regional, estratigrafía y definición de las unidades y formaciones involucradas, búsqueda de información relacionada con las metodologías, geometalurgia, entre otras.
- Revisión y consolidación de la base de datos.
- Validación de la ubicación espacial y leyes de las muestras geometalúrgicas.
- Análisis de datos QEMSCAN.
- Se analizará el rol de las litologías y mineralogías predominantes en El Soldado con respecto a la recuperación de Cu, tanto mineralogía de ganga, de alteración, fases mineralógicas de mena.
- Se analizará también la dependencia de la recuperación de Cu con la liberación mineral entregada por el análisis de partículas QEMSCAN.
- Realización de regresiones lineales en búsqueda de relaciones entre variables.
- Caracterizar cuerpos mineralizados específicos, utilizando la información disponible y generando nuevas descripciones y muestras geometalúrgicas.
- Realización de cortes transparente y pulidos para caracterizar la ocurrencia mineral y textura asociada.
- Formulación de modelo de recuperación metalúrgica.

Este trabajo usó las características geológicas, mineralógicas y geometalúrgicas registradas en la base de datos de descripción geológica de la mina El Soldado de Angloamerican, para analizar el comportamiento de la recuperación en función de las clases definidas.

2.1 UNIFICACIÓN BASE DE DATOS

La unificación de la base de datos es una parte importante del manejo de información que nos permitió organizar la información geológica del yacimiento para poder realizar una caracterización geometalúrgica asociada a las variaciones de los parámetros geológicos. En este caso permitió definir diferencias en el comportamiento de las distintas litologías sobre la recuperación de cobre, reconocer el efecto de las texturas minerales en el comportamiento metalúrgico de los cuerpos mineralizados y más aún identificar la importancia de una caracterización detallada de los mismos para pronosticar de forma precisa la variable en cuestión.

La información disponible permitió caracterizar geológicamente 829 muestras con litología, 704 muestras con mineralogía de mena, 410 muestras con ocurrencia mineral y 590 muestras con alteración. Sin embargo, sólo 406 de ellas presenta una caracterización geológica completa incluyendo litología, mineralogía, ocurrencia y alteración.

2.1.1 LITOLOGÍA

La información litológica del yacimiento se encuentra asociada y clasificada según el mapeo de sondajes, y se puede encontrar en la base de datos de información geológica de la mina El Soldado. La información geometalúrgica, la recuperación rougher de cobre en el caso de este estudio, no cuenta con una descripción de la litología de las muestras, por lo tanto, el procedimiento llevado a cabo involucra la revisión de la información litológica disponible en los sondajes, de esta forma, se procede a realizar un vínculo entre esta información y la ubicación espacial de la muestra. Se realizó el seguimiento de cada una de las 1460 muestras utilizadas para este estudio, logrando clasificar litológicamente 848 muestras. De las cuales se extraen 19 muestras por presentar incoherencias en la litología como se puede observar en la tabla 2.1, de esta forma, se cuenta con 829 muestras clasificadas litológicamente (tabla 2.2) y que serán usadas para caracterizar la recuperación de cobre en base a esta variable categórica. La información litológica involucra las 17 litologías presentes en el yacimiento, y se observa que las muestras recaen en una o en más de una litología, por lo tanto, se realizó una subclasificación de estas, caracterizándolas como litología única o litológica compuesta. Esta categorización se realizó con una nueva variable denominada Categoría_Lito, siendo una clasificación binaria, valor 0 para las litologías únicas y valor 1 para las litologías compuestas. La subclasificación se realizó de forma detallada, revisando una por una las muestras con litología compuestas, subclasificándolas según las litologías involucradas de la forma Litología1-Litología2-...-LitologíaN.

Para el caso donde la litología compuesta involucra una litología y además zona brecha hidrotermal de la misma, se subclasificó sólo con el carácter de brecha, siendo BXLITO (ejemplo, BXAND, BXTRQ, entre otras).

TABLA 2.1: MUESTRAS CON INCOHERENCIAS EN LA DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA INVOLUCRADA.

| Categoría | N° Muestras | Muestras |
|------------------------------|--------------------|--|
| Litología sin definir | 9 | M445, G706, G706, G707, G717, G718, G724, G725, G726, G751 |
| Tramos incompletos | 8 | G608, G674, G683, G687, G702, G716, G723, G1235 |
| Información duplicada | 2 | G1350, G1354 |

Las litologías principales se ilustran en la tabla 2.2, indicándose el código de roca, la litología correspondiente y el número de muestras asociado a cada categoría.

TABLA 2.2: LITOLOGÍAS PRINCIPALES

| Categoría | Código de Roca | Litología | N° Muestras |
|----------------------------|-----------------------|--|--------------------|
| Litología Única | ANDVN | Andesita Veta Negra | 39 |
| | BXANDVN | Brecha Andesítica Veta Negra | 12 |
| | BXVVN | Brecha Volcánica Veta Negra | 10 |
| | TUFVN | Toba Veta Negra | 7 |
| | BXTUFVN | Brecha Tobácea Veta Negra | 3 |
| | AND | Andesita Lo Prado | 96 |
| | BXAND | Brecha Andesítica Lo Prado | 14 |
| | TUF | Toba Lo Prado | 100 |
| | BXTUF | Brecha Tobácea Lo Prado | 46 |
| | TRQ | Traquita Lo Prado | 124 |
| | BXTRQ | Brecha Traquítica Lo Prado | 89 |
| | SD | Sedimentario Lo Prado | 105 |
| | BXSED | Brecha Sedimentaria Lo Prado | 36 |
| | BXHY | Brecha Hidrotermal | 1 |
| | BXSEDEVN | Brecha Sedimentaria Veta Negra | 3 |
| | ANDDK | Dique Andesítico | 1 |
| | SCAR | Relleno | 5 |
| Litología Compuesta | - | Muestras que involucran una intercalación de las litologías anteriores | 138 |
| Total | | | 829 |

2.1.2 MINERALIZACIÓN Y OCURRENCIA MINERAL

2.1.2.1 MINERALIZACIÓN

Se logró identificar 704 muestras con información de las fases minerales presentes según descripción macroscópica de las fases minerales de mena, tanto para sondajes diamantina como de aire reverso.

Se incorporó la información de mapeo de mineralización en sondajes con la información metalúrgica de recuperación de cobre, específicamente se recopilaron los datos de sulfuro hipógeno principal y ocurrencia sulfuro hipógeno principal, secundario y terciario definidos como MIN_HIPO1, MIN_HIPO, MIN_HIPO3, OCC_PPALHIPO1, OCC_PPALHIPO2 y OCC_PPALHIPO3, donde el sulfuro principal es el que se encuentra en mayor cantidad en la roca (reconocido de forma visual), esta unificación de información se realizó identificando cuidadosamente los tramos comprendidos de las muestras metalúrgicas (soporte) y los tramos de mapeo de mineralización disponibles. Cabe destacar que, en la mayoría de los casos, las muestras metalúrgicas presentan la totalidad del tramo con información de mineralización, sin embargo, existen muestras con parte del tramo no descrita. De esta forma se logró caracterizar la mineralización presente a lo largo de cada una de las muestras, reconociéndose las zonaciones minerales. Se crearon variables auxiliares enfocadas a determinar estas variaciones mineralógicas dentro de las mismas muestras, y otra variable que indica los metros de influencia correspondientes de cada fase mineral mapeada.

Las variables creadas son:

1. Secuencia de mapeo de MIN_HIPO1, MIN_HIPO2 y MIN_HIPO3: da cuenta de la mineralogía de mena principal descrita dentro del tramo de muestra.
2. Metros mapeados: Da cuenta de los metros que involucra cada descripción mineral dentro de las muestras.
3. Porcentaje mapeado: da cuenta del porcentaje de información disponible dentro de la muestra.

TABLA 2.3: RESUMEN DE LAS ZONAS MINERALES PRINCIPALES PRESENTES EN LOS CUERPOS MINERALIZADOS DE LA MINA EL SOLDADO.

| Código de Mineralogía | |
|------------------------|---------------|
| Zonas Minerales | Núcleos Bn-Cc |
| | Núcleos de Bn |
| | Zona Bn-Cpy |
| | Zona Cpy |
| | Zona Cpy-Py |

2.1.2.2 OCURRENCIA MINERAL

Asimismo, como el caso de la descripción de zona mineral, la ocurrencia mineral se encuentra en la base de datos de sondajes de exploración, por lo cual se realizó el vínculo con esta información para cada una de las 1460 muestras geometalúrgicas de recuperación de cobre. Se logró clasificar la ocurrencia mineral de 410 muestras, siendo las principales categorías diseminado fino (DF), diseminado grueso (DG), masa fundamental (MF), fracturas (FR), guías (GU), núcleos o parche (NP), vetillas finas (VTF), vetillas gruesas (VTG), stockwork (ST) y Relleno (RE). El procedimiento de vincular la información es análogo para el caso de la litología, utilizándose la ubicación espacial de la muestra y el sondaje asociado (from-to de la muestra según el sondaje al que pertenece).

Se tienen 258 muestras con información única de clasificación de ocurrencia, es decir que todo el tramo de muestra presenta la misma clasificación de ocurrencia mineral y 152 con interacción de varias texturas y ocurrencias minerales del cuerpo mineralizado.

TABLA 2.4: TABLA RESUMEN DE LAS OCURRENCIAS MINERALES PRESENTES EN EL SOLDADO.

| Categoría | Código de Ocurrencia | Ocurrencia Mineral | Nº Muestras |
|-----------------------------|-----------------------------|---|--------------------|
| Ocurrencia única | DF | Diseminado Fino | 136 |
| | DG | Diseminado Grueso | 60 |
| | MF | Masa Fundamental | 17 |
| | FR | Fractura | 2 |
| | GU | Guías (traza) | 4 |
| | NP | Núcleo o Parche | 12 |
| | VTF y VTG | Vetillas Finas y Gruesas | 27 |
| Ocurrencia Compuesta | - | Muestras que involucran variaciones laterales en la ocurrencia de las fases minerales de mena | 152 |
| Total | | | 410 |

2.1.2.3 MINERALIZACIÓN Y OCURRENCIA EN LITOLOGÍAS

Se logró reconocer la información de mineralización y ocurrencia mineral según las litologías principales presentes en el yacimiento, entre ellas Andesita Lo Prado, Riodacita Lo Prado, Toba Lo Prado, Sedimentario Lo Prado y Veta Negra. Esta información es útil para poder reconocer la morfología y zonaciones minerales de los cuerpos mineralizados. A continuación, se presenta una tabla resumen de la cantidad de muestras por litología.

TABLA 2.5: TABLA RESUMEN DE MUESTRAS CON CLASIFICACIÓN DE MINERALIZACIÓN Y OCURRENCIA EN LAS LITOLOGÍAS PRINCIPALES DEL YACIMIENTO. SE EXPRESA LA CANTIDAD DE MUESTRAS CON INFORMACIÓN NUMÉRICA.

| Litología | Nº muestras con Mineralización | Nº muestras con Ocurrencia | Nº Muestras con QEMSCAN |
|------------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Andesita LP | 79 | 72 | 36 |
| Riodacita LP | 111 | 105 | 59 |
| Toba LP | 92 | 63 | 38 |
| Sedimentario LP | 89 | 16 | 7 |
| Veta Negra | 39 | 39 | 14 |
| Total | 410 | 295 | 154 |

2.1.2.4 MINERALIZACIÓN Y OCURRENCIA EN ANDESITA LO PRADO

Una de las litologías más importantes corresponde a la estratificación volcánica de Andesitas Lo Prado, la mineralización en este tipo de rocas es característica y presenta una zonificación mineralógica detallada de sus cuerpos mineralizados, motivo por el cual se procedió a caracterizar la morfología de este tipo de cuerpos alojados en las andesitas de la mina. A continuación, se presenta una tabla resumen que caracteriza las zonas minerales de los cuerpos en andesita y de las variaciones texturales y de ocurrencia dentro de los mismos, enfatizando la cantidad de muestras disponibles. Posteriormente en la sección de resultados se caracterizan geo-metalúrgicamente estas zonas minerales.

TABLA 2.6: RESUMEN CARACTERIZACIÓN DE ZONAS MINERALES Y OCURRENCIAS DENTRE DE LOS CUERPOS MINERALIZADOS EN LA ANDESITA LO PRADO.

| Litología | Mineralización | Ocurrencia | Nº Muestras | Nº Muestras con QEMSCAN |
|--------------------------|---------------------|------------|-------------|-------------------------|
| Andesita Lo Prado | Bornita-Calcosina | MF-DG | 4 | 1 |
| | | DF | 5 | 5 |
| | | NP | 3 | 3 |
| | Bornita | MF | 7 | 3 |
| | | DF | 2 | 0 |
| | | DG | 2 | 2 |
| | | MF+DG | 3 | 2 |
| | Calcopirita-Bornita | DF | 7 | 4 |
| | | NP | 3 | 0 |
| | | VTF+VTG | 5 | 5 |
| | Calcopirita | DF | 10 | 3 |
| | | DG | 5 | 5 |
| | | DF+VTF | 3 | 2 |
| | Calcopirita-Pirita | - | 4 | 1 |
| Excluidas | - | 9 | 0 | |
| Total | | | 72 | 36 |

Se han excluido muestras por no ser representativas de la caracterización mineral, pues presentan un tramo mineralizado muy pequeño comparado con el tramo de muestra, se ve reflejado en las bajas leyes, esto se debe principalmente al efecto de soporte. También se han excluido las muestras con un Factor K muy superior a 14.4.

2.1.3 ALTERACIÓN

Con el propósito de asociar e identificar la alteración presente en las muestras se realizó el mismo procedimiento anterior, se identificó el tramo de muestra y se recopiló la descripción asociada, luego se crearon variables auxiliares que permiten saber qué parte de la muestra presenta información útil y si existen variaciones laterales en la alteración.

Se logró asociar una descripción de alteración a 590 muestras de la base de datos. Dentro de los minerales de alteración principales reconocidos en la mina El Soldado se tienen Albita, Bitumen, Calcita, Clorita, Feldespato K, Hematita, Jarosita, Limonitas, Sericita y Sílice. A continuación, se presenta la tabla 2.7 que resume la cantidad de muestras con una alteración específica y el total de muestras con alteración compuesta.

TABLA 2.7: RESUMEN DE LAS ALTERACIONES PRESENTES EN EL YACIMIENTO EL SOLDADO.

| Categoría | Alteración | Nº Muestras |
|-----------------------------|--------------|-------------|
| Alteración Única | Albita | 18 |
| | Bitumen | 1 |
| | Calcita | 45 |
| | Clorita | 192 |
| | Feldespato K | 39 |
| | Hematita | 32 |
| | Jarosita | 2 |
| | Limonitas | 1 |
| | Sericita | 4 |
| | Sílice | 71 |
| Alteración Compuesta | - | 185 |
| Total | | 590 |

Se clasificó como alteración de la muestra la que se encuentra de forma mayoritaria y descrita como principal en la categoría Alteracion1, sin embargo, se reconoce que la alteración presente en las muestras no es única, coexisten al menos 2 alteraciones distintas como se puede observar en el detalle de la información disponible, definidas en las categorías ALT2 y ALT3. Como también existen variaciones laterales de la alteración, donde hay muestras que incluyen más de una alteración principal descrita a lo largo del tramo de muestra, las cuales fueron clasificadas como alteración compuesta.

2.1.4 ESTRUCTURAS

El trabajo realizado con la información estructural se basa en identificar muestras en torno a sistemas estructurales específicos, para poder determinar comportamientos de la variable recuperación de cobre en torno a las fallas principales. La mina El Soldado presenta más de 100 fallas mapeadas y caracterizadas, sin embargo, las fallas más importantes y consideradas como mineralizadoras son 17 y se presentan en la tabla 5.1 de este informe. Durante este año se realizó una actualización de la información estructural de la mina, identificando cada estructura presente en la información descriptiva de sondajes y caracterizándolas con el sistema estructural al que pertenecen. De esta forma se realizaron dos metodologías, primero, una incorporación de esta nueva información descriptiva que reconoce si una muestra geometalúrgica recae sobre alguna estructura según el mapeo de sondajes y además identifica a que falla corresponde. Y, por otro lado, se creó una variable auxiliar con el software Leapfrog que determina la distancia entre las muestras y las fallas principales antes mencionadas. De esta forma, se tiene una variable numérica que permite identificar patrones de la recuperación de cobre frente a las principales fallas mineralizadoras del yacimiento. A continuación, se presenta una tabla resumen con la cantidad de muestras asociadas a las fallas principales:

TABLA 2.8: TABLA RESUMEN DE LAS MUESTRAS GEOMETALURGICAS CON INFORMACIÓN ESTRUCTURAL.

| Estructura | Zona de influencia [m] | Muestras que recaen en la traza de la estructura | Muestras dentro de la zona de influencia |
|---------------------------|-------------------------------|---|---|
| San José 16 | 45 | 1 | 49 |
| Adelita | 50 | 0 | - |
| Adela | 50 | 0 | 119 |
| Isabel 50 | 40 | 0 | 43 |
| Isabel 38 | 27 | 0 | 33 |
| Isabel 12 | 50 | 1 | 289 |
| California | 50 | 9 | 265 |
| Arauco 103 | 45 | 1 | 14 |
| Arauco 105 | 45 | 8 | 228 |
| Arauco 101 | 50 | 0 | 0 |
| Noroeste 111 | 50 | 0 | - |
| Isabel 1 | 50 | 0 | 65 |
| Isabel 6 Norte | 50 | 0 | - |
| Isabel 6 Sur | 50 | 0 | - |
| Isabel 4 | 50 | 3 | 240 |
| Christine 2 Rama 1 | 50 | 0 | 35 |
| Christine 2 | 50 | 2 | 57 |

2.2 DEPURACIÓN DE LA BASE DE DATOS

Esta sección es enfocada principalmente a corregir errores de tipeo en la base de datos. Los errores principales encontrados fueron errores en la digitación de los sondajes y en la ubicación espacial de las muestras.

Se corroboró además la ley de cada una de las muestras en función de la ley química de sondajes.

Para validar la posición de las muestras se realizó seguimiento a cada una de las muestras y se comparó la ley entregada por el ensayo de flotación y la ley de assay de cada tramo de sondaje asociado, como la ley es una variable aditiva se calculó el promedio simple de los tramos que comprende la muestra geometalúrgica.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN QEMSCAN

Se tiene una detallada información QEMSCAN que involucra mineralogía modal de cada una de las muestras, asociaciones mineralógicas bimodales, información de análisis de partículas, entre ellas grados de liberación por especie mineral, y las texturas asociadas a nivel microscópico (partículas ocluidas, partículas con contactos laterales, totalmente liberadas, entre otras) e información granulométrica por fases minerales.

Se ha recopilado información QEMSCAN correspondiente a 385 muestras geometalúrgicas.

Fue necesario revisar la información QEMSCAN disponible para definir los parámetros útiles según el enfoque de esta memoria, a continuación, se mencionan las variables más representativas que se utilizaron en el contexto de este trabajo:

- Mineralogía modal
- Asociaciones Minerales
- Liberación de Cpy
- Liberación de Bn
- Liberación de Cc
- Liberación de Cv
- Liberación mineral, se intenta correlacionar esta información con la recuperación de cobre, la ocurrencia mineral y la textura.

Cada parámetro se describe en detalle en la sección 5.1.4 de este trabajo.

2.4 CARACTERIZACIÓN DE CUERPOS MINERALIZADOS

Los cuerpos mineralizados de la mina El Soldado son diversos en geometría, morfología, en textura y fases minerales presentes. Se intenta realizar una caracterización mineralógica y textural a lo largo de estos según los siguientes criterios:

- Identificación de las fases mineralógicas de mena y las ocurrencias principales, en base a la información descrita en la sección 2.1.2 de este informe. Esto consiste en caracterizar la variación lateral de la mineralogía de mena de un tramo de sondaje que corresponda a una zona mineralizada y que presente muestras geometalúrgicas de recuperación por flotación, considerando la continuidad espacial.
- Caracterizar geo-metalúrgicamente las zonas minerales de un cuerpo mineralizado en función de la textura, ocurrencia, grado de liberación y recuperación de cobre.
- Dar una cuantificación de la variación espacial de la recuperación en los distintos cuerpos mineralizados.
- Mencionar la ubicación espacial del cuerpo mineralizado descrito y los bancos que involucra en la mina y cómo se relaciona con la metalurgia de Corto Plazo.

2.5 SELECCIÓN DE MUESTRAS PARA ENSAYO DE RECUPERACIÓN POR FLOTACIÓN

Se seleccionó un total de 15 muestras para someterlas a un ensayo de recuperación rougher (descripción en sección 4.11), estas involucran un cuerpo mineralizado específico del yacimiento, descrito en la sección 6.6, los criterios de selección de muestras están directamente relacionados con las características de un cuerpo mineralizado, descrito en la sección 2.4. De forma general, estos criterios se basan en que cada muestra debe acotarse a representar características geológicas específicas, como, por ejemplo, que determinen una asociación mineral específica, un halo de alteración detallado, y/o zonaciones texturales determinadas. En la mayoría de los casos estas variables geológicas están intrínsecamente mezcladas e interrelacionadas, lo que perturba el análisis del comportamiento mineral, sin embargo, en la toma de muestra se precisó acotar estas variables para medir directamente el efecto de esa característica.

Las muestras fueron seleccionadas de sondajes diamantina, provenientes de la testigoteca de El Soldado, involucrando sondajes de dimensiones NQ (47.6 cm de diámetro) y HQ (63.5cm).

2.5.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MUESTRAS

La selección de muestras se realizó considerando la hipótesis planteada en esta memoria, y propuesta por Lund, C. (2013) de que materiales con características geológicas similares deben presentar el mismo comportamiento metalúrgico, por lo cual se realizó una descripción geológica detallada de la roca, que involucra propiedades geológicas macroscópicas, como los son las fases mineralógicas de mena presentes y la textura involucrada, la ocurrencia mineral, los minerales de alteración presentes, tipo de roca y litología involucrada, y la presencia de estructuras en la roca. Esta información definió el tamaño de la muestra, con el objetivo de representar el comportamiento de estos parámetros geológicos de interés, descritos en la sección 2.4.

Cecilia Lund y otros autores, en sus investigaciones dan énfasis a las características texturales y fases mineralógicas presentes para definir arquetipos que presentan comportamientos metalúrgicos determinados, criterio que también fue utilizado en esta memoria para seleccionar las muestras, se logró determinar que el cuerpo mineralizado a muestrear presenta zonaciones minerales y texturales bien definidas, por lo que las muestras se acotaron a ello. Introduciendo la caracterización geológica, éste presenta un núcleo de Bn y zonación Bn-Cpy y Cpy-Py hacia los bordes, y con variaciones texturales del núcleo hacia el exterior, siendo intensamente diseminado fino al interior y disminuyendo en intensidad y ley visual hacia los bordes, como también aumentando la granulometría de los granos minerales (principalmente Cpy diseminada gruesa).

2.6 SELECCIÓN DE MUESTRAS PARA CORTES TRANSPARENTES

La selección del tramo dónde se realiza el corte debe ser representativo de la muestra geometalúrgica. Se tomaron 15 muestras para realizar cortes transparentes, lo que quedará pendiente para trabajos posteriores a esta memoria, con la finalidad de caracterizar la textura de las zonas minerales que forman el cuerpo mineralizado estudiado. La selección de las muestra para corte se enfocó en los siguientes criterios:

- Debe ser representativa de la ocurrencia y zona mineral presente, por lo que se define cuidadosamente la posición dentro del tramo de muestra.
- Debe caracterizar la litología del tramo, por lo que se evita tomar el corte en una zona de falla donde la roca pueda estar muy obliterada.
- Debe tomarse en una zona mineralizada, reconociendo claramente el mineral que caracteriza dicha zona.

3. MARCO GEOLÓGICO

El yacimiento El Soldado se ubica en la Cordillera de la Costa de los Andes Centrales como se observa en la figura 3.1 y está emplazado entre el miembro superior de la Fm. Lo Prado y el miembro inferior de la Fm. Veta Negra, trascendiendo una diversidad de litologías, y ha sido caracterizado como “stratabound ore deposit” que alude a estar acotado a un horizonte estratigráfico específico, correspondiente a las formaciones anteriormente mencionadas (Boric, R. et al., 2002). Sin embargo, en un sentido local, los cuerpos mineralizados son discordantes atravesando las intercalaciones volcano-sedimentarias. El depósito pertenece a la franja metalogénica del Cretácico Inferior definida por MaksaeV, 2002 y es clasificado de edad Liasic-Albiana (Cretácico Inferior) según Fontobé (1990) y con una edad promedio de 103 ± 3 Ma según Boric, R. et al., 2002 con mediciones en Ar-Ar.

Existen un número acotado de trabajos realizados sobre el yacimiento El soldado, entre ellos los principales son de R. Boric et al. (2002) y C. Holgrem et al. (1987) que detallan muy bien la geología del yacimiento y plantean un modelo genético para el mismo.

Las litologías involucradas corresponden a secuencias estratificadas de rocas volcánicas variando entre andesitas basálticas, andesitas y riolacitas, con presencia de intercalaciones sedimentarias continentales y tobas con variaciones composicionales y texturales para la parte superior del miembro superior de la Fm. Lo Prado y la Fm. Veta Negra y la presencia de una secuencia potente de rocas sedimentarias marinas estratificadas correspondiente a intercalaciones de areniscas finas y lutitas con variaciones composicionales y granulométricas. La estratigrafía presenta rumbo NS y un manteo de 30° al Este, siendo cortada por una diversidad de estructuras locales con orientación NS y variando entre NNW y NNE que responden al margen compresivo de la época.

El control estructural de la mineralización es notable y se reconoce como el factor principal que permitió el ascenso de los fluidos hidrotermales (magmáticos) dando origen a la mineralización de cobre (Holgrem, C. et al., 1987). El modelo metalogénico más aceptado para el yacimiento es el de origen magmático-hidrotermal, ya que se han encontrado evidencias de metamorfismo previo a la mineralización, (según análisis de las texturas de los minerales sulfurados de cobre) pudiendo descartar el origen a través de fluidos metamórficos.

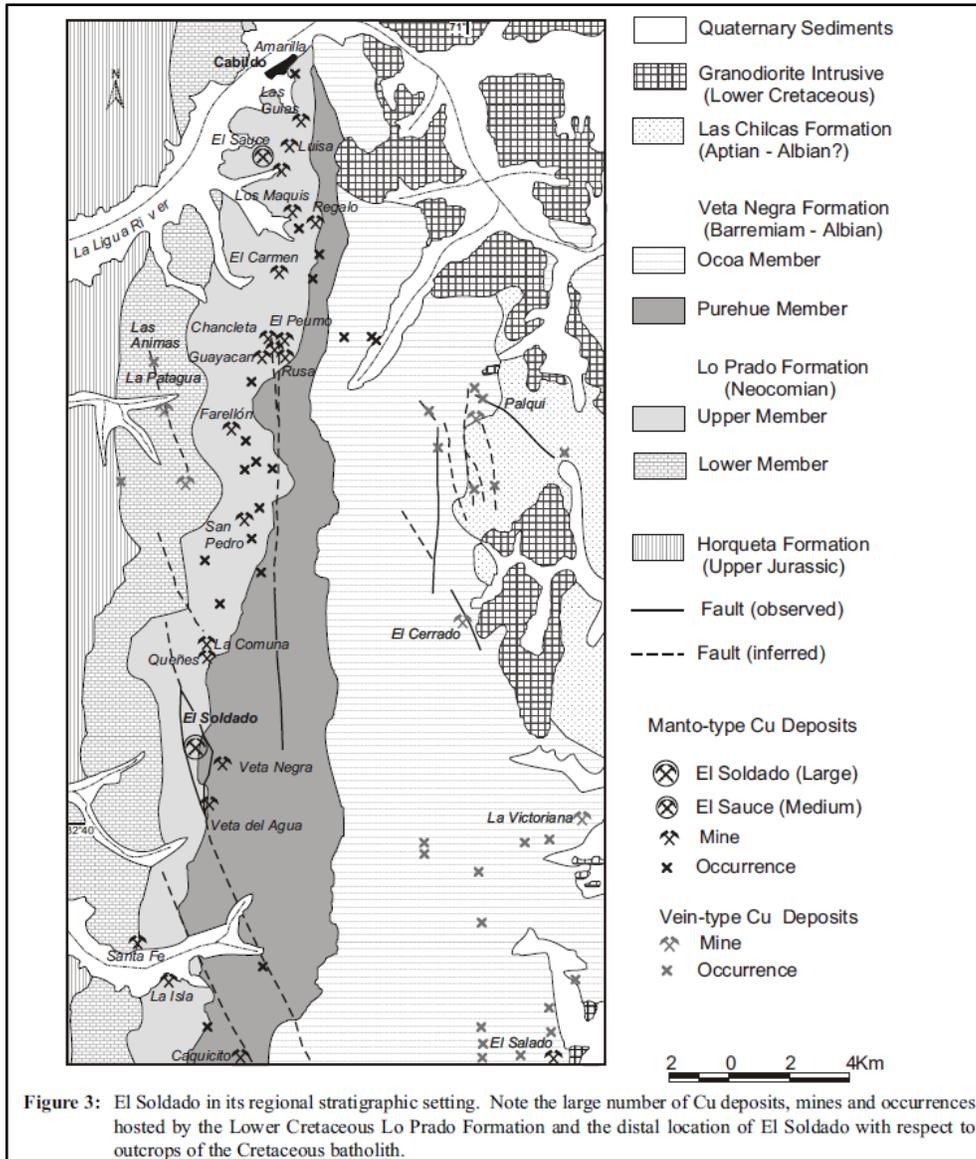


Figure 3: El Soldado in its regional stratigraphic setting. Note the large number of Cu deposits, mines and occurrences hosted by the Lower Cretaceous Lo Prado Formation and the distal location of El Soldado with respect to outcrops of the Cretaceous batholith.

FIGURA 3.1: FIGURA 3 DEL TRABAJO DE BORIC, R. ET AL., 2002. REPRESENTA LA CONFIGURACIÓN GEOLÓGICA REGIONAL, ILUSTRANDO LA UBICACIÓN DEL YACIMIENTO EL SOLDADO.

3.1 TIPO DE DEPÓSITO

El Soldado se encuentra en el limbo entre ser un depósito estratoligado y no serlo, de acuerdo con la definición de este tipo de yacimiento (Fontobé, 1990). Los yacimientos son clasificados de acuerdo con el tipo y distribución de la mineralización que presentan, donde El Soldado presenta mineralización de sulfuros de cobre diseminado fino y grueso, vetillas y vetas, brechas hidrotermales y en núcleos o parches. Los límites de las zonas mineralizadas corresponden a bordes rectos en torno a la ley (Boric et al., 2002) pasando de leyes sobre 2% a zonas completamente estériles (0.15% Cu, medias en soportes de 2 y 3 metros) lo que permite considerar los cuerpos mineralizados como depósitos acotados diferentes entre sí, pudiendo ser elongados en torno a un estrato específico, como discordantes a la estratigrafía.

3.1.1 MANTO TYPE OR STRATABOUND ORE DEPOSIT

Este concepto de “Manto Type” fue introducido inicialmente por Ruiz et al., 1965 y Camus, 1990. Los depósitos estrictamente estratoligados están acotados a una unidad estratificada definida (Glosario de Geología, 1980, Fontobé, L. (1990)) y presentan una morfología estratiforme alargándose a través del paquete estratigráfico, que en el caso de El Soldado podrían corresponder a los cuerpos de riodacitas o traquitas, sin embargo, esta anisotropía no representa la totalidad de los cuerpos de mena, donde existe una diversidad de cuerpos mineralizados acotados discordantes entre las intercalaciones volcánicas y sedimentarias y con morfología concéntrica en torno a la estructura principal.

Fontobé (1990) introduce la idea de clasificar los depósitos estratoligados según los procesos genéticos, edad de formación, posición y tipo de roca encajante acorde al ambiente geotectónico en que se emplaza. Con este concepto en mente se clasifica al depósito de El Soldado como estratoligado e incluido dentro del cinturón de depósitos estratoligados de cobre de Chile Central debido a estar emplazado en rocas del cretácico inferior (Klohn, E., et al. 1990).

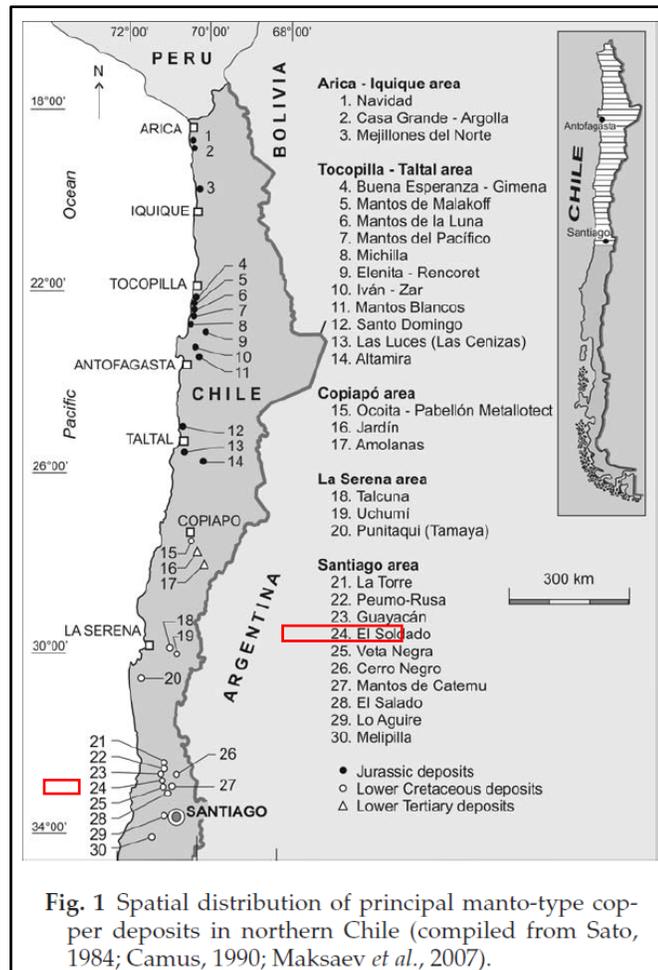


FIGURA 3.2. MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEPÓSITOS ESTRATOLIGADOS TIPO MANTOS EN LA ZONA CENTRO-NORTE DE CHILE, CON EL N° 24 SE REPRESENTA EL YACIMIENTO EL SOLDADO. FIGURA OBTENIDA DE KOJIMA, S. ET AL. (2009), CORRESPONDE A LA FIG 1.

3.2 CONFIGURACIÓN GEOLÓGICA REGIONAL

3.2.1 ESTRATIGRAFÍA

3.2.1.1 FORMACIÓN LO PRADO

La Formación Lo Prado ha sido descrita por Rivano *et al.*, 1993, describiendo en detalle las unidades estratigráficas que la conforman y sus variaciones laterales. Esta formación presenta un espesor aproximado de 3000 m.

Dentro de las litologías principales se encuentran rocas sedimentarias marinas, entre ellas calcilitas negras, fétidas y fosilíferas intercaladas entre niveles macizos de calcarenitas grises; consta, además, de niveles de brechas y conglomerados, generalmente oligomícticos con frecuentes intraclastos calcáreos. Aparecen también importantes intercalaciones de niveles volcánicos de

andesitas afaníticas y porfídicas, algunos de los cuales llegan a ser ocoíticos, con niveles superiores de carácter brechoso (Boyce, D. 2015).

Se han definido edades para esta formación, por un lado, la presencia de varios niveles fosilíferos indican una edad berrasiana a valanginiana tardía (Rivano et al., 1993). Por otro lado, Boric y Munizaga (1994) obtuvieron una edad Ar-Ar en plagioclasa de una lava de esta formación de $131,8 \pm 3,1$ Ma, mientras Morata et al. (2006) obtuvieron edades Ar-Ar en plagioclasa de alrededor de 120 Ma en los niveles superiores de esta. Todo esto indicaría que su edad sería berrasiana a barremiana.

3.2.1.2 FORMACIÓN VETA NEGRA

Esta Formación se compone de dos miembros, el miembro inferior Pehue y el miembro superior Ocoa, definidos por Thomas, 1958. El Miembro Pehue se compone principalmente por lavas andesíticas, fuertemente brechosas y/o vesiculares de colores púrpura a gris pardo, y algunas intercalaciones sedimentarias de color rojo que corresponden normalmente a areniscas, conglomerados y brechas. El Miembro Ocoa está constituido casi exclusivamente por rocas andesíticas que se caracterizan por presentar una textura porfídica gruesa, definida por fenocristales de plagioclasa que alcanzan en ocasiones más de 2 cm de largo, y una masa microcristalina muy fina (Boyce, D. 2015).

El espesor de la Fm. Veta Negra es variable, abarcando entre 4000 m y 5000 m, por un lado, el espesor del Miembro Pehue varía entre 350 m y 2000 m, en cambio, el Miembro Ocoa tiene espesores variables de entre 2500 m y 3000 m. Esta formación sobreyace concordantemente a la Formación Lo Prado.

Rivano et al. (1993) definen una edad pre-barremiana para la Formación Veta Negra, sobre la base de relaciones estratigráficas y de dataciones K-Ar de entre 94 y 115 Ma. Por otro lado, dataciones Ar-Ar realizadas en plagioclasas frescas de lavas del Miembro Ocoa por Aguirre et al. (1999) y Fuentes et al. (2005) entregaron edades de $119 \pm 1,2$ Ma y $118,7 \pm 0,6$ Ma, respectivamente, lo que llevaría a la Formación Veta Negra al menos hasta el Aptiano medio. Por lo que su edad sería barremiana– aptiana (Boyce, D. 2015).

3.2.2 ESTRUCTURAS REGIONALES

Como rasgo estructural principal a nivel regional en la Cordillera de Costa de Chile Central se presenta un homoclinal con basculamiento hacia el Este que involucra toda la secuencia mesozoica, con buzamientos variables desde 40 y 50° en la parte occidental y disminuyendo hacia el Este (Boyce, D. 2015, obtenido de Rivano et al., 1993). A nivel de yacimiento, el basculamiento de los estratos en la Mina El Soldado presentan una inclinación de 30° manteniendo hacia el Este (Boric, R. et al., 2002).

A nivel regional y entre los 32 y 35° de latitud Sur en Chile Central se presenta el Megakink del Maipo con estructuras subsidiarias de orientación NW-SE que cortan las unidades jurásicas y cretácicas. Otro rasgo estructural importante es la zona de contacto estratigráfico entre la Fm. Lo Prado y la Fm. Veta Negra, que representa un plano de debilidad favorable para el emplazamiento de los cuerpos mineralizados, donde en la zona de estudio este contacto se dispone con orientación N – S y NNW – SSE coincidiendo con los controles estructurales de la mineralización dentro del yacimiento (Gropper, J., 2011).

Como se anticipa en el párrafo anterior, en el yacimiento El Soldado se reconocen fallas mayores con orientaciones N – S y NNW – SSE con desplazamiento normal y componente de cizalle sinistral, con manteo de 60° al Oeste a subvertical. Y fallas secundarias con orientación NW – SE y NE – SW. La configuración estructural del yacimiento con una forma de “cymoid loop structures”, permite asociarlo a un sistema de cuña sinistral en respuesta al dominio dominio transtensional, con un esfuerzo deformativo principal en el eje NNW (Boric, R., et al., 2002).

3.3 GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO

3.3.1 LITOLOGÍA

La mina El Soldado presenta información descriptiva de las litologías involucradas en el yacimiento y que se encuentran mineralizadas, estas corresponden a rocas sedimentarias, volcánicas, intrusivas y piroclásticas. La información corresponde a campañas de descripción de sondajes. Existe un documento guía para la descripción geológica de sondajes, en donde se describen las litologías principales y sus modos de ocurrencia de forma generalizada. A continuación, se enuncian cada una de ellas, según se describen en el documento antes mencionado:

3.3.1.1 UNIDADES SEDIMENTARIAS LO PRADO Y VETA NEGRA

Areniscas: Son de color gris claro o pardo rojizo si existe la presencia de óxidos de hierro en matriz o cemento. Generalmente son de grano fino a medio y están bien estratificadas. La mineralización ocurre en guías y diseminada.

Areniscas calcáreas: Son de color negro, el cual puede deberse a la presencia de material orgánico. El tamaño de grano es fino a medio. Frecuentemente, están afectadas por un intenso vetilleo de calcita y la mineralización ocurre diseminada y en vetillas finas.

Areniscas Tobácea: Son de color gris a gris blanquecino, usualmente con laminación fina y bien estratificadas. Los granos son finos a medios, con algunos clastos mayores de traquitas o andesitas. La mineralización ocurre principalmente en guías y diseminada.

TABLA 3.1: TABLA RESUMEN DE LAS LITOLOGÍAS SEDIMENTARIAS PRESENTES EN EL YACIMIENTO EL SOLDADO, INVOLUCRANDO A LA FM. LOPRADO Y LA FM. VETA NEGRA

| Formación | Grupo litológico | Nombre Roca | Abreviatura Roca |
|--------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------|
| Lo Prado Superior | Sedimentos LP | Sedimentos indiferenciados LP | SEDIND |
| | | Arenisca LP | SD |
| | | Lutita, limolita LP | SH |
| | | Caliza LP | LM |
| | | Calcarenita, Arenisca calcárea LP | CALN |
| | | Brecha Sedimentaria LP | BXSED |
| | | Conglomerado LP | CONG |
| Veta Negra | Sedimentos VN | Arenisca VN | SDVN |
| | | Lutita, Limolita VN | SHVN |
| | | Brecha sedimentaria VN | BXSEDVN |
| | | Sedimentos indiferenciados VN | SEDVN |

3.3.1.2 UNIDADES VOLCÁNICAS LO PRADO Y VETA NEGRA

Las rocas que alojan el yacimiento corresponden principalmente a lavas andesíticas y traquíticas, presentándose en estos grupos las siguientes unidades:

Andesitas: Rocas de color gris oscuro a verde, típicamente masivas, porfíricas, amigdaloidales y brechosas. Los fenocristales consisten en plagioclasas zonadas, piroxeno y olivino. La masa fundamental presenta microlitos de plagioclasa, piroxeno y vidrio. Las amígdalas y vetillas están rellenas por calcita, epidota, clorita, microclina, albita, bitumen y sulfuros.

Traquitas: Rocas de color rosado, gris a verde claro, producto de metasomatismo sódico. Hospedan la mayor parte de la mena. Son típicamente porfíricas y bandeadas. Localmente son

vesiculares, brechosas o contienen xenolitos de rocas oscuras de grano fino. Las amígdalas y vetillas están rellenas con calcita, cuarzo, bitumen y sulfuros. La masa fundamental está compuesta de microlitos de albita, feldespato potásico de grano fino, menor cuarzo, pirita y vidrio. La pirita es muy común como mineral secundario en las traquitas inalteradas. Esta ocurre como pequeños cristales diseminados en la masa fundamental, incluidas en fenocristales de albita o reemplazando minerales ferromagnesianos.

Traquitas brechosas: Son de color gris claro verdoso, con tintes rosados producto de la alteración sódica, frecuentemente mineralizadas, bandeadas, con amígdalas rellenas por calcita, Sericita y clorita. La matriz es porfírica y localmente esferulítica. El aspecto brechoso es producido por un intenso vetilleo irregular de calcita, sílice y clorita, calcopirita y pirita hacia los bordes de las vetillas. Localmente se observa hematita, calcita y trazas de bitumen en la matriz.

Andesitas brechosas: Son de color pardo a rojizo por hematización fina en la matriz, porfíricas, amigdaloidales y brechosas debido a intenso vetilleo de calcita, clorita, epidota, feldespato potásico, albita, sílice, calcopirita y pirita. Localmente presentan intercalaciones de niveles arenosos o tobáceos y, pueden o no, presentar magnetismo.

TABLA 3.2: TABLA RESUMEN DE LAS LITOLÓGÍAS VOLCÁNICAS PRESENTES EN EL YACIMIENTO EL SOLDADO, INVOLUCRANDO A LA FM. LOPRADO Y LA FM. VETA NEGRA.

| Formación | Grupo litológico | Nombre Roca | Abreviatura Roca |
|---------------------|------------------|-----------------------------|------------------|
| Lo Prado Sup | Traquita LP | Traquita indiferenciada LP | TRQIND |
| | | Traquita LP | TRQ |
| | | Traquita brechosa LP | BXTRQ |
| | | Traqui-Andesita LP | TA |
| | | Traqui-Andesita brechosa LP | BXTA |
| | Andesita LP | Traqui-Andesita LP | TA |
| | | Traqui-Andesita brechosa LP | BXTA |
| | | Andesita indiferenciada LP | ANDIND |
| | | Andesita LP | AND |
| | | Andesita brechosa LP | BXAND |
| Veta Negra | Andesitas VN | Traqui-Andesita VN | TAVN |
| | | Traqui-Andesita brechosa VN | BXTAVN |
| | | Andesita VN | ANDVN |
| | | Andesita brechosa VN | BXANDVN |
| | | Ocoíta | OCVN |
| | Traquitas VN | Traquita VN | TRQVN |
| | | Traquita brechosa VN | BXTRQVN |
| | | Traqui-andesita VN | TAVN |
| | | Traqui-andesita brechosa VN | BXTAVN |

3.3.1.3 UNIDADES PIROCLÁSTICAS LO PRADO Y VETA NEGRA

Se presentan intercaladas con rocas volcánicas y sedimentarias, o engranando lateralmente con rocas extrusivas de su misma composición. Entre las principales rocas piroclásticas se describen las siguientes:

Tobas: Son de color gris a verde oscuro, inequigranulares, polimícticas, generalmente bien estratificadas, de matriz fina, con fragmentos líticos y de cristales, epi o piroclásticas y parcialmente mineralizadas. La matriz es verdosa y presenta bandeamiento. Los clastos son generalmente angulosos, tamaño lapilli, de composición de traquítica, andesítica o de rocas sedimentarias. Localmente puede observarse la matriz color verde rojiza por presencia de hematita. Es frecuente la diseminación de piritita en la matriz. Pueden incluir niveles arenosos intercalados.

Tobas Brechosas: Son de color verde a gris verdoso, con estratificación gruesa, clastos orientados en el sentido de la estratificación general y de composiciones andesíticas y traquíticas. Los clastos son angulosos de hasta 10 cm de largo y presentan una selección buena a regular. La matriz tobácea se encuentra cloritizada y está compuesta por fragmentos líticos, cristales de cuarzo y plagioclasas. El cemento lo componen clorita, calcita, albita, cuarzo, arcilla y vidrio volcánico.

TABLA 3.3: TABLA RESUMEN DE LAS LITOLOGÍAS PIROCLÁSTICAS PRESENTES EN EL YACIMIENTO EL SOLDADO, INVOLUCRANDO A LA FM. LOPRADO Y LA FM. VETA NEGRA.

| Formación | Grupo litológico | Nombre Roca | Abreviatura Roca |
|--------------|------------------|------------------------------------|------------------|
| Lo Prado Sup | Tobas LP | Toba indiferenciada LP | TUFIND |
| | | Toba LP | TUF |
| | | Toba brechosa LP | BXTUF |
| Veta Negra | Tobas VN | Toba VN | TUFVN |
| | | Toba brechosa VN | BXTUFVN |
| | | Brecha volcánica indiferenciada VN | BXVVN |
| | | Aglomerado volcánico VN | AGLVVN |

3.3.1.4 UNIDADES INTRUSIVAS LO PRADO Y VETA NEGRA

En el yacimiento existen numerosos filones o diques de composición andesítica y traquítica que intruyen a las unidades estratificadas. Estos cuerpos subvolcánicos corresponden, en algunos casos, a ductos alimentadores de las rocas extrusivas (feeders).

Diques traquíticos (“feeders”): Son rosados a gris claro y localmente presentan bandeamiento. Tienen textura porfídica, con un 8-25% de fenocristales principalmente de albita, normalmente agrupados en cúmulos. La masa fundamental está constituida principalmente por feldespato potásico y plagioclasas, con cantidades subordinadas de sílice y vidrio. Constituyen un control estructural para la mineralización.

Diques andesíticos: Tienen textura porfídica, con 45% de fenocristales constituidos por plagioclasa y piroxenos. La masa fundamental está formada por microlitos de plagioclasas dispuestos al azar, con piroxenos intersticiales reemplazados a clorita y vidrio. Existe sericita, sílice y pumpellita como minerales secundarios. Generalmente estos diques son estériles y magnéticos.

Diques microdioríticos: Son de colores grises a verde claro con textura sacaroidal. Presentan un alto porcentaje de cristales subhedrales de plagioclasa y tienen entre un 5%-25% de cristales ferromagnesianos (piroxenos) totalmente reemplazados por clorita. También existen cantidades subordinadas de cuarzo y escasa epidota. Estos diques son generalmente estériles y cortan a todas las unidades.

Stock diorítico: De color verde oscuro, grano medio y estéril. Es altamente magnético, de composición similar a las andesitas, con textura porfídica y alterado a epidota clorita y calcita en halos.

TABLA 3.4: TABLA RESUMEN DE LAS LITOLOGÍAS INTRUSIVAS PRESENTES EN EL YACIMIENTO EL SOLDADO, INVOLUCRANDO A LA FM. LOPRADO Y LA FM. VETA NEGRA.

| Formación | Grupo litológico | Nombre Roca | Código Roca |
|---------------------|------------------|---------------------------|-------------|
| Lo Prado Sup | Intrusivo | Dique andesítico | ANDDK |
| | | Dique traquítico (feeder) | TRQDK |
| | | Dique microdiorítico | MDDK |
| | | Diorita | DIOR |
| Veta Negra | Intrusivo | Dique andesítico | ANDDK |
| | | Dique traquítico (feeder) | TRQDK |
| | | Dique microdiorítico | MDDK |
| | | Diorita | DIOR |

3.3.1.5 BRECHAS HIDROTERMALES

Rocas fragmentales monomíticas o polimíticas, con clastos sub-redondeados a angulosos de tamaños milimétricos a centimétricos. La matriz es generalmente calcítica y en ocasiones puede estar mineralizada. Este tipo de brechas tiene poco desarrollo en la Mina El Soldado.

3.3.2 SISTEMAS ESTRUCTURALES Y FALLAS

1. Sistema NS

Las fallas más importantes de sistema son las fallas Adelita, California, Isabel y Arauco. Generalmente, presentan salbanda menor que 15 cm y brechas de falla. En muchos casos

se le asocia mineralización de sulfuros de cobre y hierro, hematita, calcita, arcilla clorita y óxidos de cobre en cantidades variables. Las zonas de falla pueden comprender varios metros de espesor, hasta 10 m.

2. Sistema NE a ENE

A este sistema pertenecen las fallas San José, las cuales presentan brechas de falla y minerales como calcita, hematita, óxidos de cobre, sulfuros de cobre y hierro. La zona de falla puede alcanzar hasta 2 m de espesor.

3. Sistema EW

Las fallas que lo definen se denominan Santa Clara. El relleno está compuesto por brechas de falla, calcita, arcilla, sulfuros y óxidos de cobre. El espesor máximo alcanza a 1,20 m.

4. Sistema NW

A este sistema pertenecen las fallas Christine e Isabel, cuyo relleno está compuesto de calcita y sulfuros de cobre. Los espesores son similares al sistema anterior. Como ayuda a la denominación de éstas, la Tabla VII corresponde a un listado de las principales fallas reconocidas en el Yacimiento.

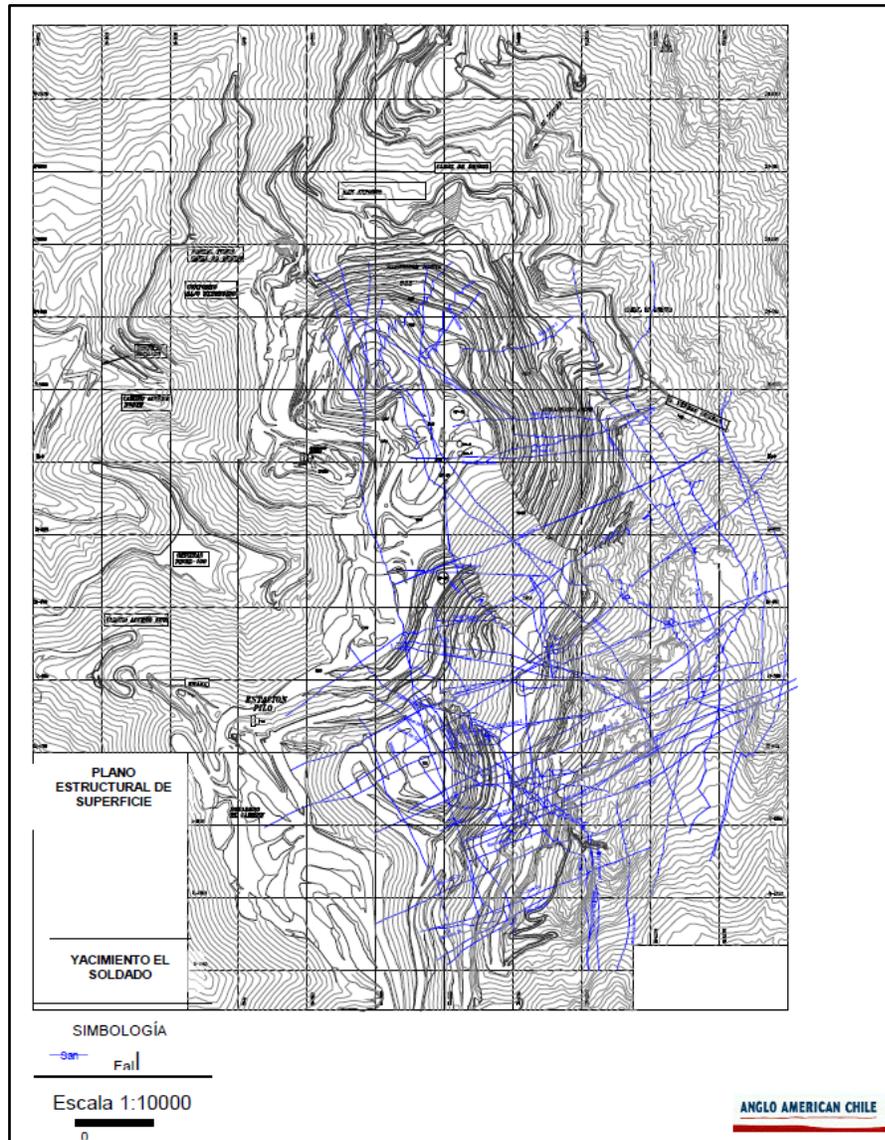


FIGURA 3.3: MAPA EN PLANTA DE LA MINA EL SOLDADO, ILUSTRANDO LAS PRINCIPALES ESTRUCTURAS Y SISTEMAS ESTRUCTURALES PRESENTES.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 GEOESTADÍSTICA

La geoestadística nace cuando se empieza a utilizar herramientas estadísticas para la estimación de recursos y reservas, para realizar un modelo de bloques que caracterice, por ejemplo, la ley mineral de una zona, a través de la ubicación espacial y valor de una muestra. En sí, la estadística clásica asume que los valores de las muestras están aleatoriamente distribuidos en el espacio y que son independientes unos de otros, lo que en muchos casos no refleja confiabilidad en la estimación. Esto se debe principalmente a que no se incluye el control geológico sobre las variables que se quiere estudiar, ni la varianza de las propiedades geológicas dentro de un depósito o cuerpo mineralizado, ignorando la relación espacial de las muestras. De esta forma, nace el concepto de variables regionalizadas para resolver el problema de la continuidad espacial, donde la varianza de las variables regionalizadas asume que el valor representado depende de la ubicación de las muestras. Esto permite obtener un valor cuantitativo que representa la confiabilidad de la estimación (Haldar, S.K. 2018).

Las herramientas que utiliza la geoestadística incluyen análisis de la población de muestras, distribución de probabilidad y frecuencia de la población, histogramas, parámetros estadísticos de la muestra (media, rango, desviación estándar, varianza), como también coeficientes de correlación y ajuste lineal, entre otros.

4.2 BOX SPLOT

La herramienta de gráficos de bigotes y cajas es utilizada en la estadística para representar de forma visual la dispersión y media de la variable analizada, como también los valores extremos. El gráfico consta de la caja central que muestra el 50% de la información distribuida dentro de la caja, corresponde a la información incluida entre el percentil 25 y el 75. Los bigotes corresponden a los datos incluidos en el primer y cuarto cuartil.

4.3 SCATTER PLOT

Las nubes de dispersión o scatter plots son diagramas que grafican dos variables en un gráfico bidimensional XY, que permiten visualizar la interrelación entre las dos variables, ploteando la variable independiente en el eje x y la variable dependiente en el eje y.

4.4 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN

El coeficiente de correlación es una medida cuantitativa de la interrelación entre dos variables, el cual no está influenciado por la unidad de medida de las variables. Este factor corresponde a la razón entre la covarianza de dos variables y el producto de sus desviaciones estándar.

El coeficiente de correlación varía entre +1, valor asociado a una perfecta relación directa, y -1, valor para una perfecta relación inversa, es decir entre variables directamente proporcionales e inversamente proporcionales, pasando a través del cero, el cual indica una nula relación entre las variables.

4.5 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD

La distribución de probabilidad de una variable corresponde al espectro de resultados posibles de una selección aleatoria. La probabilidad es la determinación de lo probable dentro de lo posible. En un sentido aplicado, la probabilidad corresponde a la medida de la posibilidad de que un evento ocurra. Por otro lado, la distribución se asocia a cada posible valor de x de una probabilidad $P(x)$. En estricto rigor, no es posible predecir el valor de la aparición, sin embargo sí se puede medir la probabilidad con la que ocurra.

Los eventos geológicos no son discretos, sino más bien, presentan una cantidad infinita y continua de posibles resultados, como por ejemplo las leyes de Cu, es una variable continua. Sin embargo, el rango que abarca los posibles resultados es finito. De esta forma se busca construir distribuciones de probabilidad que definan la distribución de las muestras, donde dos grupos con distribuciones distintas, corresponden a eventos estadísticamente separables.

La frecuencia de la distribución está determinada por los histogramas.

4.6 GRÁFICOS DE PROBABILIDAD

Un gráfico de probabilidad representa en el eje-x la propabilidad acumulada de las muestras, y en el eje-y los valores de la variable, esto permite conocer la distribución de los datos. Una variable normalmente distribuida reflejará una línea recta en el grafico de probabilidad acumulada, de esta forma, del gráfico se puede obtener el valor de la media, correspondiente al 50% de probabilidad, y el valor de la desviación estándar corresponde a la diferencia entre el 84 y el 50% de probabilidad (Haldar, S.K. 2018).

Con este tipo de gráficos se puede reconocer si una variable presenta una distribución normal o log normal como es el caso de la mayoría de las variables mineralógicas presentes en un

yacimiento. Además, se pueden realizar ajustes a las variables según corresponda para poder identificar la distribución de ellas. En el caso de una variable con distribución log normal, representará una curva en el gráfico de probabilidad normal, por lo tanto si se realiza un ajuste logarítmico, los datos reflejarán ahora una línea recta, de donde se puede obtener la media y la desviación estándar. También en el caso de variables con otro tipo de distribución se puede aplicar una transformación que normalice la distribución de los datos.

4.7 TRANSFORMACIÓN DE VARIABLES

La no linealidad de las variables metalúrgicas es un área estudiada recientemente, donde el comportamiento de ellas no responde a una ponderación lineal simple, las interacciones de las variables geológicas generan un comportamiento no lineal del procesamiento mineral. Los modelos numéricos por lo general están basados en la linealidad de las variables requerido por todos los métodos estadísticos. La estadística tradicional se basa en la linealidad de la media de las variables, lo cual no sucede con las variables metalúrgicas, pero esto se puede resolver con modelos no lineales, involucrando la transformación de las variables a un espacio normal o lineal, donde se ajusta la distribución de probabilidad del espacio muestral de la variable no lineal, donde los valores transformados si responden a una ponderación lineal, y los parámetros estadísticos, como la media se comporta ahora de forma lineal, los valores estimados se pueden volver a transformar para representar coherentemente el valor de la variable.

Se usan distintos métodos de transformación de variables, entre ellos se encuentra la transformación potencial.

4.8 GEOMETALURGIA

La geometalurgia es un área multidisciplinaria que involucra el entendimiento de las características geológicas de la roca, el modelamiento espacial y la respuesta metalúrgica frente al procesamiento mineral, la cual intenta cuantificar la variabilidad espacial de los procesos mineralizadores y atenuar la incertidumbre en el comportamiento de las propiedades metalúrgicas del yacimiento. Como menciona Deutsch, J. L. (2015) la geometalurgia es considerada como un enfoque integrado de las disciplinas antes mencionadas que permite mejorar la eficiencia del proceso de molienda y flotación e incrementar el valor de la mina. El concepto de geometalurgia ha sido definido por diversos autores, entre ellos para referirse a la caracterización de la mineralogía, textura y su entendimiento frente al comportamiento en el procesamiento mineral (Lund, C. et al., 2014), como también para referirse a la caracterización de las propiedades metalúrgicas a pequeña escala (Kuhar et al., 2011), o como un enfoque cuantitativo denominado geometalurgia predictiva, que involucra a geólogos, metalurgistas, ingenieros en minas e

ingenieros en procesamiento mineral, tratando de optimizar el valor de la cadena mineral en base a un entendimiento preciso y cuantitativo de la geología y mineralogía del yacimiento, el procesamiento mineral y la economía del producto final (Van der Boogaart, K. G. y Tolasana-Delgado, R., 2018).

4.9 FLOTACIÓN

El proceso de flotación es utilizado por diversas industrias, entre ellas la industria minera y se denomina “Froth Flotation”. Corresponde a un proceso de separación selectiva de los materiales basándose principalmente en la afinidad de éstos por el agua, materiales hidrofóbicos e hidrofílicos (Crawford, C. B., 2017). El principio de flotación en la minería se basa en el carácter hidrofóbico de los minerales de mena metálica, como por ejemplo los sulfuros de cobre, donde la mineralogía de mena molida a una fracción granulométrica óptima y en presencia de reactivos específicos se vuelve repelente al agua y afín a las burbujas de aire inyectadas (Haldar, S. K., 2018).

El proceso consiste en airear la pulpa que contiene el material de alimentación en conjunto con agua y algunos reactivos específicos, y debido a las propiedades antes mencionadas se logra separar el mineral de interés, adhiriéndose a las burbujas de aire y ascendiendo a la parte superior de la celda de flotación, dejando la ganga en contacto con la fase líquida que decanta al fondo de ésta.

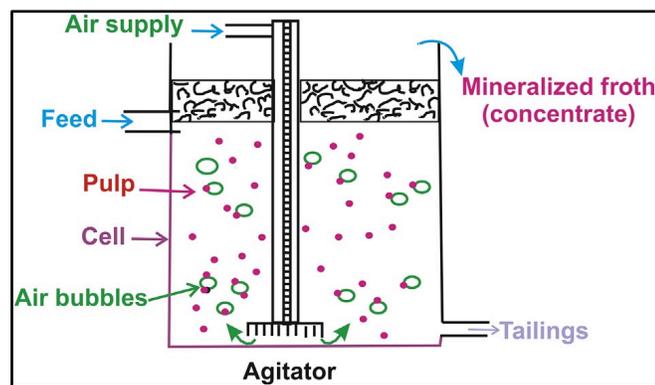


FIGURA 4.1: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO QUE INTENTA REPRESENTAR LOS PRINCIPIOS INVOLUCRADOS EN LA FLOTACIÓN DE LA PULPA Y LA DINÁMICA DE LAS PARTICULAS DENTRO DE LA CELDA. (HALDAR, S. K., 2018. FIGURA 13.35, PAG 276)

Haldar, S. K. (2018) describe las etapas y reactivos involucrados en la flotación, resumiéndolas en la siguiente secuencia:

Entrada al Acondicionador → Celdas Rougher → Celdas Scavenger → Celda Limpiadora

1. Celda Acondicionadora: Corresponde a la primera de las celdas, y es la que recibe al material de alimentación después del proceso de molienda. Como su nombre lo dice el

propósito de esta celda es acondicionar el material en presencia de reactivos para potenciar sus propiedades hidrofóbicas, por lo general se utilizan xantatos y metil isobutil carbinol (MIBC).

2. Celda Rougher: Esta celda recibe directamente el material cargado de reactivos y es la encargada de separar la primera fracción de pulpa, el material de interés con las características óptimas de granulometría asciende rápidamente adherido a las burbujas de aire y avanza hacia la celda de limpieza en forma de una pulpa enriquecida. La fracción de pulpa remanente de menor ley y en presencia de ganga avanza hacia la celda scavenger.
3. Celda Scavenger: Esta celda recibe la fracción de la pulpa que no logró ascender con facilidad, por lo general corresponde a una pulpa de menor ley con presencia de material de ganga adherido directamente al material de interés como partículas ocluidas. En esta etapa se vuelve a airear la pulpa y permite flotar el material de interés remanente, el cual vuelve a incorporarse en el proceso. El material que decanta avanza directamente hacia el relave.
4. Celda de Limpieza: El objetivo de esta celda es recuperar la pulpa enriquecida y formar un concentrado de alta ley, esta celda permite limpiar y recuperar la fase mineral de interés desde la pulpa enriquecida, la parte remanente de esta etapa se vuelve a incorporar al proceso en la celda de acondicionamiento.

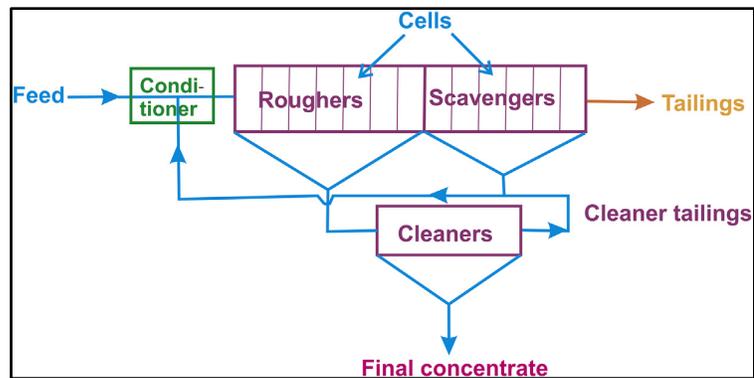


FIGURA 4.2: ESQUEMA DEL DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE FLOTACIÓN, EL CUAL INCLUYE LAS 4 ETAPAS PRINCIPALES. (HALDAR, S. K., 2018. FIGURA 13.37, PAG 277)

4.10 ENSAYO ROUGHER DE RECUPERACIÓN

En la mina El Soldado se cuenta con un Laboratorio de pruebas metalúrgicas, en donde se realizan distintos ensayos, tales como ensayo de dureza (SGI), flotación y granulometría. En particular para el ensayo de flotación se trabaja con cargas de mineral homogenizado lo que requiere de un peso mínimo de material a procesar.

La metodología del ensayo de recuperación por flotación del laboratorio metalúrgico de la mina contempla las siguientes etapas:

1. Chancado de la muestra y separada en cargas de 1.125 kg.
2. Molienda de las cargas a través de un molino de bolas que simula la molienda convencional de la planta de la Mina El Soldado. La molienda es enfocada a lograr una granulometría específica, que corresponde al D80 con que trabaja la planta de la mina igual a 195 micrones. Esta etapa consiste en una prueba de ensayo y error en busca del tiempo óptimo (TMOL) al cual el molino de bolas logra el D80 especificado. En esta etapa se consumen entre 3 y 4 cargas de material pulverizado siendo la última carga la que presenta la granulometría óptima para el ensayo de recuperación por flotación.
3. Ensayo de recuperación por flotación, consiste en una celda de flotación a escala que simula la planta de flotación de la Mina.
4. Se utiliza una carga para la validación de la ley del tramo, además de una carga por ensayo extra que se requiera (dureza SGI), una carga de respaldo para recuperación por flotación y 2 cargas extras por eventualidades, como derrame de material o contaminación de alguna carga lo que limita el peso mínimo a 12 kg correspondientes al menos a 10 cargas.

Para el ensayo de recuperación por flotación que robustece el modelo de Largo Plazo de la mina El Soldado se utiliza una prueba de flotación cinética, que trabaja con mediciones de concentrado en 6 tiempos y un relave, los tiempos de medición son 3, 7, 13, 17, 21 y 25 minutos. Por otro lado, las muestras del modelo de Corto Plazo se realizan con una prueba de flotación rougher con una sola medición a los 17 minutos y con reactivos convencionales.

Ambos ensayos de flotación trabajan con 6 mallas Tyler para llegar a la granulometría esperada, estas son malla 35, malla 48, malla 65, malla 100, malla 150 y malla 200 con aberturas de 420, 297, 210, 149, 105 y 74 micrones respectivamente.



FIGURA 4.3: MÁQUINAS AIREADORAS DEL LABORATORIO METALÚRGICO DE LA MINA EL SOLDADO, QUE PERMITEN LA AGITACIÓN DE LA PULPA EN UN ENSAYO DE FLOTACION ESTÁNDAR.

4.11 QUEMSCAN (QUANTITATIVE EVALUATION OF MINERALS BY SCANNING ELECTRON MICROSCOPY)

QEMSCAN es una tecnología usada frecuentemente en la industria minera, masificándose su uso en las últimas décadas, pues es una herramienta rápida y precisa que permite la cuantificación de propiedades geológicas, tales como la concentración de fases minerales presentes en la roca realizando una análisis de mineralogía modal, como también un análisis de partículas que permite cuantificar el grado de liberación por especie mineral, entre otras, esta tecnología fue desarrollada en la década de los '70 por CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) en Australia. Como menciona C. Lund, 2013, esta tecnología se basa en el análisis y la combinación de las señales espectrales detectadas en un receptor de electrones (BSE) y la dispersión de energía observada en los detectores de rayos X. El método permite reconocer partículas basándose en un contraste de densidad y en las diferencias composicionales entregadas por el espectro de rayos X, de esta forma se crean imágenes digitales de cada mineral.

Existen varios tipos de análisis con los que opera QEMSCAN, entre ellos análisis de roca total (bulk mineral análisis, BMA), análisis de partículas minerales (particle mineral analysis, PMA) y búsqueda de minerales traza (trace mineral search, TMS) (Pirrie et al., 2004).

5. ANTECEDENTES DE LA MINA

El yacimiento El Soldado tiene una gran trayectoria de explotación, comenzando su extracción mineral en el siglo XIX a través de pequeña minería y transformándose posteriormente a minería subterránea, explotándose hasta el año 2010 por este medio de extracción, en 1997 comenzó simultáneamente la extracción a través de rajo abierto, y se extiende hasta al presente.

A continuación, se menciona detalladamente la información disponible.

5.1 BASE DE DATOS

5.1.1 GEOMETALURGIA

La base de datos denominada marinas contiene toda la información geometalúrgica de la mina, tanto de las pruebas de dureza (medidas en SGI y TPH), parámetros metalúrgicos como D80 y TMOL, mineralogía y Recuperación de Cu, corresponde a información numérica obtenida de los respectivos ensayos.

- Mineralogía: Información numérica de contenido y presencia de fases minerales de mena. Entrega información de contenido de Calcopirita, Bornita, Calcosina y Covelina, Pirita, Hematita, Limonita y Rutilo.
- Recuperación de Cu: indica el valor de recuperación de cobre después de realizado un ensayo de flotación estándar.
- D80: indica la granulometría de la muestra al realizar el ensayo de flotación estándar.
- TMOL: indica el tiempo óptimo para alcanzar la granulometría necesaria para el ensayo de flotación estándar.

5.1.2 LEY QUÍMICA DE CU

Esta información es esencial en cada una de las muestras realizadas en El Soldado, permite conocer la ley exacta de la muestra en cuestión. Esta información incluye presencia de cobre total, presencia de cobre soluble y con ello permite incluir la razón de solubilidad o Factor K calculado a partir de estos dos parámetros. Estas leyes se calculan en un laboratorio químico.

- CUT: corresponde a la ley de Cu presente en la muestra.
- CUS: indica la presencia de cobre soluble presente en la muestra.
- Factor K (razón de solubilidad): indica la relación entre el cobre soluble y el cobre insoluble, este parámetro indica el porcentaje de cobre soluble en la muestra. El cobre soluble es asociado con los minerales de cobre oxidado, los cuales generan problemas en los procesos metalúrgicos de la planta de flotación.

5.1.3 GEOQUÍMICA MULTI-ELEMENTOS

Esta información es bastante limitada, y cuenta con mediciones de elementos como Ag, As, CaO, Fe, S y SiO₂.

- Ag: concentración de plata en la muestra.
- As: concentración de arsénico en la muestra.
- CaO: concentración de óxido de calcio en la muestra.
- Fe: concentración de hierro en la muestra.
- S: concentración de azufre en la muestra.
- SiO₂: concentración de sílice en la muestra.

5.1.4 QEMSCAN

La información de mineralogía se basa principalmente en ensayos QEMSCAN realizados por la empresa GEOMAQ. La división El Soldado cuenta con 19 informes hasta la fecha, los cuales contienen información de ley química para los elementos Cu y Fe, además de las fases mineralógicas presentes en la roca (mineralogía modal), tanto de mena como de ganga (medidas en porcentaje en peso de cada fase mineral). Por otro lado, estos informes también presentan información de más detalle, bastante útil para el marco de esta memoria, entre ella se encuentran, tanto el porcentaje de liberación de las distintas fases minerales, siendo principalmente útiles las de mena de cobre (Calcopirita, Bornita, Calcosina y Covelina) presentes en el yacimiento, como información de las distintas asociaciones entre fases minerales presentes, utilizándose sólo las que involucran a las fases minerales de mena antes mencionadas, además se tiene información, si bien limitada, pero muy útil, de la granulometría promedio de las distintas fases minerales y de la masa de mineral de cobre asociada a 6 rangos distintos de liberación superficial (0%, <30%, <60%, <90%, <100% y 100% de liberación) e información de ley por especie mineral de mena según distribución granulométrica (<50 µm, 50-100 µm, 100-150 µm y >150 µm). Como también análisis de partículas, indicando las texturas intergranulares de la mena.

A continuación, se describe las distintas categorías de información antes mencionadas:

- **Ley química:** Esta información contiene la ley química del tramo de roca medida en laboratorio y la ley entregada por el ensayo QEMSCAN, tanto para el Cu como el Fe, lo que permite realizar una conciliación entre las leyes y validar de cierta forma el ensayo realizado. La ley de Cu entregada por QEMSCAN corresponde a una combinación lineal de las fases mineralógicas de Cu medidas por el ensayo.

- **Fases minerales (mineralogía modal):** Esta información corresponde a una medición de la mineralogía presente en la roca, el ensayo QEMSCAN involucra el escaneo de la muestra y mediante técnicas espectrométricas realizan una estimación de la mineralogía modal, puede ser fluorescencia de rayos X (XRF) o difracción de rayos X (XRD), entregando un valor aproximado de la proporción de cada fase mineral presente en la muestra. Las fases minerales medidas son las siguientes:

| | | |
|---------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 1. Calcosina/ Digenita | 14. Otros sulfuros | 25. Anfíbol |
| 2. Covelina | 15. Cuprita | 26. Sericita |
| 3. Calcopirita | 16. Tenantita/ Tetrahedrita | 27. Arcillas |
| 4. Bornita | 17. Magnetita | 28. Clorita |
| 5. Enargita | 18. Silicatos de Cu | 29. Epidota |
| 6. Sulfuros de Cu-As | 19. Carbonatos de Cu | 30. Otros Silicatos |
| 7. Pirita | 20. Cuarzo | 31. Carbonatos |
| 8. Molibdenita | 21. Plagioclasas | 32. Sulfatos |
| 9. Hematita | 22. Feldespato K | 33. Apatito |
| 10. Limonita | 23. Biotita/ Flogopita | 34. Esfeno |
| 11. Esfalerita | 24. Piroxeno | 35. Rutilo |
| 12. Cu Metálico | | 36. Otros |
| 13. Galena | | |

- **Asociaciones minerales:** Esta información entrega un valor que da cuenta de qué proporción de un mineral en específico está asociada a cada uno del resto de los minerales presentes en la muestra. Es decir, si consideramos el mineral de calcopirita, este puede estar liberado completamente u ocluido (en contacto superficial con otros minerales dentro de la misma partícula, entonces la información nos indica que cantidad de ese mineral de Cpy está asociado con los demás minerales presentes, por ejemplo el 20% de las Cpy están en contacto con Bn, un 3% en contacto con Bt, un 5.6% en contacto con Chl, un 30% en contacto con Plg y así con cada uno de los minerales presentes en la muestra; además las asociaciones minerales de cada fase en específico deben sumar el 100%. Esta información se tiene para cada fase mineral presente.
- **Grado de liberación:** Esta información es una estimación de la proporción del mineral que se encuentra liberado, considerando la cantidad de partículas que se encuentran liberadas superficialmente, es decir, por ejemplo, para la Cpy se tiene una liberación del 74% que correspondería, el 74% de todas las partículas de calcopirita presentes en la muestra se encuentran completamente liberadas superficialmente, ahondando un poco más, se refiere a las partículas que no están en contacto superficial con otro mineral. Esta información se extrae de la tabla de asociaciones minerales.

- **Liberación Mineral:** Este es un parámetro creado para poder generalizar la liberación de las partículas de interés, para simular una liberación de los minerales de mena en la alimentación o, en este caso las muestras geometalúrgicas. Consiste en una combinación lineal entre la cantidad de partículas ocluidas de cada fase mineral de mena, considerando las concentraciones de Cpy, Bn, Cc y Cv en la muestra. La cantidad de partículas ocluidas se obtiene de la tabla de asociaciones minerales y corresponde al complemento de las partículas 100% liberadas y las partículas que interactúan con otro mineral de mena. De la tabla de asociaciones minerales, por ejemplo, para la Cpy, entrega información de las partículas que se pueden considerar 100% liberadas, de la Cpy en contacto con Bn, Cc y Cv, y la Cpy en contacto con el resto de los minerales presentes en la roca. Entonces la Cpy ocluida será la que está en contacto con la ganga.

$$\begin{aligned}
 & \textit{Fase mineral ocluida} \\
 & = 100 - (\textit{Liberación fase mineral} \\
 & + \textit{fase mineral en contacto con resto de minerales de mena})
 \end{aligned}$$

Ejemplo:

$$\textit{Cpy Ocluida} = 100 - (\textit{Liberación Cpy} + \textit{Cpy en contacto con Bn, Cc, Cv})$$

$$\begin{aligned}
 & \textit{Liberación Mineral} \\
 & = (100 - \textit{Cpy}_{ocluida}) \\
 & \quad * \% \textit{Cpy}_{normalizado a las fases sulfuradas de Cu} + \dots \\
 & \quad + (100 - \textit{Sulfuro de Cu}_{ocluida}) \\
 & \quad * \% \textit{Sulfuro de Cu}_{normalizado a las fases sulfuradas de Cu} \\
 & \quad \% \textit{Cpy}_{normalizado a las fases sulfuradas de Cu} \\
 & \quad = \frac{\textit{Cocentración de Cpy}}{\textit{Cocentración de Cpy} + \textit{Bn} + \textit{Cc} + \textit{Cv}}
 \end{aligned}$$

- **Liberación detallada:** esta categoría de información nos entrega un detalle mayor respecto de la liberación de las fases minerales más importantes, que serían Calcopirita, Bornita, Calcosina, Covelina y Pirita, indicando la masa del mineral en cuestión que se encuentra liberada en 6 rangos diferentes, 0%, <30%, <60%, <90%, <100% y 100% de liberación superficial. Por ejemplo para la Cpy de la muestra G1119, que presenta un 1,68% en peso en la muestra, se tiene que 0,11% en peso se encuentra 100% liberada, un 0,22% peso corresponden a partículas con liberación superficial entre un 90-100%, 0,80% en peso con liberación entre el 60-90%, 0,25%

en peso con liberación entre un 30-60%, 0,29% en peso con liberación entre 0-30% y no hay partículas totalmente ocluidas.

- **Granulometría promedio:** esta información indica la granulometría promedio de las partículas según las distintas fases minerales presentes, permitiendo reconocer cuales son los minerales de la fase gruesa en el perfil granulométrico de molienda.
- **Liberation and Looking:** esta información nos da cuenta de la masa (%) por fase mineral (Cpy, Bn, Cc, Cv) clasificadas en 3 categorías que describen la liberación superficial de las partículas de cobre, las categorías son, partículas 100% liberadas (es decir, 100% de liberación superficial), partículas ocluidas y partículas laterales, teniendo información cuantitativa de la masa de cobre. La categoría de partículas ocluidas y partículas con contactos laterales dan cuenta de texturas microscópicas de los granos de mineral, medidas por el ensayo QEMSCAN.
- **Caracterización por Distribución granulométrica:** esta información va ligada directamente a liberation and looking, y nos da cuenta de cómo se distribuye la masa de cobre según fracciones granulométricas específicas (<50 μm , 50-100 μm , 100-140 μm y >140 μm) de acuerdo con las 3 categorías mencionadas en liberation and looking (partículas liberadas, ocluidas y laterales), como también nos entrega información del tamaño promedio de las partículas por fracción granulométrica.
 - a) Masa por fracción granulométrica
 - b) Tamaño promedio por fracción granulométrica

5.2 GEOLOGÍA

Este capítulo tiene como finalidad mostrar la información geológica con la que cuenta la mina El Soldado, con la cual se trabajó en este trabajo de memoria.

5.2.1 MODELO LITOLÓGICO

La superintendencia de geología de la mina El Soldado ha confeccionado un modelo litológico del yacimiento, éste está adecuado a la estratigrafía de la zona y a las unidades definidas, tanto en la literatura como por la misma mina. Este modelo representa las litologías principales definidas en la sección 3.3.1 de este informe, se ha incorporado además el efecto de las estructuras principales definidas en la tabla 5.1.

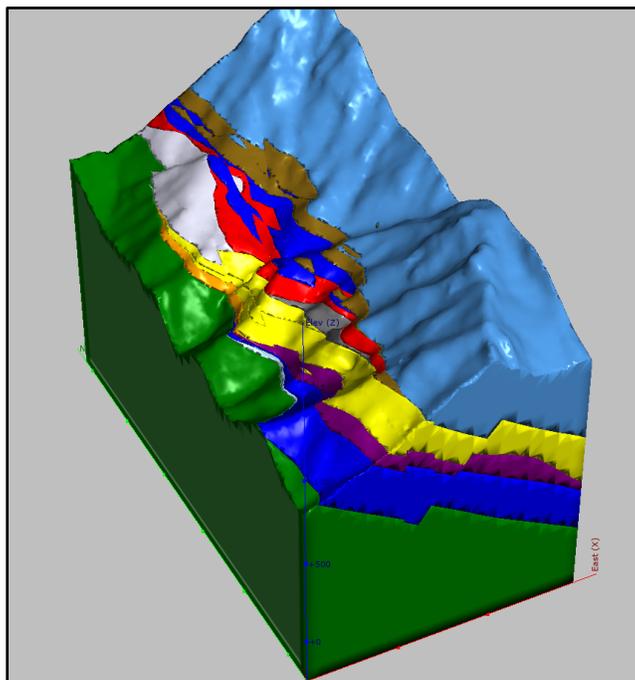


FIGURA 5.1: MODELO LITOLÓGICO DE LA MINA EL SOLDADO, REPRESENTA LA ESTRATIGRAFIA CORRESPONDIENTE A LAS FORMACIONES LO PRADO Y VETA NEGRA. DESDE EL TECHO A LA BASE LAS LITOLOGIAS INVOLUCRADAS SON LAS SIGUIENTES, EN COLOR CELESTE LA FM. VETA NEGRA, EN CAFÉ LA UNIDAD DE TOBA SUPEIOR LP PRADO, EN AZUL LA UNIDAD DE ANDESITA NORTE SUPERIOR Y ANDESITA SUR INFERIOR LO PRADO, EN COLOR ROJO UNA INTERCALACION DE TOBA Y ARENISCA DE LA FM. LO PRADO, EN COLORBLANCO Y GRIS LA UNIDAD DE RIODACITA NORTE Y RIODACITA SUR SUPERIOR, EN COLOR AMRILLO LA UNIDAD DE ANDESITA SUR SUPERIOR Y TOBA CENTRAL, ANARANJADO LA UNIDAD DE TOBA CENTRAL INFERIOR, MORADO RIODACITA SUR INFERIOR, AZUL LA UNIDAD DE ANDESITA SUR INFERIOR, Y EN VERDE EL PAQUETE SEDIMENTARIO DE LA PARTE INFERIOR DE LA FM. LO PRADO.

5.2.2 INFORMACIÓN MINERALÓGICA

La información mineralógica mencionada y utilizada en esta memoria de título forma parte importante del catastro de información geológica de la mina El Soldado. Esta corresponde a descripción de las fases mineralógicas en sondajes, la cual fue indispensable para la caracterización de los cuerpos mineralizados realizada en este trabajo. A continuación, se presentan las figuras 5.2 y 5.3 que muestran toda la información disponible desplegada en el espacio, representando cada uno de los sondajes con este tipo de información. En color amarillo se representan las zonas de Cpy, en color morado la presencia de Bn, en gris la presencia de Cc, en azul la Hematita Especular y en color celeste la presencia de Py.

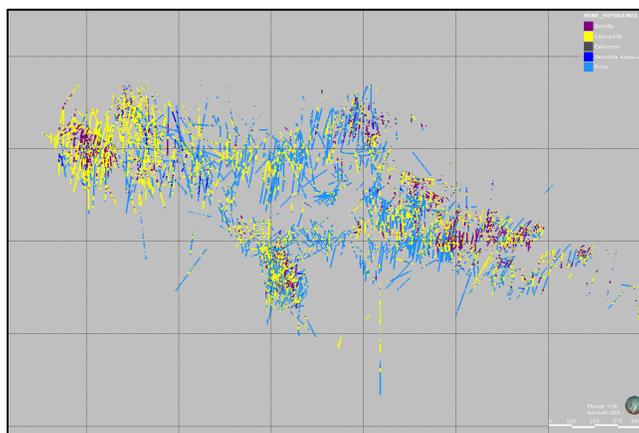


FIGURA 5.2: REPRESENTACIÓN DE LOS SONDAJES CON INFORMACION MINERALÓGICA DESCRITA.

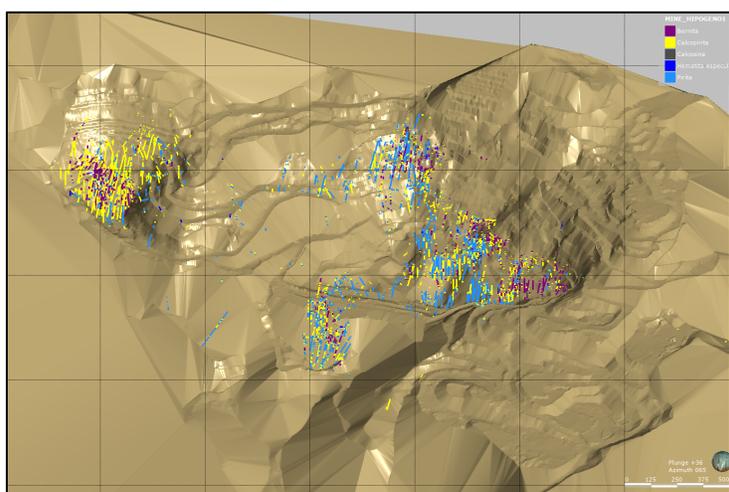


FIGURA 5.3: SONDAJES DESPLEGADOS SOBRE LA TOPOGRAFÍA DE LA MINA EL SOLDADO.

5.2.3 ESTRUCTURAS

El yacimiento presenta un fuerte control estructural como se ha presentado en el marco geológico, reconociéndose cientos de estructuras y fallas a lo largo de toda la mina. Sin embargo, las fallas consideradas como mineralizadoras son 17, las cuales generaron grandes desplazamientos de bloques y permitieron la permeabilidad para la circulación de fluidos enriquecidos. Estas fallas se presentan a continuación en la tabla 5.1.

TABLA 5.1: FALLAS PRINCIPALES DE LA MINA EL SOLDADO Y CONSIDERADAS LAS ESTRUCTURAS MINERALIZADORAS.

| Estructura | Zona de influencia [m] | Azimet Promedio | Inclinación Promedio |
|--------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| San José 16 | 45 | 328 | 68 |
| Adelita | 50 | 270 | 89 |
| Adela | 50 | 252 | 89 |
| Isabel 50 | 40 | 249 | 56 |
| Isabel 38 | 27 | 244 | 42 |
| Isabel 12 | 50 | 220 | 57 |
| California | 50 | 270 | 45 |
| Arauco 103 | 45 | 282 | 57 |
| Arauco 105 | 45 | 260 | 54 |
| Arauco 101 | 50 | 287 | 68 |
| Noroeste 111 | 50 | 230 | 59 |
| Isabel 1 | 50 | 235 | 43 |
| Isabel 6 Norte | 50 | 272 | 66 |
| Isabel 6 Sur | 50 | 252 | 62 |
| Isabel 4 | 50 | 249 | 42 |
| Christine 2 Rama 1 | 50 | 232 | 66 |
| Christine 2 | 50 | 241 | 62 |

5.2.4 LEYES

El Soldado cuenta con más de 600.000 muestras de leyes a lo largo de su historia, lo que robustece el modelo numérico de leyes de la mina. A continuación, se presentan la figura 5.4 y 5.5 las cuales intentan representar a través de los sondajes, los cuerpos mineralizados a lo largo del yacimiento. En color azul se presenta las zonas estériles con leyes menores a 0.2%, en color amarillo las zonas de baja ley entre 0.2 y 0.5%, en verde las zonas de ley media entre 0.5 y 0.8 % y en color rojo las zonas de alta ley con leyes por sobre 0.8%.

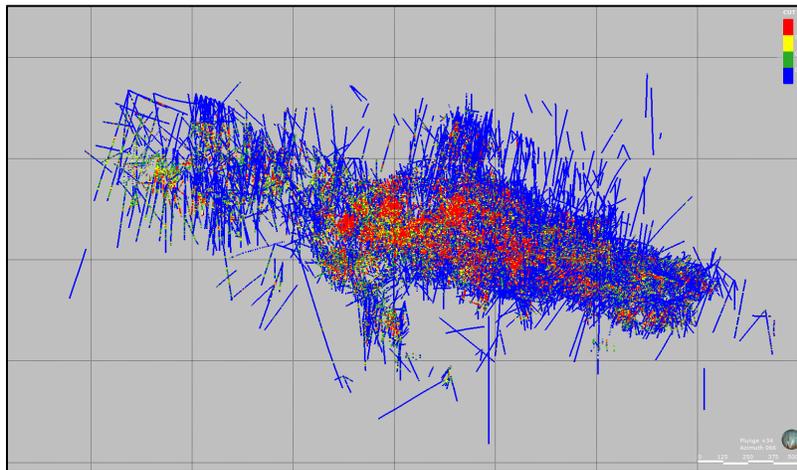


FIGURA 5.4: REPRESENTACIÓN DE LOS SONDAJES CON INFORMACION DE LEYES.

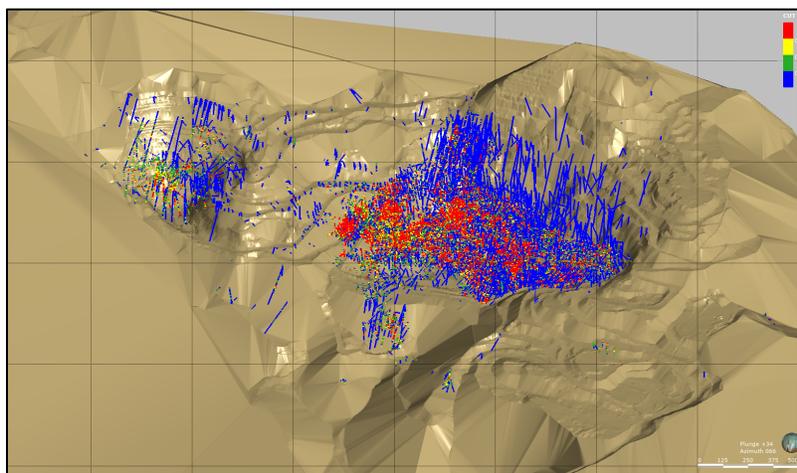


FIGURA 5.5: SONDAJES DESPLEGADOS SOBRE LA TOPOGRAFÍA DE LA MINA EL SOLDADO.

5.2.5 CALCOPIRITA

Calcopirita en el Yacimiento

La Cpy se distribuye a lo largo de todo el yacimiento, sin embargo, es más abundante en la zona intermedia de la mina, donde los cuerpos mineralizados se conforman principalmente de Cpy y existe mayor densidad de vetas y vetillas.

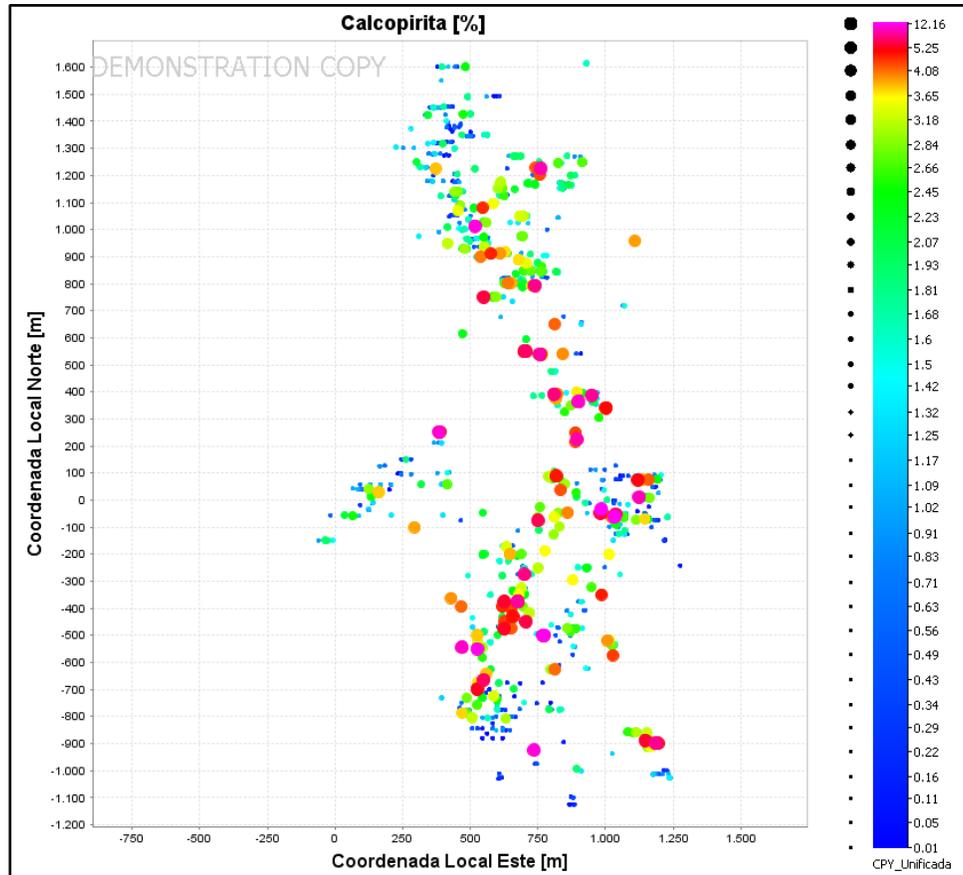


FIGURA 5.6: MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LA PRESENCIA DE CALCOPIRITA EN EL YACIMIENTO EL SOLDADO. INTENSIDAD DE LA VARIABLE REPRESENTADA SEGÚN COLOR Y TAMAÑO DEL PUNTO IDENTIFICADOR, ESCALA DE COLOR ILUSTRADA AL COSTADO DERECHO, MAYOR TAMAÑO INDICA MAYOR VALOR DE LA VARIABLE.

5.2.6 BORNITA

Bornita en el Yacimiento

La mayoría de los cuerpos mineralizados del yacimiento se conforman por Bn en su núcleo y distintas zonas minerales de Cc, Cpy y en menor medida Cv. Se puede observar cómo los grandes cuerpos de la mina se disponen de altos niveles de este mineral, como, por ejemplo, el cuerpo de Veta Blanca ubicado por el norte de la mina y hospedado en el Sedimentario

principalmente. Bastante concentración también por el sur en los cuerpos de Filo, y por el oeste con el cuerpo elongado de Morro y por el oeste los cuerpos más superficiales hospedados en Veta Negra.

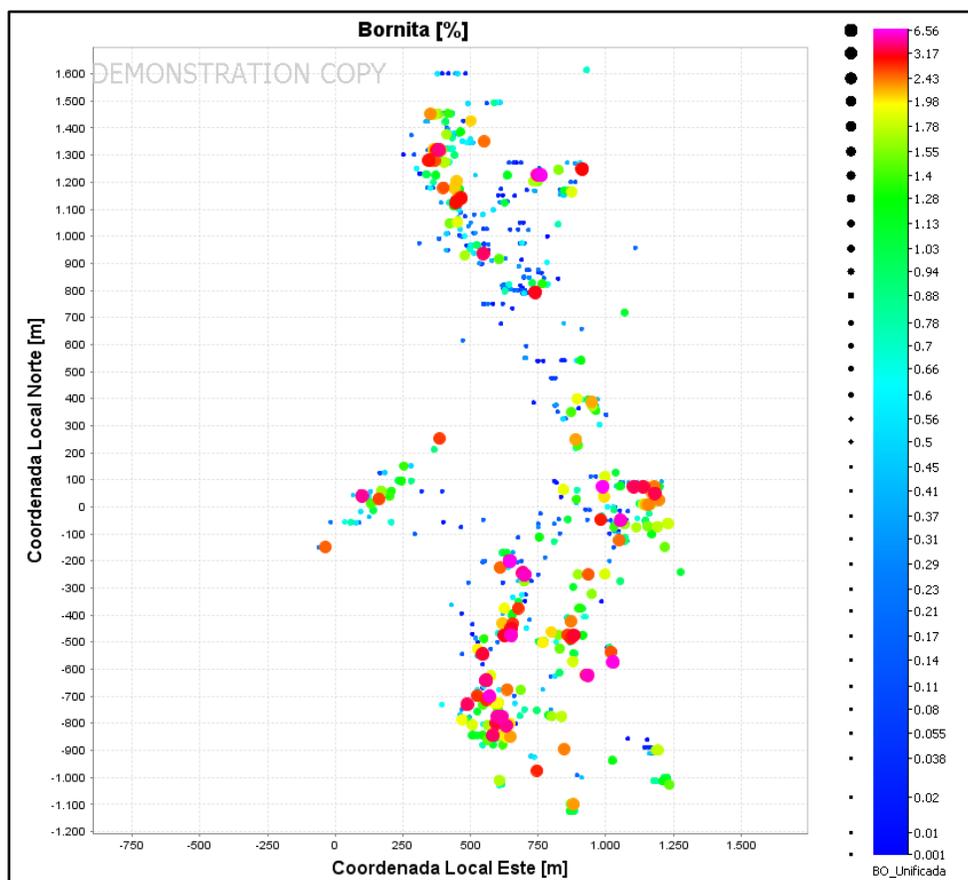


FIGURA 5.7: MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LA PRESENCIA DE BORNITA EN EL YACIMIENTO EL SOLDADO. INTENSIDAD DE LA VARIABLE REPRESENTADA SEGÚN COLOR Y TAMAÑO DEL PUNTO IDENTIFICADOR, ESCALA DE COLOR ILUSTRADA AL COSTADO DERECHO, MAYOR TAMAÑO INDICA MAYOR VALOR DE LA VARIABLE.

5.2.7 CALCOSINA

Calcosina en el Yacimiento

Como se puede observar en la figura 6.48, la presencia de calcosina se concentra mayoritariamente en dos zonas, por un lado, en la zona central y más alta del rajo, correspondiente a la unidad de Veta Negra, entre las coordenadas -150, +150 N y +900, +1300 E, y por otro lado en la parte sur del yacimiento y también de forma somera, correspondiente al Sector de Filo, entre las coordenadas +650, +1050 N y +400, +800 E. Es importante reconocer la presencia de Cc en la unidad de Veta Negra lo que explicará las buenas recuperaciones de esta unidad litológica.

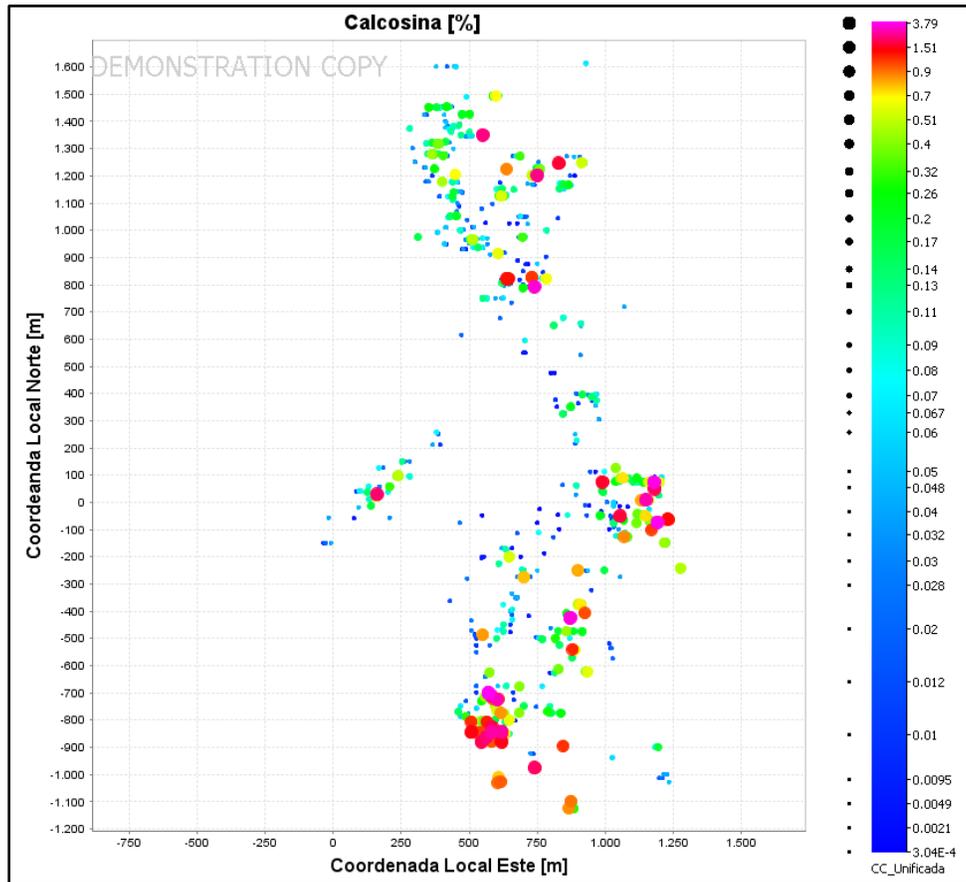


FIGURA 5.8: MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LA PRESENCIA DE CALCOSINA EN EL YACIMIENTO EL SOLDADO. INTENSIDAD DE LA VARIABLE REPRESENTADA SEGÚN COLOR Y TAMAÑO DEL PUNTO IDENTIFICADOR, ESCALA DE COLOR ILUSTRADA AL COSTADO DERECHO, MAYOR TAMAÑO INDICA MAYOR VALOR DE LA VARIABLE.

5.2.8 COVELINA

Covelina en el Yacimiento:

La Covelina esta casi ausente en el yacimiento, sin embargo, existen algunas muestras que reflejan muy alta concentración de este mineral, y se encuentran asociadas directamente a núcleos de mineralización Bn-Cc.

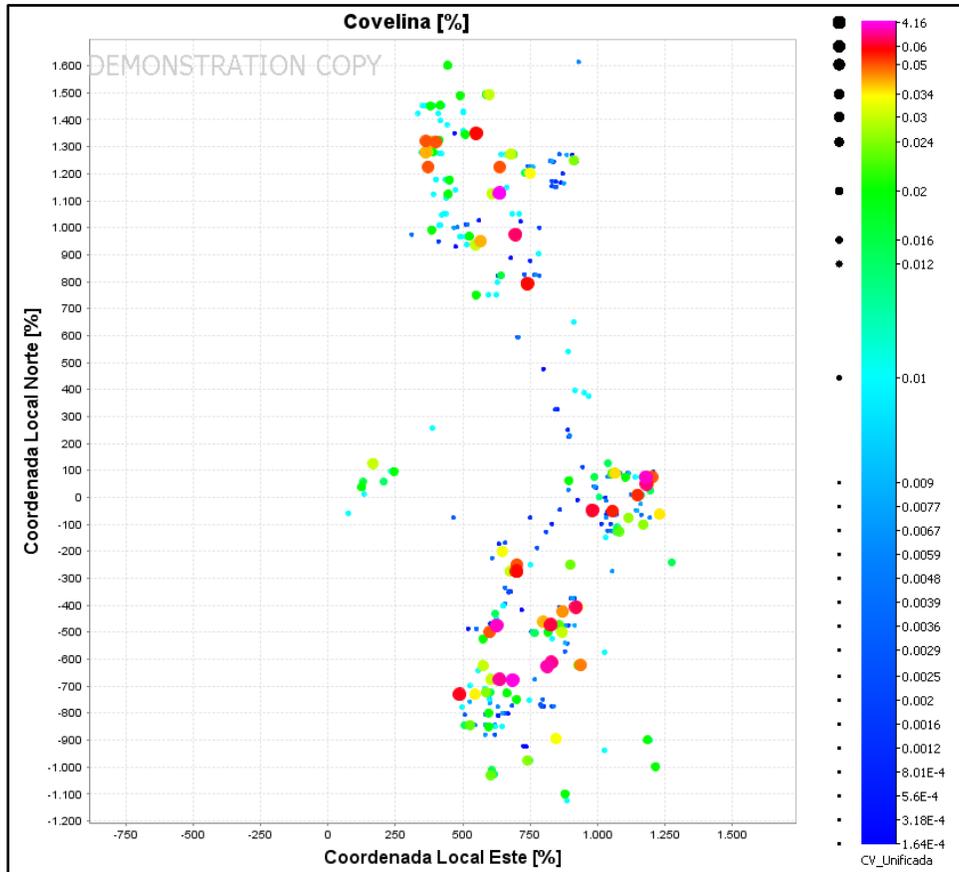


FIGURA 5.9: MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LA PRESENCIA DE COVELINA EN EL YACIMIENTO EL SOLDADO. INTENSIDAD DE LA VARIABLE REPRESENTADA SEGÚN COLOR Y TAMAÑO DEL PUNTO IDENTIFICADOR, ESCALA DE COLOR ILUSTRADA AL COSTADO DERECHO, MAYOR TAMAÑO INDICA MAYOR VALOR DE LA VARIABLE.

5.2.9 RECUPERACIÓN DE COBRE

El yacimiento presenta una distribución global característica de la recuperación de cobre. Reconociéndose bajas recuperaciones en los cuerpos mineralizados inferiores hospedados en el sedimentario de la parte inferior del miembro superior de la Fm. Lo Prado, como se puede observar en el cuerpo elongado central de Morro con orientación NE ubicado entre -200 y +300 N, -100 y +400 E y en el cuerpo elongado de Veta Blanca con orientación NS ubicado en la parte Oeste de la zona mineralizada Norte entre +900 y +1600 N, +250 y +500 E (Figura 6.45). Aumentando en material recuperado hacia las zonas superficiales del yacimiento hospedadas en el techo de la Fm. Lo Prado y base de la Fm. Veta Negra. Las zonas mineralizadas superiores presentan mejores recuperaciones de cobre y se debe principalmente a las asociaciones minerales presentes en estos núcleos mineralizados

superiores, formados principalmente por Bn-Cc y texturas minerales más gruesas, como se puede observar en las figuras 6.47 y 6.48.

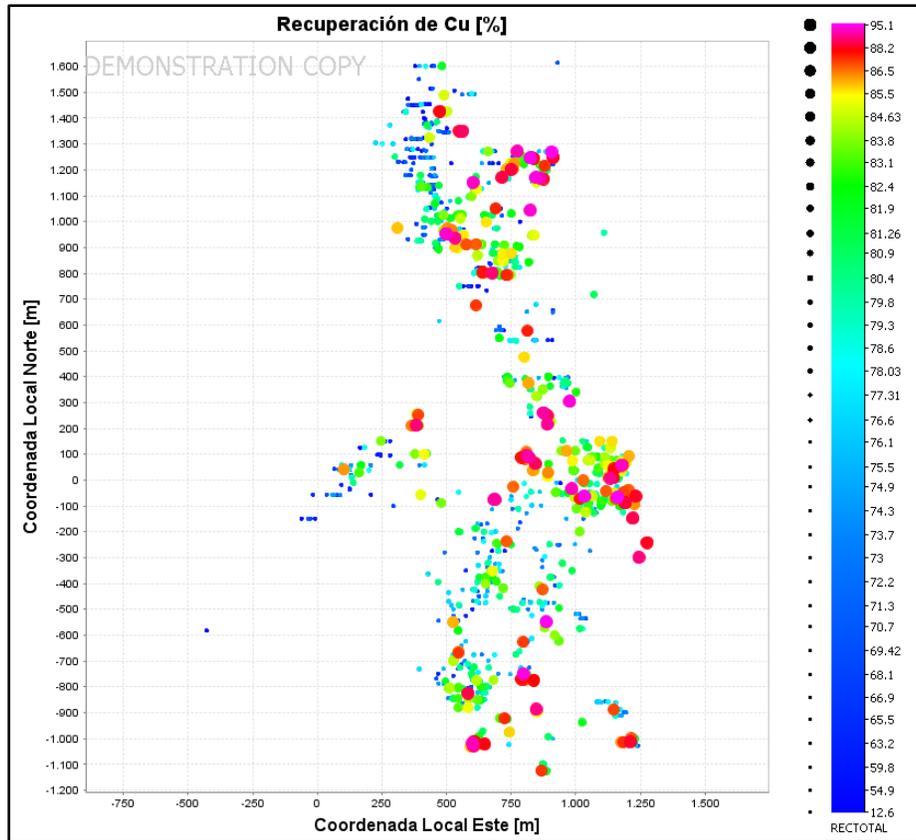


FIGURA 5.10: MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE COBRE EN EL YACIMIENTO EL SOLDADO. INTENSIDAD DE LA VARIABLE REPRESENTADA SEGÚN COLOR Y TAMAÑO DEL PUNTO IDENTIFICADOR, ESCALA DE COLOR ILUSTRADA AL COSTADO DERECHO, MAYOR TAMAÑO INDICA MAYOR VALOR DE LA VARIABLE.

5.2.10 SECCIÓN TRANSVERSAL

En este capítulo se presentará una sección transversal del yacimiento El Soldado para comprender de mejor forma como se encuentra dispuesta la mineralización. La sección es realizada E-O y corresponde a la coordenada +0N. Ilustrando los sondeos involucrados con las leyes respectivas. Se eligió esta sección pues corresponde a la parte central de la mina y muestra los cuerpos mineralizados de Morro, la Fase 2 ya extraída, la Fase 3 en extracción en el presente, y, por la parte superior se observan los cuerpos hospedados en la Fm. Veta Negra. De fondo se plasma el modelo litológico construido por la mina, de color celeste se representa la unidad Sedimentaria Lo Prado, en rosado la unidad de Riodacita Lo Prado, en

verde las Andesitas Lo Prado, en café los paquetes de Tobas de la Fm Lo Prado y en Morado la Fm. Veta Negra.

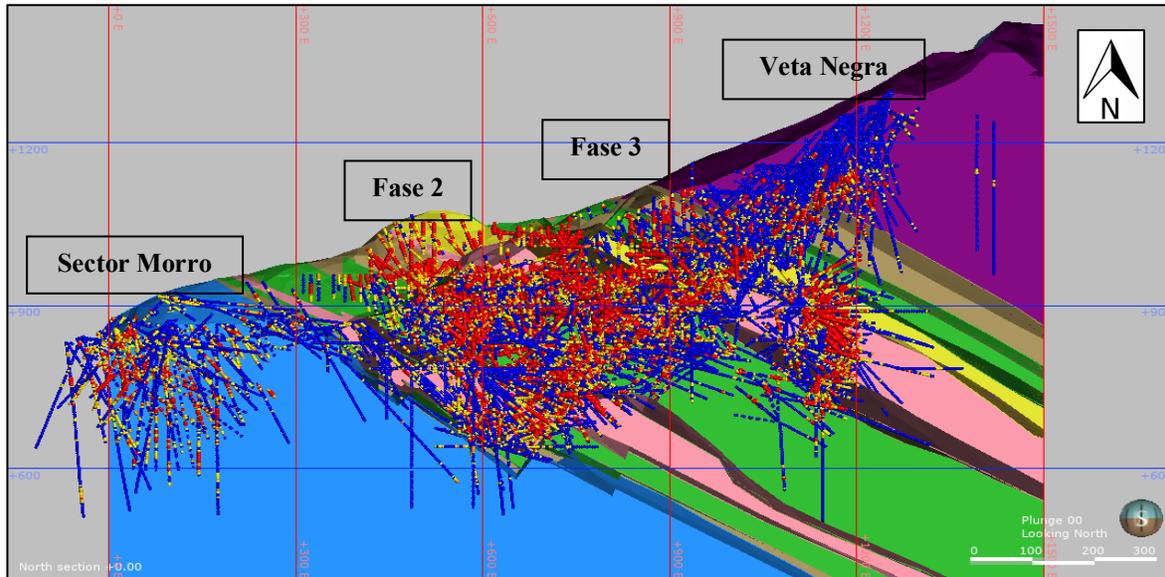


FIGURA 5.11: SECCION TRANSVERSAL EN LA COORDENADA +0N DE LA MINA EL SOLDADO, ILUSTRANDO LAS LEYES EN SONDAJES.

Ahondando un poco más en la mineralización presente en la mina en torno a las leyes de cobre (CUT), se despliegan 3 sondajes a lo largo de esta sección con la finalidad de visualizar los cambios en leyes a través de los distintos cuerpos. Estos sondajes son S19805, S23905 y S20307 los cuales representan a los cuerpos de Morro, Fase 2 y Veta Negra respectivamente. En la tabla 5.2 se visualizan las leyes a lo largo de las zonas mineralizadas.

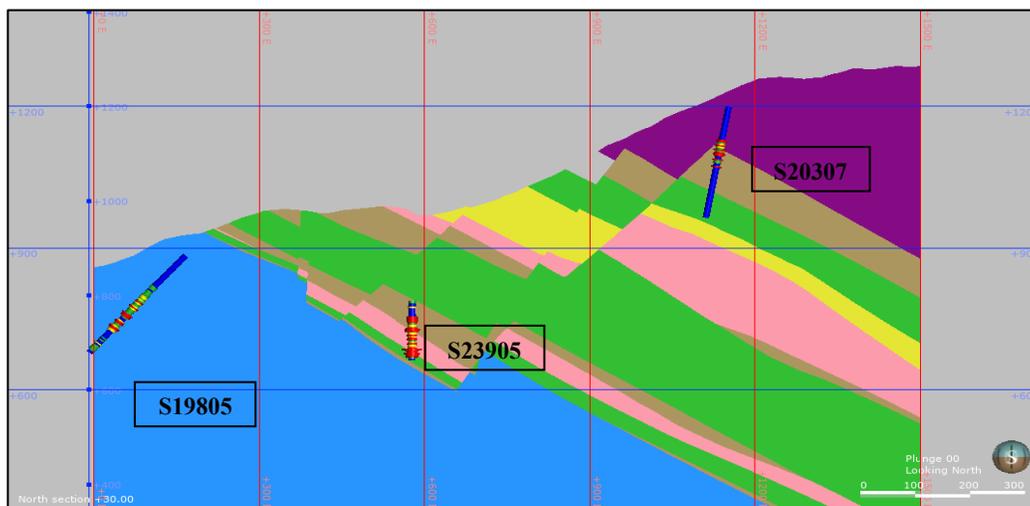


FIGURA 5.12: SONDAJES CON VISUALIZACION DE LEYES. S19805 CORRESPONDE AL CUERPO MINERALIZADO DE MORRO. S23905 CUERPO DE FASE 2. S20307 CUERPO EN VETA NEGRA.

TABLA 5.2: RESUMEN DE LAS LEYES A LO LARGO DE LOS TRAMOS MINERALIZADOS DE LOS SONDAJES DESPLEGADOS EN LA SECCIÓN TRANSVERSAL +0N DE LA FIGURA 5.12.

| S19807 | | S23905 | | S20307 | |
|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|
| From-To [m] | Copper Grade [%] | From-To [m] | Copper Grade [%] | From-To [m] | Copper Grade [%] |
| 75-78 | 0.014 | 0-3 | 0.048 | 75-78 | 0.193 |
| 78-81 | 0.044 | 3-6 | 0.235 | 78-81 | 0.182 |
| 81-84 | 0.149 | 6-9 | 1.921 | 81-84 | 0.053 |
| 84-87 | 0.48 | 9-12 | 2.316 | 84-87 | 0.015 |
| 87-90 | 0.417 | 12-15 | 4.478 | 87-90 | 0.002 |
| 90-93 | 0.301 | 15-18 | 1.741 | 90-93 | 0.001 |
| 93-96 | 0.09 | 18-21 | 1.302 | 93-96 | 0.001 |
| 96-99 | 0.203 | 21-24 | 7.472 | 96-99 | 0.001 |
| 99-102 | 0.221 | 24-27 | 1.079 | 99-102 | 0.109 |
| 102-105 | 0.235 | 27-30 | 0.607 | 102-105 | 0.056 |
| 105-108 | 0.239 | 30-33 | 0.723 | 105-108 | 0.006 |
| 108-111 | 0.492 | 33-36 | 1.229 | 108-111 | 1.132 |
| 111-114 | 0.529 | 36-39 | 0.762 | 111-114 | 0.044 |
| 114-117 | 0.626 | 39-42 | 0.432 | 114-117 | 0.059 |
| 117-120 | 0.339 | 42-45 | 1.254 | 117-120 | 0.437 |
| 120-123 | 0.727 | 45-48 | 0.857 | 120-123 | 0.343 |
| 123-126 | 0.327 | 48-51 | 0.65 | 123-126 | 1.768 |
| 126-129 | 0.833 | 51-54 | 1.325 | 126-129 | 0.095 |
| 129-132 | 0.629 | 54-57 | 0.681 | 129-132 | 0.005 |
| 132-135 | 0.381 | 57-60 | 0.622 | 132-135 | 1.104 |
| 135-138 | 0.424 | 60-63 | 3.199 | 135-138 | 2.221 |
| 138-141 | 0.744 | 63-66 | 3.398 | 138-141 | 1.083 |
| 141-144 | 1.67 | 66-69 | 2.14 | 141-144 | 0.431 |
| 144-147 | 0.682 | 69-72 | 0.786 | 144-147 | 2.513 |
| 147-150 | 0.337 | 72-75 | 0.512 | 147-150 | 0.446 |
| 150-153 | 0.466 | 75-78 | 0.477 | 150-153 | 0.711 |
| 153-156 | 0.23 | 78-81 | 0.942 | 153-156 | 1.381 |
| 156-159 | 0.429 | 81-84 | 1.741 | 156-159 | 0.526 |
| 159-162 | 2.375 | 84-87 | 1.555 | 159-162 | 0.447 |
| 162-165 | 1.597 | 87-90 | 1.495 | 162-165 | 1.42 |
| 165-168 | 1.825 | 90-93 | 1.402 | 165-168 | 0.803 |
| 168-171 | 0.272 | 93-96 | 0.182 | 168-171 | 0.068 |
| 171-174 | 0.178 | 96-99 | 0.141 | 171-174 | 0.061 |
| 174-177 | 0.061 | 99-102 | 0.073 | 174-177 | 0.017 |
| 177-180 | 0.724 | 102-105 | 0.095 | 177-180 | 0.004 |
| 180-183 | 1.025 | 105-108 | 0.059 | 180-183 | 0.002 |
| 183-186 | 1.476 | 108-111 | 0.056 | 183-186 | 0.002 |
| 186-189 | 0.292 | 111-114 | 0.597 | 186-189 | 0.002 |
| 189-192 | 0.5 | 114-117 | 0.14 | 189-192 | 0.004 |
| 192-195 | 0.77 | 117-120 | 0.182 | 192-195 | 0.002 |
| 195-198 | 2.285 | 120-123 | 0.237 | 195-198 | 0.005 |
| 198-201 | 1.617 | 123-126 | 0.316 | 198-201 | 0.003 |
| 201-204 | 0.766 | | | 201-204 | 0.001 |
| 204-207 | 0.788 | | | 204-207 | 0.001 |
| 207-210 | 0.053 | | | 207-210 | 0.001 |
| 210-213 | 0.064 | | | 210-213 | 0.005 |
| 213-216 | 0.041 | | | 213-216 | 0.001 |
| 216-219 | 0.1 | | | 216-219 | 0.001 |

5.3 METALURGIA

Algunos antecedentes de la planta metalúrgica:

- La planta de flotación está diseñada para recibir material de 1% de ley.
- La planta consta con molinos de bolas que corresponden a la molienda convencional y un molino SAG.
- Las celdas de flotación son analizadas mediante una máquina de Courier que permite medir en línea la ley de alimentación, la ley de concentrado y de relave, lo cual permite calcular la recuperación de cobre de forma instantánea. Se miden además el porcentaje de sólidos, el TPH, cantidad de agua, y tiempos de residencia en la celda, entre otros.
- La molienda convencional procesa alrededor de 400 TPH, en cambio, el molino SAG permite procesar alrededor de 500 TPH en promedio.

6. RESULTADOS

6.1 CONTROL LITOLÓGICO EN LA RECUPERACIÓN DE CU

El yacimiento El Soldado se encuentra emplazado en una secuencia estratificada de carácter volcano-sedimentaria que comprende las siguientes litologías principales:

1. Rocas sedimentarias y volcánicas de la Fm. Veta Negra
2. Andesita de la Fm. Lo Prado
3. Riodacita de la Fm. Lo Prado
4. Toba de la Fm. Lo Prado
5. Sedimentario de la Fm. Lo Prado

Se tiene experiencia local que las litologías de la mina presentan diferentes comportamientos en el procesamiento mineral, por lo tanto, se caracterizó estadísticamente los espacios muestrales de cada litología. Para ello los box splot permiten visualizar de forma gráfica la distribución de cada grupo, como se observa en la figura 6.1 y la tabla 12.1 a 12.5 con la estadística básica de cada grupo litológico.

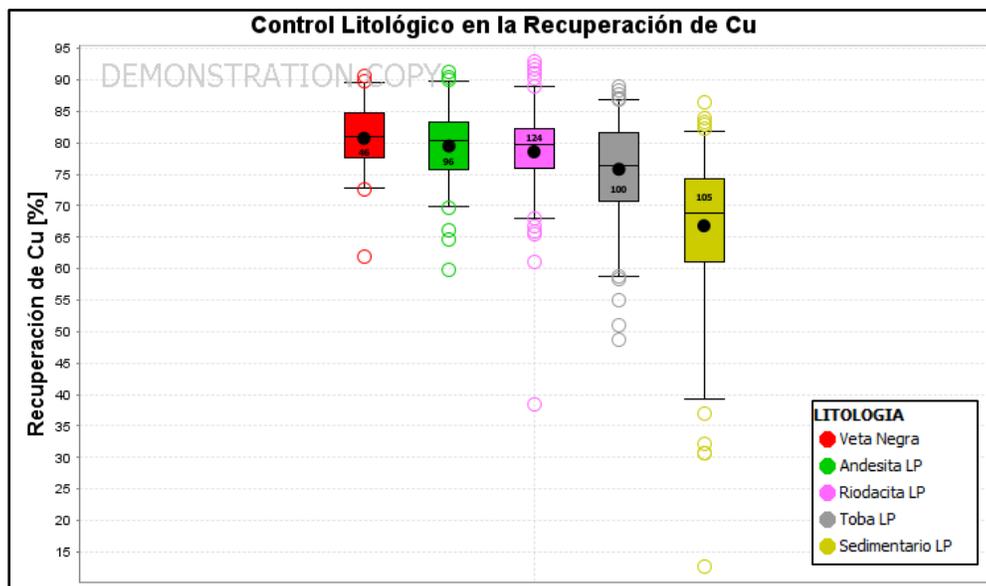


FIGURA 6.1: DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES DE LA DISTRIBUCION DE LOS PRINCIPALES GRUPOS LITOLÓGICOS PRESENTES EN EL SOLDADO. VETA NEGRA PRESENTA LAS MEJORES RECUPERACIONES DE COBRE Y MEOR DISPERSION, POR EL CONTRARIO, EL SDIEMNTARIO DE LO PRADO PRESENTA LA MENOR RECUPERACIÓN EN PROMEDIO Y MAUOR DISPERSION.

El gráfico de distribución de probabilidad con las unidades litológicas reconocidas, figura 6.2, muestra de forma visual las diferencias en su distribución, lo que permite considerarlos como grupos de comportamiento distinto frente a la recuperación de cobre. Existe una superposición entre la población de Andesita y Riodacita Lo Prado, lo que se observa también en la figura 6.4 presentando medias y dispersión similares. Se observa que, la unidad Veta Negra presenta, en promedio, las recuperaciones de cobre más altas y el Sedimentario de Lo Prado las recuperaciones de cobre más bajas.

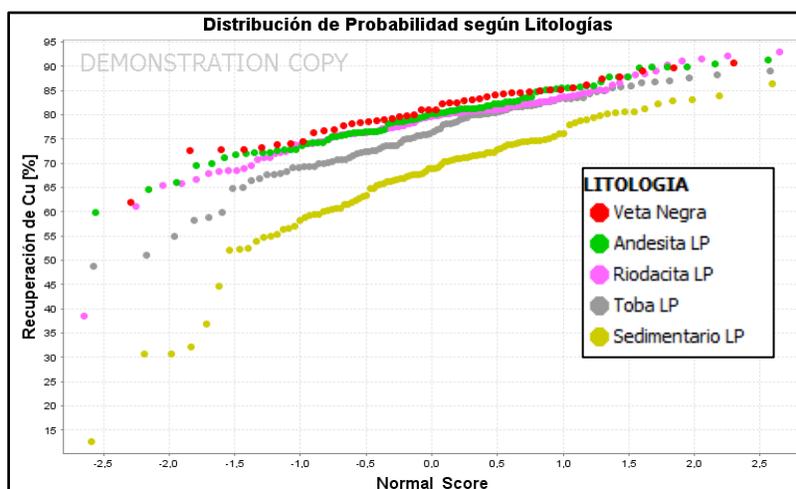


FIGURA 6.2: DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE LA RECUPERACIÓN DE COBRE EN LOS DISTINTOS GRUPOS LITOLÓGICOS.

Como se evidencia en la sección 6.3 existen una alta correlación entre los valores altos de Factor K y las bajas recuperaciones de cobre, con las figuras 6.14 y 6.15 se exhibe un punto de influencia de este parámetro donde la correlación se comporta de forma lineal. Por lo tanto, es coherente calcular la estadística sin estos Outliers, lo que se muestra en la figura 6.3. Observándose claramente las diferencias entre las unidades litológicas.

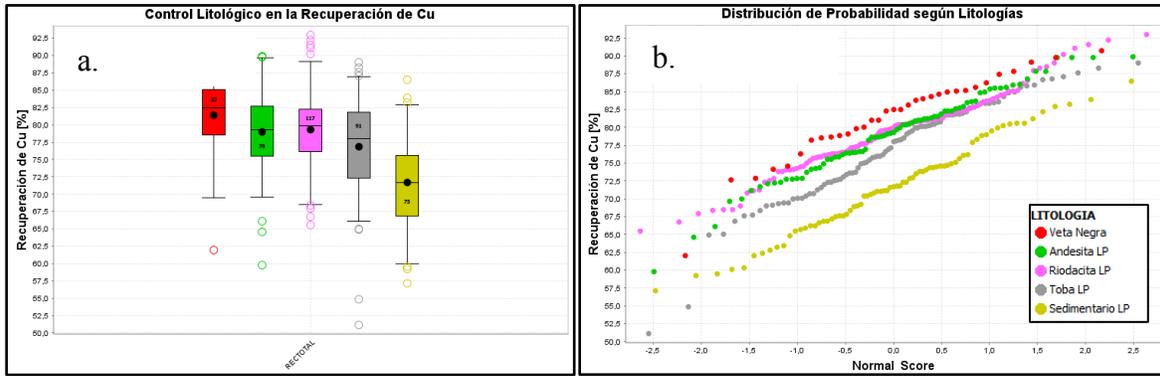


FIGURA 6.3: A: BOX SPLIT DE LA RECUPERACIÓN DE COBRE EN LAS DIFERENTES LITOLOGÍAS CON FACTOR K INFERIOR A 14.4%. B: DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD DE LAS DISTINTAS UNIDADES LITOLÓGICAS CON FACTOR K INFERIOR A 14.4%.

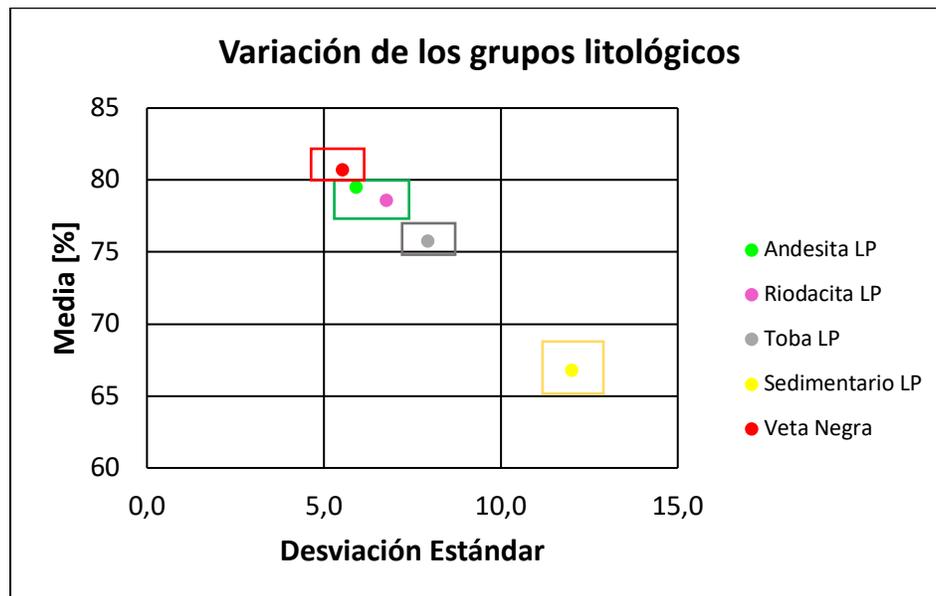


FIGURA 6.4: GRÁFICO DE MEDIA VS DISPERSION DE CADA GRUPO LITOLÓGICO, REPRESENTANDO LA VARIABILIDAD DE LAS UNIDADES

6.2 CORRELACIONES MULTIVARIABLES Y REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIABLE

Se tiene una base de datos numérica que incluye variables mineralógicas, geoquímica multi-elementos, información de procesos metalúrgicos y de análisis de partículas como se ha presentado en el capítulo 5 de antecedentes de la mina. Para abordar el objetivo específico n°2 se realizaron matrices de correlación con un análisis multivariable para identificar los parámetros más influyentes en la recuperación de cobre. Las correlaciones entre variables se midieron realizando regresiones lineales OLS (Ordinary Least Squares) calculando el coeficiente de correlación de Pearson. Se realizaron diferencias por litologías para identificar el comportamiento de cada una de ellas.

Las variables más importantes encontradas son:

1. Mineralogía de Mena y Ganga:
 - a. Calcopirita
 - b. Pirita
2. Mineralogía de Alteración:
 - a. Clorita
 - b. Limonitas
 - c. Rutilo
 - d. Sericita
3. Asociaciones Minerales:
 - a. Mineral-Py
 - b. Mineral-Qtz
 - c. Mineral-FeldK
 - d. Mineral-Clorita
 - e. Mineral-Rutilo
 - f. Mineral-Plg
4. Análisis de Partículas:
 - a. Liberación de Cpy
 - b. Liberación de Bn
 - c. Liberación de Cc
 - d. Liberación Mineral
 - e. Cpy Ocluida
 - f. Bn Ocluida
 - g. Cc Ocluida
5. Parámetros Metalúrgicos:
 - a. CUS
 - b. Factor K
 - c. TMOL

En las matrices de correlación calculadas se resaltan coeficientes entre ± 0.2 y ± 0.3 de color celeste mostrando una baja correlación lineal entre variables, de color anaranjado se resaltan los coeficientes de correlación de Pearson entre ± 0.3 y ± 0.5 indicando una buena correlación entre variables, y de color rojo los coeficientes entre ± 0.5 y 1 los cuales indican una muy buena correlación lineal entre variables.

Con la determinación de las variables más influyentes sobre el grado de recuperación de cobre de la mina El Soldado, se realizaron regresiones lineales multivariantes para estimar este parámetro. Logrando predecir la recuperación con gran certeza, para cada uno de los grupos litológicos; la estimación involucra diferentes grupos de variables dependiendo de la litología en cuestión y, en general se obtienen coeficientes de ajuste lineal R^2 superiores a 0.8

y valores de R^2 Ajustado mayores a 0.73. Cabe destacar que la mejor predicción de la variable recuperación de Cu se logra sin transformar la distribución de los datos.

6.2.1 TOBA LO PRADO

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Mineralogía de Alteración: <ul style="list-style-type: none"> - Limonitas - Clorita - Rutilo 2. Asociaciones Minerales: <ul style="list-style-type: none"> - Mineral-Qtz - Mineral-Feld K | <ul style="list-style-type: none"> - Mineral-Clorita - Mineral-Rutilo <ol style="list-style-type: none"> 3. Análisis de Partículas: <ul style="list-style-type: none"> - Liberación de Cpy - Liberación de Bn - Liberación Mineral |
|--|---|

TABLA 6.1: MATRIZ DE CORRELACIÓN DE VARIABLES PARA EL MODELO REGRESIÓN LINEAL EN TOBA LO PRADO.

| Toba Lo Prado 23 Datos | Rec Cu | Lim | Chl | Rut | Mineral- Qtz | Mineral- Feld K | Mineral- Chl | Mineral- Rut | Lib Cpy | Lib Bn | Lib Min |
|---------------------------|-----------|-----------|-------|-------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------|------------|------------|
| Recuperación de Cu | 1 | - 0,56 | 0,36 | 0,084 | -0,26 | -0,67 | 0,37 | -0,48 | 0,0022 | 0,034 | 0,41 |
| Limonitas | | 1 | -0,36 | 0,3 | -0,05 | 0,43 | -0,53 | 0,48 | -0,032 | -0,12 | - 0,25 |
| Clorita | | | 1 | 0,29 | -0,47 | -0,43 | 0,82 | -0,41 | -0,31 | - 0,013 | 0,24 |
| Rutilo | | | | 1 | -0,5 | -0,32 | 0,12 | -0,2 | -0,18 | -0,13 | 0,11 |
| Mineral-Qtz | | | | | 1 | 0,23 | -0,23 | 0,17 | 0,27 | 0,11 | - 0,38 |
| Mineral-Feld K | | | | | | 1 | -0,3 | 0,91 | 0,013 | -0,15 | - 0,75 |
| Mineral-Clorita | | | | | | | 1 | -0,25 | -0,25 | -0,11 | - 0,11 |
| Mineral-Rutilo | | | | | | | | 1 | 0,0082 | -0,17 | - 0,76 |
| Liberación de Cpy | | | | | | | | | 1 | 0,83 | 0,13 |
| Liberación de Bn | | | | | | | | | | 1 | 0,29 |
| Liberación Mineral | | | | | | | | | | | 1 |

La regresión lineal multivariables para la recuperación de Cu en la unidad litológica Toba Lo Prado queda determinada por la siguiente ecuación, y cada uno de los coeficientes se tabulan en la tabla 6.2:

Recuperación de Cu

$$\begin{aligned} &= (-6.5973 * LIMONITA) + (0.5817 * CLORITA) + (-11.1289 \\ &* RUTILO) + (-1.0666 * MINERAL - QTZ) + (-4.6593 * MINERAL \\ &- FELDK) + (-2.375 * MINERAL - CHL) + (11.5497 * MINERAL \\ &- RUTILO) + (0.28 * LIBERACION_CPY) + (-0.2625 * LIBERACION_BN) \\ &+ (-0.4135 * LIBERACION_MINERAL) + 131.4758 \end{aligned}$$

TABLA 6.2: TABLA RESUMEN DE LOS PARÁMETROS QUE DEFINEN LA REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIABLE EN LA TOBA LO PRADO.

| | Ceoficiente | Error Std | T-Val | P-Val |
|---------------------------|--------------------|------------------|--------------|---------------|
| Limonitas | -6,5973 | 2,1777 | -3,0295 | 0,0064 |
| Clorita | 0,5817 | 0,2605 | 2,2333 | 0,0365 |
| Rutilo | -11,1289 | 5,0184 | -2,2176 | 0,0377 |
| Mineral-Cuarzo | -1,0666 | 0,4318 | -2,4703 | 0,0222 |
| Mineral-FeldK | -4,6593 | 0,8191 | -5,688 | 0 |
| Mineral-Clorita | -2,375 | 0,9263 | -2,564 | 0,0181 |
| Mineral-Rutilo | 11,5497 | 3,3121 | 3,4871 | 0,0022 |
| Liberación Cpy | 0,28 | 0,1367 | 2,0489 | 0,0532 |
| Liberación Bn | -0,2625 | 0,14 | -1,8752 | 0,0747 |
| Liberación Mineral | -0,4135 | 0,1684 | -2,4555 | 0,0229 |
| Constante | 131,4758 | 16,5911 | 7,9245 | 0 |
| R2 | 0.85 | | | |
| R2 ajustado | 0.7386 | | | |

La regresión lineal multivariable se calculó con las 23 muestras de recuperación e información mineralógica QEMSCAN reconocidas en la tabla 6.1. A continuación, se presenta el gráfico de correlación entre la recuperación de Cu calculada y el valor real, observándose la línea de tendencia (figura 6.5) y la línea de identidad con barras de error del 5%. Como además la distribución de los valores residuales obtenidos (figura 6.6)

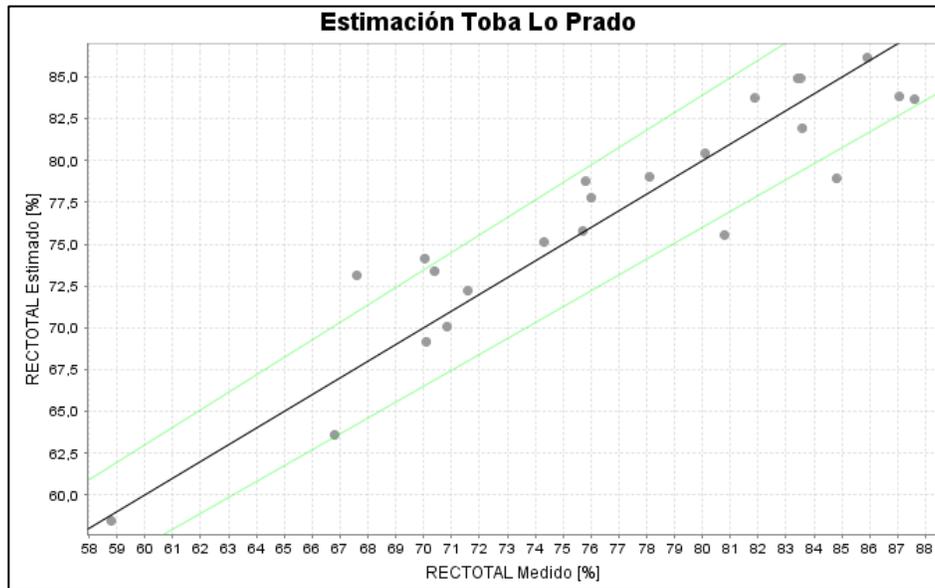


FIGURA 6.5: MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIABLE PARA EL GRUPO LITOLÓGICO TOBA LO PRADO.

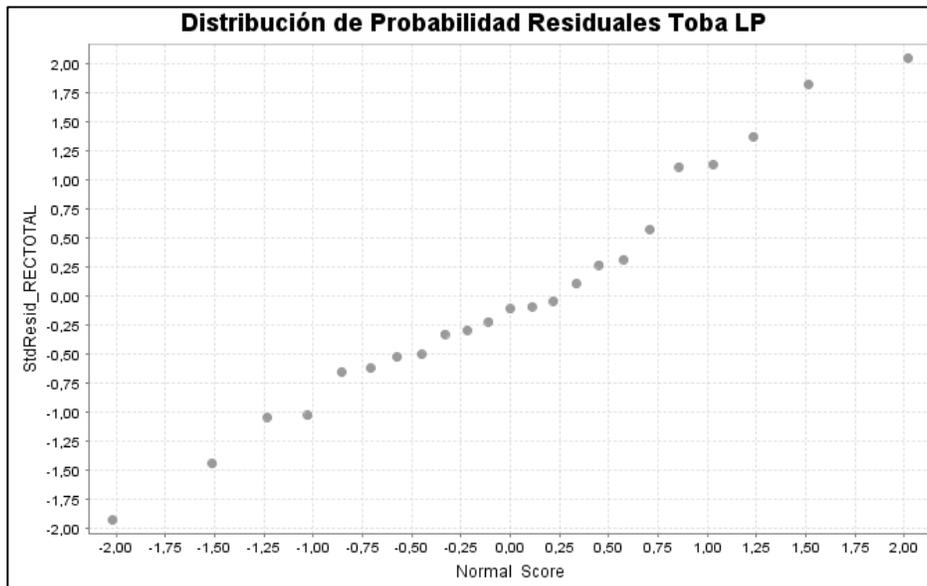


FIGURA 6.6: DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE LOS RESIDUOS OBTENIDOS DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIABLE.

6.2.2 RIODACITA LO PRADO

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| 1. Mineralogía de Mena: | - Mineral-Py |
| - Calcopirita | |
| 2. Mineralogía de Alteración: | 4. Análisis de Partículas: |
| - Sericita | - Liberación Mineral |
| 3. Asociaciones Minerales: | 5. Paramétros Metalúrgicos: |
| - Mineral-Plg | - Factor K |
| | - TMOL |

TABLA 6.3: MATRIZ DE CORRELACIÓN DE VARIABLES PARA EL MODELO REGRESIÓN LINEAL EN RIODACITA LO PRADO.

| Riodacita Lo Prado 51 Datos | Rec Cu | Cpy | Ser | Min-Plg | Mineral-Py | Liberación Min | Factor K | TMOL |
|-----------------------------|--------|------|-------|---------|------------|----------------|----------|--------|
| Recuperación de Cu | 1 | 0,25 | 0,29 | -0,11 | 0,041 | 0,31 | -0,75 | 0,19 |
| Calcopirita | | 1 | 0,054 | -0,073 | 0,16 | -0,13 | -0,2 | 0,0068 |
| Sericita | | | 1 | 0,059 | -0,013 | -0,17 | -0,046 | 0,14 |
| Mineral-Plg | | | | 1 | 0,054 | -0,61 | -0,032 | 0,092 |
| Mineral-Py | | | | | 1 | -0,48 | -0,11 | -0,18 |
| Liberación Mineral | | | | | | 1 | -0,049 | 0,14 |
| Factor K | | | | | | | 1 | 0,046 |
| TMOL | | | | | | | | 1 |

La regresión lineal multivariables para la recuperación de Cu en la unidad litológica Riodacita Lo Prado queda determinada por la siguiente ecuación, y cada uno de los coeficientes se tabulan en la tabla 6.4:

Recuperación de Cu

$$\begin{aligned}
 &= (0.7384 * \text{CALCOPIRITA}) + (0.4108 * \text{SERICITA}) + (0.3802 \\
 &* \text{MINERAL - PLG}) + (0.4538 * \text{MINERAL - PY}) + (0.3486 \\
 &* \text{LIBERACION_MINERAL}) + (-0.6803 * \text{FACTORK}) + (0.1738 \\
 &* \text{TMOL}) + 45.33
 \end{aligned}$$

TABLA 6.4: TABLA RESUMEN DE LOS PARÁMETROS QUE DEFINEN LA REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIABLE EN LA RIODACITA LO PRADO.

| | Ceoficiente | Error Std | T-Val | P-Val |
|---------------------------|--------------------|------------------|--------------|---------------|
| Calcopirita | 0,7384 | 0,3372 | 2,1897 | 0,0333 |
| Sericita | 0,4108 | 0,0883 | 4,655 | 0 |
| Mineral-Plg | 0,3802 | 0,203 | 1,873 | 0,067 |
| Mineral-Py | 0,4538 | 0,1679 | 2,7022 | 0,0094 |
| Liberación Mineral | 0,3486 | 0,0698 | 4,994 | 0 |
| Factor K | -0,6803 | 0,073 | -9,3209 | 0 |
| TMOL | 0,1738 | 0,1006 | 1,727 | 0,0905 |
| Constante | 45,33 | 6,6953 | 6,7705 | 0 |
| R2 | 0.81 | | | |
| R2 ajustado | 0.78 | | | |

La regresión lineal multivariable se calculó con las 51 muestras de recuperación e información mineralógica QEMSCAN reconocidas en la tabla 6.3 A continuación, se presenta el gráfico de correlación entre la recuperación de Cu calculada y el valor real, observándose la línea de tendencia (figura 6.7) y la línea de identidad con barras de error del 10%. Como además la distribución de los valores residuales obtenidos (figura 6.8).

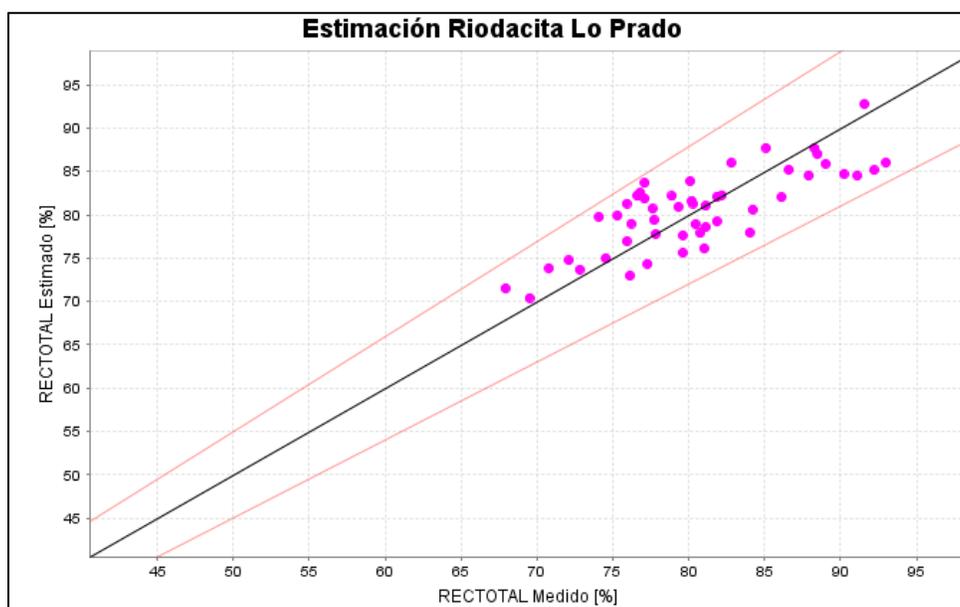


FIGURA 6.7: MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIABLE PARA EL GRUPO LITOLÓGICO RIODACITA LO PRADO.

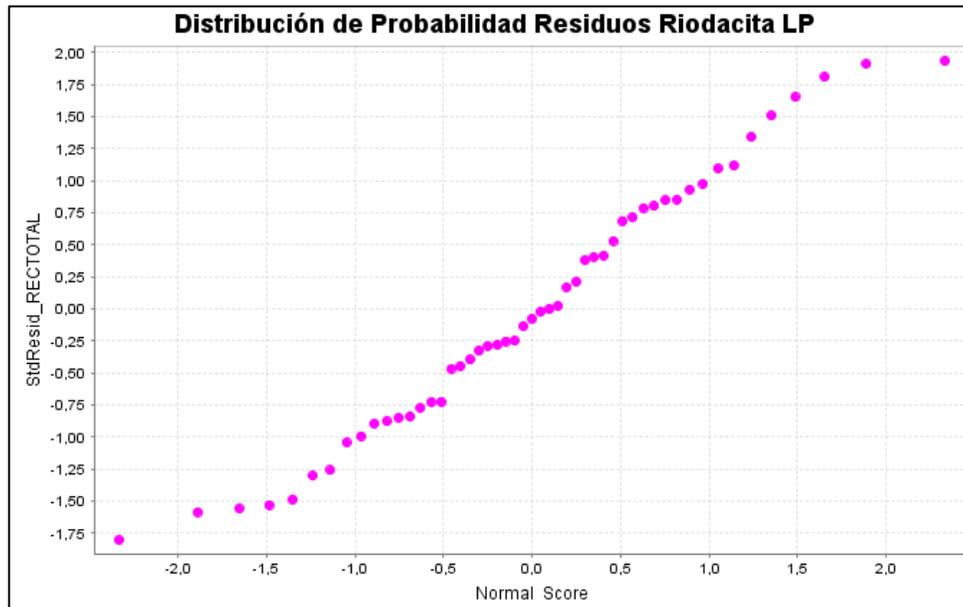


FIGURA 6.8: DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE LOS RESIDUOS OBTENIDOS DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIABLE.

6.2.3 ANDESITA LO PRADO

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| 1. Mineralogía de Ganga: | - Liberación de Cc |
| - Pirita | - Cpy Ocluida |
| 2. Mineralogía de Alteración: | - Bn Ocluida |
| - Clorita | - Cc Ocluida |
| 3. Asociaciones Minerales: | 5. Parametros Metalúrgicos: |
| - Mineral-Py | - CUS |
| 4. Análisis de Partículas: | |

TABLA 6.5: MATRIZ DE CORRELACIÓN DE VARIABLES PARA EL MODELO REGRESIÓN LINEAL EN ANDESITA LO PRADO.

| Andesita Lo Prado 25 Datos | Rec Cu | Py | Chl | Mineral-Py | Lib Cc | Cpy Ocluida | Bn Ocluida | Cc Ocluida | CUS |
|----------------------------|--------|-------|--------|------------|--------|-------------|------------|------------|-------|
| Recuperación de Cu | 1 | 0,094 | 0,16 | 0,17 | -0,21 | -0,33 | -0,38 | 0,16 | -0,35 |
| Pirita | | 1 | -0,059 | 0,45 | 0,13 | 0,05 | -0,17 | -0,23 | -0,12 |
| Clorita | | | 1 | -0,38 | -0,29 | -0,58 | 0,04 | 0,15 | 0,26 |
| Mineral-Py | | | | 1 | 0,25 | 0,71 | -0,44 | -0,37 | -0,61 |

| | | | | | | | | | |
|------------------|--|--|--|--|---|------|-------|---------|-------|
| Liberación de Cc | | | | | 1 | 0,27 | -0,2 | -0,43 | -0,32 |
| Cpy Ocluida | | | | | | 1 | -0,35 | -0,46 | -0,44 |
| Bn Ocluida | | | | | | | 1 | -0,0066 | 0,47 |
| Cc Ocluida | | | | | | | | 1 | 0,11 |
| CUS | | | | | | | | | 1 |

La regresión lineal multivariables para la recuperación de Cu en la unidad litológica Andesita Lo Prado queda determinada por la siguiente ecuación, y cada uno de los coeficientes se tabulan en la tabla 6.6:

Recuperación de Cu

$$= (-1.8153 * \text{PIRITA}) + (-0.3112 * \text{CLORITA}) + (1.3154 * \text{MINERAL} - \text{PY}) + (-0.3956 * \text{LIBERACION_CC}) + (-0.4894 * \text{CPY_OCLUIDA}) + (-0.4682 * \text{BN_OCLUIDA}) + (-1.8288 * \text{CC_OCLUIDA}) + (-53.3518 * \text{CUS}) + 125.9585$$

TABLA 6.6: TABLA RESUMEN DE LOS PARÁMETROS QUE DEFINEN LA REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIABLE EN LA ANDESITA LO PRADO.

| | Ceoficiente | Error Std | T-Val | P-Val |
|----------------------------|--------------------|------------------|--------------|---------------|
| Pirita | -1,8153 | 0,6147 | -2,9531 | 0,0071 |
| Clorita | -0,3112 | 0,0935 | -3,3271 | 0,0029 |
| Mineral-Py | 1,3154 | 0,3382 | 3,8889 | 0,0007 |
| Liberación de Cc | -0,3956 | 0,0901 | -4,3878 | 0,0002 |
| Calcopirita Ocluida | -0,4894 | 0,0605 | -8,083 | 0 |
| Bornita Ocluida | -0,4682 | 0,094 | -4,9789 | 0 |
| Calcosina Ocluida | -1,8288 | 0,5146 | -3,5537 | 0,0017 |
| CUS | -53,3518 | 20,3413 | -2,6228 | 0,0152 |
| Constante | 125,9585 | 7,8035 | 16,1413 | 0 |
| R2 | 0.87 | | | |
| R2 ajustado | 0.80 | | | |

La regresión lineal multivariable se calculó con las 25 muestras de recuperación e información mineralógica QEMSCAN reconocidas en la tabla 6.5. A continuación, se presenta el gráfico de correlación entre la recuperación de Cu calculada y el valor real, observándose la línea de tendencia (figura 6.9) y la línea de identidad con barras de error del 5%. Como además la distribución de los valores residuales obtenidos (figura 6.10).

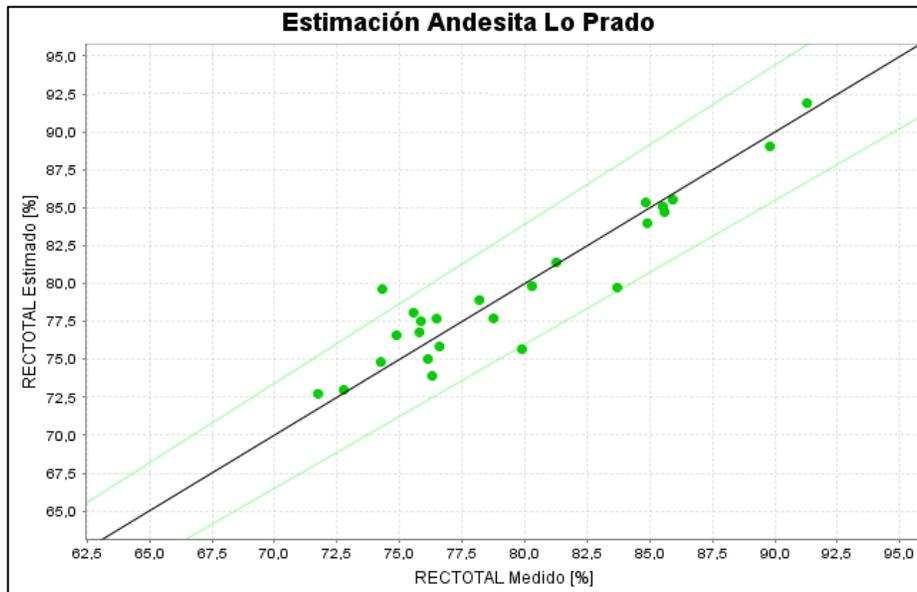


FIGURA 6.9: MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIABLE PARA EL GRUPO LITOLÓGICO ANDESITA LO PRADO.

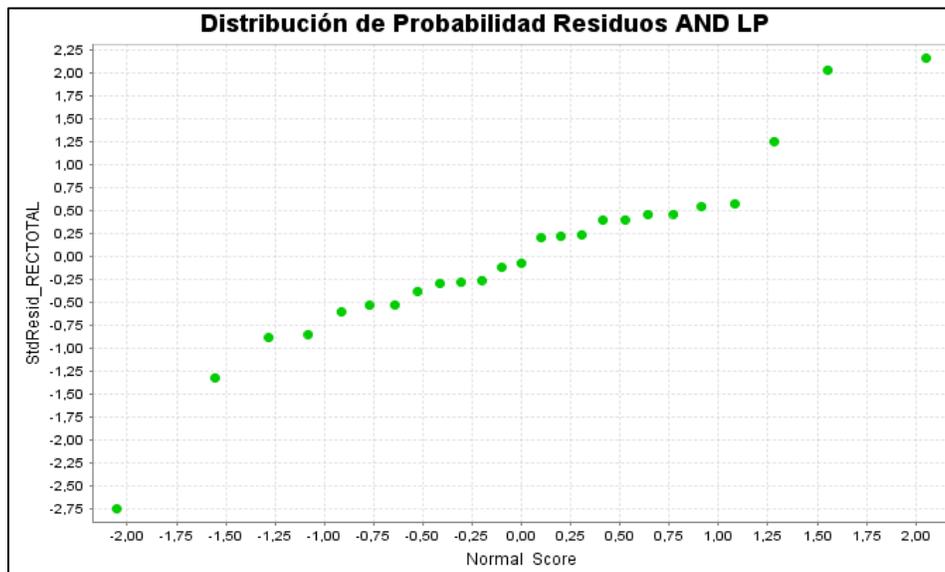


FIGURA 6.10: DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE LOS RESIDUOS OBTENIDOS DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIABLE.

6.3 FACTOR K

El Factor K corresponde a la razón de concentración entre las fases minerales oxidadas y sulfuradas de cobre. La mina mide la ley de cobre a través del parámetro CUT y también solicita al laboratorio químico la medición del cobre oxidado medido en la variable CUS. Este parámetro es una variable importante en el procesamiento mineral, sobre todo en el proceso de flotación de sulfuros, ya que da cuenta de la fracción porcentual de cobre oxidado o soluble (concepto que alude al mecanismo de obtención del cobre en dichas fases minerales, disolución por ácido en pilas de lixiviación) en la muestra. El cobre soluble no es posible recuperarlo por medio del proceso de flotación convencional, en teoría debe decantar y acumularse en el relave, impactando de forma lineal en la recuperación de cobre, como se puede observar en la figura 6.10.

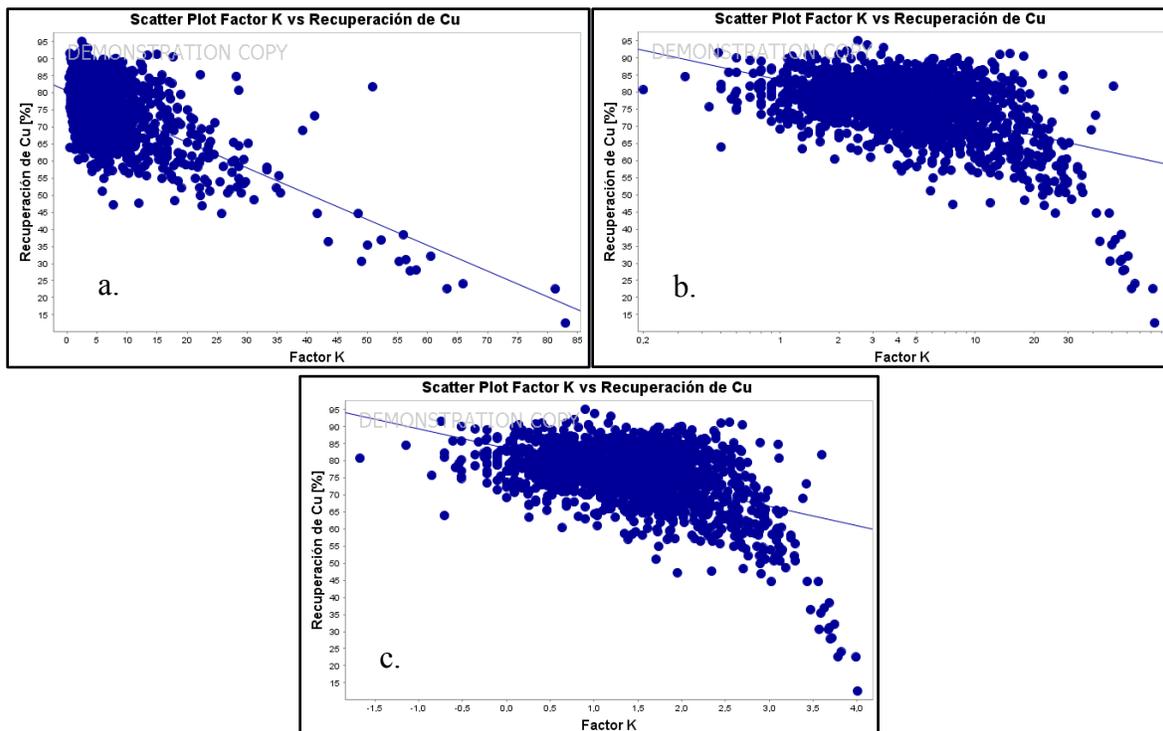


FIGURA 6.11: NUBE DE DISPERSIÓN ENTRE LA RECUPERACIÓN DE COBRE Y LA RAZON DE SOLUBILIDAD (FACTOR K) PARA MOSTRAR CORRELACIÓN ENTRE ESTAS VARIABLES. A: SCATTER PLOT SIN AJUSTE. B: SCATTER PLOT CON AJUSTE LOGARITMICO. C: SCATTER PLOT CON AJUSTE POTENCIAL.

TABLA 6.7: TABLA RESUMEN DE LA TRANSFORMACIÓN EN LA DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS PARA ENCONTRAR EL MEJOR AJUSTE. EN COLOR ROJO SE PRESETA EL MEJOR AJUSTE QUE CORRELACIONA LAS VARIABLES.

| | Sin Ajuste | Ajuste Log | Power Transformation |
|----------------------|--------------------|------------|----------------------|
| X | Factor K | | |
| Y | Recuperación de Cu | | |
| Cantidad de muestras | 1459 | | |
| Pendiente | -0.75 | -12.41 | -5.67 |
| Intercepto | 80.57 | 83.58 | 83.63 |
| R ² | 0.42 | 0.26 | 0.25 |
| Pearson | -0.65 | -0.51 | -0.44 |

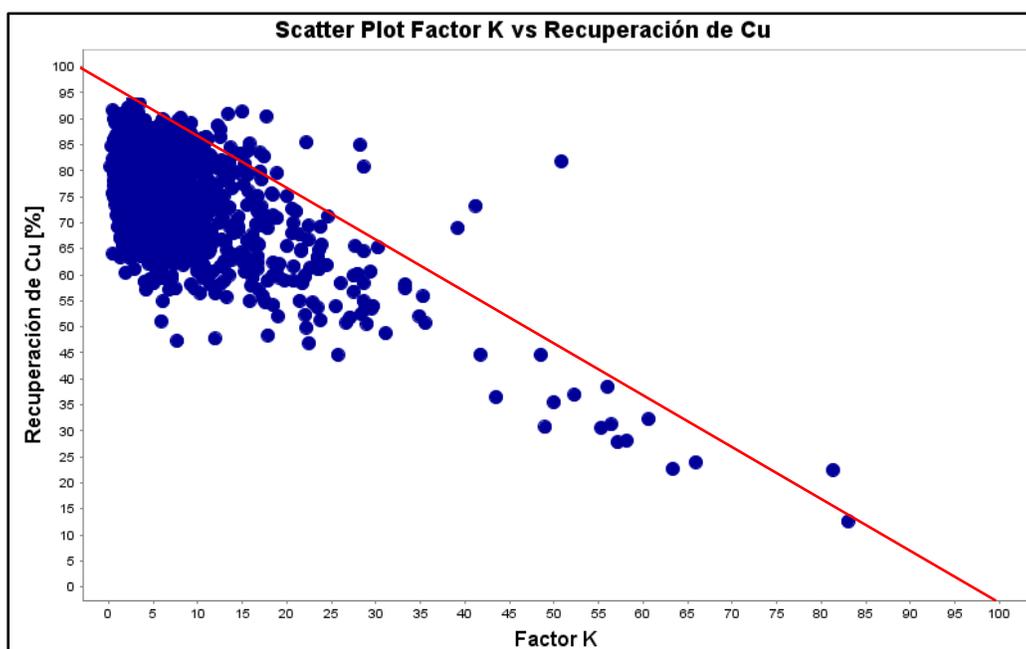


FIGURA 6.12: GRAFICO DE SCATTER PLOT ENTRE RECUPERACIÓN DE COBRE Y LA RAZON DE SOLUBILIDAD (FACTOR K). EL GRAFICO MUESTRA LA CORRELACION PAR A PAR ENTRE AMBAS VARIABLES, EL COEFICIENTE DE CORRELACION DE PEARSON ES DE -0.65, MOSTRANDO UNA BUENA CORRELACION. EN ROJO SE MUESTRA LA LINEA DE IDENTIDAD QUE EN UN CASO IDEAL DEBERIA REFLEJAR EL MAXIMO DE COBRE A RECUPERAR.

En la figura 6.12 se observa que la nube de dispersión se ubica mayoritariamente por debajo de la línea de identidad indicando que no se logra recuperar la totalidad del cobre sulfurado. Teóricamente, si por ejemplo se tiene un 40% de cobre soluble (el cual no flota) y un 60 % de cobre sulfurado (el cual sí flota), el gráfico muestra que las recuperaciones se ubican por debajo del 60%. Existe una dependencia de la razón de solubilidad sobre la recuperación de cobre que desde cierto punto responde de forma lineal, se ha determinado

según las figuras 6.14 y 6.15 que el punto de inflexión donde empieza la correlación lineal tiene un valor de 14.4 % involucrando el percentil 90 (el 90% de las muestras se encuentran bajo este nivel). Se identificaron litológicamente sólo 691 muestras, las cuales han sido graficadas en la figura 6.13 a continuación, mostrando que existen diferencias en dispersión y media de los diferentes grupos litológicos. Se mencionará de forma global que el paquete sedimentario de la parte inferior del miembro superior de la Fm. Lo Prado presenta bajas recuperaciones de cobre, asociados a los niveles más altos de Factor K.

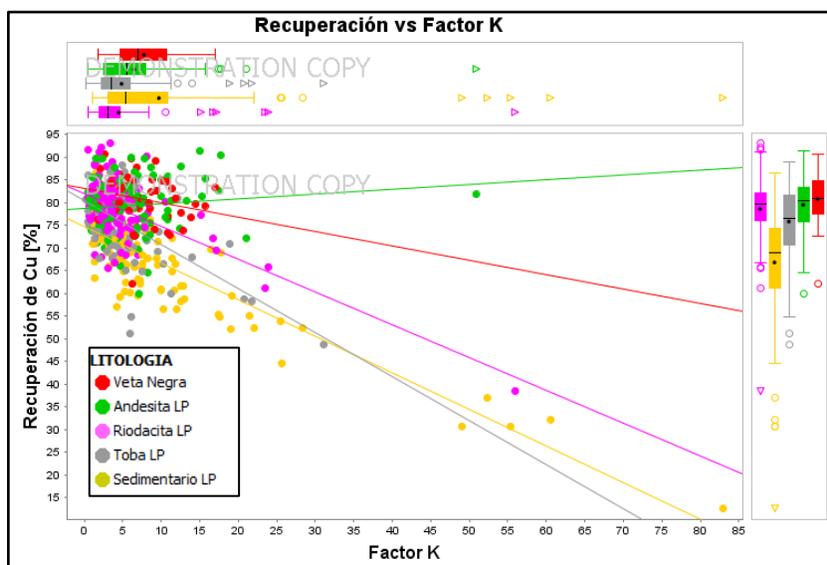


FIGURA 6.13: CORRELACION ENTRE EL FACTOR K Y LA RECUPERACION DE COBRE VISUALIZADO EN LAS DISTINTAS LITOLOGIAS DEL YACIMIENTO. EN ROJO SE PRESENTAN LAS MUESTRAS DE VETA NEGRA, EN VERDE ANDASEITA LO PRADO, EN ROSADO RIODACITA LO PRADO, EN GRIS TOBA LO PRADO Y EN AMARILLO EL SEDIMENTARIO DE LA PARTE INFERIOR DE LO PRADO. A AMBOS COSTADOS DEL GRAFICO PRINCIPAL SE INCORPORAN BOX PLOT DE LAS DIFERENTES CATEGORIAS LITOLOGICAS MOSTRANDO LA DISPERSION Y MEDIA DE CADA UNA DE ELLAS.

TABLA 6.8: TABLA RESUMEN DE LAS DIFERENCIAS POR LITOLOGÍAS. SE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN QUE CARACTERIZA CADA UNO DE LOS GRUPOS LITOLÓGICOS. ENFATIZANDO LA CORRELACIÓN ENTRE LA RECUPERACIÓN DE COBRE Y LA RAZON DE SOLUBILIDAD EN CADA LITOLOGÍA. EN COLOR ROJO SE MUESTRA UNA MUY BUENA CORRELACION PARA EL SEDIMENTARIO, LA RIODACITAY LA TOBA DE LA FM. LO PRADO.

| Sin Ajuste | Litologías | | | | |
|----------------------|--------------------|-----------------------|---------------|-------------------|------------|
| | Riodacita Lo Prado | Sedimentario Lo Prado | Toba Lo Prado | Andesita Lo Prado | Veta Negra |
| X | Factor K | | | | |
| Y | Recuperación de Cu | | | | |
| Cantidad de muestras | 124 | 105 | 100 | 96 | 46 |
| Pendiente | -0.72 | -0.81 | -0.97 | 0.10 | -0.32 |
| Intercepto | 81.81 | 74.63 | 80.49 | 78.81 | 83.19 |
| R ² | 0.41 | 0.76 | 0.33 | 0.01 | 0.05 |
| Pearson | -0.64 | -0.87 | -0.57 | 0.11 | -0.21 |

6.3.1 DETERMINACIÓN NIVEL DE INFLUENCIA FACTOR K

Se realizó una metodología poco convencional para mostrar el punto de influencia del Factor K sobre la recuperación de cobre como se observa en las figuras siguientes 6.14 y 6.15, se graficó el coeficiente de correlación de Pearson de acuerdo a percentiles del espacio muestral (percentiles con aumento de 3%), bajo la hipótesis de que la correlación entre las variables no es constante, por lo tanto, existe un punto de inflexión donde la dependencia par a par entre las variables mencionadas se intensifica mostrando la correlación lineal observada en la figura 6.12. Bajo este criterio se logró identificar que el punto de inflexión ocurre para un Factor K de 14.4% involucrando el percentil 90 y un coeficiente de correlación de -0.28, donde el 10% restante de muestras reflejan la buena correlación entre las variables (de coeficiente correlación de -0.28 a -0.65).

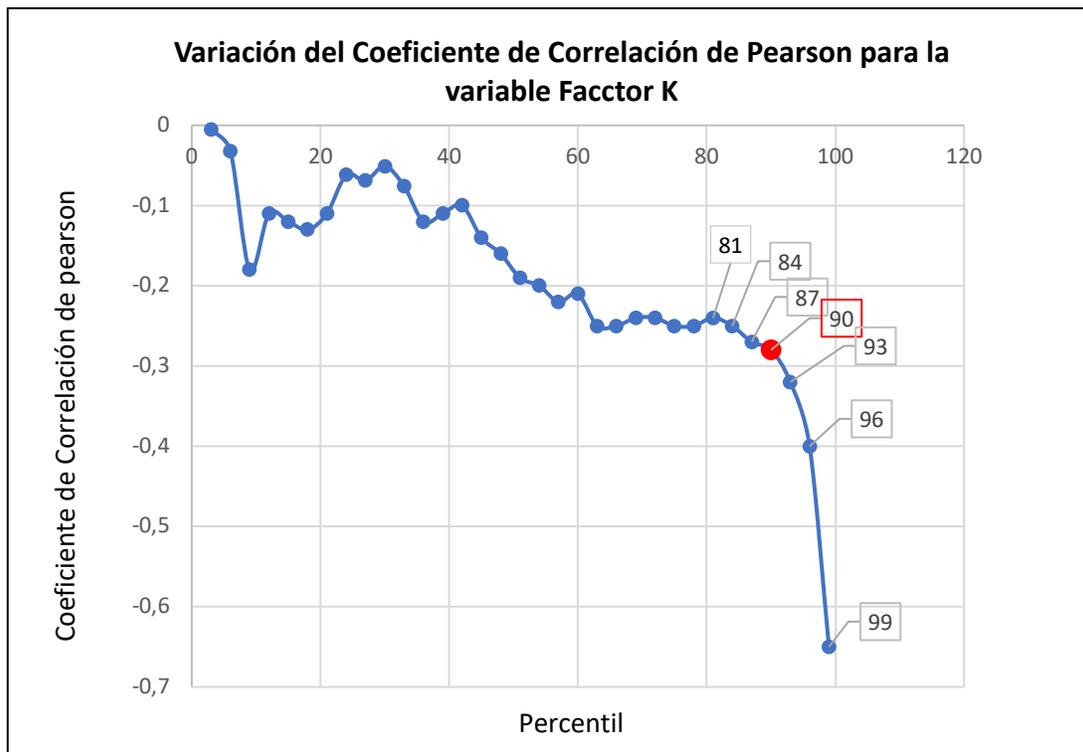


FIGURA 6.14: GRÁFICO DE VARIACIÓN PORCENTUAL DE LOS DATOS QUE ILUSTRAN COMO VARÍA EL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE LA RECUPERACIÓN DE COBRE Y EL FACTOR K. SE RESALTA EN COLOR ROJO EL PERCENTIL AL CUAL SE DISPARA DE FORMA EXPONENCIAL ESTE COEFICIENTE.

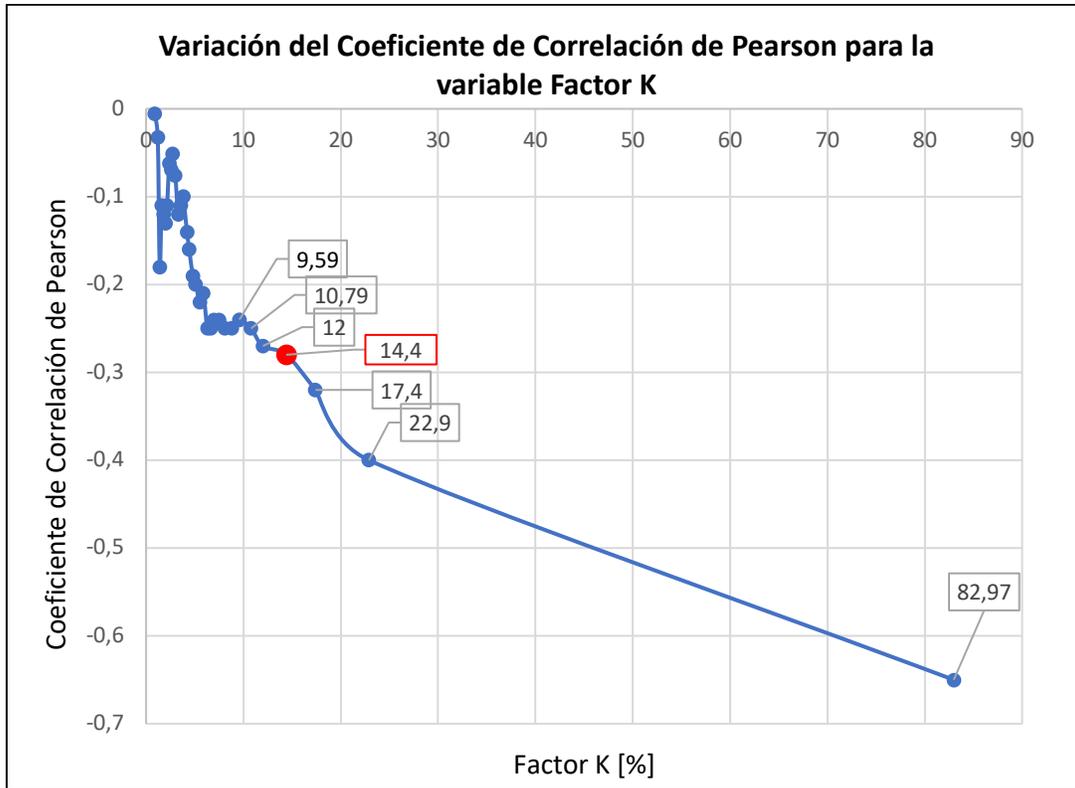


FIGURA 6.15: GRÁFICO QUE ILUSTRAS EL NIVEL DE INFLUENCIA LINEAL DEL FACTOR K SOBRE LA RECUPERACIÓN DE COBRE. SE RESALTA EN ROJO EL PUNTO DE INFLUENCIA DIRECTA.

6.4 LIBERACIÓN MINERAL

Como se explica en la sección 5.1.4 el parámetro definido como Liberación Mineral corresponde a una combinación lineal de las partículas ocluidas de cada fase mineral sulfurada de Cu. Se ha reconocido que las liberaciones varían según la fase mineral en cuestión y con ello también varía la cantidad de partículas ocluidas.

En la figura 6.16 se muestra como varían estas liberaciones y la cantidad de partículas ocluidas, y en la tabla 6.9 se resumen los valores para cada grupo. Se observa que el mineral de Cpy es el que se encuentra mayoritariamente ocluido a lo largo del yacimiento, donde, en promedio el 26% de las partículas de Cpy están ocluidas en cada muestra. Se observa además que la Cv presenta menor liberación mineral con respecto a la Cpy, Bn y Cc, sin embargo, las partículas ocluidas son ínfimas, en esto se consideran partículas ocluidas aquellas en contacto superficial con fases minerales de ganga, y la Cv se encuentra principalmente en contacto con Bn y Cc.

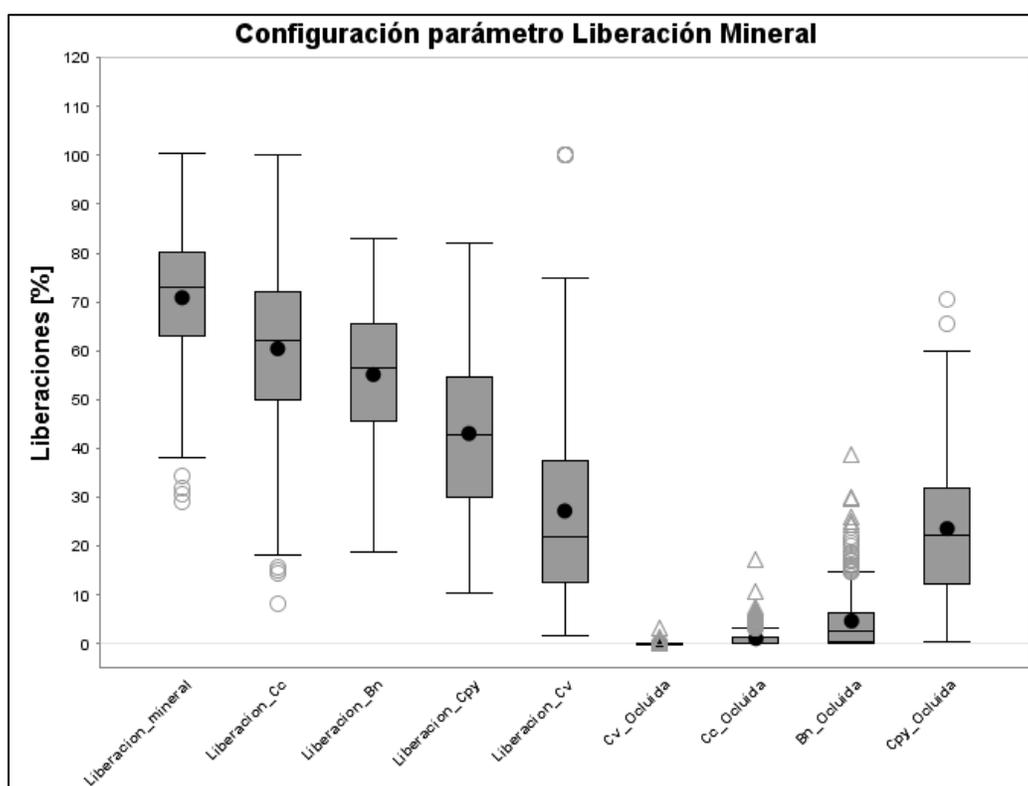


FIGURA 6.16: BOX SPLOTS QUE RESUMEN LOS NIVELES DE LIBERACION DE PARTICULAS Y PARTICULAS OCLUIDAS POR ESPECIES SULFURADAS DE COBRE.

TABLA 6.9: TABLA RESUMEN, INDICANDO LOS PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE LOS GRUPOS MENCIONADOS EN LA FIGURA 6.36. SE RECONOCE QUE LAS PARTICULAS DE CPY ESTAN EN PROMEDIO UN 20% OCLUIDAS.

| | Lib liberación Mineral | Cv Ocluida | Cc Ocluida | Bn Ocluida | Cpy Ocluida |
|-------------------------------|------------------------|------------|------------|------------|-------------|
| Cuenta de Datos | 354 | 143 | 289 | 350 | 354 |
| Mínimo | 29.22 | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.504 |
| Máximo | 100.44 | 3.23 | 17.37 | 38.73 | 70.56 |
| Media | 70.88 | 0.08 | 1.08 | 4.69 | 23.61 |
| Mediana | 73.03 | 0.02 | 0.22 | 2.69 | 22.15 |
| Desviación Estándar | 12.84 | 0.30 | 1.89 | 5.66 | 14.34 |
| Varianza | 164.95 | 0.09 | 3.59 | 32.07 | 205.57 |
| Coef. De Variación [%] | 18.12 | 394.74 | 174.86 | 120.74 | 60.73 |

Para conocer la interacción entre las liberaciones de partículas minerales de los 4 sulfuros hipógenos de cobre presentes en la mina, considerados la principal mena de cobre de El Soldado, se graficó la liberación de cada uno de ellos. Para apoyar el seguimiento realizado a la unidad de Andesita Lo Prado, las figuras 6.17 y 6.18 intentan representar este comportamiento. La primera figura permite observar diferencias en la liberación de partículas reconociéndose mayor liberación en las partículas de Cc, seguidos por la Bn, la Cpy y la Cv, respondiendo a la información obtenida en el box plot de la figura 6.16.

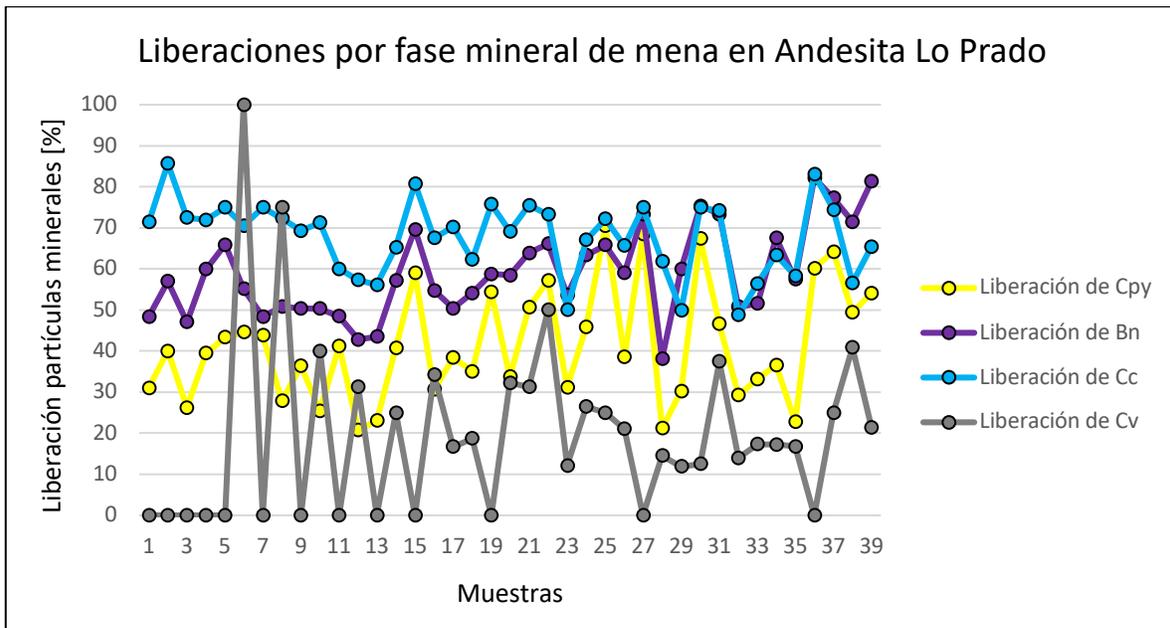


FIGURA 6.17: GRÁFICO DE LAS LIBERACIONES POR FASE MINERAL SULFURADA DE COBRE CALCULADO CON LAS MUESTRAS DE LA UNIDAD DE ANDESITA LO PRADO.

Por otro lado, la figura 6.18 exhibe la dependencia de las partículas ocluidas sobre el parámetro definido como liberación mineral y da cuenta, además, de cómo se relacionan con la recuperación de cobre. Se reconoce una alta correlación con la recuperación de cobre para valores de liberación mineral superior al 70%, sin embargo, la recuperación no responde de forma lineal para las liberaciones por debajo de este rango, lo que indica que se recuperan partículas ocluidas, lo que debe estar asociado a algún parámetro geológico.

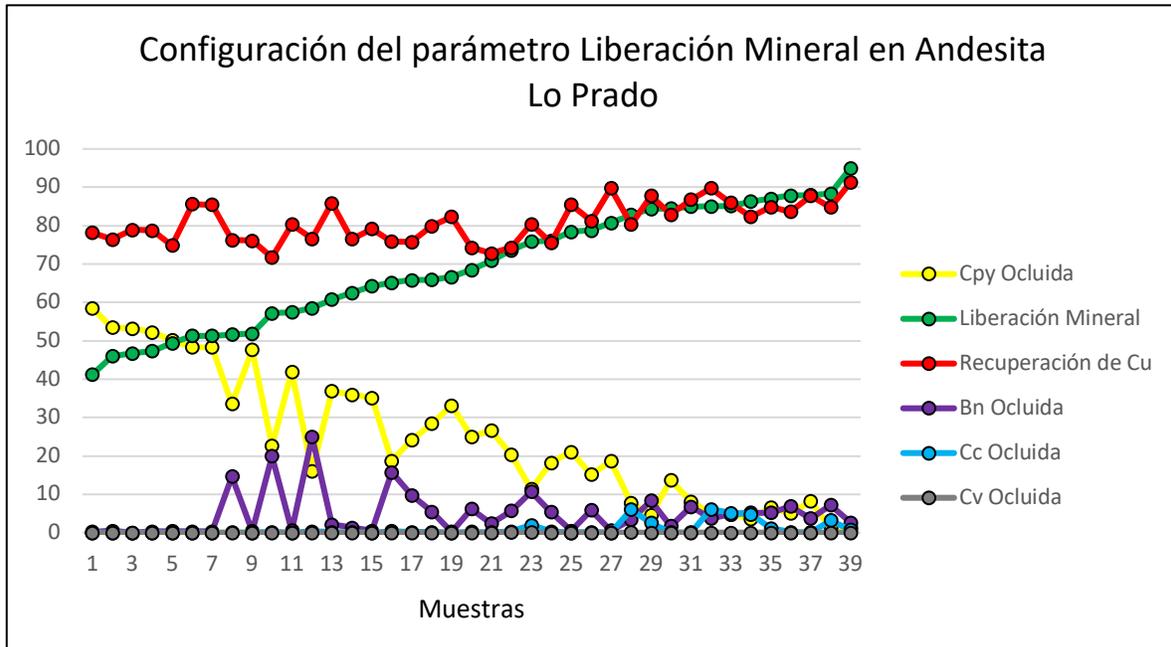


FIGURA 6.18: GRÁFICO QUE ILUSTRAS LA DEPENDENCIA DE LA LIBERACION MINERAL CON NIVEL DE PARTICULAS OCLUIDAS, DEBIDO A COMO SE CONFECCIONÓ ESTA VARIABLE. EN COLOR VERDE SE REPRESENTA LA LIBERACIÓN MINERAL CONSTRUIDA Y EN ROJO LA RECUPERACION DE COBRE.

6.4.1 DIFERENCIAS EN LA RECUPERACIÓN DE CU POR ZONA Y OCURRENCIA MINERAL

En El Soldado se presentan núcleos mineralizados con zonas minerales características, presentando núcleos de Bn-Cc, o Bn intensamente diseminada en la masa fundamental, zonaciones externas de Bn-Cpy, hasta llegar a halos de interacción entre Cpy y Py diseminada. Además, existen variaciones laterales en la ocurrencia y textura de las fases minerales de mena, que están asociadas a estas zonas minerales, como se observa en las tablas 2.3, 2.4 y 2.6. El trabajo de esta memoria es reconocer y estudiar el alcance y dependencia de la recuperación de cobre, con un enfoque geometalúrgico, analizando geología y metalurgia. Y como se ha mostrado en este capítulo, la recuperación de cobre tiene una dependencia litológica y sólo tiene sentido al analizarla según estos grupos litológicos, por lo cual, se caracterizan las zonas y ocurrencia minerales dentro de ellos. Así se aísla la variable litológica y se puede considerar representativo el efecto de las demás variables geológicas.

En este caso se presenta la mineralización en la Andesita Lo Prado, como indica la tabla 2.6, se tiene 72 datos con información geológica lo que permite clasificar y asociar muestras a cada zona mineral y textural. Además, se presenta información numérica QEMSCAN del 50% de estos datos, con los que se realiza una caracterización de la recuperación de cobre, liberación por especie mineral y liberación mineral global de las zonas y ocurrencias minerales.

Las zonas minerales principales que conforman los cuerpos mineralizados son:

1. Núcleo de Bornita – Calcosina
2. Núcleo de Bornita
3. Zona de Bornita – Calcopirita
4. Zona de Calcopirita
5. Zona de Calcopirita – Pirita

Se construyeron box plot con cada una de las zonas minerales, enfatizando como varía la recuperación de cobre en cada una de ellas. Además, se caracterizan las distintas ocurrencias en torno a la recuperación de cobre y la liberación de partículas.

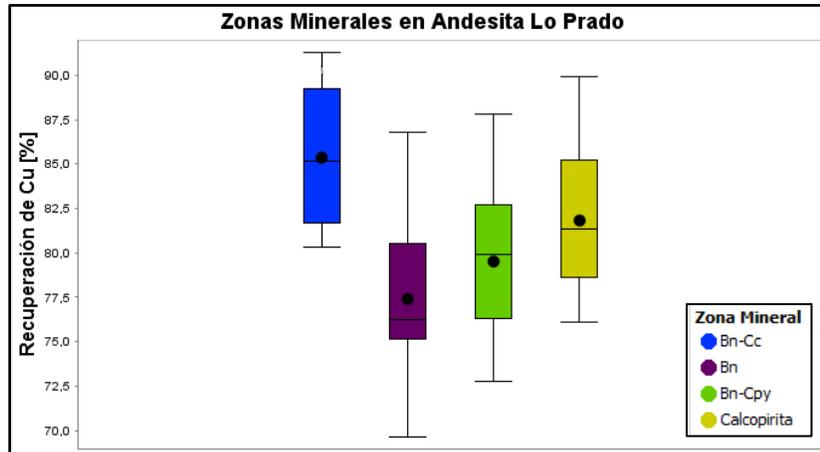


FIGURA 6.19: DIAGRAMA BOX SPLIT QUE ILUSTRAS LOS NIVELES DE RECUPERACIÓN DE COBRE EN LAS DISTINTAS ZONAS MINERALES PARA LA UNIDAD DE ANDESITA LO PRADO.

En la figura anterior 6.19 existe una variación gradual de la recuperación en cada zonas mineralizadas, donde los núcleos de bornita presentan los niveles más bajos debido principalmente a la ocurrencia y textura que caracteriza esta zona, una ocurrencia diseminada muy fina e intensamente distribuida intergranularmente en la masa fundamental, en cambio en las partes externas del núcleo, gradualmente aparece calcopirita, pero, con ocurrencia gruesa y aislada lo que se ve reflejado en las leyes (menor intensidad de mineralización), mejorando la liberación de las partículas y con ello el grado de material recuperado.

Los núcleos con presencia de calcosina presentan buenas recuperaciones, debido a la buena flotabilidad natural de este mineral con alto contenido de cobre en su estructura. En la tabla 6.10 se resaltan las recuperaciones medias de cada zona mineral.

TABLA 6.10: TABLA RESUMEN DE LOS NIVELES DE RECUPERACION DE COBRE POR ZONA MINERAL CARACTERIZADA.

| Zona Mineral | Bornita- Calcosina | Bornita | Bornita- Calcopirita | Calcopirita |
|-------------------------------|-----------------------|---------|-------------------------|-------------|
| Cuenta de Datos | 12 | 14 | 15 | 18 |
| Mínimo | 80.30 | 69.61 | 72.75 | 76.13 |
| Máximo | 91.30 | 86.80 | 87.80 | 89.90 |
| Media | 85.35 | 77.40 | 79.51 | 81.82 |
| Mediana | 85.15 | 76.24 | 79.88 | 81.35 |
| Desviación Estándar | 3.76 | 4.58 | 4.38 | 4.20 |
| Varianza | 14.12 | 20.96 | 19.17 | 17.63 |
| Coef. De Variación [%] | 4.40 | 5.91 | 5.51 | 5.13 |

1. Núcleo de Bornita - Calcosina:

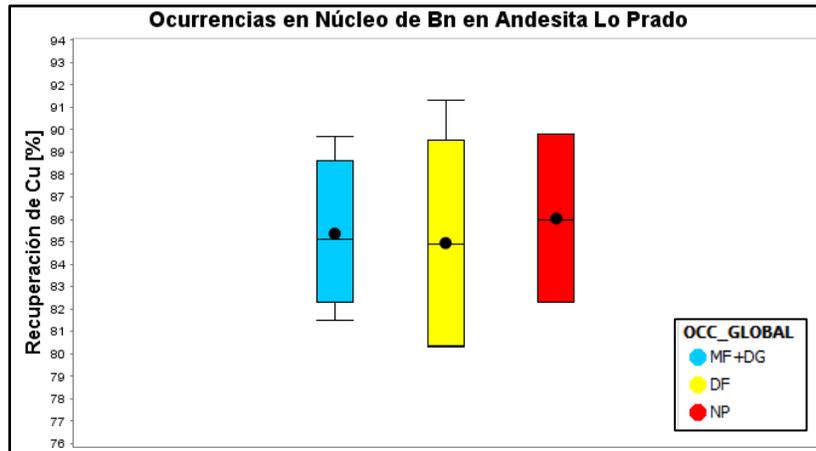


FIGURA 6.20: DIAGRAMA BOX SPLIT QUE ILUSTRAS LA DIFERENCIA EN LOS NIVELES DE RECUPERACION DENTRO DE UNA MISMA ZONA MINERAL, EN ESTE CASO NUCLEO DE BORNITA – CALCOSINA.

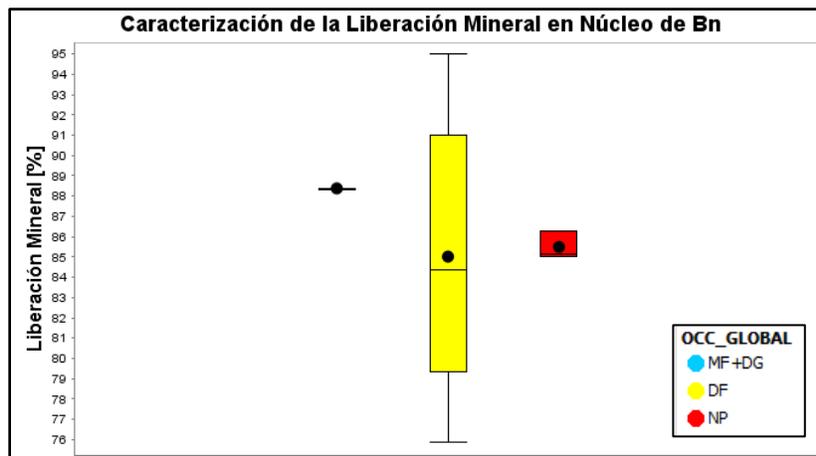


FIGURA 6.21: BOX SPLIT QUE ILUSTRAS EL GRADO DE LIBERACION DE PARTICULAS MINERALES EN CADA UNA DE LAS OCURENCIAS DESCRITAS PARA LOS NUCLEOS DE BORNITA.

2. Núcleo de Bornita:

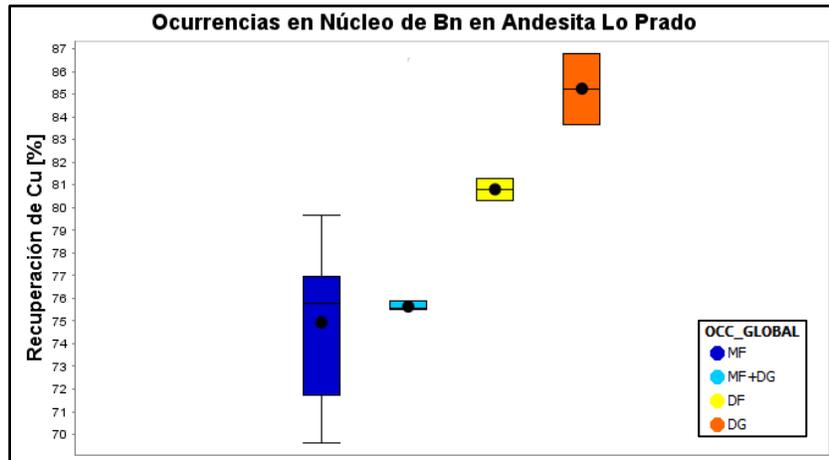


FIGURA 6.22: DIAGRAMA BOX SPLIT QUE ILUSTRAS LA DIFERENCIA EN LOS NIVELES DE RECUPERACION DENTRO DE UNA MISMA ZONA MINERAL, EN ESTE CASO NUCLEO DE BORNITA. SE RECONOCE COMO LA OCURRENCIA DEFINIDA COMO MASA FUNDAMENTAL PRESENTA LOS PEORES NIVELES DE RECUPERACIÓN DE COBRE.

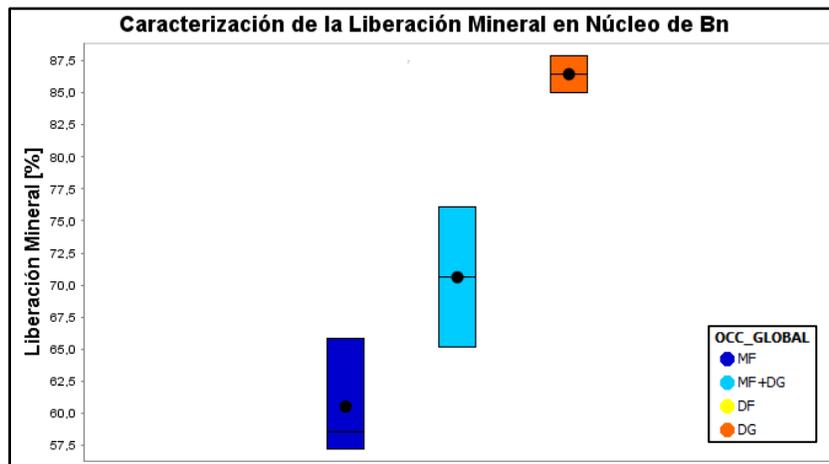


FIGURA 6.23: BOX SPLIT QUE ILUSTRAS EL GRADO DE LIBERACION DE PARTICULAS MINERALES EN CADA UNA DE LAS OCURRENCIAS DESCRITAS PARA LOS NUCLEOS DE BORNITA.

3. Zona Bornita - Calcopirita:

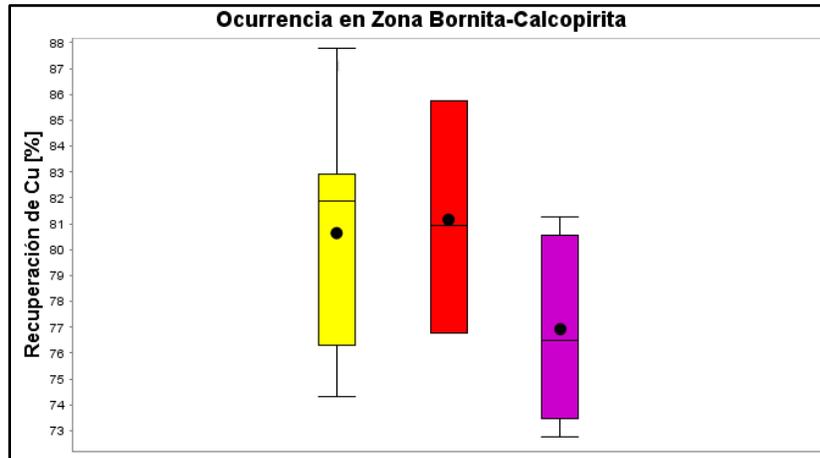


FIGURA 6.24: DIAGRAMA BOX SPLIT QUE ILUSTR LA DIFERENCIA EN LOS NIVELES DE RECUPERACION DENTRO DE UNA MISMA ZONA MINERAL, EN ESTE CASO ZONA BORNITA - CALCOPIRITA. NO SE RECONOCEN DIFERENCIAS DEFINIDAS POR OCURRENCIA.

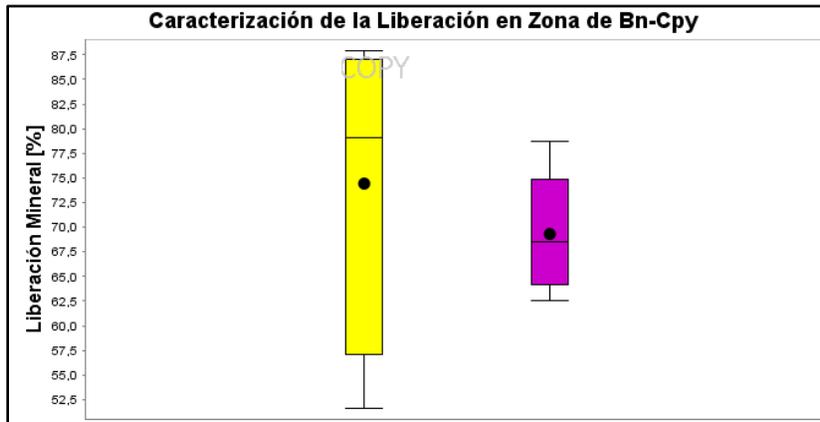


FIGURA 6.25: BOX SPLIT QUE ILUSTR EL GRADO DE LIBERACION DE PARTICULAS MINERALES EN CADA UNA DE LAS OCURRENCIAS DESCRITAS PARA LA ZONA DE BORNITA - CALCOPIRITA.

4. Zona de Calcopirita:

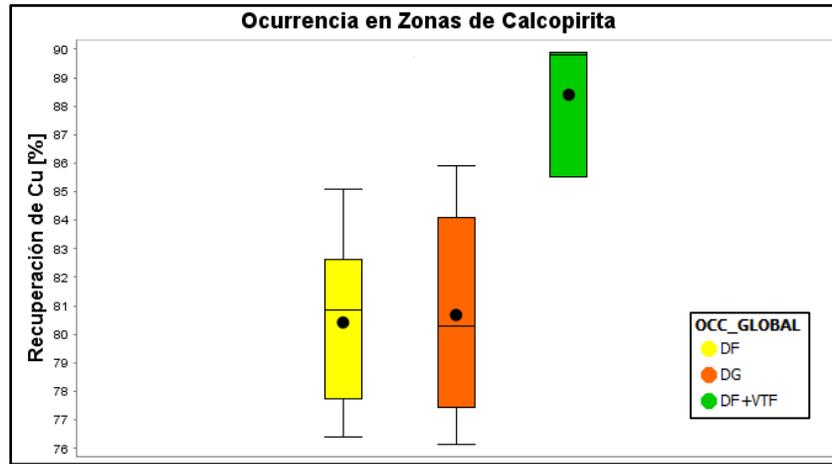


FIGURA 6.26: DIAGRAMA BOX SPLIT QUE ILUSTRAS LA DIFERENCIA EN LOS NIVELES DE RECUPERACION DENTRO DE UNA MISMA ZONA MINERAL, EN ESTE CASO LA ZONA DE CALCOPIRITA. SE RECONOCE COMO LA RECUPERACIÓN AUMENTA LEVEMENTE CON UNA OCURRENCIA MAS GRUESA.

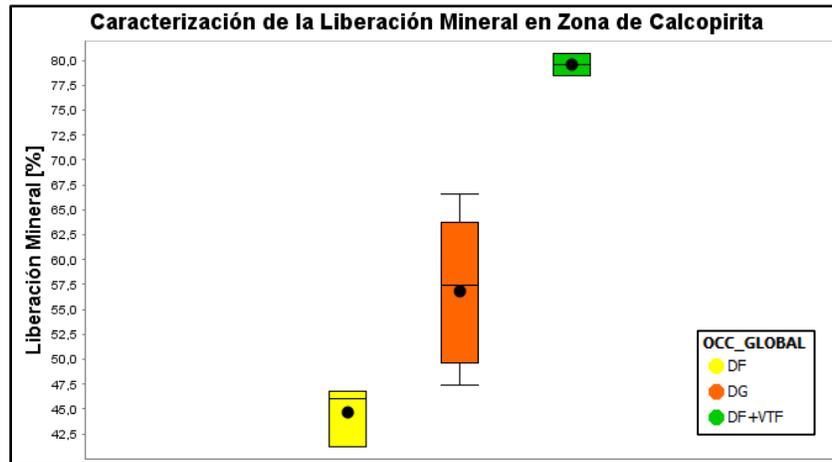


FIGURA 6.27: BOX SPLIT QUE ILUSTRAS EL GRADO DE LIBERACION DE PARTICULAS MINERALES EN CADA UNA DE LAS OCURRENCIAS DESCRITAS PARA LA ZONA DE CALCOPIRITA.

A continuación, se presentan tablas resumen de la caracterización geometalúrgica realizada para la recuperación de cobre y la liberación mineral en las distintas zonas minerales y ocurrencias descritas.

TABLA 6.11: TABLA RESUMEN CON LA ESTADÍSTICA BÁSICA DE LA RECUPERACIÓN DE COBRE EN LA DISTINTAS ZONAS MINERALES Y OCURRENCIAS.

| Zona Mineral | Bornita-Calcosina | | | Bornita | | | | Bornita-Calcopirita | | | Calcopirita | | |
|------------------------|-------------------|-------|-------|---------|---------|-------|-------|---------------------|-------|-----------|-------------|-------|----------|
| | MF + DG | DF | NP | MF | MF + DG | DF | DG | DF | NP | VTF + VTG | DF | DG | DF + VTF |
| Cuenta de Datos | 4 | 5 | 3 | 7 | 3 | 2 | 2 | 7 | 3 | 5 | 10 | 5 | 3 |
| Mínimo | 81.50 | 80.30 | 82.30 | 69.61 | 75.50 | 80.30 | 83.68 | 74.30 | 76.80 | 72.75 | 76.40 | 76.13 | 85.50 |
| Máximo | 89.72 | 91.30 | 89.80 | 79.66 | 75.87 | 81.30 | 86.80 | 87.80 | 85.74 | 81.28 | 85.10 | 85.90 | 89.90 |
| Media | 85.36 | 84.94 | 86.03 | 74.94 | 75.64 | 80.80 | 85.24 | 80.64 | 81.16 | 76.93 | 80.42 | 80.68 | 88.40 |
| Mediana | 85.11 | 84.90 | 86.00 | 75.80 | 75.54 | 80.80 | 85.24 | 81.90 | 80.94 | 76.49 | 80.85 | 80.30 | 89.80 |
| Desviación Estándar | 3.38 | 4.76 | 3.75 | 3.40 | 0.20 | 0.71 | 2.21 | 4.57 | 4.47 | 3.62 | 2.92 | 3.69 | 2.51 |
| Varianza | 11.40 | 22.69 | 14.06 | 11.54 | 0.04 | 0.50 | 4.87 | 20.90 | 20.02 | 13.13 | 8.51 | 13.60 | 6.31 |
| Coef. De Variación [%] | 3.96 | 5.61 | 4.36 | 4.53 | 0.27 | 0.88 | 2.59 | 5.67 | 5.51 | 4.71 | 3.63 | 4.57 | 2.84 |

TABLA 6.12: TABLA RESUMEN DE LA LIBERACIÓN MINERAL DE COBRE EN LA DISTINTAS ZONAS MINERALES Y OCURRENCIAS.

| Zona Mineral | Bornita-Calcosina | | | Bornita | | | | Bornita-Calcopirita | | | Calcopirita | | |
|------------------------|-------------------|-------|-------|---------|---------|----|-------|---------------------|----|-----------|-------------|-------|----------|
| | MF + DG | DF | NP | MF | MF + DG | DF | DG | DF | NP | VTF + VTG | DF | DG | DF + VTF |
| Cuenta de Datos | 1 | 5 | 3 | 3 | 2 | 0 | 2 | 4 | 0 | 5 | 3 | 5 | 2 |
| Mínimo | 88.37 | 75.87 | 85.04 | 57.22 | 65.14 | - | 84.98 | 51.64 | - | 62.55 | 41.22 | 47.37 | 78.43 |
| Máximo | 88.37 | 95.03 | 86.30 | 65.81 | 76.08 | - | 87.91 | 87.93 | - | 78.72 | 46.76 | 66.65 | 80.74 |
| Media | 88.37 | 85.02 | 85.49 | 60.53 | 70.61 | - | 86.44 | 74.43 | - | 69.31 | 44.66 | 56.83 | 79.59 |
| Mediana | 88.37 | 84.38 | 85.13 | 58.54 | 70.61 | - | 86.44 | 79.08 | - | 68.50 | 46.01 | 57.43 | 79.59 |
| Desviación Estándar | 0.00 | 6.95 | 0.71 | 4.63 | 7.74 | - | 2.07 | 16.37 | - | 6.11 | 3.00 | 7.52 | 1.63 |
| Varianza | 0.00 | 48.28 | 0.50 | 21.41 | 59.87 | - | 4.27 | 267.93 | - | 37.33 | 9.03 | 56.53 | 2.65 |
| Coef. De Variación [%] | 0.00 | 8.17 | 0.82 | 7.64 | 10.96 | - | 2.39 | 21.99 | - | 8.82 | 6.73 | 13.23 | 2.05 |

6.5 CONTROL ESTRUCTURAL

Se realizaron scatter plots entre la recuperación de Cu y la distancia a las fallas principales definidas en la mina, con el objetivo de identificar alguna correlación en torno a estas estructuras mineralizadoras. El análisis se realizó en la zona de influencia respectiva, mencionadas en la tabla 2.8 Las estructuras analizadas son:

1. Falla Adela
2. Falla Arauco 101
3. Falla Arauco 103
4. Falla Arauco 105
5. Falla California
6. Falla Christine 2
7. Falla Christine 2 Rama 1
8. Falla Isabel 1
9. Falla Isabel 4
10. Falla Isabel 12
11. Falla Isabel 38
12. Falla Isabel 50
13. Falla San José 16

Con este análisis se identificó que las estructuras no determinan directamente el grado de recuperación de cobre, debido a la irregularidad y asimetría de los cuerpos mineralizados que forman, estos son asimétricos en torno a las fallas, y además la continuidad espacial de la mineralización, tanto de mena como de alteración, es irregular a lo largo de la traza de la falla. Sin embargo, existen cuerpos mineralizados que presentan simetría en torno a algunas fases minerales, en este caso se analizó la presencia de Arcillas como se puede observar en la figura 6.29.

A continuación, se presentan las nubes de dispersión de la variable recuperación de cobre frente a las fallas San José 16 e Isabel 12, para mostrar cómo se comporta dicha variable en la zona influencia.

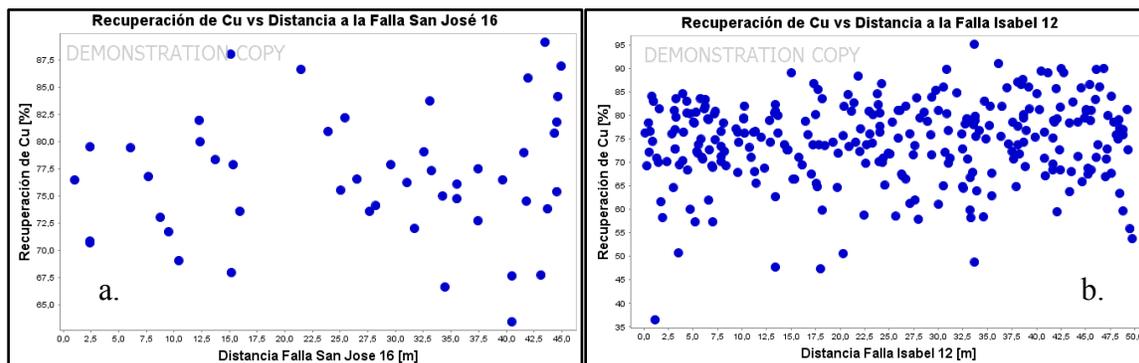


FIGURA 6.28: NUBE DE DISPERSION ENTRE LA RECUPERACIÓN DE COBRE Y LA DISTANCIA A LAS FALLAS SAN JOSÉ 16 E ISABEL 12. A: SAN JOSÉ 16. B: ISABEL 12. LOS GRAFICOS MUESTRAN CORELACION NULA EN LA ZONA DE INFLUENCIA,

A continuación, se presentan dos núcleos mineralizados, que presentan un perfil simétrico de distribución de Arcillas en torno a las fallas San José 16 e Isabel 12. Cabe destacar que este comportamiento no es uniforme a lo largo de toda la falla, debido a la irregularidad de estas, sin embargo, es posible encontrar simetrías geológicas en cuerpos específicos.

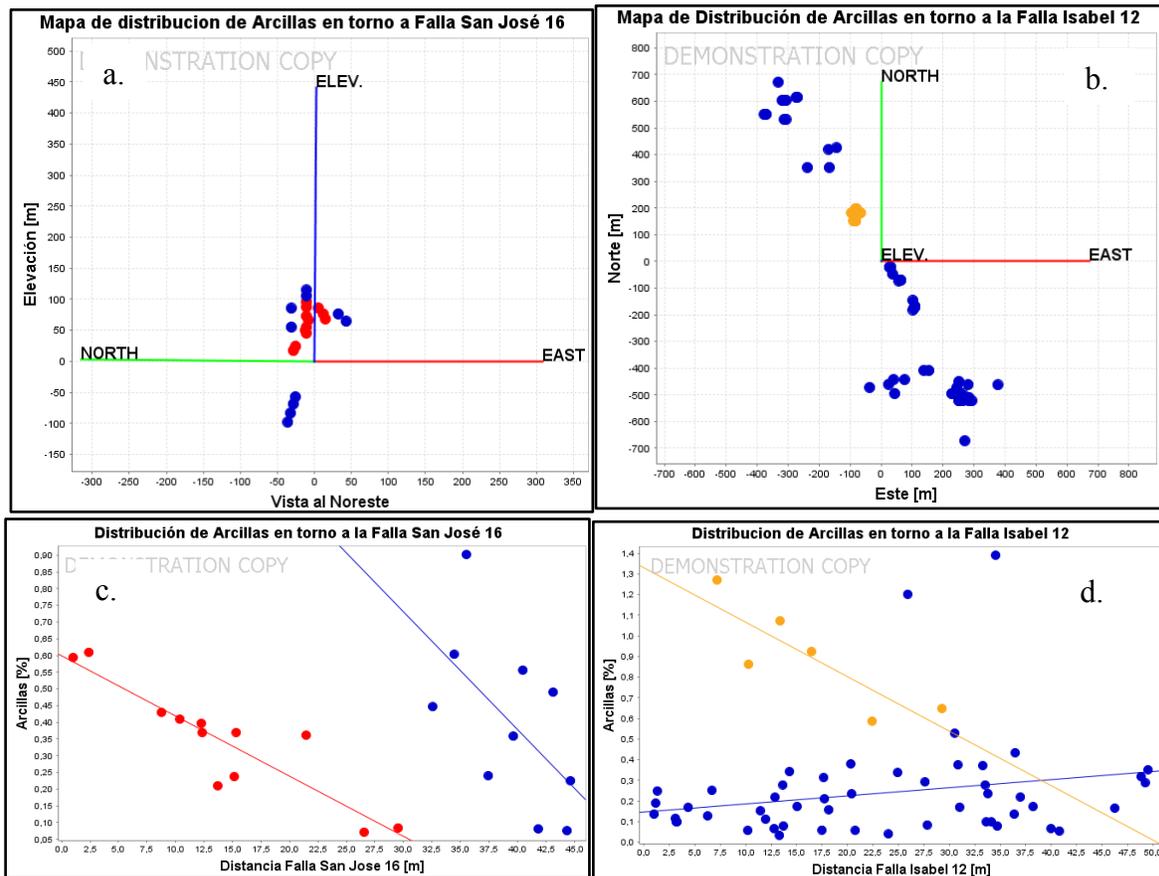


FIGURA 6.29: DISTRIBUCIÓN DE ARCILLAS EN TORNO A CUERPOS MINERALIZADOS ESPECÍFICOS ACORDE A LAS FALLAS SAN JOSÉ 16 E ISABEL 12. A: MAPA DE DISTRIBUCIÓN DEL CUERPO ANALIZADO EN TORNO A LA FALLA SAN JOSÉ 16. B: MAPA DE DISTRIBUCIÓN DEL CUERPO ANALIZADO EN TORNO A LA FALLA ISABEL 12. C: COMPORTAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE LA ARCILLA EN TORNO A LA FALLA SAN JOSÉ 16. D: COMPORTAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE LA ARCILLA EN TORNO A LA FALLA ISABEL 12.

De la figura 6.29-c se reconoce que la arcilla en torno a la falla San José 16 tiene una influencia de 30 metros, donde disminuye acorde se aleja de la estructura. Por otro lado, de la figura 6.29-d se reconoce que el comportamiento y distribución de las variables no es continuo a lo largo de la estructura, sino más bien acotado a ciertos cuerpos mineralizados específicos con características geológicas definidas.

6.6 ANÁLISIS DE PARTÍCULAS (PMA, QEMSCAN)

6.6.1 DISTRIBUCIÓN DEL CU Y MINERALES DE MENA SULFURADA SEGÚN GRANULOMETRÍA

En el Soldado, tal como en la mayoría de los yacimientos, después de la etapa de conminución, el Cu se distribuye mayoritariamente en la fase fina del material, esto es en la sección $<50\ \mu\text{m}$ de la fase granulométrica, variando entre un 54 y un 75% de la concentración total (figura 6.30) y disminuye de forma logarítmica al aumentar el tamaño de la fase granulométrica.

Tal como se exhiben diferencias en la distribución del Cu dependiendo de la fase granulométrica, también existen diferencias en la recuperación de Cu asociada a dichas fases granulométricas. Las fases granulométricas corresponden a $<50\ \mu\text{m}$, $50-100\ \mu\text{m}$, $100-140\ \mu\text{m}$ y $>140\ \mu\text{m}$. Se trabajó con un rango de recuperaciones de Cu entre 72 y 91%. De la figura 6.31 se desprende que las altas recuperaciones están asociadas a una mayor concentración de Cu en las fases granulométricas intermedias, esto es ($50-100$ y $100-140\ \mu\text{m}$) y menor concentración en la fase fina, esto se explica en la literatura por una pérdida de Cu debido a la baja capacidad de flotar de las partículas muy finas. Esto se ve reflejado claramente para las recuperaciones entre 75.15 y 84%. Asimismo, se reconoce un comportamiento menos diferenciado entre los extremos de recuperaciones de Cu (grupo de 72.5 a 75.15% y de 84 a 90.65%) donde la diferencia es estrecha, pero se logra reconocer que las recuperaciones muy altas se ven favorecidas por una mayor concentración de Cu en la fase <50 y $50-100\ \mu\text{m}$ y menor concentración en la fase muy gruesa ($>140\ \mu\text{m}$), esto se explica en la literatura debido a una pérdida por arrastre de granos de mena atrapados en grandes partículas de ganga y por la decantación de grandes granos de mena. Cabe destacar, que la diferencia entre estos últimos dos grupos es tan sutil que no puede ser explicada rotundamente por los parámetros mencionados, sino más bien por otros aspectos tales como el tamaño de las partículas de mena.

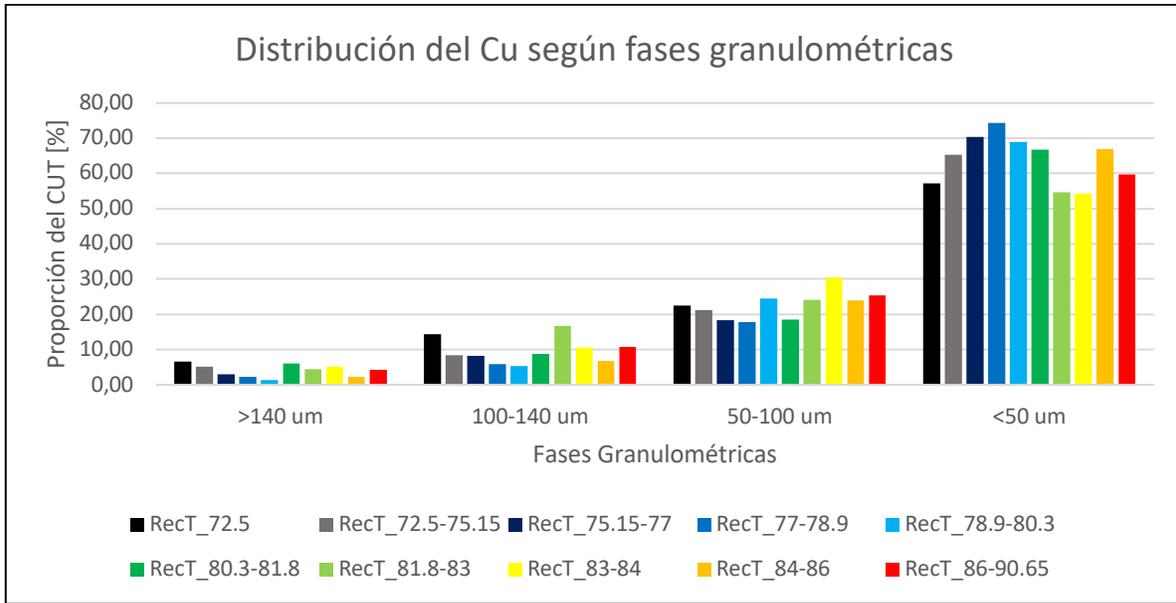


FIGURA 6.30: GRÁFICO DE BARRAS QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DEL CU EN UN PERFIL GRANULOMÉTRICO Y MOSTRANDO DIFERENCIAS SEGÚN EL GRADO DE RECUPERACIÓN DE CU.

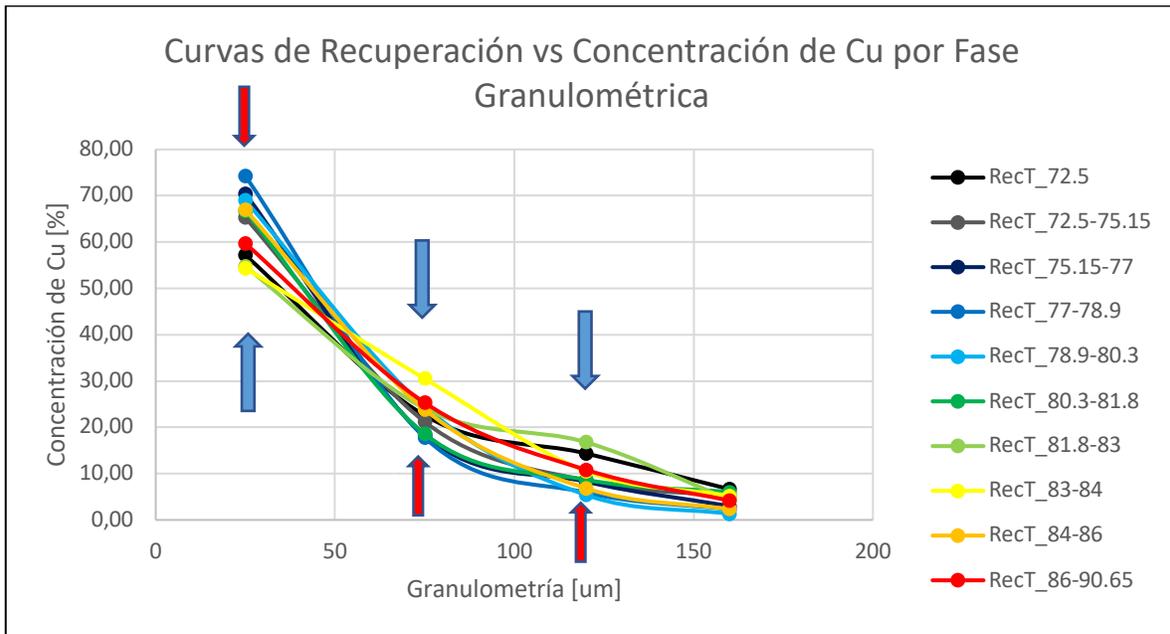


FIGURA 6.31: GRÁFICO DE LÍNEAS QUE APOYA LA FIGURA 6.30, MOSTRANDO QUE LAS RECUPERACIONES DE CU ALTAS PRESENTAN UN CONTENIDO DE CU MAYOR EN LAS FASES GRANULOMÉTRICAS INTERMEDIAS Y MENOR EN LA FASE FINA RESPECTO DEL GRUPO DE RECUPERACIONES BAJAS.

Los minerales de mena presentan el mismo perfil de distribución de masa en las fases granulométricas que la ley de Cu, considerando el 100% de la masa de cada mineral entregada por QEMSCAN (Cpy, Bn y Cc). Estos se concentran en su mayoría en la fase fina (<50 μm).

- Calcopirita (Cpy):

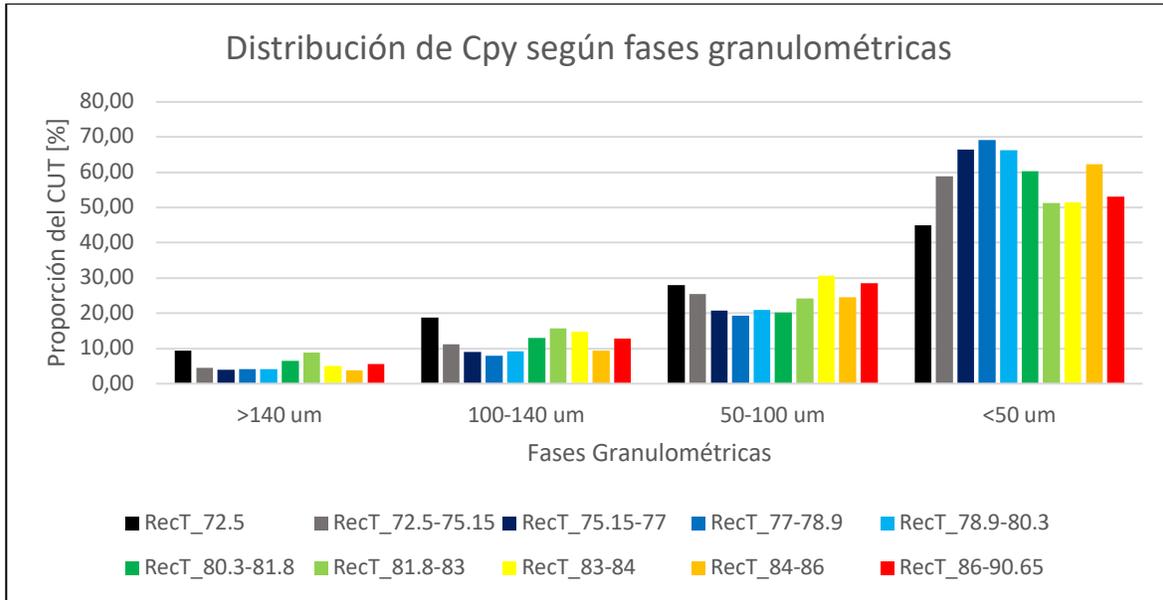


FIGURA 6.32: GRÁFICO DE BARRAS QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE LA CPY EN UN PERFIL GRANULOMÉTRICO Y MOSTRANDO DIFERENCIAS SEGÚN EL GRADO DE RECUPERACIÓN DE CU.

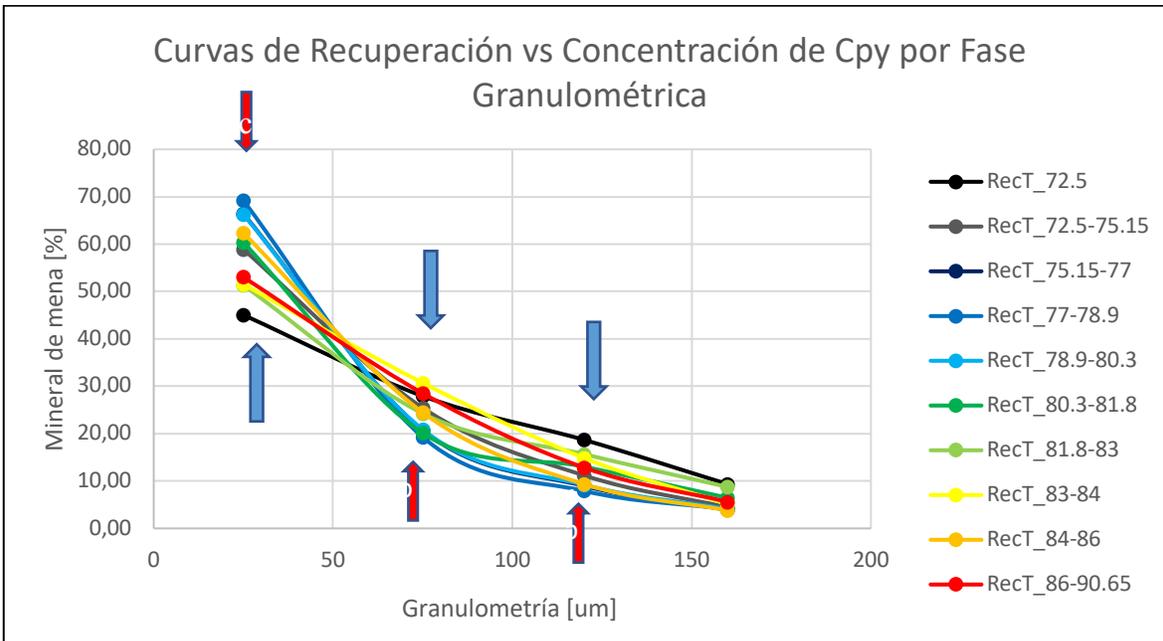


FIGURA 6.33: GRÁFICO DE LÍNEAS QUE APOYA LA FIGURA 6.32, MOSTRANDO QUE LAS RECUPERACIONES DE CU ALTAS SE ASOCIAN A UNA CPY DISTRIBUIDA MAYORITARIAMENTE EN LAS FASES GRANULOMÉTRICAS INTERMEDIAS Y DE MENOR FORMA EN LA FASE FINA RESPECTO DEL GRUPO DE RECUPERACIONES BAJAS.

- Bornita (Bn):

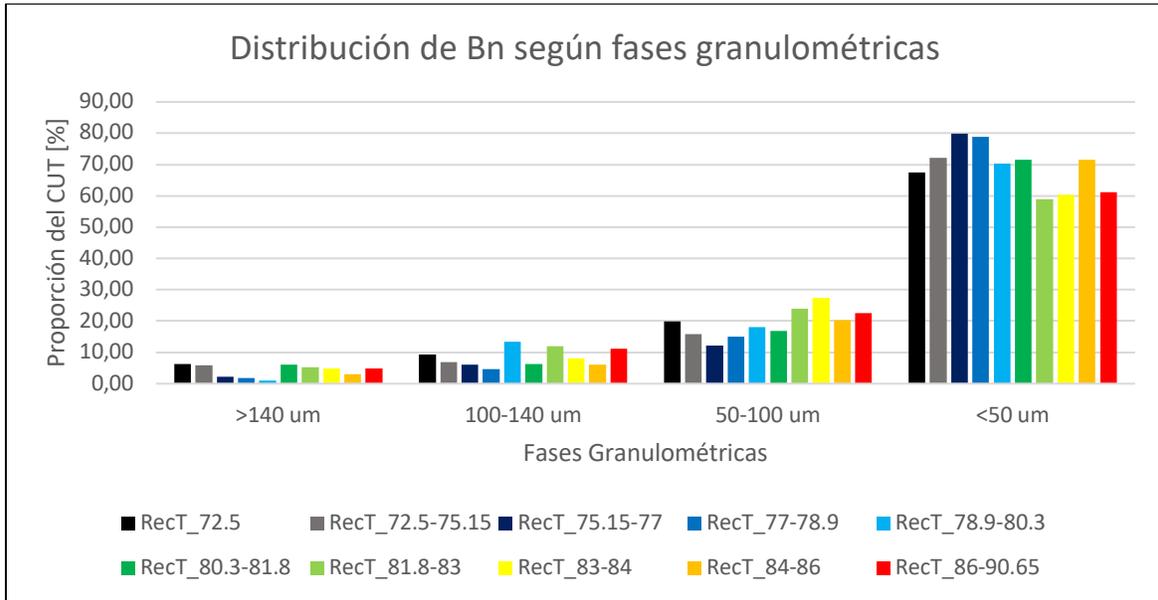


FIGURA 6.34: GRÁFICO DE BARRAS QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE LA BN EN UN PERFIL GRANULOMÉTRICO Y MOSTRANDO DIFERENCIAS SEGÚN EL GRADO DE RECUPERACIÓN DE CU.

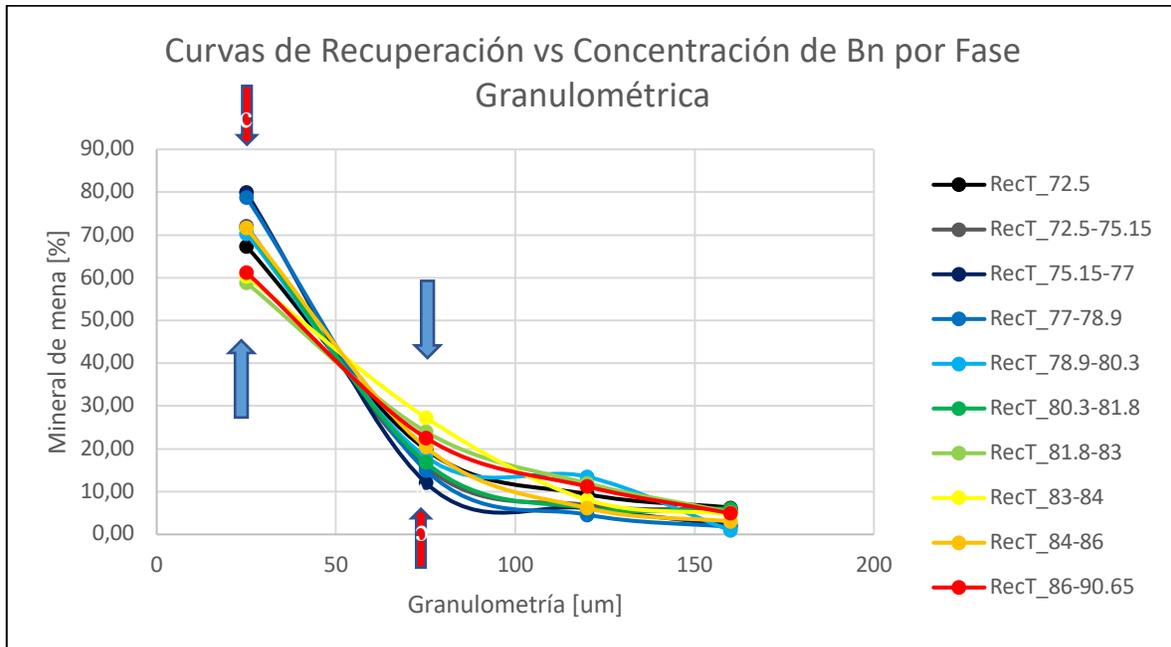


FIGURA 6.35: GRÁFICO DE LÍNEAS QUE APOYA LA FIGURA 6.34, MOSTRANDO QUE LAS RECUPERACIONES DE CU ALTAS SE ASOCIAN A UNA BN DISTRIBUIDA MAYORITARIAMENTE EN LAS FASES GRANULOMÉTRICAS INTERMEDIAS Y DE MENOR FORMA EN LA FASE FINA RESPECTO DEL GRUPO DE RECUPERACIONES BAJAS.

- Calcosina (Cc):

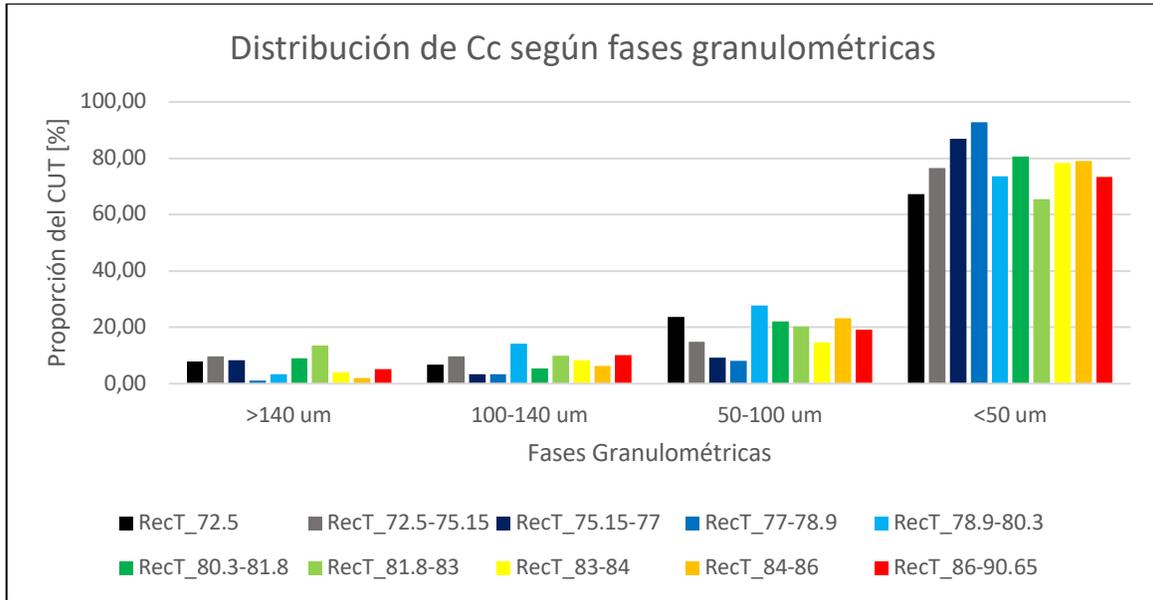


FIGURA 6.36: GRÁFICO DE BARRAS QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE LA CC EN UN PERFIL GRANULOMÉTRICO Y MOSTRANDO DIFERENCIAS SEGÚN EL GRADO DE RECUPERACIÓN DE CU.

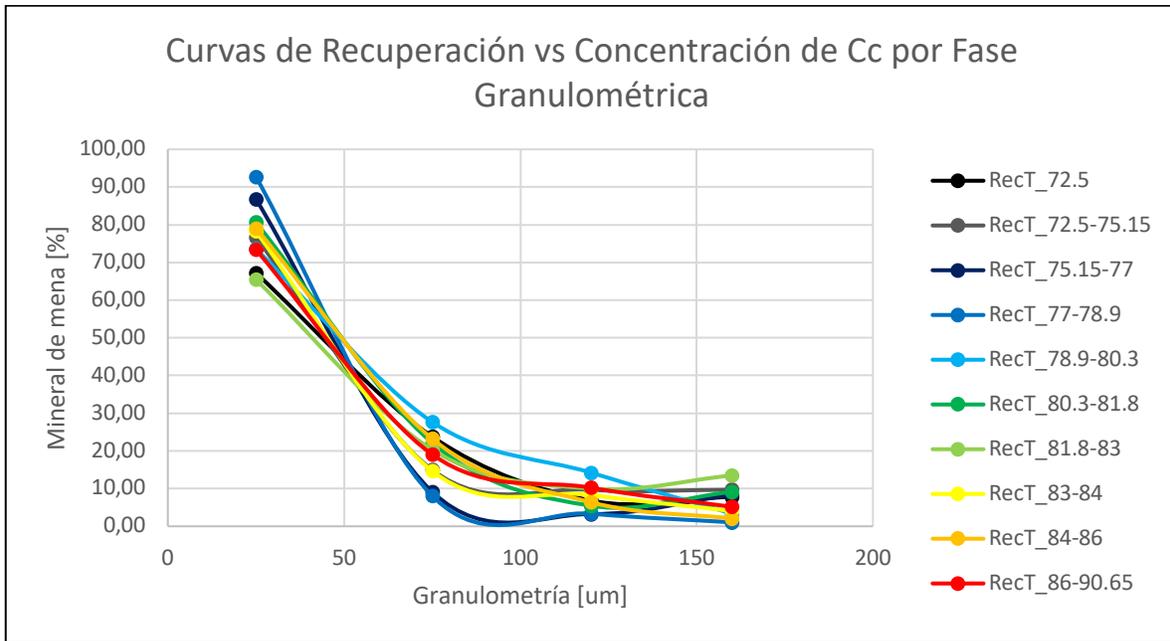


FIGURA 6.37: GRÁFICO DE LÍNEAS QUE APOYA LA FIGURA 6.36, MOSTRANDO QUE LAS RECUPERACIONES DE CU ALTAS SE ASOCIAN A UNA CC DISTRIBUIDA MAYORITARIAMENTE EN LAS FASES GRANULOMÉTRICAS INTERMEDIAS Y DE MENOR FORMA EN LA FASE FINA RESPECTO DEL GRUPO DE RECUPERACIONES BAJAS.

6.6.2 TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE MENA DE CU

La información de tamaño de partículas minerales (PMA) entregada por QEMSCAN da cuenta de un tamaño promedio de las partículas de minerales de interés. En las figuras 6.73 a 6.78 se observa un perfil de distribución característico que determina el comportamiento de las altas y bajas recuperaciones de cobre en función del tamaño de los sulfuros primarios.

- Calcopirita (Cpy):

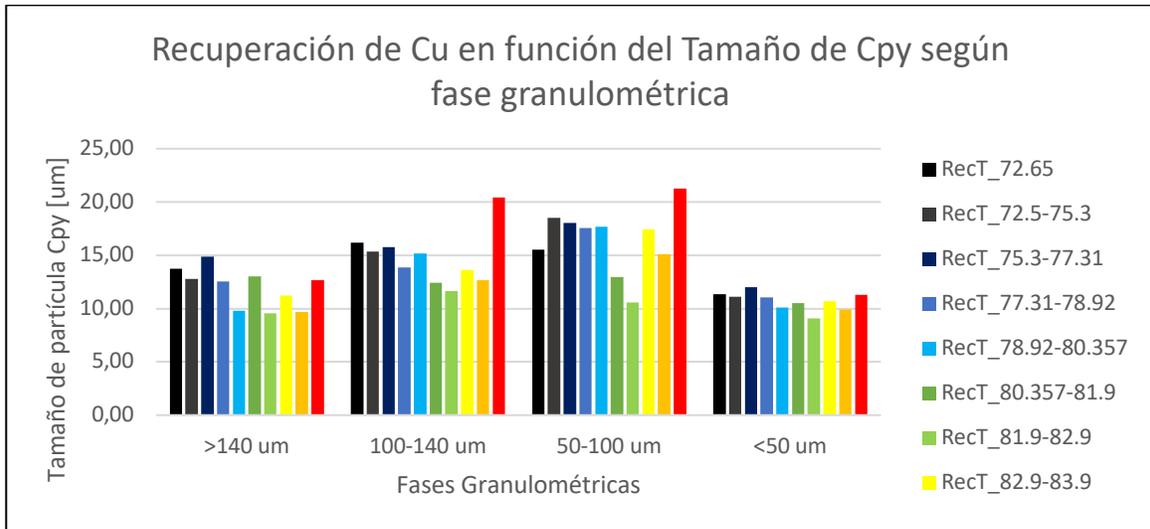


FIGURA 6.38: GRÁFICO DE BARRAS QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE CPY EN UN PERFIL GRANULOMÉTRICO Y MOSTRANDO DIFERENCIAS SEGÚN EL GRADO DE RECUPERACIÓN DE CU.

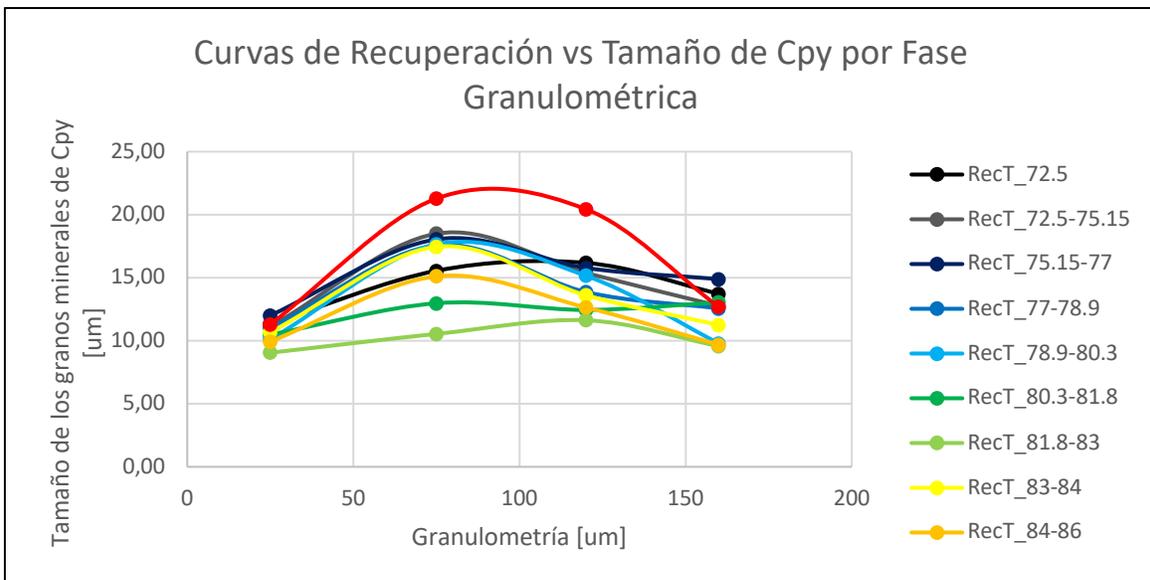


FIGURA 6.39: GRÁFICO DE LÍNEAS QUE APOYA LA FIGURA 6.38, RECONOCIÉNDOSE UN PERFIL DE DISTRIBUCIÓN INVERSO DEL TAMAÑO DE CPY Y LA RESUPERACIÓN DE CU. A LO LARGO DE TODAS LAS FASES GRANULOMÉTRICAS SE RECONOCE UNA MAYOR RECUPERACIÓN DE CU PARA UN MENOR TAMAÑO DE GRANO.

- Bornita (Bn):

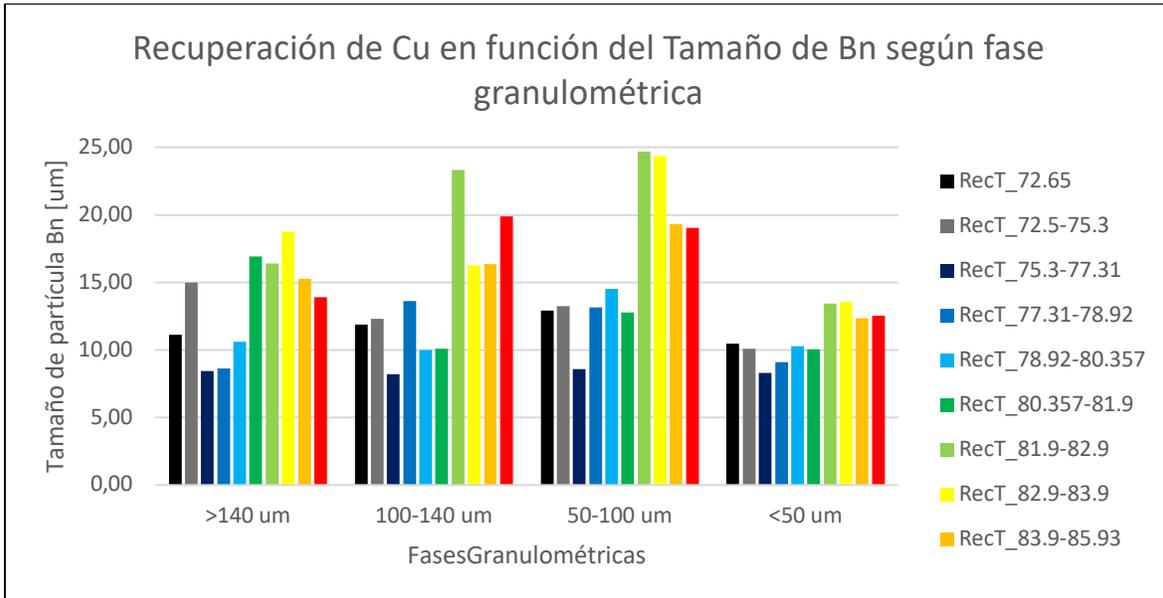


FIGURA 6.40: GRÁFICO DE BARRAS QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE BN EN UN PERFIL GRANULOMÉTRICO Y MOSTRANDO DIFERENCIAS SEGÚN EL GRADO DE RECUPERACIÓN DE CU.

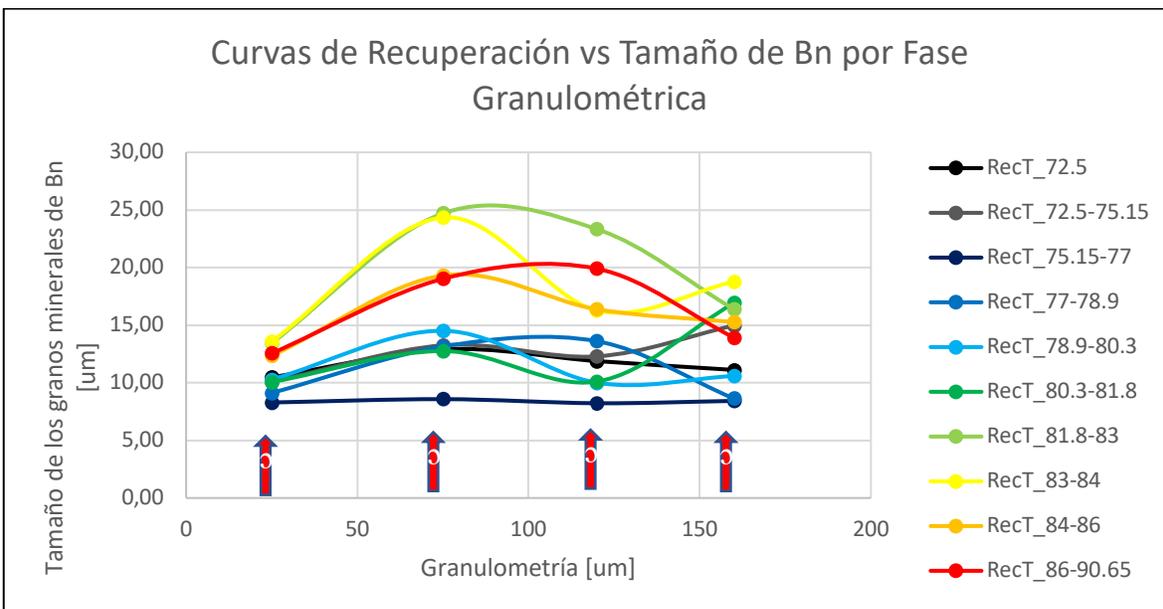


FIGURA 6.41: GRÁFICO DE LÍNEAS QUE APOYA LA FIGURA 6.40, RECONOCIÉNDOSE UN PERFIL DE DISTRIBUCIÓN NORMAL DEL TAMAÑO DE BN Y LA RESUPERACIÓN DE CU. A LO LARGO DE TODAS LAS FASES GRANULOMÉTRICAS SE RECONOCE UNA MAYOR RECUPERACIÓN DE CU PARA UN MAYOR TAMAÑO DE GRANO.

- Calcosina (Cc):

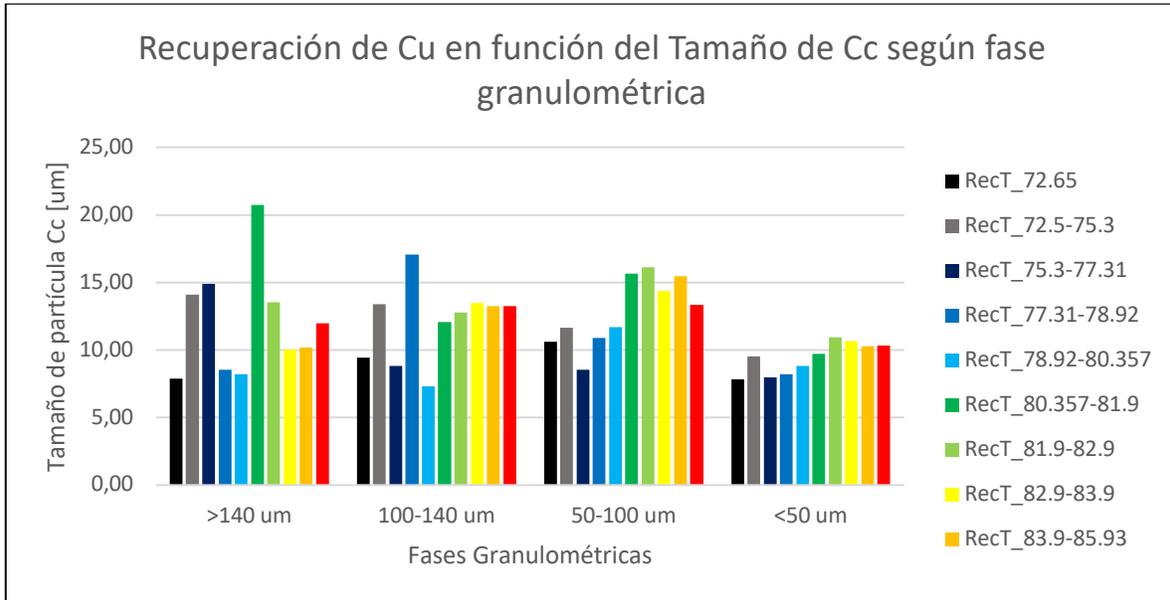


FIGURA 6.42: GRÁFICO DE BARRAS QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE CC EN UN PERFIL GRANULOMÉTRICO Y MOSTRANDO DIFERENCIAS SEGÚN EL GRADO DE RECUPERACIÓN DE CU.

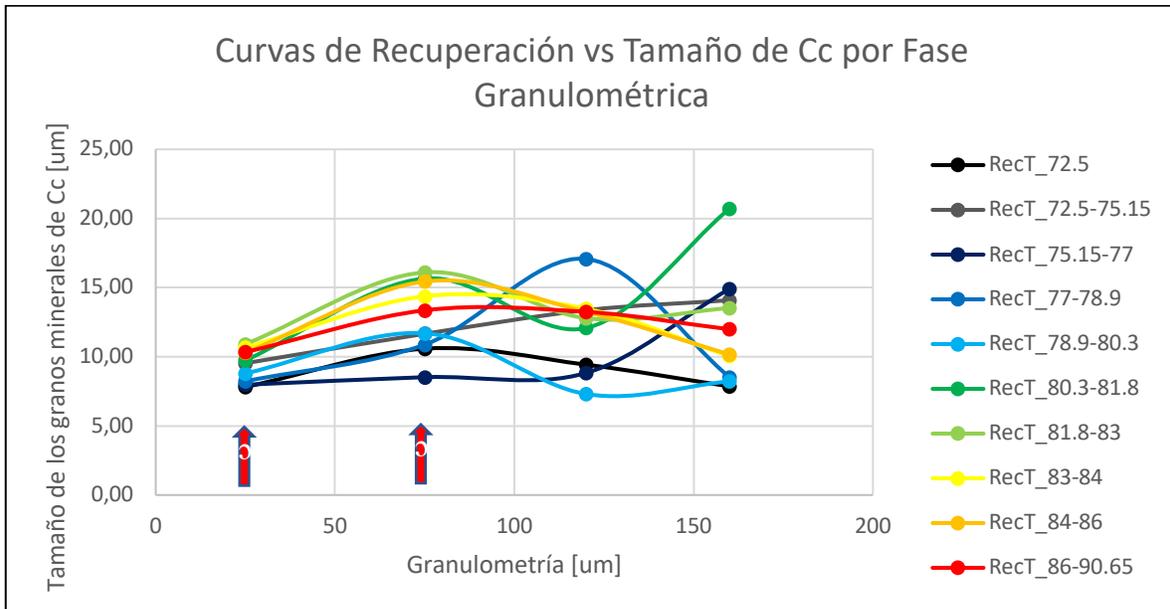


FIGURA 6.43: GRÁFICO DE LÍNEAS QUE APOYA LA FIGURA 6.42, RECONOCIÉNDOSE UN PERFIL DE DISTRIBUCIÓN NORMAL DEL TAMAÑO DE CC Y LA RESUPERACIÓN DE CU. A LO LARGO DE CASI TODAS LAS FASES GRANULOMÉTRICAS SE RECONOCE UNA MAYOR RECUPERACIÓN DE CU PARA UN MAYOR TAMAÑO DE GRANO.

6.6.3 PARTÍCULAS OCLUIDAS

La información PMA de los ensayos QEMSCAN contiene información de la masa (discriminando por fase mineral sulfurada de Cu, Cpy-Bn-Cc) de partículas liberadas en un 100%, partículas ocluidas y partículas con contactos laterales. El primer grupo representa fidedigamente la masa de Cu, sin embargo, la masa del segundo y tercer grupo corresponde a un % en masa del grano mineral y no sólo de las partículas de minerales sulfurados de Cu que lo conforman, es decir, considera también la masa de los minerales de ganga asociado a esas partículas. Si bien, no hay forma de determinar específicamente cuanto cobre realmente hay en esa masa de partículas ocluidas ni cómo se distribuye en las fases granulométricas, sí nos entrega un patrón cualitativo de la forma de las curvas de distribución.

- Bornita (Bn):

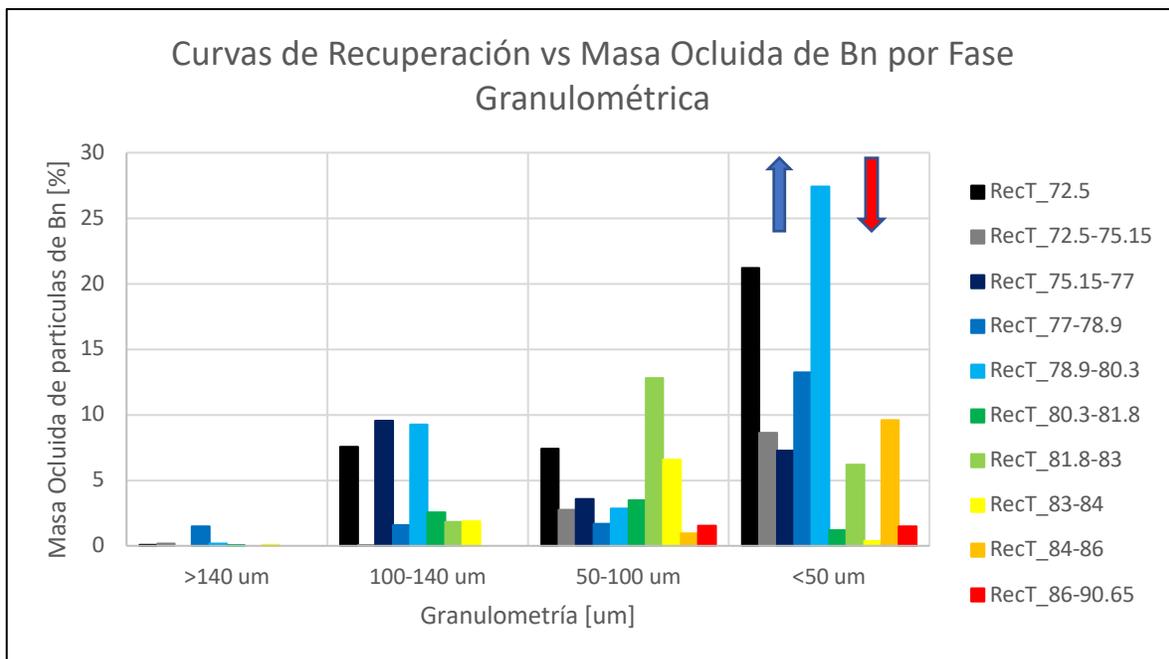


FIGURA 6.44: GRÁFICO DE CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA MASA DE PARTÍCULAS OCLUIDAS DE BN A LO LARGO DE 4 FASES GRANULOMÉTRICAS.

- Calcopirita (Cpy):

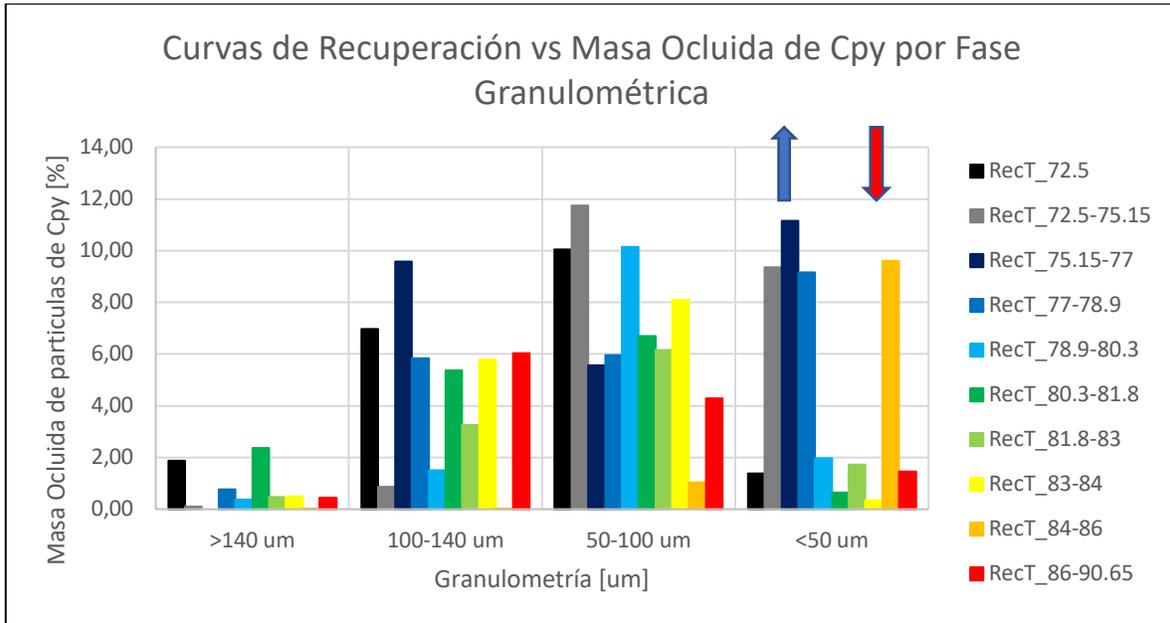


FIGURA 6.45: GRÁFICO DE CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA MASA DE PARTÍCULAS OCLUIDAS DE CPY A LO LARGO DE 4 FASES GRANULOMÉTRICAS.

- Calcosina (Cc):

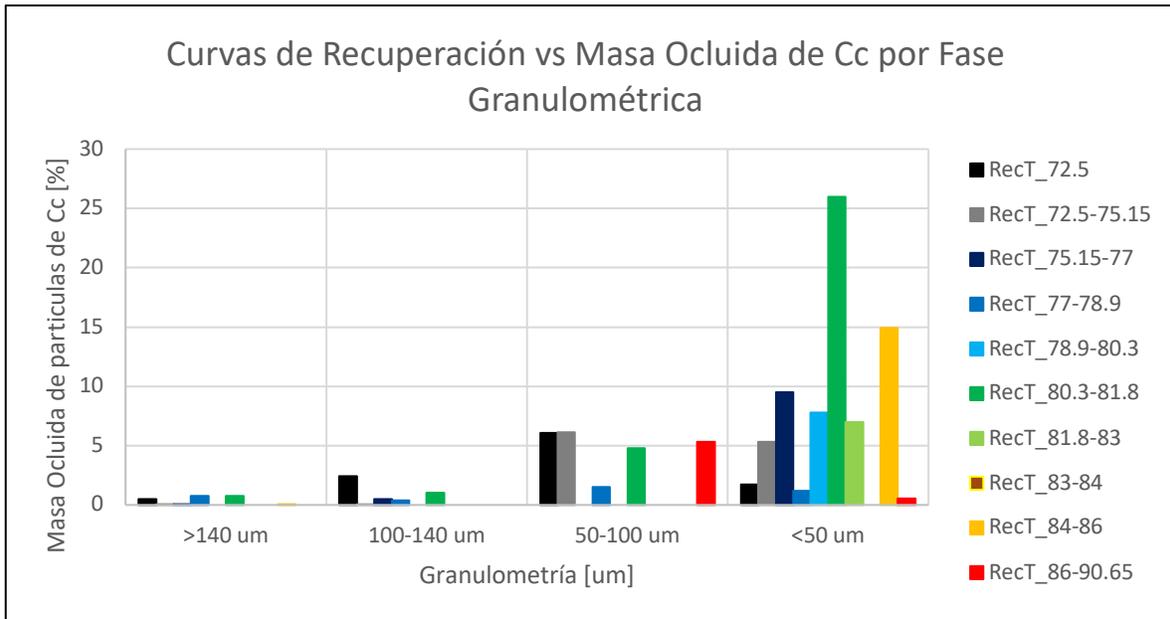


FIGURA 6.46: GRÁFICO DE CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA MASA DE PARTÍCULAS OCLUIDAS DE CPY A LO LARGO DE 4 FASES GRANULOMÉTRICAS.

6.6.4 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA

Las curvas de distribución granulométrica definen las características de moliendabilidad de los distintos tipos de roca. Se realizó estas curvas para las rocas del yacimiento considerando granulometrías de 420 μm , 297 μm , 210 μm , 149 μm , 105 μm y 74 μm .

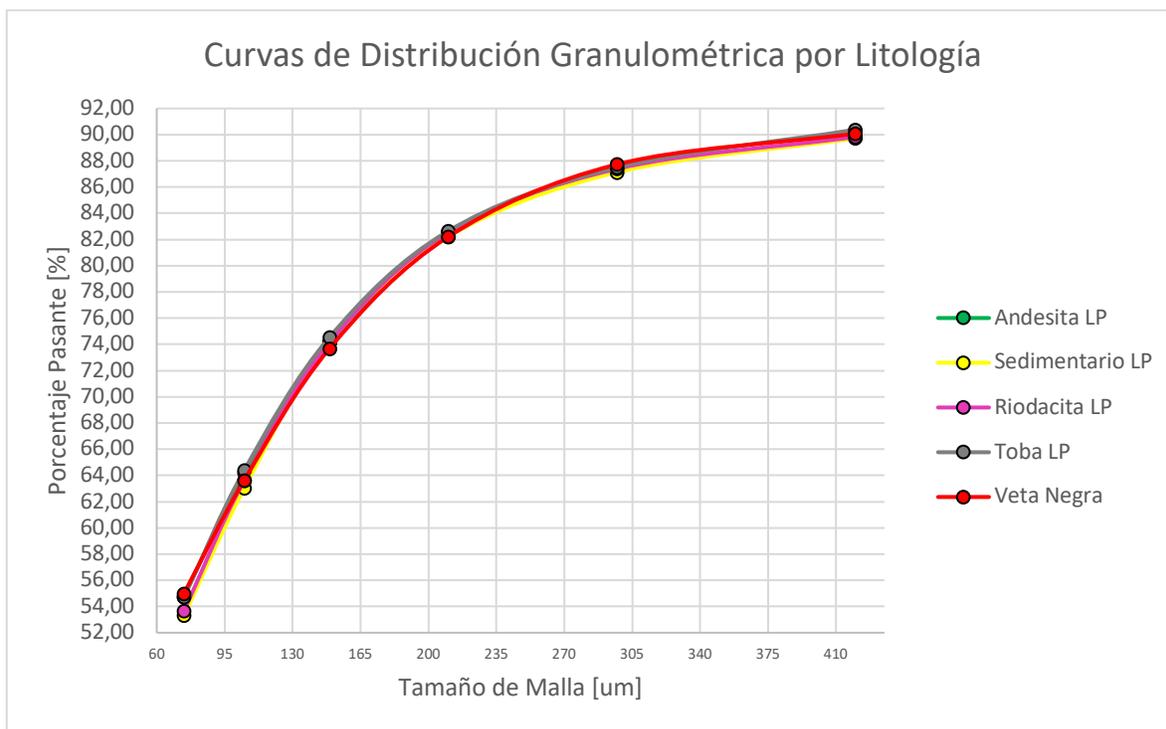


FIGURA 6.47: CURVAS DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICAS PARA ANDESITA LO PRADO, SEDIMENTARIO LO PRADO, RIODACITA LO PRADO, TOBA LO PRADO Y VETA NEGRA.

TABLA 6.13: VALORES DE MATERIAL PASANTE ASOCIADO A CADA LITOLOGÍA PARA CALCULAR LAS CURVAS DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA.

| Cuenta de datos | 78 | 7 | 89 | 57 | 40 |
|---------------------------------|---------------------------------|-----------------|--------------|---------|------------|
| Granulometría [μm] | Porcentaje material pasante [%] | | | | |
| | Andesita LP | Sedimentario LP | Riodacita LP | Toba LP | Veta Negra |
| 420 | 89,78 | 89,73 | 89,83 | 90,38 | 90,08 |
| 297 | 87,23 | 87,12 | 87,39 | 87,50 | 87,73 |
| 210 | 82,31 | 82,20 | 82,52 | 82,63 | 82,19 |
| 149 | 74,17 | 74,22 | 74,14 | 74,53 | 73,67 |
| 105 | 64,19 | 63,00 | 63,60 | 64,36 | 63,61 |
| 74 | 54,73 | 53,29 | 53,64 | 54,70 | 54,98 |

6.6.5 DISTRIBUCIÓN DEL CU Y SULFUROS DE CU

Asimismo, se calcularon las curvas de distribución granulométrica del Cu y minerales de mena (Cpy, Bn y Cc) para las distintas litologías del yacimiento.

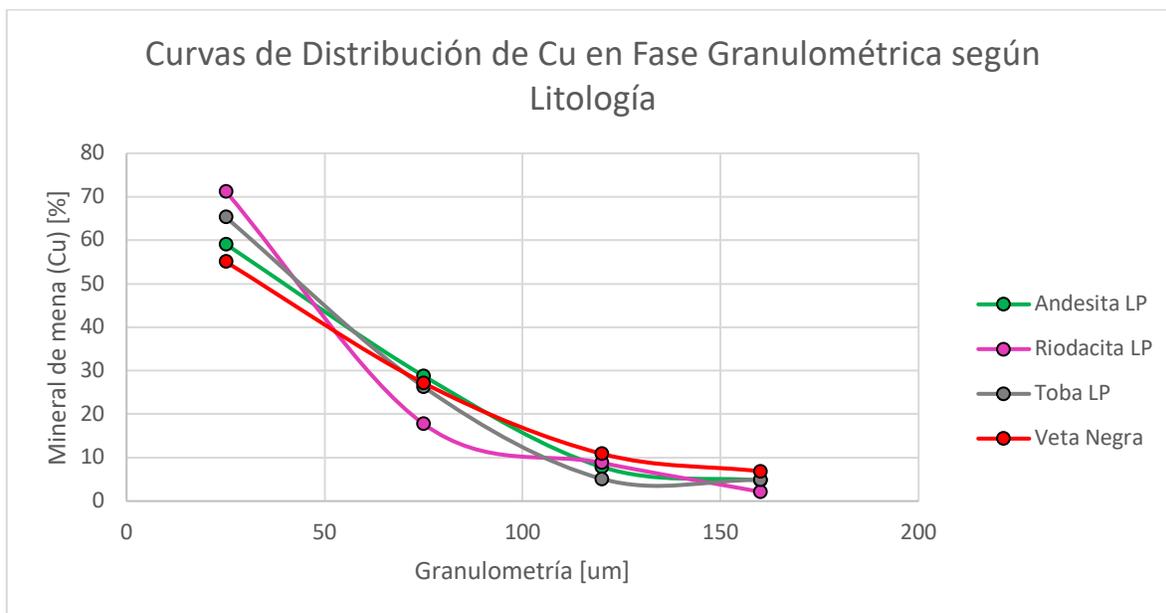


FIGURA 6.48: CURVAS DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CU EN ANDESITA LO PRADO, RIODACITA LO PRADO, TOBA LO PRADO Y VETA NEGRA.

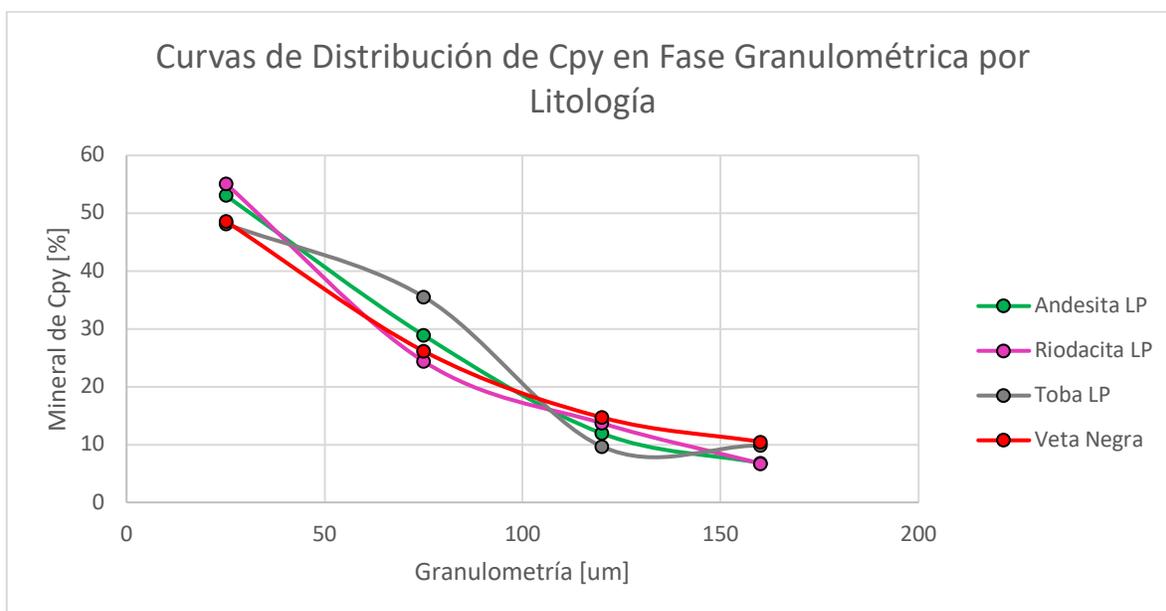


FIGURA 6.49: CURVAS DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA CPY EN ANDESITA LO PRADO, RIODACITA LO PRADO, TOBA LO PRADO Y VETA NEGRA.

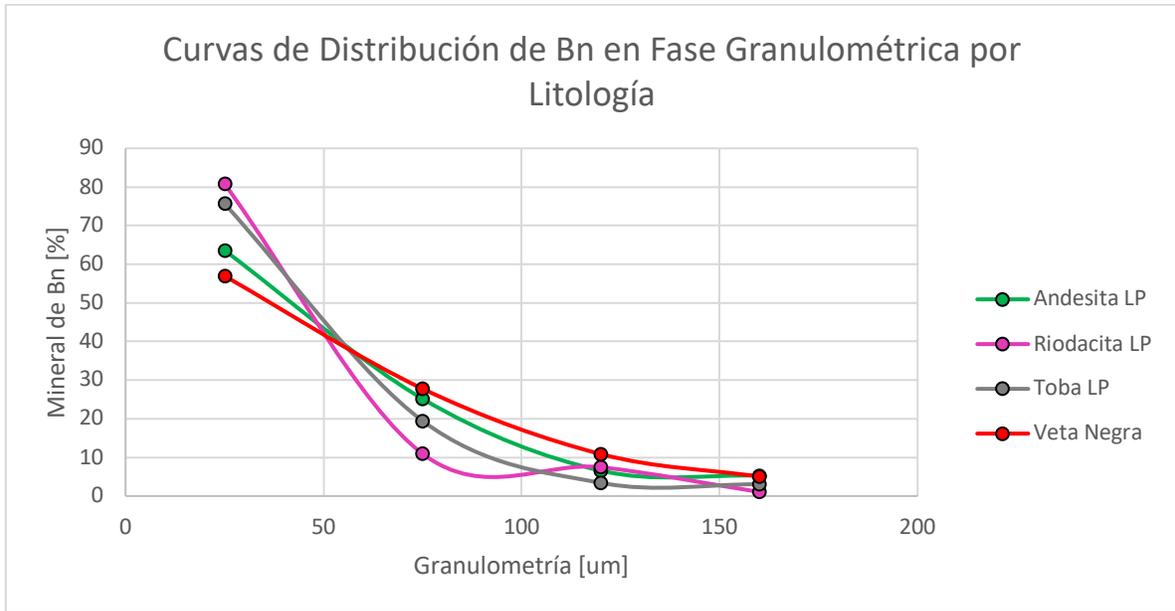


FIGURA 6.50: CURVAS DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA BN EN ANDESITA LO PRADO, RIODACITA LO PRADO, TOBA LO PRADO Y VETA NEGRA.

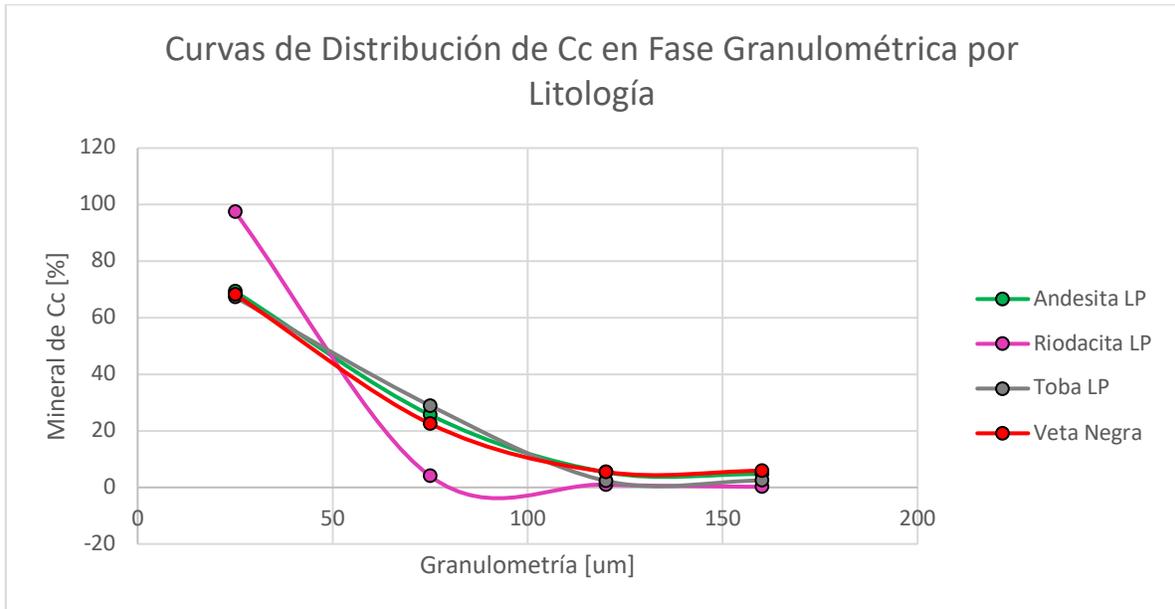


FIGURA 6.51: CURVAS DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA CC EN ANDESITA LO PRADO, RIODACITA LO PRADO, TOBA LO PRADO Y VETA NEGRA.

6.6.6 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE SULFUROS DE CU

Además, se calcularon las curvas de distribución de tamaño en cada fase granulométrica de cada minerales de mena (Cpy, Bn y Cc) para las distintas litologías del yacimiento.

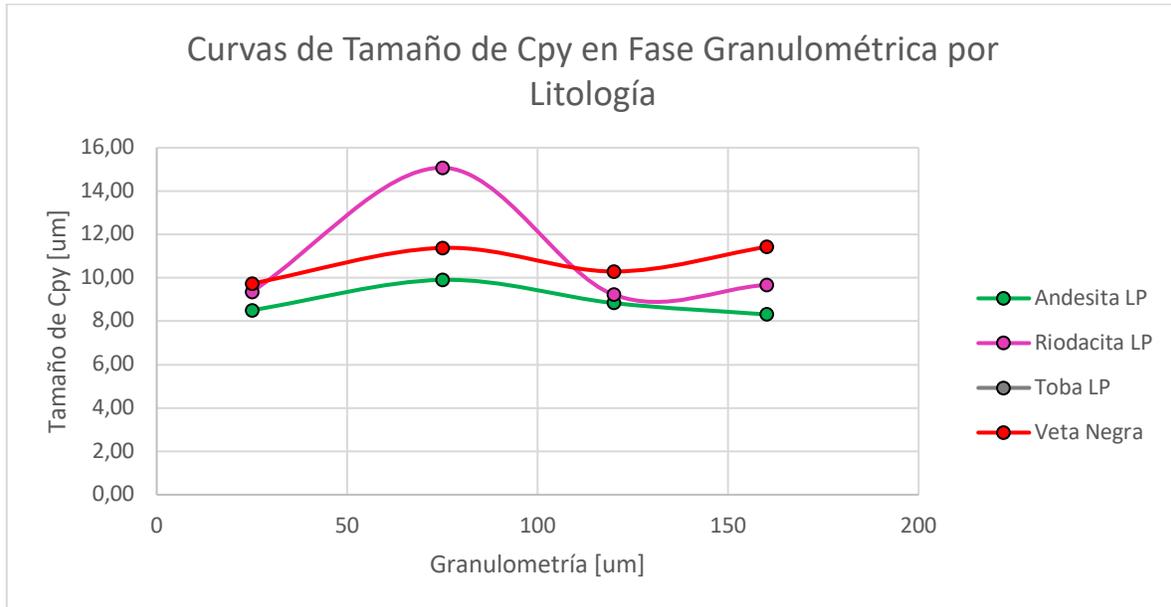


FIGURA 6.52: CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE LA CPY EN ANDESITA LO PRADO, RIODACITA LO PRADO, TOBA LO PRADO Y VETA NEGRA.

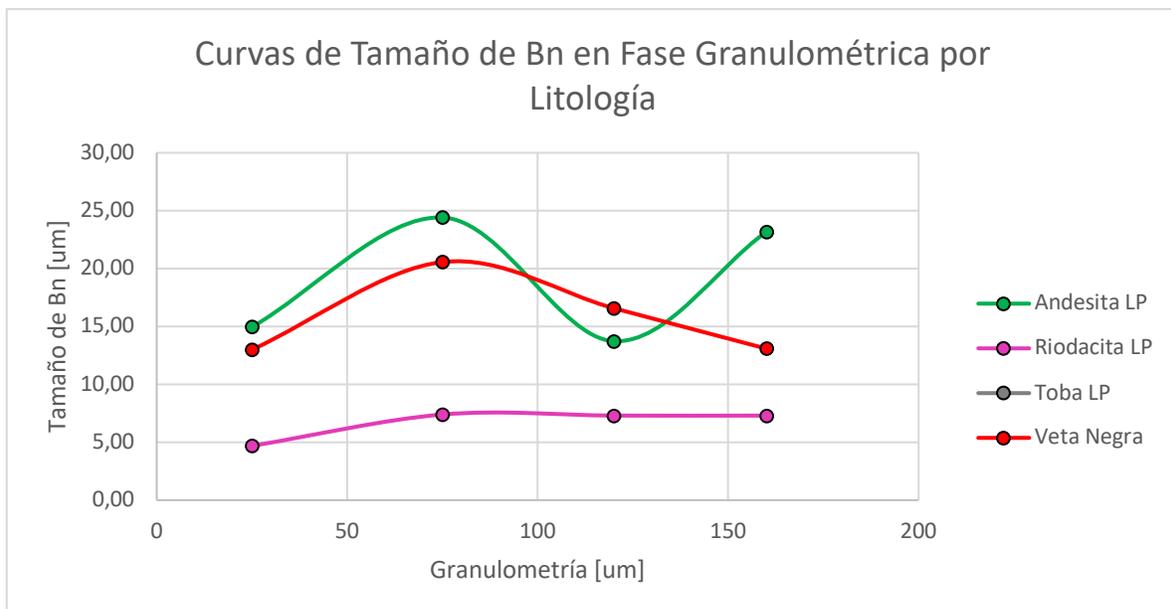


FIGURA 6.53: CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE LA BN EN ANDESITA LO PRADO, RIODACITA LO PRADO, TOBA LO PRADO Y VETA NEGRA.

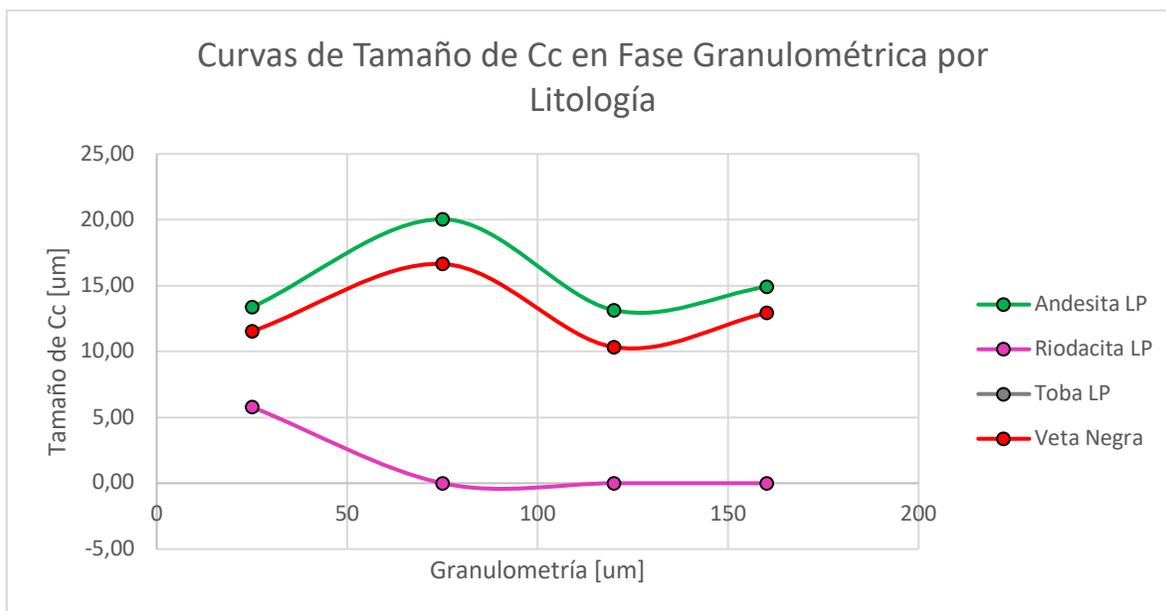


FIGURA 6.54: CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE LA CC EN ANDESITA LO PRADO, RIODACITA LO PRADO, TOBA LO PRADO Y VETA NEGRA.

6.7 CARACTERIZACIÓN DE CUERPOS MINERALIZADOS

El cuerpo mineralizado estudiado se encuentra ubicado en la parte Sur del yacimiento en lo que hoy es la Fase 3 Sur de la operación El Soldado, corresponde a un puente de roca entre la cavidad California y la Cavidad Santa Clara como se observa en la Figura 6.63, hospedado en Andesita Lo Prado. Las coordenadas locales del cuerpo son -480 N y + 880 E y comprende los bancos 890, 875 y 845 de la Fase 3 Sur (figura 6.65), con una extensión de al menos 50 metros. La iniciativa de caracterizar este cuerpo mineralizado en específico surge de la problemática de presentar bajas recuperaciones de Cu a pesar de las altas leyes asociadas. Este comportamiento negativo en la recuperación de Cu se aprecia en el Modelo de Corto Plazo sostenido por muestras de compositos de polígonos de extracción, lo que generó la idea de hacerle seguimiento a esta zona mineralizada particular. Se generaron además muestras metalúrgicas de recuperación por flotación para caracterizar geo metalúrgicamente el cuerpo y realizar una conciliación entre las muestras de Largo Plazo (sostenidas por un soporte menor (sondajes)) y las muestras de Corto Plazo.

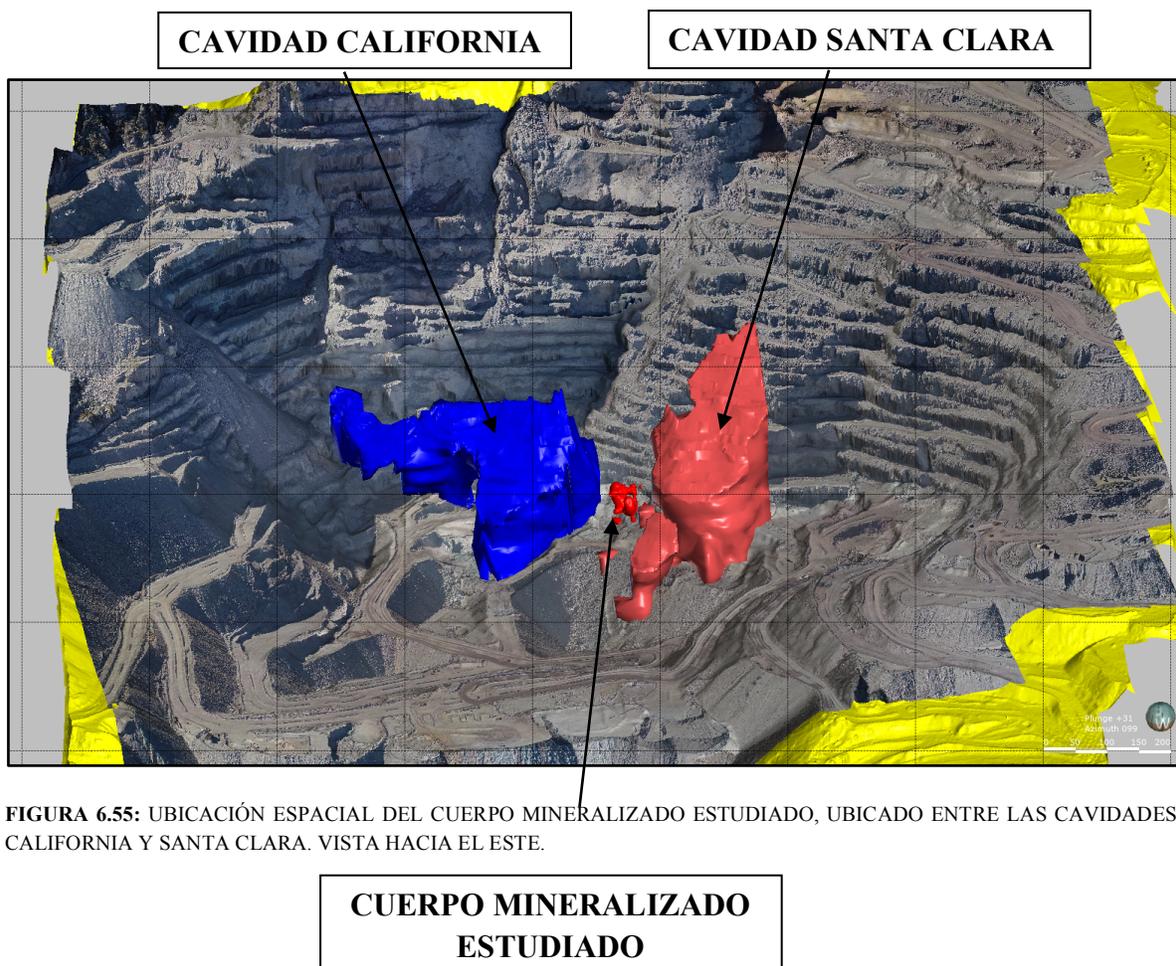


FIGURA 6.55: UBICACIÓN ESPACIAL DEL CUERPO MINERALIZADO ESTUDIADO, UBICADO ENTRE LAS CAVIDADES CALIFORNIA Y SANTA CLARA. VISTA HACIA EL ESTE.

El cuerpo mineralizado se modeló en el software Leapfrog que realiza modelamiento implícito, se creó un sólido que representa la morfología de este a partir de los sondeos involucrados en la zona, en la figura 6.56 se puede observar el cuerpo y los sondeos utilizados en la modelación.

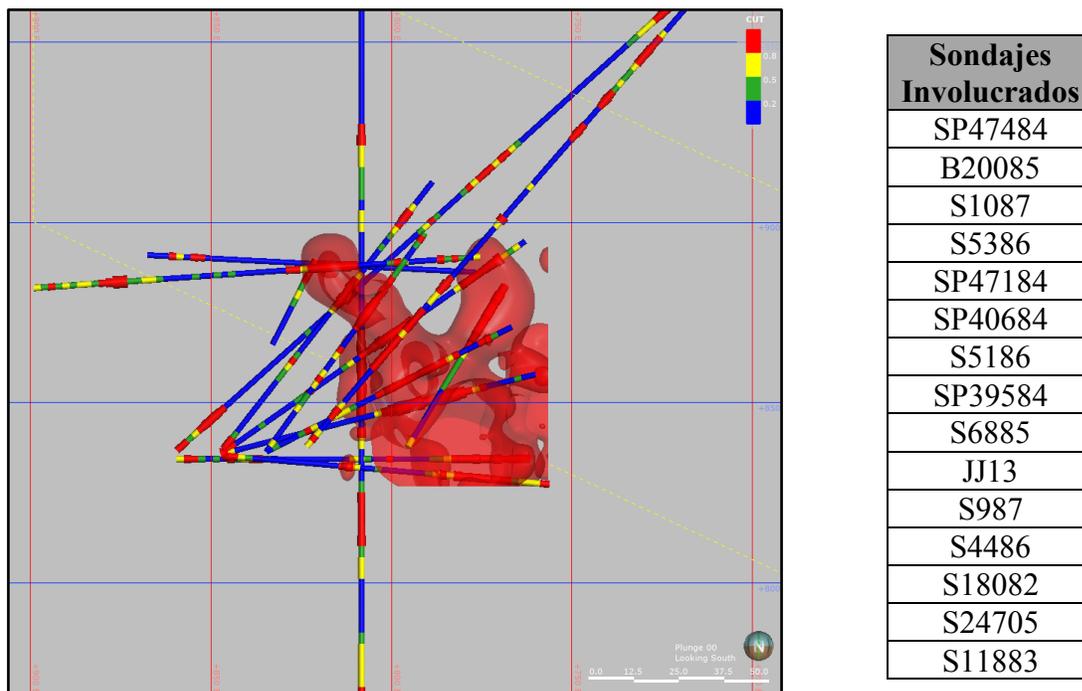


FIGURA 6.56: CUERPO MINERALIZADO CREADO EN LEAPFROG, SE DESPLEGAN LOS SONDAJES UTILIZADOS EN LA MODELACIÓN. EN EL COSTADO DERECHO SE PRESENTA UNA TABLA MENCIONANDO CADA UNO DE LOS SONDAJES. VISTA HACIA EL SUR.

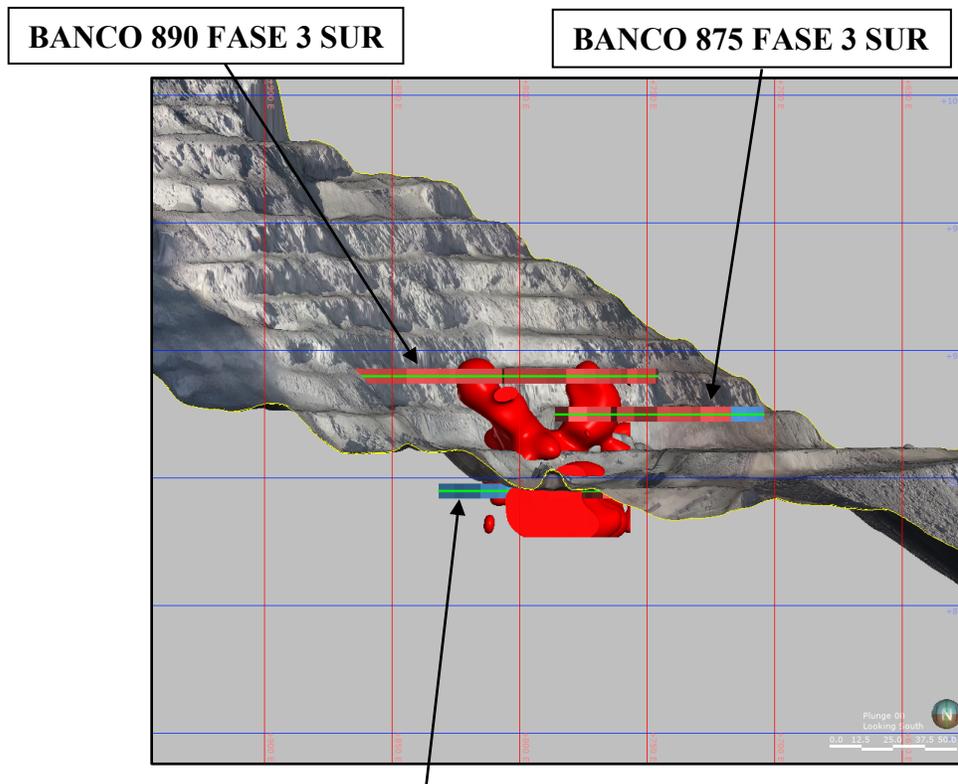


FIGURA 6.57: CUERPO MINERALIZADO SUPERPUESTO SOBRE LA TOPOGRAFÍA PARA MOSTRAR LA DIMENSIÓN DE ESTE. TIENE UNA EXTENSIÓN QUE CONTEMPLA 3 BANCOS, DOS SIMPLES DE 15 METROS Y UNO DOBLE DE 30 METROS.

BANCO 845 FASE 3 SUR

6.7.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y ANISOTROPÍA

Como se mencionó anteriormente el cuerpo mineralizado comprende al menos 3 bancos y se extiende por más de 50 metros en la vertical, este presenta una orientación característica NW-SE determinada por dos estructuras principales del yacimiento, estas corresponden a la Falla Isabel 3 y Falla Isabel 4 ambas consideradas como fallas mineralizadoras y como dominios estructurales en el Modelo de Bloques de la ley. Estas fallas presentan un azimut entre 330-345 y un dip entre 40-47° hacia el Oeste siendo subparalelas entre sí. A continuación, se ilustran ambas fallas en la mina y su control sobre el cuerpo mineralizado estudiado.

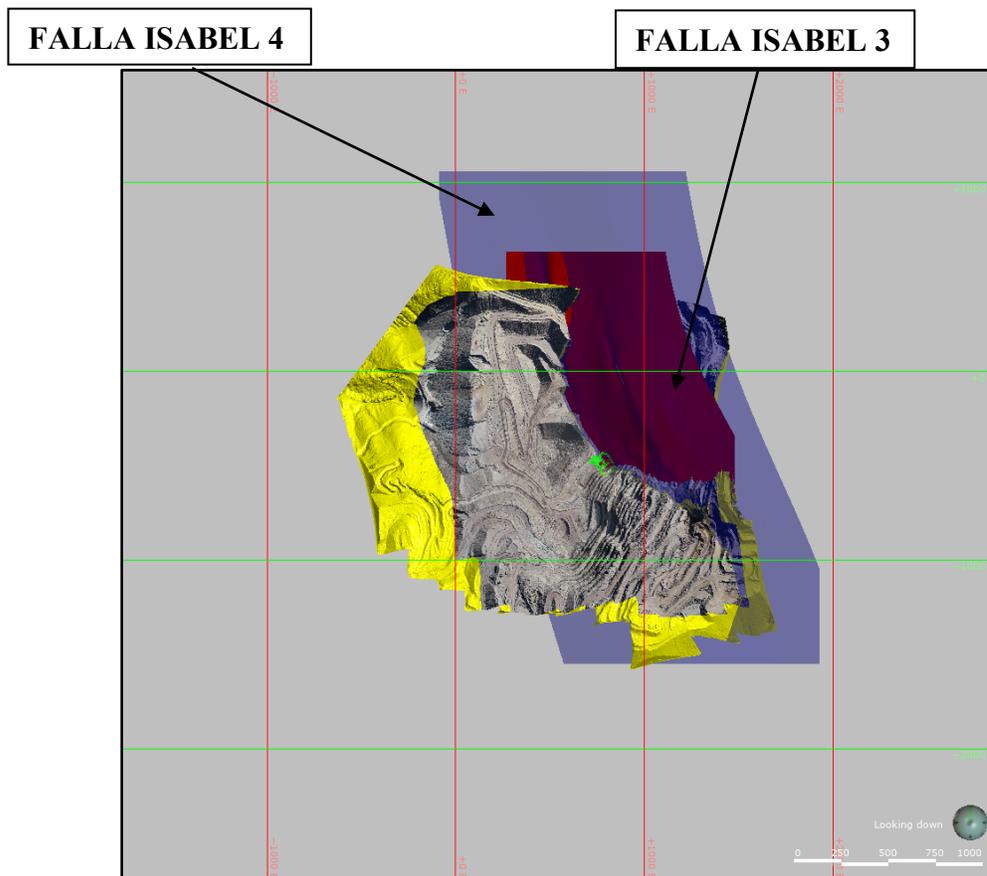


FIGURA 6.58: VISTA SUPERIOR DEL YACIMIENTO EL SOLDADO, SE OBSERVA LA FASE 3 DE LA MINA, Y SE PROYECTAN LAS DOS FALLAS CONTROLADORAS QUE LIMITAN EL CUERPO MINERALIZADO ESTUDIADO.

El cuerpo mineralizado es asimétrico respecto a ambas estructuras, éstas generan un plano de debilidad que contribuyó al paso de fluidos mineralizados, sin embargo, el cuerpo se formó entre ambas estructuras y de forma irregular. Este es un factor muy importante, pues da cuenta que los cuerpos mineralizados en El Soldado son irregulares y asimétricos respecto a las estructuras que permitieron su formación.

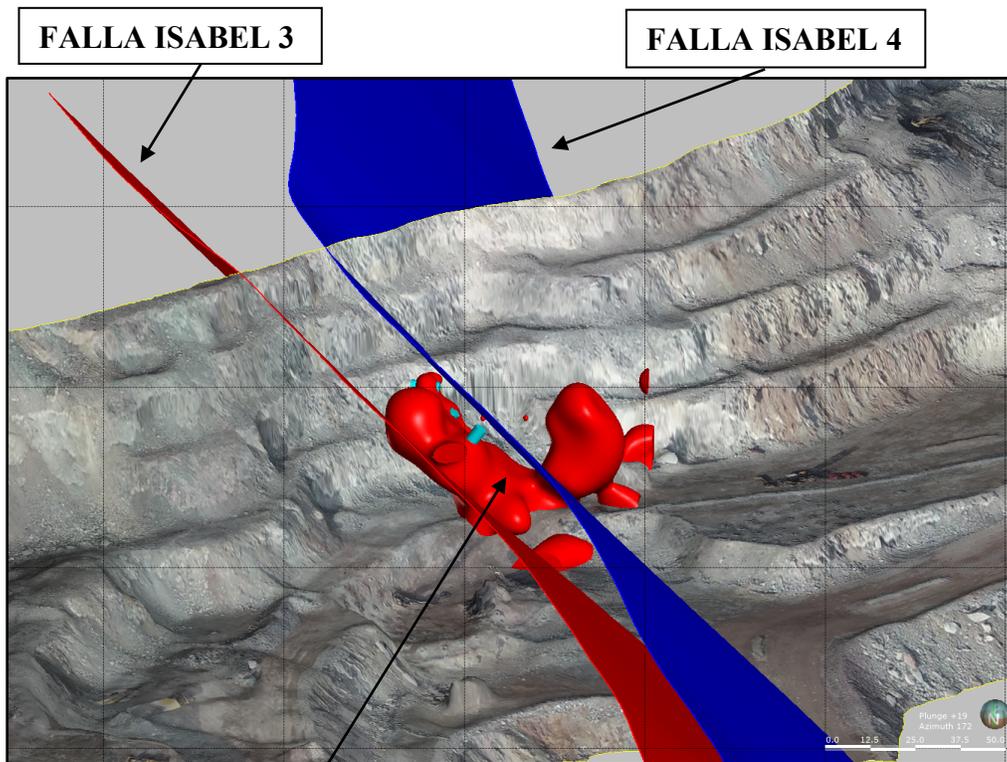


FIGURA 6.59: CONTROL ESTRUCTURAL SOBRE EL CUERPO MINERALIZADO. SE RECONOCEN LAS FALLAS ISABEL 3 Y 4 A AMBOS COSTADOS.

**CUERPO MINERALIZADO
ESTUDIADO**

Con la información descriptiva realizada, se logró identificar que el cuerpo modelado presenta continuidad espacial, tanto en las zonas minerales y texturales presentes, como en las leyes de Cu y en el comportamiento geometalúrgico, asociado a la recuperación de Cu por flotación.

6.7.2 SELECCIÓN DE MUESTRAS

Con el propósito de caracterizar geo metalúrgicamente el cuerpo mineralizado se seleccionaron 15 muestras que involucran 7 sondajes diamantina que lo atraviesan y que fueron esenciales para lograr una descripción mineralógica y textural de este cuerpo. Estos 7 sondajes son parte de los utilizados para la modelación numérica en Leapfrog, y fueron seleccionados ya que están disponibles en la testigoteca de la mina El Soldado.

Los sondajes son:

- S18082
- S11883
- SP39584
- SP40684
- SP47484
- S6885
- S1087

Cada una de las muestras presenta una descripción macroscópica de la litología, alteración hidrotermal, presencia de estructuras, fases mineralógicas de mena presentes, la ocurrencia y textura mineral. A continuación, se presenta la tabla 6.35 que resume la descripción de los sondajes.

TABLA 6.14: TABLA RESUMEN DE LA DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS REALIZADAS EN EL ESTUDIO DEL CUERPO MINERALIZADO. INVOLUCRA TODOS LOS SONDAJES DESCRITOS.

| Sondaje | Desde | Hasta | Litología | Mineralización | Intensidad Mineralización | Occ | Alteracion |
|---------|-------|-------|-----------|----------------|---------------------------|-----------|--------------------------------|
| S6885 | 40 | 45 | Andesita | Py | Media_Baja | MF | Cloritizacion |
| S6885 | 45 | 50.5 | Andesita | Cpy_Bn | Alta | DG_M F | Cloritizacion |
| S6885 | 50.5 | 69 | Andesita | Bn | Alta | MF | Cloritizacion_Hematita_Calcita |
| S6885 | 69 | 75.7 | Andesita | Cpy_Bn | Media_Baja | DG_M F | Cloritizacion |
| S6885 | 75.7 | 79 | Andesita | Py | Alta | MF | Cloritizacion_Calcita |
| SP40684 | 40 | 41.9 | Andesita | Py | Alta | MF | Cloritizacion_Hematita_Calcita |
| SP40684 | 41.9 | 43.7 | Andesita | Cpy | Media | DG | Cloritizacion_Calcita |
| SP40684 | 43.7 | 51.7 | Andesita | Bn | Media_Alta | MF | Cloritizacion_Hematita_Calcita |
| SP40684 | 51.7 | 57 | Andesita | Cpy_Bn | Media_Alta | DG_M F | Cloritizacion_Calcita |
| SP40684 | 57 | 66 | Andesita | Cpy_Py | Media_Baja | DG_M F | Cloritizacion_Calcita |
| SP40684 | 66 | 71 | Andesita | Py | Alta | MF | Cloritizacion_Calcita |

| | | | | | | | |
|---------|-------|-------|--------------------|--------|------------|-----------------------|--|
| SP40684 | 71 | 71.4 | Andesita | Cpy | Media | DF | Cloritizacion_Calcita |
| SP40684 | 71.4 | 73.1 | Arenisca | Cpy | Media | DF | Cloritizacion_Hematizacion |
| S1087 | 54 | 58 | Arenisca | - | - | - | - |
| S1087 | 58 | 59.7 | Arenisca | Py | Alta | MF_D G | Cloritizacion_Calcita |
| S1087 | 59.7 | 61 | Arenisca | Cpy_Py | Media_Baja | DG_M F | Cloritizacion_Calcita |
| S1087 | 61 | 61.4 | Arenisca | Cpy | Media | DF_DG | Cloritizacion_Calcita |
| S1087 | 61.4 | 62 | Arenisca | Cpy_Bn | Media_Alta | DG_M F | Cloritizacion_Calcita |
| S1087 | 62 | 66 | Arenisca | Bn | Alta | DG_M F | Cloritizacion_Calcita |
| S1087 | 66 | 66.5 | Arenisca | Cpy_Bn | Media | DF_DG | Cloritizacion_Calcita |
| S1087 | 66.5 | 68 | Zona de falla | Cpy | Media_Baja | DF | Albitizacion_Cloritizacion_Calcit a |
| S1087 | 68 | 72 | Andesita | Py | Baja | DF_DG | Cloritizacion_Calcita |
| SP47484 | 44 | 46.9 | Arenisca | Py | Media | | Cloritizacion |
| SP47484 | 46.9 | 47.6 | Arenisca | Cpy | Media | | Cloritizacion |
| SP47484 | 47.6 | 47.85 | Arenisca | Cpy_Bn | Media_Alta | | Cloritizacion |
| SP47484 | 47.85 | 50.2 | Arenisca | Bn | Alta | MF_D G | Cloritizacion |
| SP47484 | 50.2 | 53.4 | Arenisca | Cpy | Alta | DG_Cu mulos | Cloritizacion |
| SP47484 | 53.4 | 56 | Arenisca | Py | Alta | MF_DF | - |
| S11883 | 40 | 46 | Andesita | Py | Alta | MF_D G | Cloritizacion_Hematita_Calcita |
| S11883 | 46 | 52 | Andesita | Cpy | Media_Alta | DG_Pa tinas_ MF | Cloritizacion_Hematita_Calcita |
| S11883 | 52 | 54 | Andesita | Cpy_Bn | Alta | DG_M F | Cloritizacion_Hematita_Calcita |
| S11883 | 54 | 60 | Andesita | Bn | Alta | MF | Cloritizacion_Hematita_Calcita |
| S11883 | 60 | 63.2 | Arenisca | Bn | Baja | DF_DG | Cloritizacion |
| S11883 | 63.2 | 67.6 | Andesita | Cpy | Alta | DG_Pa tinas | Cloritizacion_Calcita |
| S11883 | 67.6 | 78.4 | Andesita | Bn | Alta | MF | Cloritizacion_Hematita_Calcita |
| S11883 | 78.4 | 80.4 | Andesita | Cpy | Alta | DG_Pa tinas | Cloritizacion_Hematita_Calcita |
| S11883 | 80.4 | 83 | Arenisca | Cpy | Media_Baja | DG | Calcificacion |
| S11883 | 83 | 87 | Arenisca | Cpy | Media_Baja | DF_DG | Cloritizacion_Calcita |
| S11883 | 87 | 94 | Toba cristalina | - | - | - | - |
| SP39584 | 34 | 41 | Arenisca | Cpy_Bn | Baja | DF | Cloritizacion_Hematita_Calcita |
| SP39584 | 41 | 49 | Arenisca | Bn | Baja | DF_DG | Cloritizacion_Calcita |
| SP39584 | 49 | 55.5 | Arenisca | Bn | Baja | DF_DG | Cloritizacion_Hematita_Calcita |
| SP39584 | 55.5 | 56.3 | Arenisca | Cpy_Bn | Baja | DF_DG | Cloritizacion_Hematita_Calcita |
| SP39584 | 56.3 | 57.8 | Arenisca | - | - | - | - |
| SP39584 | 57.8 | 59.9 | Zona de falla | Cpy | Media | DF_DG _Patina s | - |
| SP39584 | 59.9 | 66 | Arenisca | Py | Alta | MF | - |
| S18082 | 68 | 76.7 | Andesita | Cpy | Baja | VTF | Cloritizacion_Hematita_Calcita |

| | | | | | | | |
|--------|-------|--------|-----------|-----|------------|------------------------|----------------------------|
| S18082 | 76.7 | 77.4 | Andesita | Cpy | Media_Alta | DF_Pa tinas_V TF | Cloritizacion_Calcita |
| S18082 | 77.4 | 79.8 | Arenisca | Cpy | Alta | DF | Cloritizacion |
| S18082 | 79.8 | 81.55 | Riodacita | Cpy | Alta | DF_DG | Cloritizacion_Calcita |
| S18082 | 81.55 | 97.55 | Riodacita | Bn | Alta | DF_DG _VTF | Cloritizacion_Hematizacion |
| S18082 | 97.55 | 100.15 | Andesita | Bn | Media_Alta | MF | - |

Una descripción más detallada se puede encontrar en las tablas de la siguiente sección donde se describe la mineralogía presente, granulometría visual, estilos de mineralización y alteración.

A continuación, se presenta una tabla resumen de las 15 muestras seleccionadas, identificando el tramo, sondaje correspondiente y el peso de cada muestra (tabla 6.36), como también la información metalúrgica de cada una de ellas (tabla 6.37).

TABLA 6.15: TABLA RESUMEN DE LAS MUESTRAS SELECCIONADAS PARA REALIZAR ENSAYO DE RECUPERACIÓN POR FLOTACIÓN.

| Código de Muestra | Sondaje | Muestra de Mano | Desde [m] | Hasta [m] | Soporte [m] | Peso [kg] |
|-------------------|---------|-----------------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| MET-1 | S11883 | Si | 44 | 56 | 12 | 12.31 |
| MET-2 | S11883 | Si | 56 | 68 | 12 | 11.56 |
| MET-3 | SP40684 | Si | 42 | 52 | 10 | 11.55 |
| MET-4 | SP40684 | Si | 52 | 62 | 10 | 11.92 |
| MET-5 | S1087 | Si | 60 | 68 | 8 | 9.51 |
| MET-6 | SP47484 | Si | 46 | 54 | 8 | 9.44 |
| MET-7 | SP39584 | Si | 34 | 44 | 10 | 11.44 |
| MET-8 | SP39584 | Si | 44 | 55 | 11 | 11.94 |
| MET-9 | S6885 | Si | 45 | 55 | 10 | 11.24 |
| MET-10 | S6885 | Si | 55 | 65 | 10 | 10.8 |
| MET-11 | S6885 | Si | 65 | 76 | 11 | 11.73 |
| MET-12 | S11883 | Si | 68 | 78 | 10 | 11 |
| MET-13 | S11883 | No | 78 | 88 | 10 | 11.66 |
| MET-14 | S18082 | Si | 74 | 86 | 12 | 11.18 |
| MET-15 | S18082 | Si | 86 | 97 | 11 | 9.95 |

TABLA 6.16: TABLA RESUMEN DE LAS PROPIEDADES METALÚRGICAS DE CADA MUESTRA MET.

| Código de Muestra | CUT | Factor K | TMOL | D80 | Rec de Cu | Litología | Zona Mineral | Occ |
|--------------------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------------|--------------------------------|------------------------|--------------|
| MET-1 | 2.14 | 4.1 | 16.8 | 200 | 73.4 | Andesita LP | Halo externo Py-Cpy-Bn | De DG a MF |
| MET-2 | 2.87 | 4.4 | 12.8 | 195 | 65.9 | Andesita con intercalación Sed | Cpy | DG y patinas |
| MET-3 | 3.03 | 7.1 | 16.0 | 192 | 68.2 | Andesita LP | Cpy-Bn | DG y MF |
| MET-4 | 1.45 | 5.6 | 11.9 | 201 | 74.5 | Andesita LP | Cpy-Bn y Cpy-Py | DG-MF |
| MET-5 | 2.99 | 4.5 | 14.0 | 194 | 71.8 | Arenisca | Py-Cpy-Bn | DF-DG-MF |
| MET-6 | 1.89 | 4.8 | 13.5 | 203 | 70.1 | Arenisca | Py-Cpy-Bn | DF-DG-MF |
| MET-7 | 1.65 | 4.3 | 12.9 | 195 | 65.6 | Arenisca | Cpy-Bn | DF-DG |
| MET-8 | 1.83 | 4.7 | 14.4 | 200 | 65.7 | Arenisca | Bn | DF-DG |
| MET-9 | 5.56 | 4.5 | 15.0 | 194 | 71.1 | Andesita LP | Cpy-Bn y Bn | DG y MF |
| MET-10 | 6.46 | 3.3 | 17.7 | 191 | 70.0 | Andesita LP | Bn | MF |
| MET-11 | 3.35 | 4.0 | 15.0 | 189 | 74.2 | Andesita LP | Cpy-Bn | DG-MF |
| MET-12 | 4.27 | 3.0 | 17.9 | 202 | 74.9 | Andesita | Bn | MF |
| MET-13 | 1.90 | 4.0 | 12.0 | 186 | 66.4 | Andesita y Arenisca | Cpy | DG |
| MET-14 | 1.80 | 5.0 | 15.6 | 198 | 75.2 | Andesita, Arenisca y Riodacita | Cpy y Bn | DF, VTF y DG |
| MET-15 | 2.14 | 2.7 | 19.5 | 198 | 74.3 | Ridacita | Bn | DF-DG-VTF |

6.7.3 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE SULFUROS PRIMARIOS

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE MUESTRAS DE MANO

Enfocado a las fases minerales presentes (formadores de roca, mineralización y alteración).

- MET-1



FIGURA 6.60: FOTOGRAFÍA DE LA MUESTRA MET-1 ENFOCADA A APOYAR LA DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA ROCA.

TABLA 6.17: DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA MUESTRA MET-1. CONTIENIENDO INFORMACIÓN LITOLÓGICA, DE MINERALIZACIÓN DE MENA Y ALTERACIÓN.

| Hole ID | From | To | Lito | Descripción Litología | Min | Int Min | Ocu | Descripción Occ | Alteración | Int Alt | Descripción Alt | Descripción del tramo seleccionado |
|---------|------|----|----------|--|--------|------------|-----------|---|--|------------|--|--|
| S11883 | 40 | 46 | Andesita | Se reconocen cristales tabulares de Plg, cristales fracturados y anhedrales, se reconocen también cristales redondeados y angulosos, la mayoría de los cristales son plagioclasas >1mm, se reconocen cristales de menor tamaño en la matriz, <1mm de color blanco. La matriz es de color verde, cloritizada de fondo, la roca corresponde a una Andesita. La cantidad de cristales de plg alcanza un 50%, matriz cloritizada un 40% y cristales blancos pequeños un 10%. | Py | Alta | MF-DG | La pirita es bastante intensa en la masa fundamental, encontrándose diseminada muy fina, como también diseminada gruesa en cúmulos, la mineralización aprovecha la permeabilidad primaria de la roca, diseminando fino en la matriz. La mineralización oscurece la matriz de la roca generando manchas grisáceas que corresponden a mineralización de Bn. | Cloritización de fondo, calcita en cúmulos, parches y vetas. Hematización de fondo leve. | Alta | La clorita viene de fondo alterando los minerales de la matriz, coloreándola de verde, los cristales blancos de plg sobresalen a la vista. | Esta muestra está enfocada a definir la recuperación del borde externo de un núcleo de Bn diseminado o muy fino en masa fundamental, en andesita. Donde se tiene la zonación de Bn, Cpy-Bn y Cpy |
| S11883 | 46 | 52 | Andesita | Entre los 59.30 y los 60.50 corresponde a una zona brechizada y zona de falla, posiblemente la falla Isabel 3 o 4 que pasan por la zona, y pone en contacto una unidad cristalina posiblemente andesita con una unidad de areniscas | Cpy | Med - Alta | DG-Pat-MF | La Cpy se observa en diseminado grueso aisladamente, como también en patinas de diseminado fino, y en menor medida diseminada fina en la matriz. Ocurre principalmente en la matriz, y bordeando cristales de plg. | Cloritización de fondo, calcita en vetillas y cúmulos, hmt leve en vetillas | Med - Alta | La calcita genera una textura de parches, la cloritización esta de fondo en la masa fundamental, dejando ver los cxs de plg. | |
| S11883 | 52 | 54 | Andesita | | Cpy-Bn | Alta | DG-MF | La Bn se reconoce en la matriz en forma de diseminado muy fino ocupando la permeabilidad primaria de la roca, y en menor medida en DG, la Cpy se reconoce aislada en diseminado grueso y sobrepuesta a la Bn diseminada fina | Cloritización de fondo, calcita en vetillas y cúmulos, hmt leve en vetillas | Med - Alta | | |
| S11883 | 54 | 60 | Andesita | | Bn | Alta | MF | La Bn se observa diseminada muy fina en la matriz, ocupando la permeabilidad primaria de la roca, se reconocen parches y manchas de coloración grisácea | Cloritización de fondo, calcita en vetillas y | Med - Alta | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---|-------------------------------|--|--|--|
| | | | | | | | | | que corresponde a la precipitación de Bn. Al final del tramo, 60m, nos encontramos con una falla. | cúmulos, hmt leve en vetillas | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---|-------------------------------|--|--|--|

• MET-2



FIGURA 6.61: FOTOGRAFÍA DE LA MUESTRA MET-2 ENFOCADA A APOYAR LA DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA ROCA

TABLA 6.18: DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA MUESTRA MET-2. CONTIENIENDO INFORMACIÓN LITOLÓGICA, DE MINERALIZACIÓN DE MENA Y ALTERACIÓN.

| Hole ID | From | To | Litología | Descripción Litología | Min | Int Min | Ocu | Descripción Occ | Alteración | Int Alt | Descripción Alt | Descripción del tramo seleccionado |
|---------|------|------|-----------|---|-----|---------|--------|---|---|----------|---|--|
| S11883 | 54 | 60 | Andesita | | Bn | Alta | MF | La Bn se observa diseminada muy fina en la masa fundamental, ocupando la permeabilidad primaria de la roca, se reconocen parches y manchas de coloración grisácea que corresponde a la precipitación de Bn. Al final del tramo, 60m, nos encontramos con una falla. | Cloritización de fondo, calcita en vetillas y cúmulos, hmt leve en vetillas | Med-Alta | La calcita genera una textura de parches, la cloritización esta de fondo en la masa fundamental, dejando ver los cxs de plg | Esta muestra esta enfocada a definir la recuperación en una zona de falla que pone en contacto una roca sedimentaria |
| S11883 | 60 | 63,2 | Arenisca | Roca sedimentaria, de grano fino, polimictica, con matriz cloritizada de color verde, corresponde a una arenisca | Bn | Baja | DF-DG | La Bn se encuentra diseminada fina y gruesa en la matriz deforma aislada, y con baja intensidad | Cloritización, Oxidación de algunos clastos | Med-Alta | La zona de falla entre el 59.3-60.5 presenta hematización intensa de la masa fundamental | |
| S11883 | 63,2 | 67,6 | Andesita | Se observa la misma roca cristalina, con cristales de plg y matriz verdosa. Presencia de falla y roca molida entre los 64.7 a 65.25 | Cpy | Alta | DG-Pat | La Cpy se presenta en gran intensidad, de forma diseminada gruesa y aislada, como en patinas formando un mosaico, como también bordeando cristales en al roca y cúmulos de calcita principalmete. | Cloritización de fondo, Calcita en cúmulos y vetas, alteración selectiva en algunas plg | Alta | Se reconoce la típica alteración de clorita de fondo coloreando de verde la roca, la presencia de cúmulos de calcita, pero también se reconoce alteración selectiva de plg, dándoles un color pardo y café. | |

• MET-3

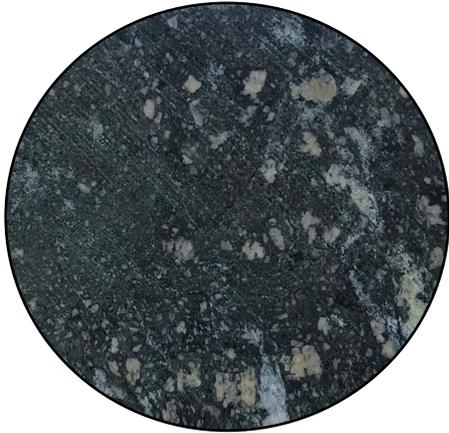


FIGURA 6.62: FOTOGRAFÍA DE LA MUESTRA MET-3 ENFOCADA A APOYAR LA DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA ROCA.

TABLA 6.19: DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA MUESTRA MET-3. CONTIENIENDO INFORMACIÓN LITOLÓGICA, DE MINERALIZACIÓN DE MENA Y ALTERACIÓN.

| Hole ID | From | To | Litología | Descripción Litología | Min | Int Min | Ocu | Descripción Occ | Alteración | Int Alt | Descripción Alt | Descripción del tramo seleccionado |
|---------|------|------|-----------|--|-----|------------|-----|---|--|------------|--|--|
| SP40684 | 41,9 | 43,7 | Andesita | Se reconoce una roca cristalina, con variación lateral en el tamaño de los cristales de Plg, se reconocen principalmente cxs tabulares de plg, una masa fundamental grisácea que va variando en tonalidades de verde y rojizo según la intensidad de la alteración, hay zonas donde la alteración cloritica no permite identificar claramente los cxs de plg y zonas donde la presencia de hematita de fondo no deja ver los cxs de plg. La textura de la roca se ve determinada por la intensidad de la alteración. Existe presencia de calcita en todo el tramo, sin embargo, se hace más intensa hacia el final del tramo mineralizado en forma de cúmulos y parches. Del 45.40-45.80 roca molida posible zona de fractura (entre los 45.40-45.45 hay presencia de material tamaño arcilla, hizo barro), la roca entre 45.20-46 cambia de granulometría, los cxs de plg son de menor tamaño y la masa fundamental esta cloritizada. Entre los 55.20-55-40 se reconoce una zona de falla con material de relleno de unos 20 cm con limonita y arcillas principalmente. | Cpy | Media | DG | La Cpy se encuentra aislada y en cúmulos formando diseminado grueso, se reconoce py de fondo diseminada fina en la masa fundamental | Cloritización y calcita en vetas | Media | La alteración es menos intensa pues deja ver claramente los cxs tabulares de plg en una masa fundamental cloritizada | El tramo corresponde principalmente al núcleo de Bn, sin embargo, por condición de peso de muestra se debió considerar parte de las zonas externas del núcleo con Cpy-Bn de ocurrencia DG-MF. Esta muestra se tomó para seguir con la continuidad del cuerpo mineralizado DMF. |
| SP40684 | 43,7 | 51,7 | Andesita | | Bn | Media-Alta | MF | La Bn se encuentra diseminada muy fina en la masa fundamental, en los primeros tramos de este tramo se encuentra diseminada gruesa y aislada, y a medida que se acerca al núcleo se hace más intensa y fina en la masa fundamental. | Cloritización y calcita en vetas y cúmulos, pequeños halos de hematita frente a vetillas | Media-Alta | Cloritización de fondo, calcita abundante y hmt leve | |

• MET-4

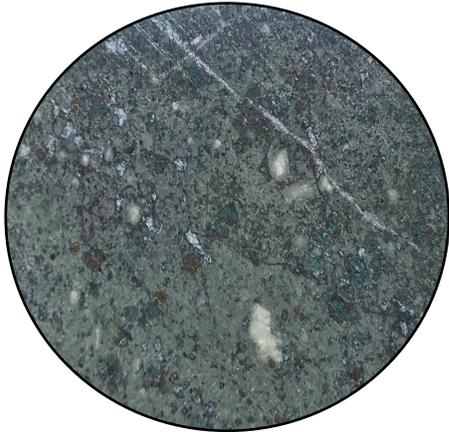


FIGURA 6.63: FOTOGRAFÍA DE LA MUESTRA MET-4 ENFOCADA A APOYAR LA DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA ROCA.

TABLA 6.20: DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA MUESTRA MET-4. CONTIENIENDO INFORMACIÓN LITOLÓGICA, DE MINERALIZACIÓN DE MENA Y ALTERACIÓN.

| Hole ID | From | To | Litología | Descripción Litología | Min | Int Min | Ocu | Descripción Occ | Alteración | Int Alt | Descripción Alt | Descripción del tramo seleccionado |
|---------|------|----|-----------|--|--------|------------|-------|--|--|------------|---|---|
| SP40684 | 51,7 | 57 | Andesita | Se reconoce una roca cristalina, con variación lateral en el tamaño de los cristales de Plg, se reconocen principalmente cxs tabulares de plg, una masa fundamental grisácea que va variando en tonalidades de verde y rojizo según la intensidad de la alteración, hay zonas donde la alteración clorítica no permite identificar claramente los cxs de plg y zonas donde la presencia de hematita de fondo no deja ver los cxs de plg. La textura de la roca se ve determinada por la intensidad de la alteración. Existe presencia de calcita en todo el tramo, sin embargo, se hace más intensa hacia el final del tramo mineralizado en forma de cúmulos y parches. | Cpy-Bn | Media-Alta | DG-MF | La Bn se sigue apreciando diseminada fina en la masa fundamental, y se empieza a observar Cpy sobrepuesta diseminada gruesa. | Cloritización y calcita en vetas y cumulos | Media-Alta | La clorita sigue estando de fondo presencia de calcita intensamente | |
| SP40684 | 57 | 66 | Andesita | Del 45.40-45.80 roca molida posible zona de fractura (entre los 45.40-45.45 hay presencia de material tamaño arcilla, hizo barro), la roca entre 45.20-46 cambia de granulometría, los cxs de plg son de menor tamaño y la masa fundamental esta cloritizada. Entre los 55.20-55-40 se reconoce una zona de falla con material de relleno de unos 20 cm con limonita y arcillas principalmente. | Cpy-Py | Media-Baja | DG-MF | Se reconoce cada vez mas pirita diseminada fina en la masa fundamental, con Cpy diseminada fina y gruesa. | Cloritización y calcita en vetas y cumulos | Media-Alta | La clorita sigue estando de fondo presencia de calcita intensamente | Este muestra es seleccionada con objetivo de medir la recuperación de cobre en la zona externa del núcleo de Bornita, la zona con presencia de Cpy-Bn y el halo exterior incluyendo presencia de Py |

• MET-5



FIGURA 6.64: FOTOGRAFÍA DE LA MUESTRA MET-5 ENFOCADA A APOYAR LA DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA ROCA.

TABLA 6.21: DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA MUESTRA MET-5. CONTIENIENDO INFORMACIÓN LITOLÓGICA, DE MINERALIZACIÓN DE MENA Y ALTERACIÓN.

| Hole ID | From | To | Litología | Descripción Litología | Min | Int Min | Ocu | Descripción Occ | Alteración | Descripción Alt |
|---------|------|------|-------------------------|--|--------|------------|-------|--|--|---|
| S1087 | 58 | 59,7 | Arenisca | Intercalación de roca sedimentaria, con granos subangulosos, con variaciones en tamaño de granos, pasando de fino a grueso | Py | Alta | MF-DG | Pirita diseminada muy fina de alta intensidad en la masa fundamental de la roca | Cloritización de fondo, y cúmulos-vetas de calcita | |
| S1087 | 59,7 | 61 | Arenisca | | Py-Cpy | Media-Baja | DG-MF | La Py se observa diseminada fina en la masa fundamental y la Cpy se observa aislada y diseminada entre fino y grueso | | |
| S1087 | 61 | 61,4 | Arenisca | | Cpy | Media | DF-DG | La Cpy se empieza a observar de forma más intensa, de igual forma aislada | | |
| S1087 | 61,4 | 62 | Arenisca | | Cpy-Bn | Media-Alta | DG-MF | La cpy se empieza a observar diseminada gruesa aislada, y la Bn diseminada muy fina en la masa fundamental, de intensidad media-alta | | |
| S1087 | 62 | 66 | Arenisca | | Bn | Alta | DG-MF | La Bn se observa diseminada muy fina en la masa fundamental y de forma diseminada gruesa en cúmulos aislados | | |
| S1087 | 66 | 66,5 | Arenisca | | Cpy-Bn | Media | DF-DG | Se observa Bn diseminada gruesa y fina de forma aislada, y Cpy diseminada fina y en vetillas | | |
| S1087 | 66,5 | 68 | Zona de falla, Andesita | Aumenta el contenido de granos, estos se reconocen fracturados, se reconocen algunos cristales tabulares de plg, nos encontramos en una zona de falla (66.6-67.70) | Cpy | Media-Baja | DF | Se reconce cpy deseminada fina aislada | Albitización, cloritización, Calcita | La alteración de este tramo presenta un color blanquesino y algunas zonas de color café pardo, menor cloritización, presencia de albitización |

• MET-6

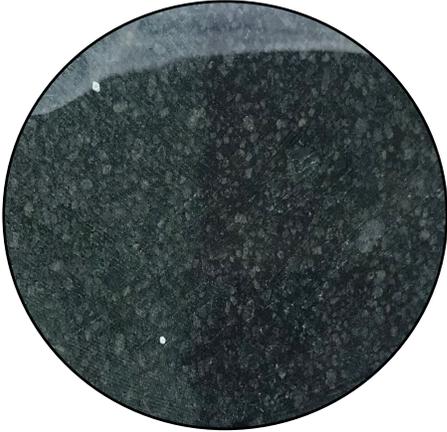


FIGURA 6.65: FOTOGRAFÍA DE LA MUESTRA MET-6 ENFOCADA A APOYAR LA DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA ROCA.

TABLA 6.22: DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA MUESTRA MET-6. CONTIENIENDO INFORMACIÓN LITOLÓGICA, DE MINERALIZACIÓN DE MENA Y ALTERACIÓN.

| Hole ID | From | To | Litología | Descripción Litológica | Min | Int Min | Ocu | Descripción Occ | Alteración |
|---------|-------|-------|------------------------------------|--|--------|------------|------------------------------|--|------------------------|
| SP47484 | 44 | 46,9 | Arenisca con granos gruesos de plg | Se reconoce la misma roca que en el sondaje S1087, una roca con granos y cristales de Plg, poco visibles por la alteración, con variaciones laterales en la granulometría de los granos, se reconocen granos tabulares, algunos subredondeados, algunos rotos, subangulosos, en una matriz fina de color verde que pareciese ser arena fina, entre los 48.5-49.5 se reconoce una roca mas cristalina con los cxs de plg bien visibles y mayoritariamente tabulares que pareciesen ser una variación lateral de la granulometría de los granos en la misma matriz. Del 48.50-48.80 posible zona de falla, roca molida en el tramo mas cristalino. | Py | Media | | | Cloritización de fondo |
| SP47484 | 46,9 | 47,6 | | | Cpy | Media | | | |
| SP47484 | 47,6 | 47,85 | | | Cpy-Bn | Media-Alta | | | |
| SP47484 | 47,85 | 50,2 | | | Bn | Alta | MF-DG-como halos de vetillas | La Bn se observa diseminada fina en la amsa fundamental y en diseminado grueso y cúmulos | |
| SP47484 | 50,2 | 53,4 | | | Cpy | Alta | DG-Cúmulos y patinas | La intensidad de la Cpy comienza alta cerca del núcleo, con Cpy diseminada gruesa generando patinas bien intensas y disminuye a medida se aleja, tanto en intensidad, generando diseminado más aislado | |
| SP47484 | 53,4 | 56 | | | Py | Alta | MF-DF | | |

- MET-7

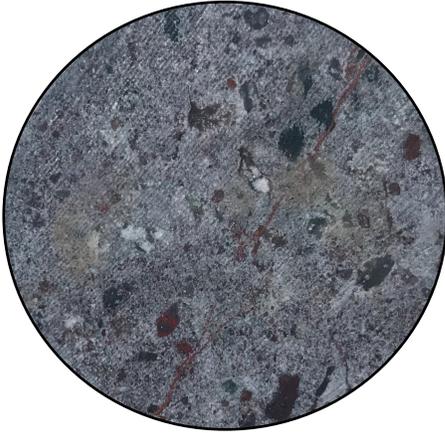


FIGURA 6.66: FOTOGRAFÍA DE LA MUESTRA MET-7 ENFOCADA A APOYAR LA DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA ROCA.

TABLA 6.23: DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA MUESTRA MET-7. CONTIENIENDO INFORMACIÓN LITOLÓGICA, DE MINERALIZACIÓN DE MENA Y ALTERACIÓN.

| Hole ID | From | To | Litología | Descripción Litología | Min | Int Min | Ocu | Descripción Occ | Alteración | Int Alt | Descripción Alt | Descripción del tramo seleccionado |
|---------|------|----|-----------------|---|--------|---------|-------|--|---|---------|---|---|
| SP39584 | 34 | 41 | Arenisca gruesa | Fragmentos angulosos polimícticos >5 mm, en matriz fina | Bn-Cpy | Baja | DF | Los granos de mineral, tanto de Bn como de Cpy se encuentran diseminados finos en la matriz, intergranularmente | Calcificación, oxidación de clastos (hematita), y cloritización | Media | La calcificación esta de fondo, algunos clastos se encuentran hematitizados, y se reconoce cloritización leve de fondo de baja intensidad | La mineralización en la parte sedimentaria es uniforme en ocurrencia, siempre diseminado tanto fino como grueso de forma aislada. La muestra se enfoca a analizar la zona externa del nucleo donde se presenta Bn-Cpy y Cpy-Py hacia los bordes |
| SP39584 | 41 | 49 | Arenisca fina | Se reconoce arenisca de grano fino <1mm polimíctica | Bn | Baja | DF-DG | La mineralización de Bn se reconoce aislada, entre granos de matriz y varía en diseminado, tanto fino como grueso, pero en su mayoría fino | Cloritización de fondo, vetas de calcita | Media | Se reconoce la típica clorita en la matriz alterando de fondo | |

- MET-8

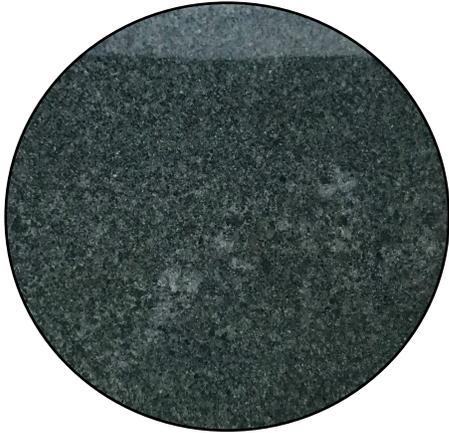


FIGURA 6.67: FOTOGRAFÍA DE LA MUESTRA MET-8 ENFOCADA A APOYAR LA DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA ROCA.

TABLA 6.24: DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA MUESTRA MET-8. CONTENIENDO INFORMACIÓN LITOLÓGICA, DE MINERALIZACIÓN DE MENA Y ALTERACIÓN.

| Hole ID | From | To | Litología | Descripción Litológica | Min | Int Min | Ocu | Descripción Occ | Alteración | Int Alt | Descripción Alt | Descripción del tramo seleccionado |
|---------|------|------|-----------------|---|-----|---------|-------|--|---|---------|---|---|
| SP39584 | 41 | 49 | Arenisca fina | Se reconoce arenisca de grano fino <1mm polimíctica | Bn | Baja | DF-DG | La mineralización de Bn se reconoce aislada, entre granos de matriz y varía en diseminado, tanto fino como grueso, pero en su mayoría fino | Cloritización de fondo, vetas de calcita | Media | Se reconoce la típica clorita en la matriz alterando de fondo | La muestra es enfocada a analizar el núcleo de Bornita en la arenisca |
| SP39584 | 49 | 55,5 | Arenisca gruesa | Fragmentos angulosos polimícticos >5 mm, en matriz fina | Bn | Baja | DF-DG | | Calcificación, oxidación de clastos (hematita), y cloritización | Media | La calcificación esta de fondo, algunos clastos se encuentran hematitizados, y se reconoce cloritización leve de fondo de baja intensidad | |

• MET-9



FIGURA 6.68: FOTOGRAFÍA DE LA MUESTRA MET-9 ENFOCADA A APOYAR LA DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA ROCA.

TABLA 6.25: DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA MUESTRA MET-9. CONTIENIENDO INFORMACIÓN LITOLÓGICA, DE MINERALIZACIÓN DE MENA Y ALTERACIÓN.

| Hole ID | From | To | Litología | Descripción Litológica | Min | Int Min | Ocu | Descripción Occ | Alteración | Int Alt | Descripción Alt | Descripción del tramo seleccionado |
|---------|------|------|-----------|---|--------|---------|-------|--|---|---|--|--|
| S6885 | 45 | 50,5 | Andesita | Se reconoce una roca cristalina, se observan cristales de plagioclasas, tabulares y algunos subhedrales, se reconoce una masa fundamental de color verde (cloritizada), algunos cristales se observan semiredondeados, y algunos fracturados. La roca es la misma a lo largo de todo el tramo, sin embargo la visualización de los cristales de Plg se ve dificultada producto de la alteración y la intensidad de esta, en las zonas cloritizadas los cristales de plagioclasa se observan menos y presentan una superficie de alteración volviendolos de color pardo. | Cpy-Bn | Alta | DG-MF | A medida que nos alejamos del núcleo de Bn, la Cpy se encuentra más aislada, menos intensa y diseminada gruesa, se reconoce la mezcla de Cpy-Bn al acercarse al núcleo de Bn | Cloritización | Media-Alta | La alteración comienza con clorita por los extremos del cuerpo mineralizado, clorita en la masa fundamental, los cxs de plg se observan alterados presentándose de color pardo, al adentrarse al cuerpo mineralizado se presenta hematización de la roca como halos en torno a fracturas y vetillas, se observan zonas rojizas hematizadas, sin embargo aparecen entre medio zonas verdosas donde predomina la clorita de fondo, en el núcleo de alta Bn se reconoce un color gris púrpura de la masa fundamental debido a la mineralización en la masa fundamental. Por otro lado la calcita se vuelve intensa en el núcleo de Bn presentándose en cúmulos y parches a lo largo de todo el tramo y en presencia de vetas. La zona de Cpy-Bn se reconoce principalmente cloritizada. | Enfocado a definir si la zona externa del núcleo, con zonación Cpy-Bn, como hipótesis debiese presentar mejor recuperación debido al DG aislado. Sin embargo, debido al requisito de peso, no se puede seleccionar solamente la zona de Cpy-Bn, por lo que se incorpora parte del núcleo de Bn (50.5-55) |
| S6885 | 50,5 | 69 | Andesita | La roca es la misma a lo largo de todo el tramo, sin embargo la visualización de los cristales de Plg se ve dificultada producto de la alteración y la intensidad de esta, en las zonas cloritizadas los cristales de plagioclasa se observan menos y presentan una superficie de alteración volviendolos de color pardo. | Bn | Alta | MF | La Bn se encuentra diseminada muy fina en la masa fundamental, se reconoce una mancha negra a simple vista, esto se mantiene en todo el núcleo de alta ley. En las zonas hematizadas de fondo con alta intensidad la Bn se da diseminada gruesa. | Cloritización de fondo y halos de hematita alterando de fondo alrededor de vetillas y, oxidación de la mena, clacita en cúmulos | Cloritización media, Hematización intensa, Calcita en cúmulo y vetillas alta intensidad | | |

• MET-10

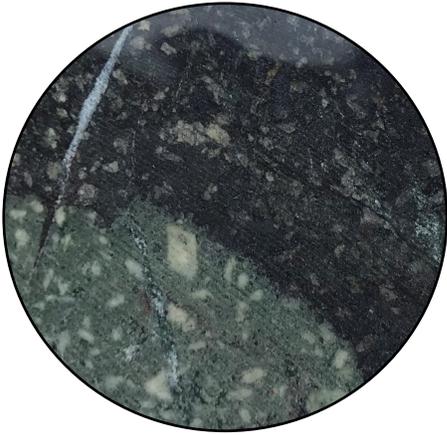


FIGURA 6.69: FOTOGRAFÍA DE LA MUESTRA MET-10 ENFOCADA A APOYAR LA DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA ROCA.

TABLA 6.26: DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA MUESTRA MET-10. CONTIENIENDO INFORMACIÓN LITOLÓGICA, DE MINERALIZACIÓN DE MENA Y ALTERACIÓN.

| Hole ID | From | To | Litología | Descripción Litológica | Min | Int Min | Ocu | Descripción Occ | Alteración | Int Alt | Descripción Alt | Descripción del tramo seleccionado |
|---------|------|----|-----------|---|-----|---------|-----|--|---|--|--|--|
| 56885 | 50,5 | 69 | Andesita | Se reconoce una roca cristalina, se observan cristales de plagioclasas, tabulares y algunos subhedrales, se reconoce una masa fundamental de color verde (cloritizada), algunos cristales se observan semiredondeados, y algunos fracturados. La roca es la misma a lo largo de todo el tramo, sin embargo la visualización de los cristales de Plg se ve dificultada producto de la alteración y la intensidad de esta, en las zonas cloritizadas los cristales de plagioclasa se observan menos y presentan una superficie de alteración volviéndolos de color pardo. | Bn | Alta | MF | La Bn se encuentra diseminada muy fina en la masa fundamental, se reconoce una mancha negra a simple vista, esto se mantiene en todo el núcleo de alta ley. En las zonas hematitizadas de fondo con alta intensidad la Bn se da diseminada gruesa. | Cloritización de fondo y halos de hematita alterando de fondo alrededor de vetillas y, oxidación de la mena, clacita en cúmulos | Cloritización media, Hematitización intensa, Calcita en cúmulos y vetillas alta intensidad | La alteración comienza con clorita por los extremos del cuerpo mineralizado, clorita en la masa fundamental, los cxs de plg se observan alterados presentándose de color pardo, al adentrarse al cuerpo mineralizado se presenta hematización de la roca como halos en torno a fracturas y vetillas, se observan zonas rojizas hematizadas, sin embargo aparecen entre medio zonas verdosas donde predomina la clorita de fondo, en el núcleo de alta Bn se reconoce un color gris púrpura de la masa fundamental debido a la mineralización en la masa fundamental. Por otro lado la calcita se vuelve intensa en el núcleo de Bn presentándose en cúmulos y parches a lo largo de todo el tramo y en presencia de vetas. La zona de Cpy-Bn se reconoce principalmente cloritizada. | Se tomará una muestra del núcleo de Bn diseminada muy fina en la masa fundamental con el objetivo de definir continuidad espacial de la recuperación en este tipo de ocurrencia de núcleos de alta ley y DMF. Asociado a la muestra G1529. |

• MET-11

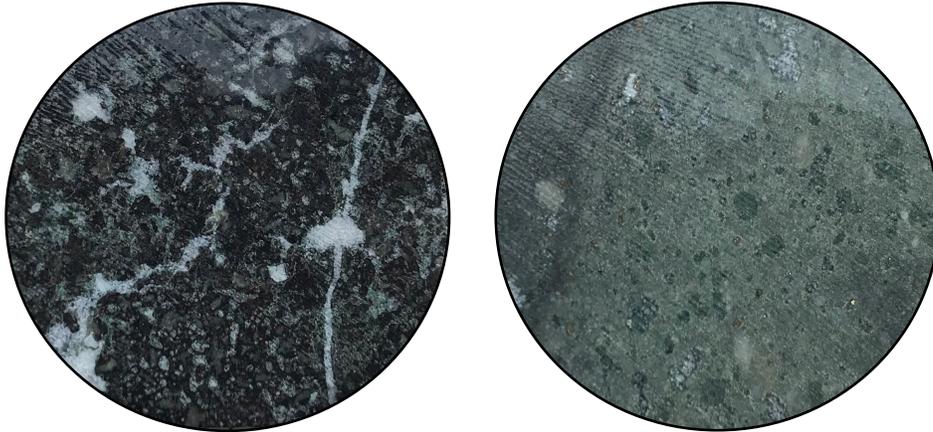


FIGURA 6.70: FOTOGRAFÍA DE LA MUESTRA MET-11 ENFOCADA A APOYAR LA DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA ROCA

TABLA 6.27: DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA MUESTRA MET-11. CONTIENIENDO INFORMACIÓN LITOLÓGICA, DE MINERALIZACIÓN DE MENA Y ALTERACIÓN.

| Hole ID | From | To | Litología | Descripción Litológica | Min | Int Min | Ocu | Descripción Occ | Alteración | Int Alt | Descripción Alt | Descripción del tramo seleccionado |
|---------|------|------|-----------|--|--------|------------|-------|---|---------------|------------|--|---|
| 56885 | 69 | 75,7 | Andesita | Se reconoce una roca cristalina, se observan cristales de plagioclasas, tabulares y algunos subhedrales, se reconoce una masa fundamental de color verde (cloritizada), algunos cristales se observan semiredondeados, y algunos fracturados. La roca es la misma a lo largo de todo el tramo, sin embargo, la visualización de los cristales de Plg se ve dificultada producto de la alteración y la intensidad de esta, en las zonas cloritizadas los cristales de plagioclasa se observan menos y presentan una superficie de alteración volviéndolos de color pardo. | Cpy-Bn | Media-Baja | DG+MF | A medida que nos alejamos del núcleo de Bn la Cpy se encuentra mas aislada, menos intensa y diseminada gruesa, se reconoce la mezcla de Cpy-Bn al acercarse al núcleo de Bn | Cloritización | Media-Alta | La alteración comienza con clorita por los extremos del cuerpo mineralizado, clorita en la masa fundamental, los cxs de plg se observan alterados presentándose de color pardo, al adentrarse al cuerpo mineralizado se presenta hematización de la roca como halos en torno a fracturas y vetillas, se observan zonas rojizas hematizadas, sin embargo, aparecen entre medio zonas verdosas donde predomina la clorita de fondo, en el núcleo de alta Bn se reconoce un color gris púrpura de la masa fundamental debido a la mineralización en la masa fundamental. Por otro lado, la calcita se vuelve intensa en el núcleo de Bn presentándose en cúmulos y parches a lo largo de todo el tramo y en presencia de vetas. La zona de Cpy-Bn se reconoce principalmente cloritizada. | Enfocada a medir el otro borde externo del núcleo de bornita, donde se tiene zonación Bn, Bn-Bpy y Cpy hacia los extremos |

- MET-12

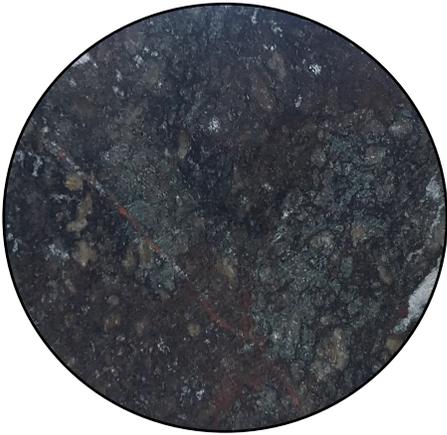


FIGURA 6.71: FOTOGRAFÍA DE LA MUESTRA MET-12 ENFOCADA A APOYAR LA DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA ROCA.

TABLA 6.28: DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA MUESTRA MET-12. CONTIENIENDO INFORMACIÓN LITOLÓGICA, DE MINERALIZACIÓN DE MENA Y ALTERACIÓN.

| Hole ID | From | To | Litología | Descripción Litológica | Min | Int Min | Ocu | Descripción Occ | Alteración | Int Alt | Descripción Alt | Descripción del tramo seleccionado |
|---------|------|------|-----------|---|-----|---------|-----|---|--|---------|---|---|
| S11883 | 67,6 | 78,4 | Andesita | Se reconoce la misma roca nterior, roca cristalina con matriz verdosa, cristales fracturados, tabulares y redondeados | Bn | Alta | MF | La Bn se reconoce principalmente en la matriz, de forma diseminada muy fina, ocupando la permeabilidad primaria de la roca, generando manchas grises, también se reconoce diseminada muy fina en torno a cúmulos de calcita y como halos de DF en masa fundamental en torno a vetas de calcita. | Cloritización de fonfo, Calcita en cúmulos y vetas, hematita | Alta | Se reconocen las mismas alteraciones de clorita y calcita, sin embargo, se observa la presencia de hematita como halos de alteración en torno a vetas de calcita y en fracturas | Enfocada a analizar la recuperación de un núcleo de bornita diseminado muy fino en la masa fudamental en andesita |

• MET-14

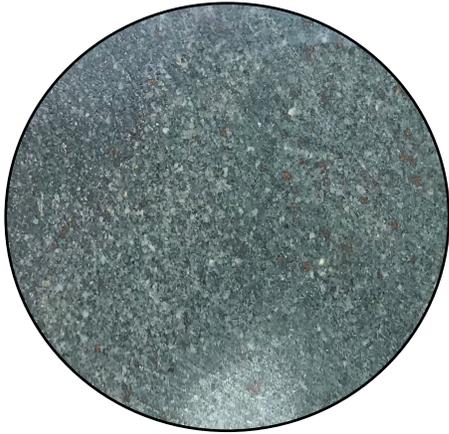


FIGURA 6.72: FOTOGRAFÍA DE LA MUESTRA MET-14 ENFOCADA A APOYAR LA DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA ROCA.

TABLA 6.29: DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA MUESTRA MET-14. CONTIENIENDO INFORMACIÓN LITOLÓGICA, DE MINERALIZACIÓN DE MENA Y ALTERACIÓN.

| Hole ID | From | To | Litología | Descripción Litológica | Min | Int Min | Ocu | Descripción Occ | Alteración | Int Alt | Descripción Alt |
|---------|-------|-------|-----------|---|-----|------------|----------------|---|--|------------|--|
| S18082 | 68 | 76,7 | Andesita | Roca cristalina, se observan cristales de plg tabulares y cxs de color oscuro posiblemente plagioclasas reemplazadas por clorita o epidota ya que mantienen la forma tabular, la masa fundamental es de color gris con clorización y hematización de fondo lo que dificulta la visibilidad de los cxs de plg. | Cpy | Baja | VTF | Se reconoce Cpy en vetillas finas y diseminado en vetillas finas de Calcita como también en vetillas y diseminado formando una corona o halo alrededor de vetas de calcita | Clorización, hematización y Vetas de calcita | Media-Alta | Clorización y hematización de fondo en la masa fundamental, alteración selectiva de las plagioclasas o minerales máficos. Calcita en vetas y vetillas. |
| S18082 | 76,7 | 77,4 | Andesita | La roca presenta una textura distinta, no se reconocen cristales de plg a simple vista, sin embargo, la roca pareciese ser la misma pero con una alteración distinta, la roca presenta cxs tabulares de color oscuro inmersos en la masa fundamental, posiblemente plg alteradas | Cpy | Media-Alta | DF-Patinas-VTF | En este tramo, que corresponde al contacto entre una arenisca y la andesita, se reconoce Cpy diseminada fina y en microvetillas bordeando cristales y cúmulos de calcita | Clorización y calcita | Media-Alta | La clorización esta de fondo y la calcita se reconoce en cúmulos y parches |
| S18082 | 77,4 | 79,8 | Arenisca | Lente de arenisca, polimítico, inequigranular, clastosoportado, granos <1mm, clorización de fondo, color verde de la roca | Cpy | Alta | DF | La Cpy se reconoce diseminada fina entre granos de la matriz de la roca, de forma aislada ocupando la permeabilidad primaria de la roca. Principalmente diseminado fino, sin embargo, algunos pocas mas gruesos | Clorización | Media | Clorización de fondo, |
| S18082 | 79,8 | 81,55 | Riodacita | Roca de color gris con parches verdes, se reconoce los fenocristales tabulares de plg en una masa fundamental, hay zonas de color gris posiblemente calcitizadas y otras zonas verdosas con clorita de fondo. Contacto litológicos concordantes con la arenisca, puede corresponder a un lente sedimentario | Cpy | Alta | DF-DG | Se reconoce la ocurrencia diseminada de la Cpy en la masa fundamental, no de forma intensa teselando toda la masa fundamental sino que de forma aislada en esta | Calcificación y clorización | Alta | Clorización de fondo en tramos de riodacta y calcificación de fondo en otros tramos entremezclados |
| S18082 | 81,55 | 97,55 | Riodacita | Roca cristalina con fenocristales de plg tabulares en una masa fundamental afanítica de color rojizo o verde según la alteración presente (hmt o clorita). El tramo termina en un contacto por falla con roca andesita. La roca presenta la típica textura bandeada de flujo | Bn | Alta | DF-DG-VTF | La ocurrencia de la bornita se mantiene uniforme en todo el tramo de roca, con diseminados fino y grueso en la masa fundamental de forma aislada, por lo general los granos de mineral no se topan unos con otros, y microvetillas muy finas y cortas. Existe la presencia de 1 o 2 vetas de bornita de 0.5 cm de ancho | Clorización y hematización | Alta | La alteración corresponde a una intercalación de hematización y clorización de fondo coloreando de tonos rojizos y verdes la roca en intercalación |

- MET-15



FIGURA 6.73: FOTOGRAFÍA DE LA MUESTRA MET-15 ENFOCADA A APOYAR LA DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA ROCA.

TABLA 6.30: DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA MUESTRA MET-15. CONTIENIENDO INFORMACIÓN LITOLÓGICA, DE MINERALIZACIÓN DE MENA Y ALTERACIÓN.

| Hole ID | From | To | Litología | Descripción Litológica | Min | Int Min | Ocu | Descripción Occ | Alteración | Int Alt | Descripción Alt |
|---------|-------|-------|-----------|--|-----|---------|-----------|---|------------------------------|---------|--|
| S18082 | 81,55 | 97,55 | Riodacita | Roca cristalina con fenocristales de plg tabulares en una masa fundamental afanítica de color rojizo o verde según la alteración presente (hmt o clorita). El tramo termina en un contacto por falla con roca andesita. La roca presenta la típica textura bandeada de flujo | Bn | Alta | DF-DG-VTF | La ocurrencia de la bornita se mantiene uniforme en todo el tramo de roca, con diseminados fino y grueso en la masa fundamental de forma aislada, por lo general los granos de mineral no se topan unos con otros, y microvetillas muy finas y cortas. Existe la presencia de 1 o 2 vetas de bornita de 0.5 cm de ancho | Cloritización y hematización | Alta | La alteración corresponde a una intercalación de hematización y cloritización de fondo coloreando de tonos rojizos y verdes la roca en intercalación |

6.7.4 ZONIFICACIÓN MINERAL Y TEXTURAL

La descripción geológica de los sondajes que definen el cuerpo en cuestión permitió identificar y caracterizar las zonas minerales y texturales que lo conforman, como se documenta en la tabla 6.14. El cuerpo está formado por un núcleo de Bornita, que varía irregularmente conforme a las dimensiones del cuerpo, sin embargo, este núcleo presenta continuidad, reconociéndose una textura específica en todos los sondajes, la bornita del núcleo se dispone en la roca de forma intensa y diseminada muy fina penetrando de forma pervasiva en la masa fundamental de la andesita. Esta ocurrencia característica es definida como Masa Fundamental (MF) y forma parte de la mayoría de los cuerpos mineralizados de El Soldado. Las muestras que definen directamente esta zona mineral y textural son MET-2, MET-3, MET-10 y MET-12.

Por otro lado, también se reconoce en todos los sondajes, una variación lateral de las fases minerales de mena, a medida que se avanza hacia los bordes del cuerpo comienza a disminuir la presencia de Bn y aumentar la de Cpy, apareciendo una zona de mezcla en la que interactúan granos de bornita y calcopirita. Estas variaciones mineralógicas conllevan intrínsecamente cambios texturales y por lo tanto de la ocurrencia definida, los cuales se ven reflejados directamente en las leyes presentes la cual aumenta concéntricamente hacia el núcleo mineralizado. Esta zona de interacción Bn-Cpy presenta menos ley que el núcleo, donde la intensidad de los minerales de mena es menor, lo que provoca que los granos minerales estén dispuestos de forma más aislada, con menos contactos intergranulares entre sí. Reflejando un perfil de ocurrencia definido como Diseminado Grueso (DG) para la Bn y Diseminado Fino (DF) para la Cpy.

A medida que se acerca el borde externo del cuerpo mineralizado, se hace más abundante la presencia de Cpy con una textura aún más aislada y granos más gruesos, disminuyendo considerablemente en intensidad y por lo tanto en ley, se define una ocurrencia de Diseminado Grueso para la Cpy de los bordes y comienza la presencia de vetillas y vetas de este mineral, sin embargo, conforme nos seguimos alejando disminuye la ley y presencia de Cpy por los bordes, y comienza a aumentar la presencia de Py diseminada muy fina, dispuesta intensamente en la masa fundamental de la roca.

Las zonas minerales y texturales definidas para el cuerpo mineralizado son 4 y se definen de la siguiente forma:

1. Núcleo de Bn con ocurrencia en MF.
2. Zona Bn-Cpy con ocurrencia DF y DG.
3. Zona de Cpy con ocurrencia DG, y textura más aislada.
4. Zona exterior de Cpy-Py con pirita diseminada muy fina en la MF.

En la figura 6.56 se presenta el cuerpo mineralizado y los sondeos involucrados en la caracterización geológica, estos sondeos están ilustrando las fases minerales presentes, de color morado se representa el núcleo de Bornita, en color rosado zona de interacción Bn-Cpy, de color amarillo la zona de Cpy, de color verde zonificación Cpy-Py y de color celeste las zonas exteriores donde predomina la presencia de Py (figura 6.74-b).

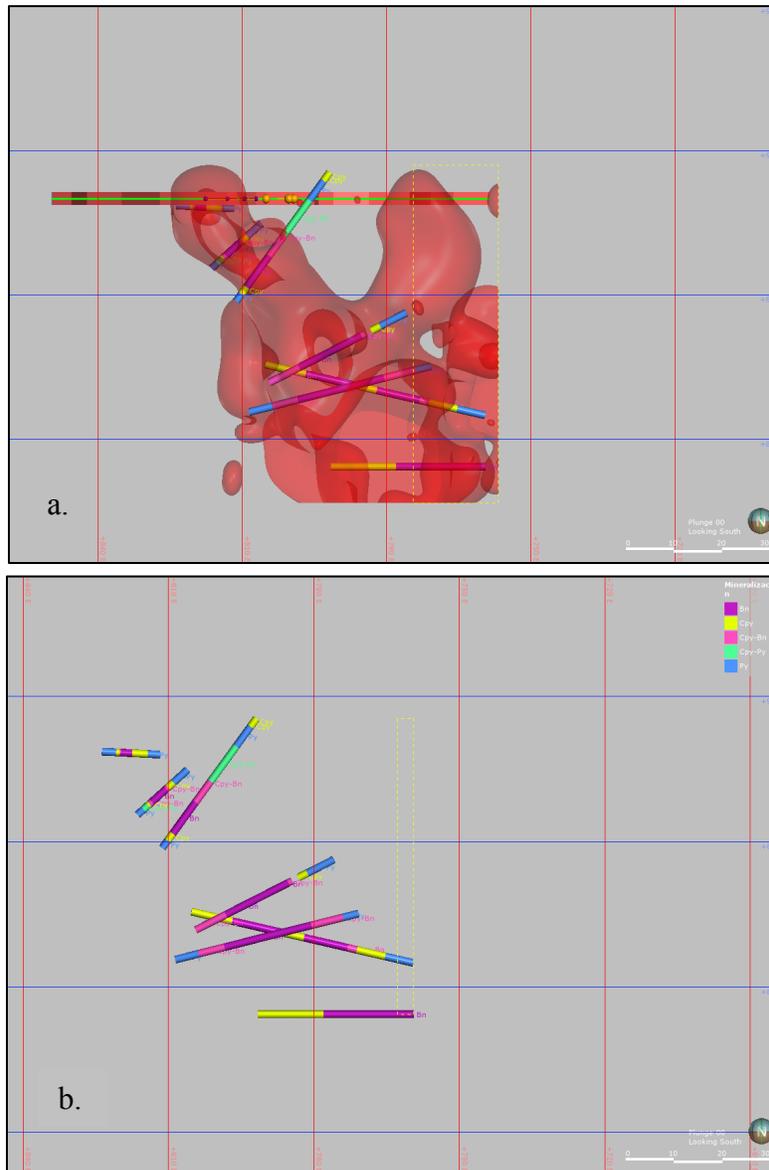


FIGURA 6.74: ZONAS MINERALES DEFINIDAS PARA LOS CUERPOS MINERALIZADOS DE EL SOLDADO. A: MORFOLOGÍA DEL CUERPO MODELADO. B: SONDAJES INVOLUCRADOS EN LA MODELACIÓN Y DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA, ESTÁN ILUSTRANDO LAS ZONAS MINERALES IDENTIFICADAS, COLOR MORADO NÚCLEO DE BN, COLOR ROSADO ZONA BN-CPY, COLOR AMARILLO ZONA CPY, COLOR VERDE ZONA CPY-PY Y COLOR CELESTE ZONA DE PY.

Se modeló en el software Leapfrog, mediante modelamiento implícito, las principales zonas mineralizadas del cuerpo estudiado, estas corresponden al núcleo de Bn (color rosado) y a la zona de interacción Bn-Cpy (celeste), como se ilustra en la figura 6.75.

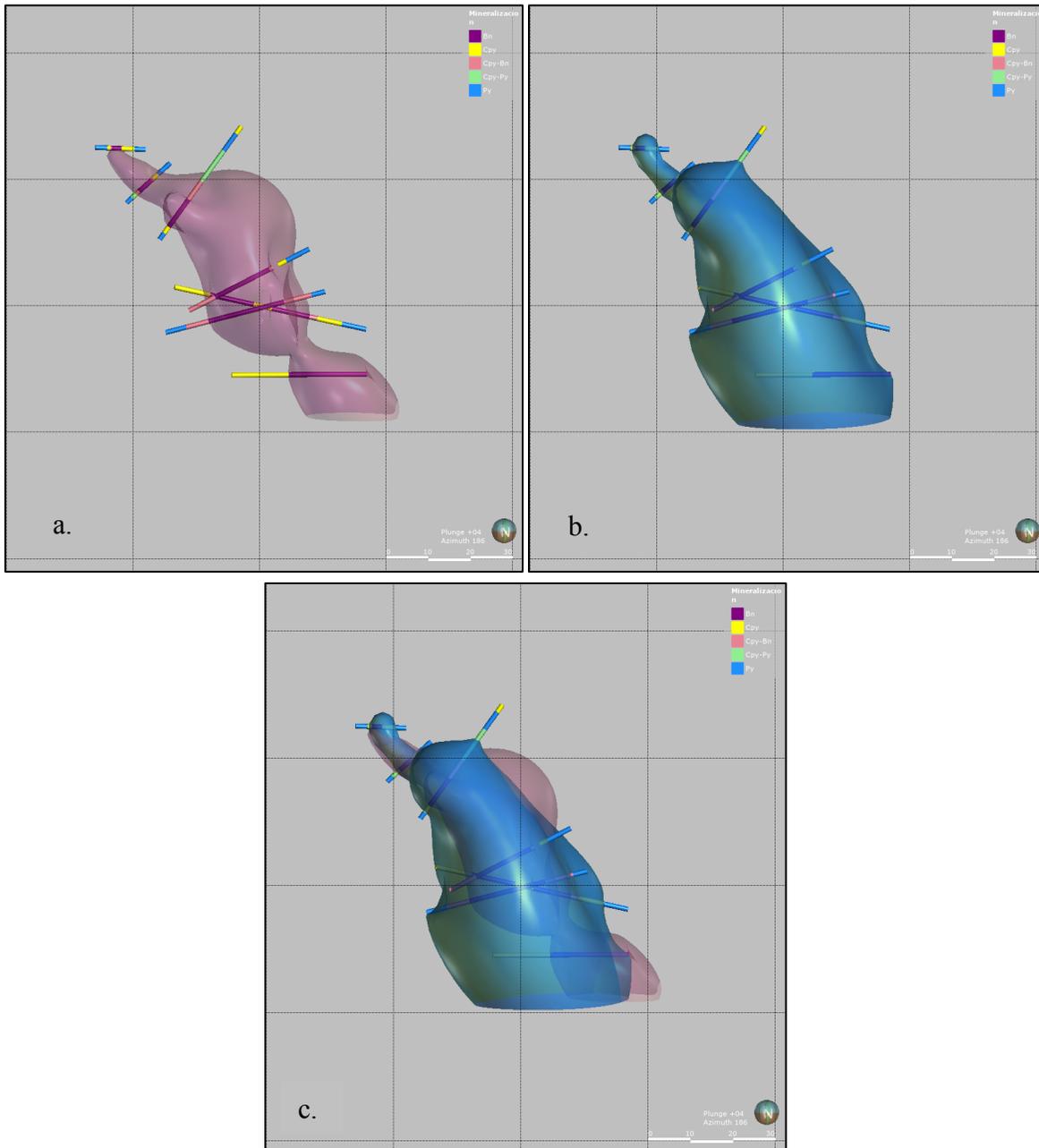


FIGURA 6.75: MODELACIÓN DE LAS ZONAS MINERALES EN EL CUERPO MINERALIZADO ESTUDIADO. A: NÚCLEO DE BORNITA, EN COLOR ROSADO. B: ZONA EXTERNA CON PRESENCIA DE BN-CPY Y AUMENTO DE CPY HACIA EL EXTERIOR. C: SUPERPOSICION CONCENTRICA D ELAS ZONAS MINERALES QUE FORMAN LOS NÚCLEOS MINERALIZADOS EN EL SOLDADO.

6.7.5 CONCILIACIÓN MODELO LARGO Y CORTO PLAZO

Una parte importante de los modelos numéricos, en este caso geometalúrgicos, es saber si existe relación entre ellos y conversan de forma amigable, en el caso de la mina, los modelos de recuperación de Corto y Largo Plazo están enfocados a etapas distintas del proceso minero, sin embargo, es crucial que ellos conversen entre sí, la mina da cuenta de una buena conciliación numérica entre ambos modelos. De igual forma se quiso ahondar más en este tema. El estudio del cuerpo mineralizado comenzó desde la premisa que, las muestras del modelo de Recuperación del Corto Plazo presentan continuidad espacial, estudiándose las muestras de 8 disparos (representados como polígonos de extracción), como se puede observar en la figura 6.76. Los disparos involucrados son:

- | | |
|---|---|
| 1. Disparo 816 del banco 905, Fase 3 Sur | 5. Disparo 613 del banco 890, Fase 3 Sur |
| 2. Disparo 817 del banco 905, Fase 3 Sur | 6. Disparo 817 del banco 875, Fase 3 Sur |
| 3. Disparo 610 del banco 890, Fase 3 Sur | 7. Disparo 602 del banco 845, Fase 3 Sur |
| 4. Disparo 611 del banco 890, Fase 3 Sur | 8. Disparo 811 del banco 890, Fase 3 Sur |

Las 15 muestras de recuperación realizadas, enfocadas a representar el modelo de Largo plazo, permitieron realizar una conciliación entre ambos modelos. Comparando estas 15 muestras geometalúrgicas de recuperación con las 5 muestras del Corto Plazo que recaen directamente sobre el cuerpo mineralizado estudiado permitiendo definir una conciliación del 97% como se muestra en la tabla 6.31.

TABLA 6.31: TABLA RESUMEN DE LA CONCILIACION ENTRE LAS MUESTRAS DEL CORTO Y LARGO PLAZO.

| | ID LP | Recuperación | ID CP | Recuperación |
|---------------------|--------|--------------|---------------|--------------|
| 1 | MET-1 | 73.4 | F3-0890-610-S | 64.82 |
| 2 | MET-2 | 65.9 | F3-0845-602-S | 65.59 |
| 3 | MET-3 | 68.2 | F3-0845-811-S | 68.47 |
| 4 | MET-4 | 74.5 | F3-0875-817-S | 75.41 |
| 5 | MET-5 | 71.8 | F3-0890-813-S | 69.49 |
| 6 | MET-6 | 70.1 | | |
| 7 | MET-7 | 65.6 | | |
| 8 | MET-8 | 65.7 | | |
| 9 | MET-9 | 71.1 | | |
| 10 | MET-10 | 70.0 | | |
| 11 | MET-11 | 74.2 | | |
| 12 | MET-12 | 74.9 | | |
| 13 | MET-13 | 66.4 | | |
| 14 | MET-14 | 75.2 | | |
| 15 | MET-15 | 74.3 | | |
| Promedio | | 70.8 | | 68.8 |
| Conciliación | | 97% | | |

En la figura 6.76 se representa el cuerpo mineralizado estudiado, junto a los disparos involucrados, las muestras de recuperación del Modelo de Corto Plazo y las 15 muestras de recuperación realizadas para caracterizar el cuerpo, que apuntan a robustecer el Modelo de Largo Plazo. En círculos se representan las muestras del CP, y en cilindros las muestras del LP. Los disparos de tronadura están representados por polígonos de color verde y la escala de color de las muestras está dada por, color azul para las muestras con recuperaciones inferiores al 70%, color celeste para recuperaciones entre 70-75%, rosado entre 75-78% y verde para recuperaciones mayores al 78%.

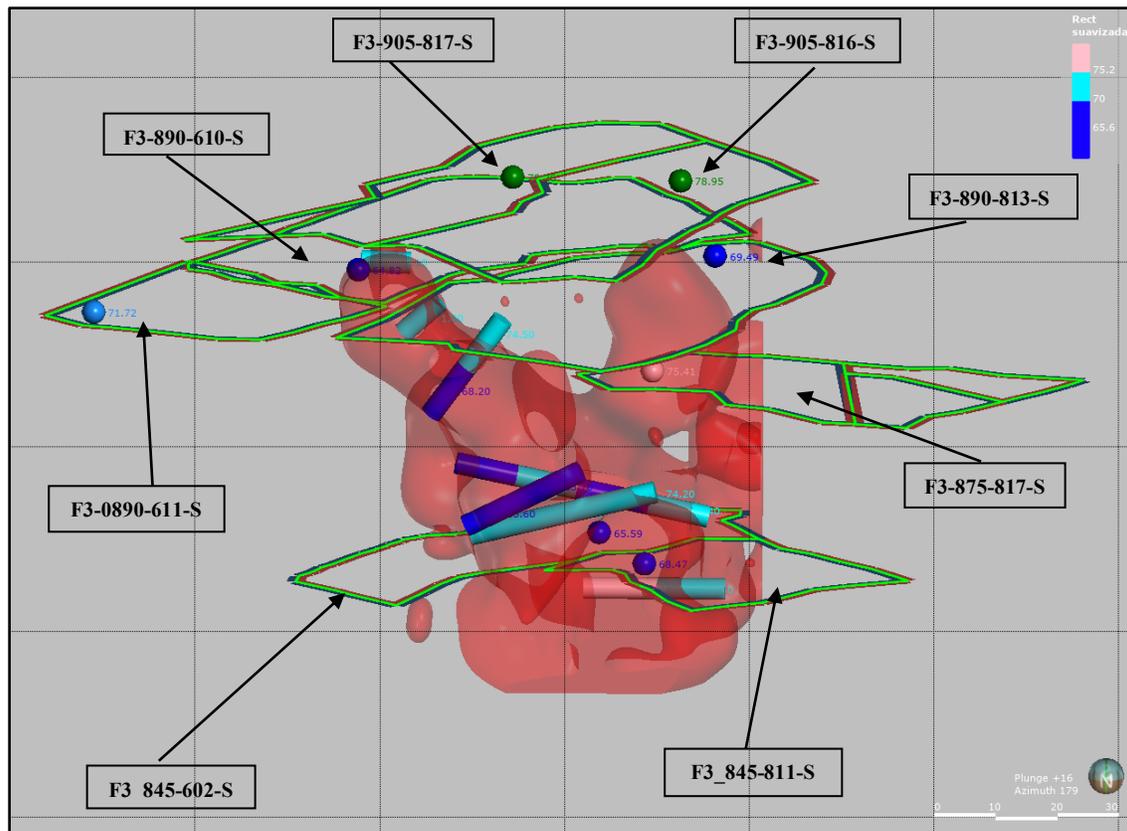


FIGURA 6.76: FIGURA QUE ILUSTR A LA DISPOSICIÓN DEL CUERPO MINERALIZADO ESTUDIADO, ADEMÁS DE LAS MUESTRAS REALIZADAS PARA CARACTERIZARLO Y ROBUSTECER EL MODELO DE LARGO PLAZO, COMO TAMBIÉN LOS DISPAROS INVOLUCRADOS Y LAS RESPECTIVAS MUESTRAS GEOMETALÚRGICAS DE RECUPERACIÓN QUE CARACTERIZAN CADA DISPARO Y ROBUSTECEN EL MODELO DE CORTO PLAZO.

6.8 ARQUETIPO DE RECUPERACIÓN DE COBRE EN BASE A OCURRENCIA Y ZONA MINERAL

La idea de definir arquetipos que determinen y caractericen el comportamiento metalúrgico de un tipo de roca, se basa en la hipótesis de que una roca con características geológicas similares, tanto en litología, zona mineral y disposición del mineral en la roca (lo que involucra textura y ocurrencia) debe tener el mismo comportamiento en el procesamiento mineral independiente del lugar de procedencia dentro de la mina, esto es planteado por Lund, C. 2013, estos arquetipos apuntan a ser unidades de estimación geometalúrgicas, y en este caso, son zonas que determinan un comportamiento similar de la recuperación de cobre.

Dada la variabilidad presente en el yacimiento, tanto en mineralización, unidades litológicas albergantes de esta mineralización, irregularidad de los cuerpos mineralizados, variabilidad en la alteración, y lo acotado que pueden llegar a ser los cuerpos minerales, se inclina a definir estas unidades o arquetipos geometalúrgicos, que además ayudan a definir la continuidad espacial de la recuperación de cobre.

El estudio realizado al cuerpo mineral en la sección anterior ayuda a definir los criterios de los arquetipos en base a la ocurrencia presente en la roca para una zona mineral en específico, donde para el caso de la Andesita Lo Prado, el principal arquetipo definido corresponde a un núcleo formado principalmente por Bn y con una ocurrencia muy fina dispuesta intensamente en la masa fundamental (definida como masa fundamental, MF), arquetipo que determina recuperaciones de cobre entre 65 y 75%, este arquetipo queda definido por las muestras MET-2, MET-3, MET-10 y MET-12.

1. Arquetipo 1, Núcleo de Bornita con ocurrencia MF

La definición de este arquetipo se fundamenta en el análisis de la figura 6.22 y tabla 6.10 con 7 muestras que apoyan el grupo definido como MF en núcleo de Bn. Se profundizó para demostrar con información numérica la premisa que rocas con características similares presentan comportamientos similares en el procesamiento mineral, como se presenta en la tabla 6.32, existen dos muestras, G1362 y G1529, correspondientes a dos núcleos mineralizados distantes entre sí, ambas hospedadas en Andesita Lo Prado y con mineralización de Bn con ocurrencia MF, presentando similitudes en la recuperación de cobre.

TABLA 6.32: RESUMEN DE MUESTRAS QUE RESPALDAN LA DEFINICIÓN DEL ARQUETIPO 1.

| Muestra | G1362 | G1529 | MET-2 | MET-3 | MET-10 | MET-12 |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| Sondaje | S01211 (189-198) | S30412 (147-156) | S11883 (56-68) | SP40684 (42-52) | S6885 (55-65) | S11883 (68-78) |
| Litología | Andesita LP | Andesita LP | Andesita LP | Andesita LP | Andesita LP | Andesita LP |
| Zona Mineral | Núcleo de Bn | Núcleo de Bn | Núcleo de Bn | Núcleo de Bn | Núcleo de Bn | Núcleo de Bn |
| Ocurrencia | MF | MF | MF | MF | MF | MF |
| CUT | 2.98 | 1.8 | - | - | - | - |
| Bn | 3.26 | 1.973 | - | - | - | - |
| Cpy | 1.04 | 1.792 | - | - | - | - |
| Cc | 0.15 | 0.158 | - | - | - | - |
| Factor K | 2 | 8.85 | 4.4 | 7.1 | 3.3 | 3.0 |
| Recuperación de Cu | 67.6 | 67.66 | 65.9 | 68.2 | 70 | 74.9 |

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 DISTRIBUCIÓN Y ESTADÍSTICA

Como es común en los yacimientos de cobre, y en zonas donde se han generado concentraciones anómalas de minerales de interés económico, la concentración de dichos minerales responde a una distribución log normal, asimétrica y con alta frecuencia en valores de baja concentración. Así es el caso de la ley de Cu y fases mineralógicas de mena y ganga en el yacimiento El Soldado, la ley de cobre (CUT) presenta una distribución de probabilidad logarítmica quedando definida por una media de 1.07%, una mediana de 0.83% y la mitad de los datos comprendidos entre 0.54 y 1.35% de Cu y comportándose de la misma forma para cada unidad litológica. El valor definido para identificar valores extremos/outliers recae en 2.565% para la ley de Cu – determinado por un intervalo de confianza del 95% – mostrando que existen leyes considerablemente altas, alcanzando un 6.89% de Cu, y llevándonos a reflexionar si se pueden considerar como valores representativos. La información mineralógica QEMSCAN permite confirmar la representatividad de estos datos, mostrando coherencia entre la mineralogía de mena y los valores altos de leyes químicas (CUT), donde las leyes de Cu sobre un 2.565% son determinadas por valores de Cpy sobre un 5%, Bn sobre un 4% y Cc sobre 1.5%. Las fases mineralógicas de mena sulfurada de cobre también responden a una distribución log normal, asimétrica hacia los valores bajos y con valores extremos – considerados por un intervalo de confianza del 95% – donde para la Cpy este valor recae en 4.19%, para la Bn en un 2.6% y 1.012% en la Cc. Los valores extremos de Cpy se asocian directamente al estilo de mineralización presente, correspondiendo en su mayoría a vetas con bordes rectos y potencia variable entre 1 y 10 cm. Sin embargo, para la Bn y Cc, se reconoce un efecto textural más complejo, si bien se pueden encontrar vetas de Bn, estas son escasas, siendo principalmente Bn-Cc intensamente diseminada en la masa fundamental lo que domina los núcleos mineralizados de alta ley en las rocas volcánicas. La ley de Cu se distribuye de forma distinta en cada litología; presenta los valores más altos en Veta Negra con una media de 1.23%, y los valores más bajos en el Sedimentario de Lo Prado con una media de 0.78%. Asimismo, se distribuyen los minerales de mena, los niveles más altos de Bn y Cc se concentran entre las litologías de Veta Negra y Andesita Lo Prado, con una media de 0.36% de Cc y 0.92% de Bn en VN y 1.08% de Bn y 0.22% Cc en ANDLP. La Cpy se mantiene con los niveles más altos en la Andesita Lo Prado con una media de 1.89%, pero, en Veta Negra cambia, presentando los valores más bajos con una media de 0.96%. El Sedimentario de Lo Prado se mantiene con las concentraciones más bajas de minerales de mena sulfurada de cobre.

La mineralización de Bn controla en su mayoría la Ley de Cu, como se observa en la figura 12.7 presentando un coeficiente de correlación lineal de Pearson de 0.79, muy por

sobre la Cpy y la Cc con coeficientes 0.42 y 0.46 respectivamente (tabla 12.6). Esto permite responder que los valores extremos en la ley de Cu se ven determinados principalmente por valores altos de concentración de Bn.

La recuperación de cobre presenta una distribución de probabilidad normalizada en cada una de las litologías, al igual que cada una de las variables de liberación de partículas y asociaciones minerales, lo que permite correlacionarlas y modelarlas sin transformar su distribución. Los valores extremos de recuperación de cobre recaen por la parte inferior de su distribución, siendo menores a 55.25%, y se correlacionan directamente con los valores altos de Factor K y con la unidad de roca Sedimentaria de Lo Prado.

El Factor K también presenta una distribución log normal, asimétrica hacia los valores bajos, quedando definido por una media de 6.95%, una mediana de 4.70% y la mitad de los valores entre 2.43 y 8.10%. La unidad Sedimentaria de Lo Prado presenta los niveles más altos de Factor K, con una media de 9.7% y un máximo de 82.97%. Se determinó un nivel de influencia de este parámetro sobre la Recuperación de Cu, que recae en 14.4% y contempla el 90% de la información, indicando que por sobre este nivel de cobre soluble la dependencia entre variables se hace lineal (figuras 6.14 y 6.15). La distribución del Factor K varía según las litologías disminuyendo conforme se pasa de sedimentario a roca volcánica, al Sedimentario LP le sigue Veta Negra con una media de 7.75% , pero, con un máximo mucho menor de 16.97%, luego la unidad Andesita LP con una media de 6.48% y un máximo de 50.85%, a esta le sigue la Toba LP con una media de 4.84% y un máximo de 31.08%, finalmente la Riodacita LP presenta los niveles de Factor K más bajos con una media de 4.46%.

Con respecto a los parámetros metalúrgicos, por un lado, el D80 presenta una distribución normal de los datos, centrados en torno a los 195 micrones asociado directamente a la granulometría óptima de molienda de la planta metalúrgica de la mina, presentando una media de 194.94 μm , una mediana de 195 μm y la mitad de la información comprendida entre 191.11 y 199 micrones. Por otro lado, el TMOL (tiempo de molienda) se ve diferenciado por litologías, las unidades sedimentarias son las rocas más blandas, siendo el Sedimentario de Lo Prado y la unidad Veta Negra definidas por medias de 13.20 y 12.24 minutos respectivamente. Las unidades volcánicas presentan mayor dureza, donde la Riodacita Lo Prado alcanza un máximo de 16.38 minutos.

Tal como las fases mineralógicas de mena se distribuyen de forma diferenciada en las distintas litologías, las liberaciones por especie mineral también se diferencian.

7.2 CONTROL LITOLÓGICO

La recuperación de Cu está controlada por las litologías del yacimiento, cada unidad presenta una distribución de probabilidad característica y diferente frente a este parámetro (líneas rectas en figura 6.2). Por un lado, la unidad de Veta Negra presenta las recuperaciones cobre más altas de la mina, quedando determinada por una media de 80.73%, un mínimo de 62% y la mitad de los valores entre 77.6 y 84.68% (tabla 12.5). Por otro lado, las unidades litológicas de la Fm. Lo Prado presentan un comportamiento menor que Veta Negra y difieren entre sí conforme se pasa de rocas volcánicas a piroclásticas y sedimentarias. En primer lugar, la Andesita Lo Prado presenta la más alta recuperación de este grupo, con una media de 79.49%, un mínimo de 59.80% y la mitad de los valores entre 75.81 y 83.35%. La Riodacita Lo Prado presenta una media de 78.59%, un mínimo de recuperación de 38.50% y la mitad de los datos entre 75.90 y 82.15%. La unidad Tobácea de Lo Prado queda determinada por una media de 75.79%, un mínimo de 48.73% y la mitad de los valores entre 70.74 y 81.70%. Finalmente, la unidad Sedimentaria de Lo Prado presenta el más bajo desempeño frente a la recuperación de Cu, este grupo es determinado por una media de 66.82%, un valor mínimo de 12.6% y la mitad de los valores entre 61.15 y 74.35% de recuperación, como se puede observar en las tablas 12.4, 12.1, 12.3 y 12.2 respectivamente.

El Factor K es el responsable de la alta dispersión del Sedimentario LP, la Riodacita LP y la Toba LP, pero no así de la Andesita Lo Prado, en la cual la influencia preponderante es de la concentración de calcosina y la liberación mineral (efecto textural). Al excluir los valores altos de Factor K disminuye la dispersión de la recuperación en estos grupos, como se observa en la figura 6.3 manteniéndose la distribución de probabilidad.

Veta negra presenta alta recuperación de Cu debido a la alta presencia de Cc (media de 0.36%) y a la buena correlación con esta fase mineral (tabla 12.11).

Los ensayos de recuperación sobre el cuerpo mineralizado dan cuenta que las intercalaciones sedimentarias del yacimiento presentan bajas recuperaciones de Cu independiente de la ubicación espacial (tabla 6.16).

7.3 VARIABLES NUMÉRICAS DE INTERÉS Y REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIABLE

La base de datos de la mina El Soldado cuenta con una amplia disponibilidad de variables numéricas que han sido utilizadas en búsqueda de las más influyentes y mejor correlacionadas con la recuperación de cobre, con el objetivo de poder modelar y predecir dicho parámetro. Se ha evidenciado que cada grupo litológico se comporta de forma diferenciada y con ello es controlado por una configuración distinta de variables. Por un lado, las tablas 6.1, 6.3 y 6.5 son matrices de correlación de los parámetros definidos para estimar la recuperación de cobre en las unidades Toba Lo Prado, Riodacita Lo Prado y Andesita Lo Prado respectivamente. Por otro lado, los modelos de regresión lineal multivariante ilustrados en las tablas 6.2, 6.4, 6.6 y figuras 6.5, 6.7 y 6.9 permitieron definir las variables influyentes, a través de iteración y analizando el efecto de cada variable sobre el valor de R^2 y R^2 ajustado.

El modelo de regresión lineal multivariante pone en evidencia que existen variables numéricas que permiten estimar la recuperación de cobre, mostrando un incremento considerable en el valor de R^2 y R^2 ajustado manteniendo P-values inferiores a 0.05 sin mostrar buenos coeficientes de correlación lineal de Pearson, como lo son el Rutilo, Liberación de Cpy y Liberación de Bn para la Unidad Toba Lo Prado. Mineral-Plg, Mineral-Py y TMOL en el caso de la unidad Riodacita Lo Prado. Y Pirita, Clorita, Mineral-Py y Cc Ocluida para el caso de la unidad Andesita Lo Prado.

7.3.1 TOBA LO PRADO

En la unidad litológica Toba Lo Prado predomina el efecto negativo de minerales de alteración como lo es la Limonita mostrando una disminución de -6.5973 puntos de recuperación de cobre por cada punto de aumento de ella, a su vez el mineral de Rutilo provoca una disminución de -11.1289 puntos de recuperación de cobre. Asimismo las asociaciones minerales tienen efectos contrarios, por un lado, la mena asociada al mineral formador de roca Feldespato K y Cuarzo provocan una disminución de -4.6593 y -1.0666 puntos de recuperación de cobre respectivamente, la mena asociada al mineral de Clorita provoca una disminución de -2.375 puntos de recuperación de cobre, siendo atenuados por el efecto positivo del mineral de mena asociado al Rutilo, mostrando un incremento de 11.5497 puntos de recuperación de cobre por cada porcentaje de mineral de mena asociado a él.

El modelo de regresión lineal multivariable permite definir las siguientes variables como las de mayor influencia sobre la Recuperación de Cobre en la Toba Lo Prado, presentando P-Values inferiores a 0.05 para cada una de ellas y entregando un coeficiente de correlación R2 ajustado igual a 0.7386.

- | | |
|-------------------------------|----------------------------|
| 1. Mineralogía de Alteración: | - Mineral-Clorita |
| - Limonitas | - Mineral-Rutilo |
| - Clorita | 3. Análisis de Partículas: |
| - Rutilo | - Liberación de Cpy |
| 2. Asociaciones Minerales: | - Liberación de Bn |
| - Mineral-Qtz | - Liberación Mineral |
| - Mineral-Feld K | |

7.3.2 RIODACITA LO PRADO

En la unidad litológica Riodacita Lo Prado predomina el efecto negativo del Factor K mostrando una disminución de -0.6803 puntos de recuperación de cobre por cada punto de aumento de ella, el cual es atenuado por el efecto positivo de la presencia de Calcopirita mostrando un incremento de 0.7384 puntos de recuperación de cobre. Asimismo, la Liberación Mineral provoca un incremento de 0.3486 puntos de recuperación de cobre.

El modelo de regresión lineal multivariable permite definir las siguientes variables como las de mayor influencia sobre la Recuperación de Cobre en la Toba Lo Prado, presentando P-Values inferiores a 0.05 para cada una de ellas y entregando un coeficiente de correlación R2 ajustado igual a 0.78.

- | | |
|-------------------------------|----------------------------|
| 1. Mineralogía de Mena: | - Mineral-Py |
| - Calcopirita | 4. Análisis de Partículas: |
| 2. Mineralogía de Alteración: | - Liberación Mineral |
| - Sericita | 5. Parámetros Metalúrgico: |
| 3. Asociaciones Minerales: | - Factor K |
| - Mineral-Plg | - TMOL |

7.3.3 ANDESITA LO PRADO

En la unidad litológica Andesita Lo Prado predomina el efecto negativo de minerales de mena solubles medidos a través del parámetro CUS mostrando una disminución de -53.3518 puntos de recuperación de cobre por cada punto de aumento de ella, y por el efecto negativo de los minerales de mena ocluidos en partículas de ganga, siendo el más importante la Calcosina Ocluida disminuyendo en -1.8288 puntos de recuperación de cobre. Por otro lado, el mineral de ganga Pirita afecta negativamente disminuyendo en -1.8153 puntos de recuperación de cobre.

El modelo de regresión lineal multivariable permite definir las siguientes variables como las de mayor influencia sobre la Recuperación de Cobre en la Toba Lo Prado, presentando P-Values inferiores a 0.05 para cada una de ellas y entregando un coeficiente de correlación R2 ajustado igual a 0.80.

- | | |
|----------------------------|-----------------------------|
| 1. Mineralogía de Ganga: | - Cpy Ocluida |
| - Pirita | - Bornita Ocluida |
| 2. Asociaciones Minerales: | - Calcosina Ocluida |
| - Mineral-Py | 4. Parámetros Metalúrgicos: |
| 3. Análisis de Partículas: | - CUS |
| - Liberación de Cc | |

7.4 LIBERACIÓN MINERAL Y EFECTO TEXTURAL EN ANDESITA LO PRADO

La Liberación de los minerales sulfurados de cobre en la unidad litológica Andesita Lo Prado presentan diferencias entre sí, siendo el mineral de Calcosina el mayormente liberado y mineral de Calcopirita el más ocluido y por lo tanto el menos liberado, esta configuración se repite para cada una de las unidades litológicas de la mina. Sin embargo, los niveles de liberación difieren acorde a la textura y ocurrencia de cada una de las zonas mineralizadas.

La Andesita Lo Prado muestra un nivel de influencia de la Liberación Mineral sobre la Recuperación de Cobre determinado por un valor de 70% como límite inferior desde el cual se puede considerar una correlación linealmente dependiente.

Las zonas minerales que conforman los núcleos mineralizados en la Andesita Lo Prado presentan comportamientos diferidos respecto a la Recuperación de Cu. El nivel de cobre recuperado aumenta conforme se pasa de la zona de Bn a la zona de interacción Bn-Cpy y a

la zona de Cpy, debido a la textura (tamaño y nucleación de cristales de mena) generando así un perfil transversal de recuperación de Cu. De forma excepcional, los núcleos mineralizados conformados por Bn-Cc presentan una alta recuperación, caracterizados con una media de 85.35%. La Zona de Bn queda caracterizada por una media de 77.4%, la zona de interacción Bn-Cpy por 79.51% y la zona de Cpy por 81.82% (figura 6.19 y tabla 6.10).

El análisis de ocurrencia y liberación de partículas exhibe cómo las distintas ocurrencias y texturas minerales definen un perfil de liberación en cada zona mineral y se relaciona de forma directa con la Recuperación de Cu. La zona o núcleo de Bn muestra un aumento en la liberación de partículas y en la recuperación de Cu conforme la ocurrencia es más gruesa, cuando aumenta el tamaño de granos minerales, aumentando al pasar de ocurrencia MF (en masa fundamental) a DF (diseminado fino) y a DG (diseminado grueso) (figuras 6.20 y 6.21, tablas 6.11 y 6.12). Asimismo, en la zona de Cpy la liberación y recuperación de Cu aumenta al pasar de ocurrencia diseminado fino y grueso a la presencia de vetillas (figuras 6.22 y 6.23, tablas 6.11 y 6.12). En las zonas de Bn-Cc e interacción Bn-Cpy no se reconoce efecto considerable de la ocurrencia sobre la liberación de partículas y recuperación de Cu (figuras 6.24, 6.25, 6.26 y 6.27 respectivamente).

El mismo perfil transversal de recuperación de Cu se reconoce en el cuerpo mineralizado estudiado, presentando bajas recuperaciones en la zona de Bn con ocurrencia MF y aumentando levemente hacia la zona de Cpy de los extremos.

Se reconoce que las diferencias por zonas minerales y texturales pueden explicar la variabilidad de la recuperación de Cu en el yacimiento, siempre que se asocien a información cuantitativa de tamaño y distribución granulométrica de partículas.

7.5 RECUPERACIÓN DE CU VS FACTOR K

Existe una alta correlación entre el parámetro Factor K la recuperación de Cu, con un coeficiente de correlación lineal de Pearson igual a -0.65 (tabla 6.7 y figura 6.11), lo que indica una relación inversamente proporcional. La correlación más alta se alcanza para los datos sin ajuste de distribución, mostrando que la relación es linealmente dependiente. Esta relación se debe a que los minerales de cobre oxidado decantan junto a la ganga en el proceso de flotación. A diferencia de los sulfuros de cobre, los minerales de cobre soluble (Cu oxidado) son aerofóbicos, evitando adherirse a las burbujas de aire y decantando, lo que provoca que el Cu involucrado en este tipo de minerales se pierda en una razón Factor K:Recuperación de Cu 1:1. Es decir, un Factor K de 10% involucra un 10% de cobre soluble, donde en un caso ideal, si se encuentra totalmente liberado, se pierde la totalmente, decantado hacia el relave, mostrando una relación lineal negativa perfecta, sin embargo, en el caso real, existen interacciones intergranulares provocando que las partículas de interés permanezcan

ocluídas con minerales de ganga y minerales de cobre soluble, generando dos casos que afectan la flotación, por un lado, recuperación de cobre oxidado por arrastre y, por otro lado, pérdida de cobre sulfurado ocluido, tanto en partículas de cobre oxidado como de ganga, este último caso se ve reflejado en la figura 6.12 donde la línea de color rojo refleja el caso ideal cuando se pierde la totalidad del cobre oxidado, y el caso real, donde se recupera menos del cobre sulfurado disponible, poniendo en evidencia la pérdida de sulfuros de cobre por otros parámetros distintos al Factor K, entre ellos las partículas ocluidas por minerales de ganga, los controles geológicos que determinan las liberaciones minerales y/o la presencia de minerales de alteración que perjudican las condiciones físicoquímicas del sistema.

Los valores extremos inferiores en la recuperación de Cu, menores a 45% están determinados por valores altos del Factor K (muestras con alto contenido de cobre oxidado) mayores a 40% (figura 6.12)

El Factor K se correlaciona de forma diferenciada con la Recuperación de Cu dependiendo de la litología involucrada, las unidades de Andesita LP y Veta Negra no muestran correlación con este parámetro, debido a los bajos niveles de cobre soluble – por debajo de 16.97% en Veta Negra – sin embargo, en la Toba LP y Riocacita LP la correlación negativa se mantiene, mostrando coeficientes de correlación iguales a -0.57 y -0.64 respectivamente. Y, en la unidad Sedimentario Lo Prado, la correlación negativa incrementa a un coeficiente de -0.87 (tabla 6.8). En la Andesita LP el comportamiento de esta variable es excepcional, a pesar de alcanzar un valor máximo de 50.85% no se correlaciona de forma lineal con la Recuperación.

7.6 CONTROL ESTRUCTURAL

Las fallas y estructuras principales controlan directamente los cuerpos mineralizados, determinando la dirección de anisotropía de la mena de Cu. The ore clusters (los cuerpos mineralizados) presentan zonaciones minerales determinadas, respondiendo a una simetría concéntrica y mostrando un perfil transversal con un núcleo de Bn-Cc/Bn, pasando a una zona de intercrecimiento Bn-Cpy y terminando por los extremos con una zona de Cpy y abundante pirita por el exterior. La morfología de estos, varía caso a caso y depende directamente del cuerpo en cuestión y del arreglo estructural presente, pudiendo ser simétrico/asimétrico frente a la posición de la falla/estructura (núcleo de Bn-Cc/Bn coincidiendo o no con la falla), o formado en la intersección de diversas estructuras y/o entre dos fallas principales (figura 6.59 caso de estudio).

La extensión de estos cuerpos es limitada, y en casos específicos presentan zonaciones de minerales de alteración como arcillas, limonitas y/o oxidados de Cu. Pero, con una distribución asimétrica y acotada a decenas de metros desde la falla o estructura, sin

continuidad lateral a lo largo de ella. Se reconocieron dos casos específicos, donde minerales de arcilla presentan un perfil simétrico en torno a la estructura, por un lado, un cuerpo mineral definido en la falla San José 16 presenta una zona de influencia de arcillas de 30 m mostrando una disminución lineal desde 0.6 a 0.1% y, por otro lado, un cuerpo ubicado en la falla Isabel 12 presenta también una zona de influencia de arcillas de 30 m, sin embargo, en este caso la disminución es desde 1.3% a 0.6% (figura 6.29).

A pesar de existir cuerpos mineralizados específicos con simetría en la geología, en general no se observa correlación lineal directa entre la distancia a la falla controladora y/o mineralizadora y la recuperación de Cu en el yacimiento El Soldado, debido a la irregularidad en la morfología, distribución de minerales de alteración supérgena y textura; en la figura 6.28 se presenta como varía la recuperación de Cu a lo largo de la zona de influencia de las fallas San José 16 e Isabel 12.

7.7 ANÁLISIS DE PARTÍCULAS Y LIBERACIÓN MINERAL

Existen diferencias en el grado de liberación de partículas por especie mineral sulfurada de cobre, la Cpy presenta los niveles de liberación más bajos, con una media de 43.08% y alcanzando un máximo de liberación de 82.09%, le sigue la Bn con una media de 55.12% y un máximo de 83%, la Cc lidera el grado de liberación de sus partículas alcanzando un máximo del 100% liberadas y queda definida por una media de 60.43% (tabla 6.9 y figura 6.16). La Cv presenta un comportamiento distinto, si bien sus partículas alcanzan a un 100% de liberación, el grupo queda definido por una media de 22.14% incluso menor que la Cpy, esto se debe principalmente a que la Cv ocurre en paragénesis con la Cc. Asimismo el análisis de partículas también indica que la Cpy es la fase de mena sulfurada más ocluida, con una media de 23.61%, le sigue la Bn con una media de 4.69%, y la Cc con 1.08% y la Cv infimamente ocluida en partículas de ganga.

Las diferencias en el nivel de liberación por especie mineral trascienden a las unidades litológicas, manteniéndose la Cv por debajo de la Cpy, Bn y Cc, la figura 6.17 ilustra esta tendencia para la Andesita Lo Prado. Se reconoce una relación inversamente proporcional entre la liberación mineral y el grado de Cpy ocluida, siendo este mineral el que la controla.

Las liberaciones de partículas por especie mineral se diferencian por litología, de esta forma el comportamiento de la liberación mineral frente a la recuperación de cobre es distinto dependiendo de la unidad litológica. La liberación mineral, se correlaciona de mejor forma con la recuperación de Cu sin transformar su distribución, presenta un coeficiente de correlación lineal de Pearson de 0.42, que indica una buena correlación positiva entre estas variables. Las unidades de Veta Negra, Andesita Lo Prado y Riodacita Lo Prado mantienen correlaciones positivas entre estas variables, con coeficientes de correlación 0.65, 0.53 y 0.28

respectivamente. La unidad Sedimentaria Lo Prado, presenta un comportamiento contrario al resto, en este caso la correlación es negativa, indicando que a mayor liberación mineral la recuperación es menor, pero esto se explica por un sesgo debido a la baja cantidad de muestras que definen este grupo litológico. Si bien el parámetro liberación mineral se correlaciona de buena forma con la recuperación de cobre, existe un nivel de influencia de este parámetro, donde las liberaciones inferiores a un 70% no influyen linealmente en la recuperación del cobre, fluctuando de igual forma por sobre el 70% de cobre recuperado, esto indica que hay partículas minerales ocluidas – y en contacto intergranular con fases minerales de ganga – que son recuperadas de igual forma.

El análisis de partículas PMA exhibe información relevante frente a la distribución granulométrica del cobre, minerales de mena, tamaño de partículas y su relación con la recuperación de cobre. El Cu se distribuye en su mayoría en la fase fina <50 μm con concentraciones entre un 54 y un 75%, en menor medida en la fase 50-100 μm con entre 17 y 37%, 100-140 μm entre 5 y 18% y finalmente en la fase >140 μm con concentraciones entre 0 y 8%. La distribución granulométrica del cobre indica diferencias entre las altas recuperaciones, de 80 a 84%, y las bajas recuperaciones, de 75 a 80%, caracterizando a las primeras con una menor concentración de cobre en la fase fina <50 μm , y una mayor concentración de cobre en las fases 50-100 μm , 100-140 μm y >140 μm (figura 6.31 y 6.32). Asimismo, las fases minerales de mena (Cpy, Bn, Cc) también responden a dicha caracterización (figuras 6.33 a 6.38). Las recuperaciones muy bajas (menores a 75%) y muy altas (mayores a 84%) no exhiben diferencias entre sus distribuciones granulométricas (CUT, Cpy, Bn, Cc) lo que implica una diferenciación entre las muy altas y muy bajas recuperaciones a través de la interacción conjunta de liberación mineral, partículas ocluidas, distribución granulométrica y tamaño de partículas.

El tamaño de partículas minerales caracteriza a la recuperación de cobre de la siguiente forma:

1. Recuperación Alta sobre 80%: Partículas de Bn sobre un 12 μm , partículas de Cc sobre los 9 μm .
2. Recuperación Baja por debajo del 80%: Partículas de Bn bajo los 13 μm , partículas de Cc bajo los 10 μm .

TABLA 7.1: TABLA RESUMEN DEL EFECTO DE PARTICULAS SOBRE LA RECUPERACIÓN DE COBRE.

| Tamaño de partículas | | | | |
|-----------------------------|---|--|--|-------------------|
| Variable | <50 µm | 50 – 100 µm | 100-140 µm | >140 µm |
| Cpy | | Tamaño mayor a 20 µm determina las recuperaciones muy altas >84% | | |
| Partículas Ocluidas | | | | |
| Bn | Concentración sobre 13% determina bajas recuperaciones <80% | | Concentraciones sobre 7,5% determina bajas recuperaciones <80% | |

8 DISCUSIONES

Una concepto importante en el yacimiento corresponde a la limitada continuidad espacial de los cuerpos mineralizados y al soporte de las muestras geometalúrgicas; como menciona J. L. Deutsch (2015) las muestras metalúrgicas pueden tener un soporte 1 o 2 órdenes de magnitud superior al de las leyes, lo que se reconoce en El Soldado, por un lado, las muestras tomadas en sondajes diamantina varían entre 9 y 36 m de soporte (asociadas al modelo de Largo Plazo) y, por otro lado, las tomadas en pozos de tronadura, corresponden a un compósito de 3 sondajes de 15 m de soporte – equivalente a la altura de banco, y usado para caracterizar un disparo (una muestra) en el Modelo de Corto Plazo – esta diferencia en soporte involucra, para las muestras de largo plazo, una mezcla de los parámetros geológicos que definen la recuperación de cobre, como se ve evidenciado en las 138 muestras con litología compuesta, las 152 con ocurrencia compuesta y las 185 con alteración compuesta (tablas 2.2, 2.4 y 2.7 respectivamente), dificultando así la caracterización e introduciendo variabilidad en las muestras de ensayo de recuperación de Cu por flotación. A pesar que una gran cantidad de muestras trascienden las características geológicas – tanto litología, fases mineralógicas de mena, ocurrencia y textura – existen muestras con características geológicas bien definidas, las que fueron esenciales para caracterizar y definir grupos de comportamientos metalúrgicos distintos. Dándole énfasis al soporte de las muestras, éste parámetro es determinante para caracterizar una variable geológica específica, al presentar variables geológicas compuestas, el comportamiento de la recuperación de Cu se hace no lineal, dificultando la interpretación y análisis, debido al origen y metalogénesis del yacimiento – emplazado en una secuencia volcanosedimentaria, variando en estratos de potencia desde decenas a centenas de metros y presentando lentes sedimentarios dentro de paquetes volcánicos – provocando interacción de la geología, tanto de la litología, alteración, zona mineral y ocurrencia, sin embargo, sí es posible tomar muestras de forma detallada y que representen un comportamiento metalúrgico específico, lo que permite definir arquetipos litológico-texturales para corroborar las UGM en terreno.

La toma y selección de muestras para ensayo de recuperación por flotación en El Soldado, se ha realizado preferentemente en función de la ley de cobre, buscando sólo tramos mineralizados con buenas leyes en sondajes diamantina y de aire reverso. Debido a los requisitos del ensayo, el soporte mínimo es limitado y definido por el tipo de sondaje. Por lo tanto, es importante seleccionar adecuadamente el tipo de sondaje para la muestra de recuperación, teniéndose 3 categorías principales, sondaje diamantina de dimensión BQ y HQ, y sondajes de aire reverso. Donde el soporte de las muestras en BQ es de 15 m o más para cumplir el peso de muestra, y para la categoría HQ es de 9 m, lo que influye directamente en la variabilidad lateral de los parámetros geológicos que definen la muestra, es decir, al seleccionar el tramo sólo por la ley, no se controlan las demás variables geológicas, reflejado en una gran cantidad de muestras con 2 o más litologías, alteración, ocurrencia y textura

mineral, generando dispersión y mezclando el efecto real de una variable geológica sobre la recuperación de Cu.

La litología se define como el principal control en la Recuperación de cobre en El Soldado ya que ésta define la permeabilidad primaria de la roca frente a la mineralización, y con ello las asociaciones minerales de mena y ganga, las interacciones intergranulares, la ocurrencia y textura de los minerales de mena, por lo tanto, cada unidad litológica define sus propias curvas de ley-recuperación teóricas, y con ello el nivel de recuperación máximo (Cropp, A.F. et al. 2013). Los fluidos hidrotermales circularon por las fracturas y fallas presentes en la roca caja, los cuerpos mineralizados se extienden decenas a centenas de metros alrededor de estas, mineralizando a través de procesos difusivos de alta temperatura en las inmediaciones del núcleo (Zona Bn-Cc/Bn) generando ocurrencia diseminada muy fina intensa en la masa fundamental y con zonaciones de las fases minerales sulfuradas de cobre hacia el exterior – desde núcleos de Bn-Cc y Bornita a Calcopirita-Pirita por los extremos – lo que genera una gradación y zonación tanto del mineral de mena como de la ocurrencia, siendo más gruesa y aislada hacia los bordes, y en algunos casos se presenta con un comportamiento frágil generando vetillas y vetas. Esta zonación se debe a que existen altas tasas de nucleación y alta disponibilidad de Cu en el fluido en las primeras etapas de mineralización, precipitando minerales sulfurados ricos en cobre como Bornita y Calcosina en el núcleo, de esta forma, en las etapas tardías de mineralización, existe menor disponibilidad de Cu y una menor nucleación, precipitando Calcopirita por los bordes de forma más aislada y gruesa, e incluso, debido a la disminución de temperatura del sistema, precipitando en un ambiente frágil formando vetillas.

Se determinó que existen variaciones laterales en la recuperación de cobre de forma transversal producto de los cambios litológicos, texturales y de ocurrencia involucrados dentro de los cuerpos mineralizados. El control litológico es claro y determinante, donde los parámetros intrínsecos de la roca, como lo es la permeabilidad primaria, determinan las interacciones intergranulares entre la mena y la ganga, definiendo los grados de liberación de partículas para las distintas menas (Cropp, A.F. et al. 2013). Asimismo, las zonas minerales y texturas asociadas dentro de una litología específica determinan un comportamiento metalúrgico bien definido frente a la recuperación de Cu lo que fundamenta la idea de definir arquetipos de zonas minerales y texturales para definir unidades de estimación geometalúrgica (Lund, C. et al. 2015). Si bien los cuerpos mineralizados presentan las mismas zonas minerales independiente de la litología, las ocurrencias y texturas son totalmente dependientes de ella, identificándose ocurrencias preferenciales de cada zona mineral conforme a la litología (se desprende de Boric, R. et al. (2002)). Las zonas minerales están directamente asociadas a características texturales, según la litología involucrada, las cuales permiten definir arquetipos mineralógico-texturales.

Se reconocen zonas de recuperación predominante, como lo son las zona superior del rajo, tanto en el norte con la riodacita superior, en la parte central con la mineralización en la

Fm. Veta Negra, y en la parte sur con el sector de Filo, sectores caracterizados con la mayor presencia de Bo-Cc. Por un lado, las buenas recuperaciones de la Fm. Veta Negra están asociadas a la presencia de núcleos de Bn-Cc con ocurrencias gruesas tales como DG y NP, lo que se debe a la alta flotabilidad natural y una alta liberación de partículas de la Cc (figura 6.16). Y, por otro lado, el Sedimentario de la Fm Lo Prado es caracterizado como la unidad con las menores recuperaciones de cobre. Se ha realizado seguimiento a esta unidad con la información numérica disponible, mostrando a la Calcopirita y Factor K como las principales variables codependientes, además de presentar en promedio los TMOL más bajos y los D80 más altos, lo que la hace una roca muy blanda, con tiempos de molienda alrededor de los 13 min (tabla 12.2) muy por debajo de las rocas volcánicas, esto quiere decir que se alcanza la granulometría óptima para la flotación a un menor tiempo de molienda, implicando una menor interacción interpartículas y por lo tanto una menor liberación de las partículas de cobre, en especial Cc, Cv y Bn (tabla 12.2). El hecho de presentar los D80 más altos indica que, a pesar de llegar más rápido a la granulometría necesaria para procesar el material, este queda levemente más grueso y con una distribución granulométrica más gruesa, con mayor porcentaje de partículas ocluidas.

Se determina que la ley de cobre, las fases mieraes de mena y alteración, y cada una de las variables numéricas por sí solas no determinan el comportamiento de la recuperación de Cu, sino, más bien, una combinación lineal y no lineal de ellas afectando a unidades geometalúrgicas dando evidencia del efecto mineralógico y textural. Donde la baja correlación lineal observada par a par, ha llevado a analizar a través de una regresión lineal multivariable el rol de las mineralogías, asociaciones minerales y distribución de partículas respecto de la recuperación de cobre. Para muestras con la misma concentración de especies minerales, la recuperación varía en función de la ocurrencia mineral de los sulfuros, asociaciones minerales y sus relaciones intergranulares con la ganga (textura y ocurrencia).

La presencia de minerales de alteración como limonita, clorita y sericita provocan un efecto negativo en la recuperación de cobre, mostrando codependencia en las unidades litológicas Toba Lo Prado y Riodacita Lo Prado. Por un lado, la distribución de Limonita se restringe a zonas de alta meteorización y oxidación de la roca, por lo general asociada a cavidades y galerías en la mina, y a zonas de fracturas y fallas. La presencia de arcillas es altamente influyente en la recuperación de cobre, actuando de forma negativa, debido a un aumento de la viscosidad y estabilidad de la pulpa en el proceso de flotación, como también, debido a presentar una granulometría muy fina se adhiere como una película ultrafina sobre las partículas liberadas de sulfuro de cobre, disminuyendo la capacidad de estas para flotar y, actúa también absorbiendo agua y reactivos (Cropp, A.F, et al. 2013). Las arcillas se encuentran distribuidas de forma acotada en el yacimiento, asociadas directamente a las grandes estructuras y fallas, no presentan continuidad espacial definida a lo largo de la traza de la falla, y se ha demostrado que en algunas zonas específicas la presencia de ellas forman un perfil transversal de concentración, disminuyendo conforme aumenta la distancia a la

estructura, con un alcance de 30 m, como se puede desprender de la figura 6.29. El efecto de los minerales antes mencionadas es no lineal frente a la recuperación, debido a la dependencia con otras variables, como lo son el grado de disseminación de la mena y las especies sulfuradas de cobre presentes, donde el efecto real de las arcillas-limonitas-clorita actúa de forma multivariable.

El parámetro de liberación mineral definido en este estudio corresponde a una combinación lineal de las liberaciones de partículas de cada una de las fases minerales sulfuradas de cobre presentes, que resume el efecto de cada una de ellas acorde a su presencia en la muestra, ponderándolas según las leyes minerales entregadas por los ensayos QEMSCAN. Este parámetro permite estimar de forma precisa la recuperación de cobre para los casos de liberación mineral sobre un 70%. Se demostró que la liberación mineral y por lo tanto la recuperación de cobre dependen directamente de la ocurrencia y tipo de mena en la roca, por lo tanto, la variación lateral en la ocurrencia incluso dentro de un mismo cuerpo mineralizado, genera perfiles de recuperación distintos conforme se pasa del núcleo hacia los bordes del cuerpo.

Existe una competencia entre los minerales de mena sulfurada dentro de la celda de flotación, el mineral que mayoritariamente aporta a la recuperación de Cu mediante este proceso, es la Bornita, encontrándose mayoritariamente en las unidades litológicas Andesita Lo Prado y Veta Negra (tablas 12.4 y 12.5) mostrando coherencia entre los parámetros geometalúrgicos y de análisis de partículas, considerando que es el mineral que determina en su mayoría la ley de cobre de cada muestra (figura 12.7 y tabla 12.6). Mostrando además que cuando se distribuye considerablemente en las fases granulométricas 50-100 μm y 100-150 μm , para partículas liberadas, en conjunto con un tamaño de partículas mayor a 12 μm , determina recuperaciones de Cu sobre el 90% (figura 6.34 y 6.40). Compitiendo directamente con las partículas de Cpy, que reflejan perfiles de correlación inversa entre el tamaño de partículas (figura 6.39) y la recuperación de Cu, incluso cuando se distribuyen en las fases granulométricas intermedias (50-100 μm y 100-150 μm).

Los modelos de regresión lineal multivariable permiten reconocer que el efecto principal sobre la Andesita Lo Prado corresponde a un parámetro textural asociado a la liberación de Bn y Cc y con ello al nivel de Bn y Cc ocluido. Sin embargo, en la unidad Riodacita Lo Prado el principal efecto corresponde a la mineralogía de mena asociada a la Calcopirita y su proporción con los minerales de cobre soluble (Factor K). Y en la unidad Toba Lo Prado el efecto es asociado principalmente a minerales de alteración y asociaciones minerales con la ganga.

8.1 CARACTERIZACIÓN GEOMETALÚRGICA Y UGM

El yacimiento El Soldado se encuentra emplazado en una secuencia volcano-sedimentaria correspondiente a los miembros superior de la Fm. Lo Prado y la parte inferior de la Fm. Veta Negra, trascendiendo 5 litologías principales, definidas en la sección 3.3.1 de este informe. El primer parámetro que caracteriza geo metalúrgicamente la recuperación de Cu en el yacimiento corresponde a las unidades litológicas involucradas, las cuales presentan distribuciones separables, y cada grupo se define con una media y distribución de probabilidad diferente. Según se recopila en la información bibliográfica, y también como se ha construido con la caracterización geológica realizada en este trabajo, El Soldado está formado por cuerpos mineralizados de mediano y gran tamaño controlados por las estructuras mineralizadoras principales definidas en la tabla 2.8. Los cuerpos mineralizados pueden llegar a ser muy diferentes entre sí, tanto en dimensión, forma, leyes, distribución de la alteración hidrotermal y supérgena, sin embargo, presentan zonas minerales en común, formados por un núcleo de Bn o Bn-Cc y halos de Cpy y Cpy-Py, con límites duros entre la mineralización y la roca caja, pasando rápidamente desde 1% a menos de 0.2% de Cu en un soporte de 2 o 3 metros, donde la Py abunda en las zonas externas de estos cuerpos mineralizados (Boric, et al. 2002). Lo que conlleva a la determinación del segundo parámetro que caracteriza a la recuperación de Cu, corresponde a estas zonas minerales bien definidas, que a su vez presentan una caracterización simétrica en torno a la ocurrencia y textura de las fases minerales de mena, en importante correlación con la litología involucrada. Se ha reconocido que existen texturas y ocurrencias preferentes para cada zona mineral acorde a la litología en que se encuentra, debido principalmente a la reología, permeabilidad primaria y secundaria, y comportamiento de la roca frente al paso de fluidos mineralizadores. Estas características geológicas específicas definen un comportamiento diferenciado en el procesamiento mineral.

El estudio del cuerpo mineralizado, en el capítulo 6.6 permitió definir comportamientos geometalúrgicos específicos de las distintas zonas identificadas, se logró reconocer que la presencia de lentes sedimentarios dentro de las unidades volcánicas perjudican considerablemente la recuperación de cobre, como además, la recuperación de cobre presenta continuidad espacial limitada a la dimensión y continuidad de un mismo cuerpo mineralizado de características geológicas similares, además las zonas minerales que dan forma al cuerpo presentan ocurrencias y texturas definidas que influyen en el grado de recuperación de cobre. Se encontró también que existe un leve incremento en la recuperación hacia las zonas exteriores del cuerpo mineralizado con respecto a su núcleo, a pesar de las fases minerales presentes, esto se debe principalmente a la liberación de las partículas, donde la ocurrencia hacia los bordes es más gruesa y aislada implicando menor cantidad de contactos intergranulares entre la mena y la ganga, viéndose reflejado en una mayor liberación mineral.

Por otro lado, la presencia de fases mineralógicas de mena, como lo es el mineral altamente enriquecido en cobre, Calcosina, determina zonas con buenas recuperaciones debido a la excelente flotabilidad natural que presenta comparado con Bn y Cpy. Sin embargo, no es el mineral que más cobre aporta a la alimentación (bornita) por lo que se debe configurar la adición de aditivos colectores enfocados a flotar los minerales de bornita.

Existen minerales de alteración supérgena y meteorización como lo son las arcillas, limonitas y óxidos de Cu (Factor K) que actúan de forma negativa en la recuperación de cobre, afectando de forma diferenciada a las unidades litológicas.

Finalmente se ha demostrado que la recuperación de cobre presenta continuidad espacial, pero es limitada y acotada a las dimensiones de un cuerpo mineralizado y las características geológicas presentes.

La caracterización geometalúrgica de la recuperación de cobre en el yacimiento El Soldado radica en:

1. Un control litológico
2. Asociado a características geológicas que determinan zonas minerales, de ocurrencia y textura con comportamientos metalúrgicos distintos. Determinando los grados de liberación de partículas.
3. Y minerales de alteración supérgena que influyen negativamente en el mineral recuperado. Presencia de Arcillas, Limonitas y óxidos de Cu (Factor K).
4. Asociaciones minerales específicas entre la mena y ganga.

Las unidades geometalúrgicas de estimación quedan definidas por las litologías y en específico para la Andesita Lo Prado por las zonas mineral y textural (arquetipo 1):

TABLA 8.1: TABLA RESUMEN DE LAS UNIDADES GEOMETALURGICAS DEFINIDAS.

| Unidad de Estimación | Litología | Zona Mineral - Textura | Variables en Codependencia |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|--|
| UGM 1 | Andesita Lo Prado | Nucleo Bn - MF | Límite recuperación en 75% |
| UGM 2 | Andesita Lo Prado | Todas | Pirita Clorita Mineral-Py Liberación de Cc Cpy Ocluida Bn Ocluida Cc Ocluida CUS |
| UGM 3 | Riodacita Lo Prado | Todas | Calcopirita Sericita |

| | | | |
|-------|-----------------------------|-------|--|
| | | | Mineral-Plg Mineral-Py Liberación Mineral Factor K TMOL |
| UGM 4 | Toba Lo Prado | Todas | Limonitas Clorita Rutilo Mineral-Cuarzo Mineral-Feld K Mineral-Clorita Mineral-Rutilo Liberación de Cpy Liberación de Bn Liberación Mineral |
| UGM 5 | Sedimentario Lo Prado | Todas | Cpy Factor K Liberación Cpy Liberación Bn Liberación Cv |
| UGM 6 | Veta Negra | Todas | Cc Liberación Cpy Liberación Bn Liberación Cc Liberación Cv Liberación Mineral Limonitas |
| UGM 7 | Intercalaciones litológicas | Todas | Factor K (nivel de influencia sobre 14.4%) Liberación Mineral (nivel de influencia sobre 70%) Bornita Calcopirita Limonitas Arcillas |

8.2 FORMULACIÓN MODELO GEOMETALÚRGICO PARA LA RECUPERACIÓN DE COBRE

La mina presenta un modelo numérico de recuperación de cobre, el cual estima la variable a través del método de Co-Kriging utilizando las 1460 muestras de recuperación realizadas por ensayos de flotación Rougher, se utilizó co-kriging en vez de kriging ordinario puesto que se tiene dependencia con la razón de solubilidad o Factor K, pudiendo de esta forma mejorar la predicción de valores con alta razón de solubilidad. Con el trabajo desarrollado en esta memoria se encontraron otras variables numéricas que pueden aportar a mejorar la estimación de la recuperación de cobre en el modelo de Largo Plazo, como lo son la presencia de minerales de arcillas y limonitas, y la liberación mineral de las partículas de Cu, pudiendo realizar de la misma forma una modelación a través de co-kriging.

En base a la información recopilada en este trabajo se recomienda una reformulación del modelo numérico de recuperación de cobre, de igual forma a través de co-kriging, utilizando la variable Factor K y Liberación Mineral en codependencia, respetando los niveles de influencia de 14.4% y 70% respectivamente. E incorporando las UGM definidas en la sección anterior. Ello implica el co-kriging estimará la recuperación de Cu en la UGM 1 y 2 con 9 variables codependientes e incluyendo un ponderador que afecta al límite superior de la Rec Cu. La UGM 3 y 4 considerarán 7 y 10 variables codependientes y las UGM 5 y 6 considerarán 5 y 7 variables respectivamente.

El modelo de recuperación de cobre en el Largo Plazo debe ser robustecido con un incremento de muestras de recuperación rougher en sondajes, tomadas en torno a litología, zonas minerales y ley. Y deben estar sincronizadas con el plan minero de explotación de forma de estar incorporadas al modelo antes de la reunión de proyecciones. Se requiere además, un incremento de la información QEMSCAN de mineralogía modal para mejorar las predicciones del modelo. Se debe incorporar el análisis de partículas con énfasis en la distribución granulométrica de los minerales de mena y un modelo de mineralogía.

Las UGM quedan definidas en torno a la geología y pueden ser medidas en terreno de acuerdo a la litología y arquetipo de zonas minerales. Se debe continuar con el muestreo de los pozos de tronadura del Corto Plazo y apoyar la conciliación muestreando la litología y zonas minerales en el frente de extracción e incorporar una muestra extra del pozo de tronadura para medición XRF portátil con pistola y confección de briqueta para microscopio (medición multielemento para conciliación mineralógica de mena y liberación de partículas).

9 CONCLUSIONES

- Este trabajo es un primer esfuerzo por desarrollar un marco de referencia geometalúrgico en El Soldado, unificando la información geológica y siendo fundado en 3 características mineralógicas importantes: la mineralogía modal, asociaciones minerales y liberación de partículas, donde las texturas y ocurrencias pueden ser medidas cuantitativamente por el parámetro de liberación mineral entregado por QEMSCAN.
- La variabilidad de la recuperación en zonas espacialmente cercanas está controlada principalmente por la textura, ocurrencia y asociaciones minerales, definiendo unidades de comportamiento geometalúrgico distinto.
- Del seguimiento de un cuerpo mineralizado específico, correspondiente al puente de roca central de la Fase 3 se concluye que la litología es uno de los controles principales en la recuperación del cobre, donde las intercalaciones sedimentarias dentro de los paquetes estratificados de roca volcánica generan una disminución de esta variable. Asimismo, se determina que los bordes externos de los cuerpos mineralizados presentan mejor recuperación debido a la ocurrencia más gruesa de los sulfuros de cobre que conlleva menos contactos intergranulares entre minerales de mena-ganga.
- El cuerpo mineralizado estudiado responde de forma coherente a los grupos de clasificación geometalúrgica definidos en este trabajo (control litológico y textural) y puede ser usado como guía para análisis y caracterización de otras zonas mineralizadas de la mina.
- Las pruebas de flotación realizadas al cuerpo mineralizado demostraron que, a pesar de ser discordante e irregular presenta zonas minerales y texturales determinadas que definen una continuidad espacial en la recuperación de cobre. Los perfiles transversales del cuerpo mineralizado muestran que la recuperación varía aumentando desde el núcleo hacia los bordes conforme la ocurrencia y textura es más gruesa y aislada.
- La litología es el factor más determinante en la recuperación de cobre para el yacimiento El Soldado, debido principalmente a la permeabilidad primaria, lo que determina texturas y ocurrencias características en cada tipo litológico definiendo el grado de liberación de partículas y con ello la recuperación de cobre.
- Las muestras de recuperación de cobre a través del ensayo de flotación rougher realizadas en sondajes diamantina del yacimiento El Soldado son representativas y permiten estimar con precisión este parámetro.

- La buena conciliación entre la recuperación de Cu entregada por el modelo de Largo Plazo – determinado por las muestras geometalúrgicas de sondajes diamantina – y el modelo de Corto Plazo – definido por las muestras de compósitos de pozos de tronadura – en torno a cuerpos mineralizados específicos, permite concluir que la metodología y caracterización realizada en este trabajo puede ser usada para definir y predecir con exactitud la Recuperación de Cu en otros bancos de la mina.
- La recuperación de Cu en yacimiento el Soldado es controlada por 5 factores principales dentro de cada litología. El primero de ellos y de mayor influencia corresponde al grado de liberación de partículas de cobre sulfurado definiendo el nivel base de partículas a recuperar. El segundo de ellos corresponde al Factor K, que define la cantidad de cobre sulfurado disponible para flotar. Los últimos 3 parámetros corresponden a las asociaciones minerales entre mena y ganga, concentración de minerales de alteración y tamaño de partículas.
- Los resultados encontrados, sobre la interacción de la ley de Cu, mineralogía de mena, mineralogía de alteración, asociaciones minerales, tamaño de partículas indican que estos parámetros por sí solos son insuficientes para predecir el comportamiento de la recuperación de Cu, sin embargo, una combinación lineal multivariable permiten estimar de forma precisa este parámetro.
- El parámetro Factor K afecta disminuyendo la recuperación de Cu, y presenta un límite de influencia determinado por un 14.4% y se puede utilizar como variable codependiente en la modelación de las unidades litológicas Riodacita Lo Prado (UGM 3) y Sedimentario Lo Prado (UGM 5).
- El parámetro de Liberación Mineral tiene una dependencia directa sobre la recuperación de cobre para valores sobre 70% y se puede usar como variable codependiente en la modelación de las unidades litológicas Riodacita Lo Prado (UGM 3), Toba Lo Prado (UGM 4) y Veta Negra (UGM 6).
- La recuperación de cobre en la unidad Andesita Lo Prado es afectada principalmente por la textura y partículas ocluidas de mena (bornita y calcosina).
- La recuperación de cobre en la unidad Riodacita Lo Prado es afectada principalmente por la mena de Calcopirita y su proporción con los minerales de cobre oxidado.

- La recuperación de cobre en la unidad Toba Lo Prado es afectada principalmente por los minerales de alteración como limonita, clorita y las asociaciones minerales entre la mena de cobre y minerales formadores de roca como cuarzo y feldespato potásico.

10 RECOMENDACIONES

- Se propone realizar mediciones de presencia de Arcillas, Limonitas y Clorita en las muestras geometalúrgicas para las campañas tanto del corto como del largo plazo, lo que permitirá robustecer la información disponible de estas variables que se han identificado como perjudiciales para la recuperación del yacimiento.
- Cambiar y redefinir los criterios de selección de muestras geometalúrgicas para la recuperación por flotación, dándole énfasis a los criterios definidos en esta memoria.
- Se recomienda la utilización de las unidades de estimación geometalúrgicas definidas en esta memoria para estimar la recuperación de cobre, usando co-kriging y las variables codependientes recomendadas para cada UGM, siendo las más influyentes en la flotación. Se recomienda además, mapear los sondajes sin información litológica y zonas minerales, con el objetivo de robustecer la población de muestras de cada UGM.
- Se puede seguir utilizando la metodología de este trabajo para definir nuevas zonas minerales e incorporarlas a las UGM ya definidas.
- Se recomienda crear arquetipos lito-texturales para apoyar la identificación en terreno de las UGM definidas en este trabajo.
- Se recomienda utilizar la información numérica de partículas de minerales ocluidos, en los casos donde la recuperación es superior al 70% y las liberaciones por debajo del 70%. Se propone comparar y analizar la información mineralógica de relaves para identificar si hay fases minerales de ganga que se recuperan preferentemente.
- Se recomienda vincular la información litológica y zonas minerales a las información de análisis de partículas PMA con el objetivo de construir un modelo de distribución granulométrica de partículas e incorporarlo a las UGM ya definidas. Como además la realización de un modelo de liberación de partículas, fundamentado con la información de assay (leyes químicas de Cu) junto a la información mineralógica

QEMSCAN y la información geológica descriptiva, que permita definir los niveles de recuperación de Cu.

- Se recomienda construir un modelo de mineralogía de mena, para apoyar las decisiones en planta en torno a la fase mineral de mayor aporte de cobre. Puede ser medida en el corto plazo a través de briquetas para microscopio y medición multielemento con pistola portátil XRF.
- Se recomienda robustecer el modelo de largo plazo incrementando las muestras de recuperación rougher en sondajes diamantina, sincronizando el proceso de muestreo con el plan minero de explotación.
- Se recomienda incrementar la información QEMSCAN de mineralogía modal.
- Para finalizar, se recomienda moler más fino, y evaluar el tiempo de residencia del material, contrastando con el nivel económicamente rentable. La molienda más fina permitirá una mayor liberación de la Bn en las UGM1 y UGM2 provocando un aumento de la recuperación de cobre, como además un mayor grado de liberación de las partículas de Cpy en todo el yacimiento.

11 BIBLIOGRAFÍA

- Bonnici, N., Hunt, J. A., Walters, S. G., & Collett, D. (2008). Relating Textural Attributes to Mineral Processing - Developing a More Effective Approach for the Cadia East Cu-Au Porphyry Deposit. *Ninth International Congress for Applied Mineralogy*, 415-418.
- Boric, R. (2002). The Geology of the El Soldado Manto Type Cu (Ag) Deposit, Central Chile. *Hydrothermal Iron Copper-Gold & Related Deposit: A Global Perspective, Volume 2*, 163-184.
- Boyce, D. (2015). Modelo de Evolución Tectónica y Paleogeográfica del Margen Andino en Chile Central durante el Cretácico Medio - Tardío: El Registro Estructural y Sedimentario en la Formación Las Chilcas. *Memoria para optar al Grado de Magister en Ciencias Mención Geología. Universidad de Chile, Departamento de Geología*.
- Contreras, L. (2015). Caracterización mineralógica del proceso metalúrgico y su impacto en la producción de concentrados de Cu y Mo en CMDIC. *Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología*.
- Cornelius, V., & Bradshaw, D. (2014). Characterizing Flotation Recovery Variability of Copper Ores. *IMPC 2014 - 27th International Mineral Processing Congress*, 43-52.
- Cropp, A. F., Goodall, W. R., & Bradshaw, D. J. (2013). The Influence of Textural Variation and Gangue Mineralogy on Recovery of Copper by Flotation from Porphyry Ore – A Review. *THE SECOND AUSIMM INTERNATIONAL GEOMETALLURGY CONFERENCE. BRISBANE, QLD*.
- Deutsch, J., Palmer, K., Deutsch, C., Szymanski, J., & Etsell, T. (2015). Spatial Modeling of Geometallurgical Properties: Techniques and a Case Study. *Natural Resources Research*.
- Deutsch, J. (2015). Multivariate Spatial Modeling of Metallurgical Rock Properties. *A Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Mining Engineering. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta*.
- Díaz, E. (2017). Modelamiento geometalúrgico del consumo de medios de molienda basados en técnicas de caracterización avanzada. *Memoria para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería, mención metalurgia extractiva. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas*.

- Fontobé, L. (1990). Stratabound Ore Deposits in the Andes: A Review and a Classification According to Their Geotectonic Setting. . *Special Publication No. 8 of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, vol 8. Springer, Berlin, Heidelberg*, 79-110.
- Haldar, S. (2018). Statistical and Geostatistical Applications in Geology. *Mineral Exploration, Chapter 9*, 167-194.
- Holmgren, C. (1987). Antecedentes para un Modelo Genético del Yacimiento El Soldado, V Región de Valparaíso, Chile. *Revista Geológica de Chile No. 30*, 3-18.
- Hunt, J., Berry, R., Bradshaw, D., Triffett, B., & Walters, S. (2014). Development of Recovery Domains: Examples from the Prominent Hill IOCG Deposit, Australia. *Mineral Engineering 64*, 7-14.
- Klohn, E., Holmgren, C., & Ruge, R. (1990). El Soldado, a Stratabound Copper Deposit associated with Alkaline Volcanism in the Chilean Coastal Range. *Stratabound Ore Deposits in the Andes* , 435-448.
- Lund, C. (2013). Mineralogical, Chemical and Textural Characterisation of the Malmberget Iron Ore Deposit for Geometallurgical Model. *Doctoral Thesis. Lulea University of Technology*.
- Lund, C. (2009). Mineralogical, Chemical and Textural Properties of the Malmberget Iron Deposit. *Licentiate Thesis. Lulea University of Technology*.
- Lund, C., & Lamberg, P. L. (2013). Practical Way to Quantify Minerals from Chemical Assays at Malmberget Iron Ore operations - An Important Tool for the Geometallurgical Program. *Mineral Engineering 49*, 7-16.
- Lund, C., Lamberg, P., & Lindberg, T. (2015). Development of a geometallurgical framework to quantify mineral textures for process prediction. *Mineral Engineering*.
- Lund, C., Lamberg, P., & Lindberg, T. (s.f.). A New Method to Quantify Mineral Textures for Geometallurgy.
- Mardones, V. (2018). Generación de estimador del parámetro de conminución SAG Power Index a partir de la mineralogía modal en el yacimiento Los Sulfatos, Región Metropolitana, Chile. *Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología*.
- Tungpalan, K., Wightman, E., & Manlapig, E. (2015). Relating mineralogical and textural characteristics to flotation behaviour. *Mineral Engineering*.

- Zuñiga, G. (2018). Caracterización de la Distribución y Ocurrencia de la Molibdenita y su Influencia en la Recuperación de Molibdeno en el Yacimiento El Teniente. *Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología.*
- Gropper, J. (2011). Franjas Metalogénicas de Edad Jurásica y Cretácica en la Cordillera de la Costa de Chile Central, entre los 32 y los 35 grados de latitud Sur. *Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología.*

ANEXOS

ANEXO A: LIBERACIÓN VS RECUPERACIÓN DE CU EN LITOLOGÍAS

Este anexo tiene como objetivo dar a conocer la relación entre el cobre sulfurado liberado y la recuperación de cobre en las litologías principales, Toba Lo Prado, Riodacita Lo Prado, Andesita Lo Prado y Veta Negra, graficando en contraste con su distribución granulométrica, desde los 50um hasta la granulometría mayor a 140um. Se reconoce correlación lineal cuando el porcentaje de mineral liberado supera el 70%. Las figuras 12.1 a 12.4 muestran lo mencionado.

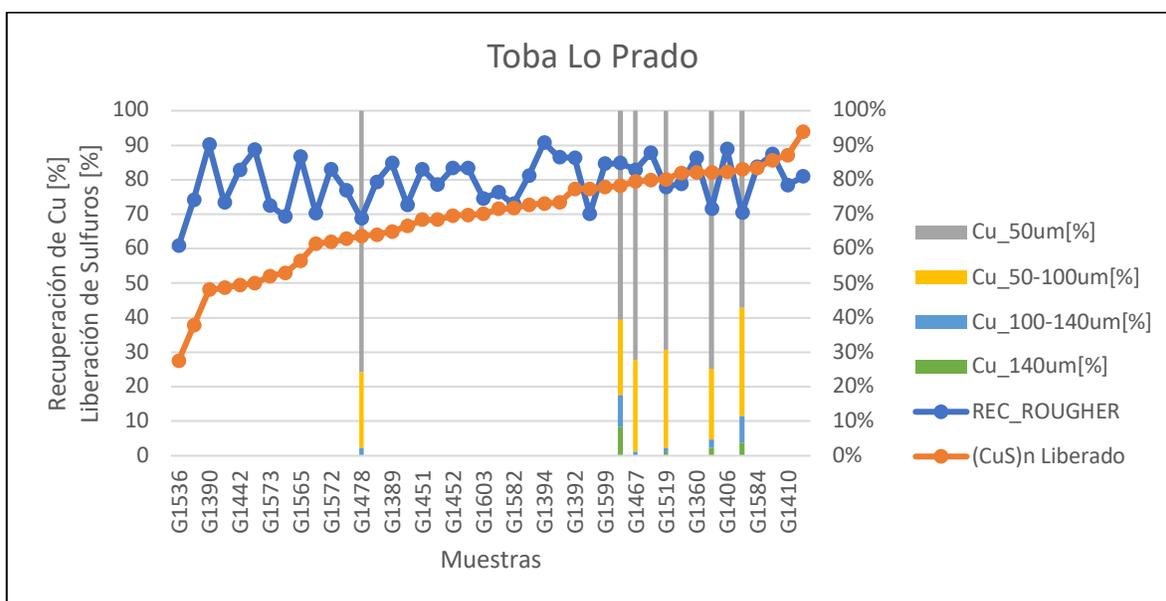


FIGURA 12.1: LIBERACIÓN DE CU SULFURADO GRAFICADO DE FORMA ASCENDENTE, EN COMPARACIÓN CON LA RECUPERACIÓN DE CU PARA LA UNIDAD TOBA LO PRADO.

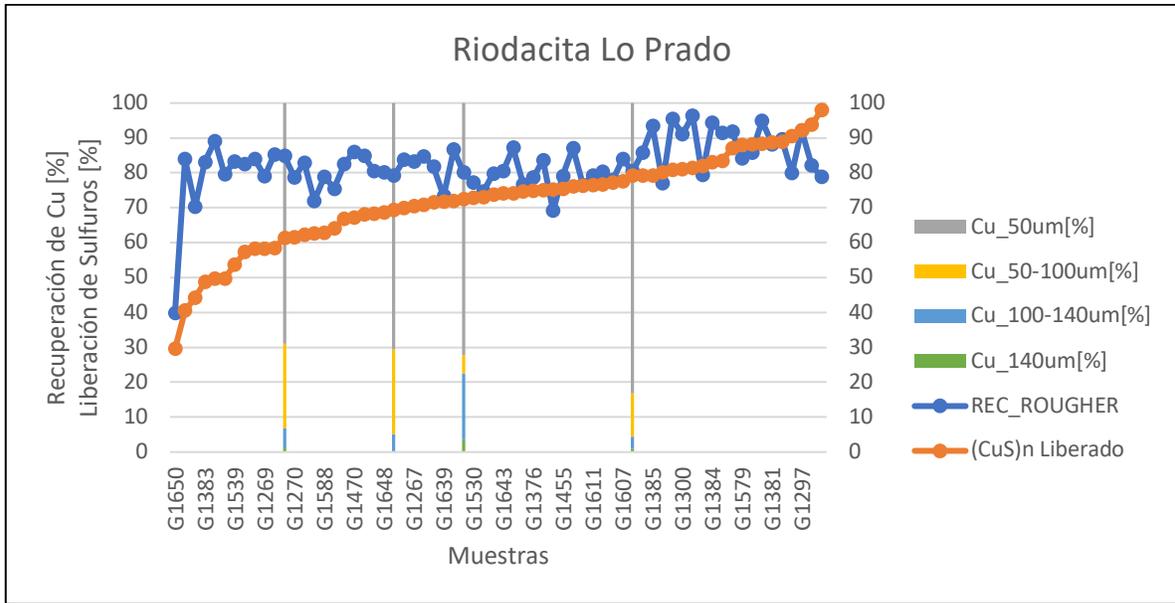


FIGURA 12.2: LIBERACIÓN DE CU SULFURADO GRAFICADO DE FORMA ASCENDENTE, EN COMPARACIÓN CON LA RECUPERACIÓN DE CU PARA LA UNIDAD RIODACITA LO PRADO.

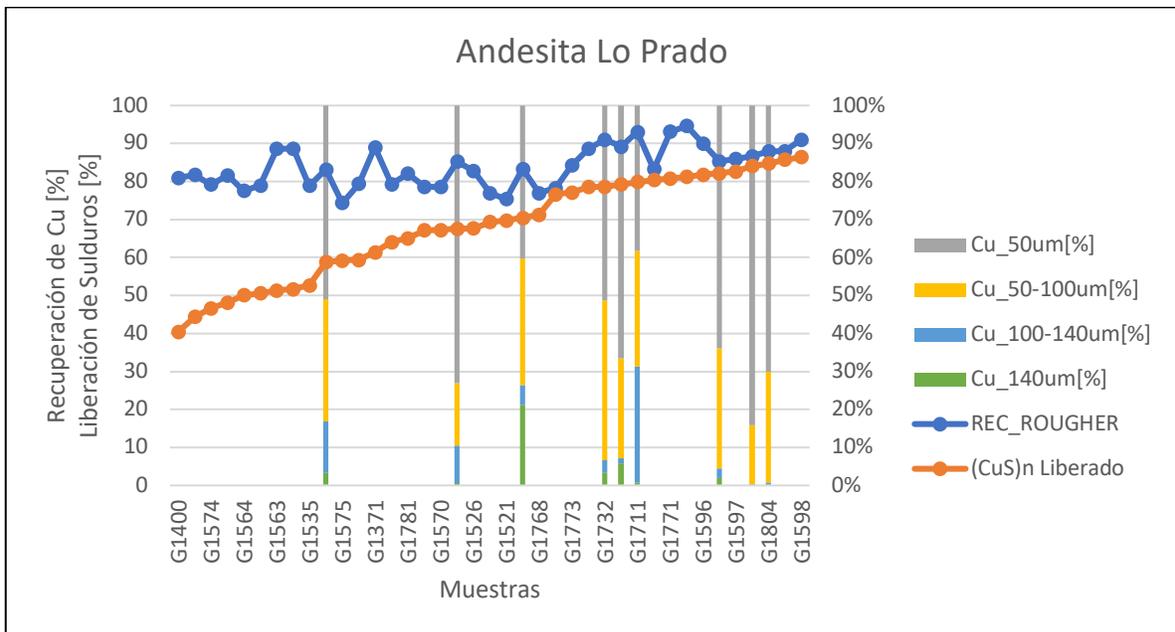


FIGURA 12.3: LIBERACIÓN DE CU SULFURADO GRAFICADO DE FORMA ASCENDENTE, EN COMPARACIÓN CON LA RECUPERACIÓN DE CU PARA LA UNIDAD ANDESITA LO PRADO.

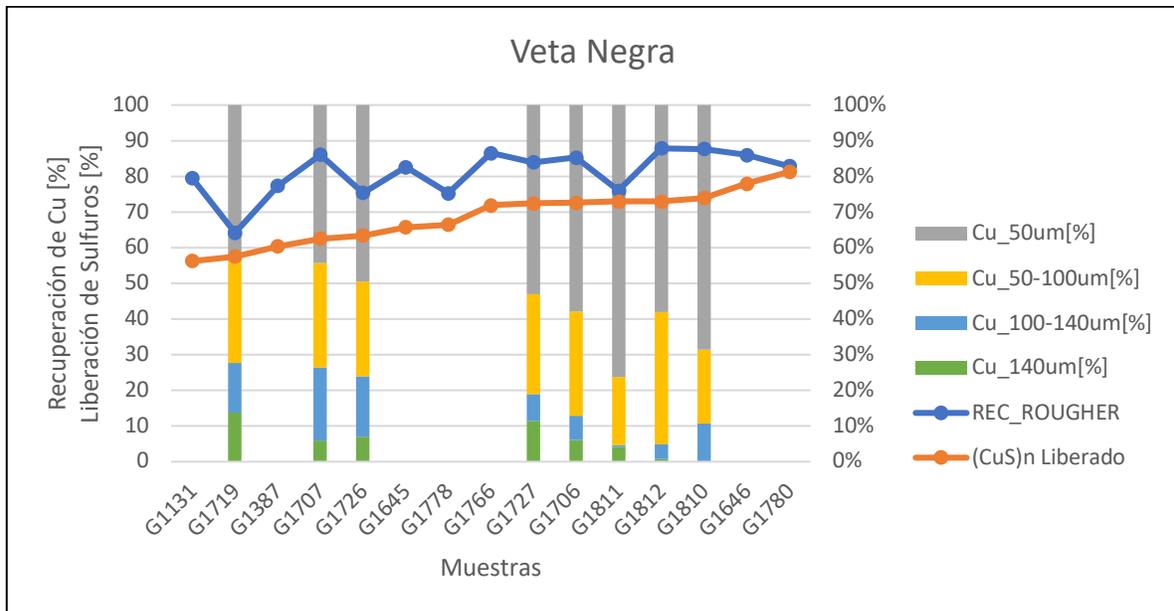


FIGURA 12.4: LIBERACIÓN DE CU SULFURADO GRAFICADO DE FORMA ASCENDENTE, EN COMPARACIÓN CON LA RECUPERACIÓN DE CU PARA LA UNIDAD VETA NEGRA.

ANEXO B: DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CU LIBERADO Y OCLUIDO

Este anexo muestra la relación entre la recuperación de cobre y la masa de partículas de cobre 100% liberadas, información obtenida del análisis de partículas de QEMSCAN en la categoría Liberation and Booking. Permite reconocer como la fase fina del mineral, con granulometría promedio de 25um (rango <50um) muestra una fuerte correlación entre ambas variables, indicando que la recuperación de cobre es directamente proporcional a la masa de partículas totalmente liberadas en esta fase (figura 12.5). Asimismo, la figura 12.6 muestra una correlación inversamente proporcional entre la recuperación de cobre y la masa de las partículas de cobre totalmente ocluidas, en las fases 25um (rango <50um) y 120um (rango 100-140um).

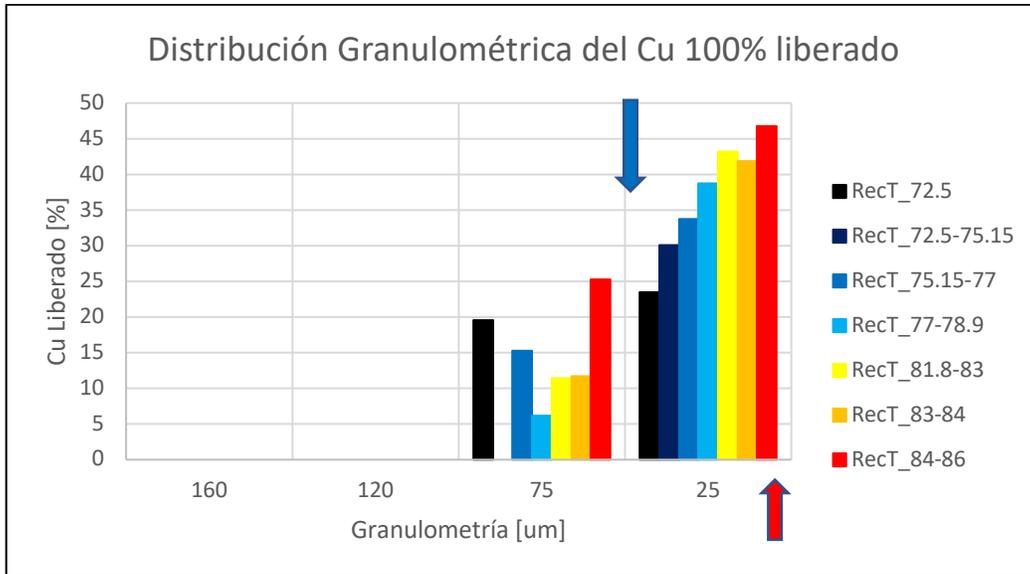


FIGURA 12.1: DISTRIBUCIÓN DEL COBRE LIBERADO EN LAS FASES GRANULOMETRICAS <50UM Y 50-100UM ASOCIADO A UNA RECUPERACIÓN DE COBRE ENTRE 72.5 Y 86%.

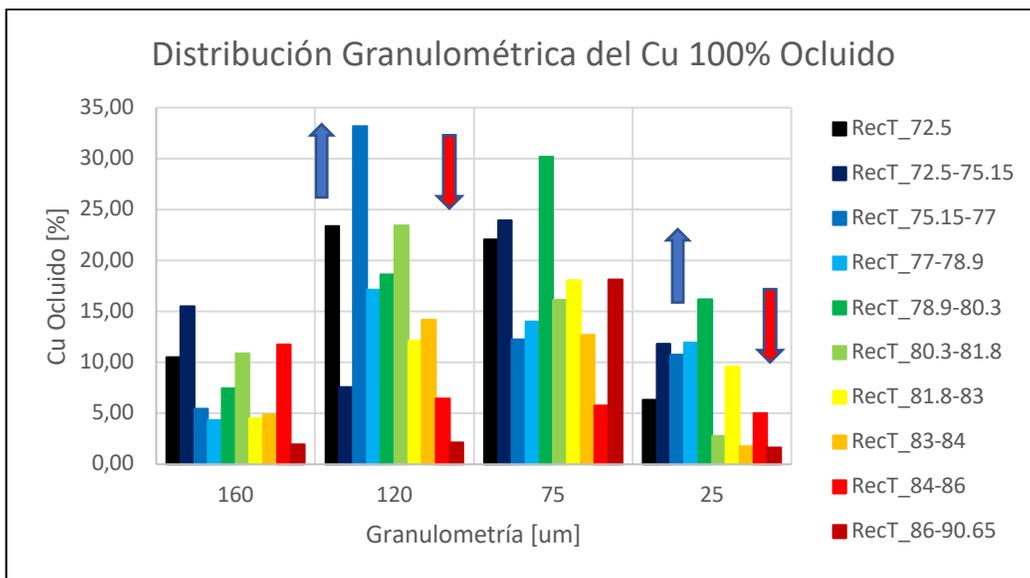


FIGURA 12.2: DISTRIBUCIÓN DEL COBRE OCLUIDO EN LAS FASES GRANULOMETRICAS <50UM, 50-100UM, 100-140UM Y >140UM ASOCIADO A UNA RECUPERACIÓN DE COBRE ENTRE 72.5 Y 90%.

ANEXO C: ESTADÍSTICA BÁSICA DE LAS VARIABLES DE INTERÉS

Este anexo da a conocer la estadística básica de las variables utilizadas en este trabajo, agrupadas según las litologías de yacimiento y principales UGM definidas. Desde las tablas 12.1 a 12.5.

TABLA 12.1: ESTADÍSTICA BÁSICA DE VARIABLES PARA MUESTRAS DE RIODACITA LO PRADO.

| Riodacita Lo Prado | Rec T | Cpy | Bn | Cc | Cv | CUT | FactorK | D80 | TM OL | Lib Cc | Lib Cv | Lib Cpy | Lib Bn | Lib Min | Hmt | Lim | Arc |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|-------|-------|
| Cuenta de Datos | 124 | 80 | 76 | 71 | 44 | 124 | 124 | 112 | 124 | 64 | 43 | 65 | 65 | 65 | 69 | 66 | 66 |
| Valores Nulos | 0 | 44 | 48 | 53 | 80 | 0 | 0 | 12 | 0 | 60 | 81 | 59 | 59 | 59 | 55 | 58 | 58 |
| Mínimo | 38.5 | 0.076 | 0.01 | 0.001 | 0.001 | 0.16 | 0.482 | 190 | 5.9 | 28.27 | 1.786 | 12.03 | 18.92 | 39.09 | 0.001 | 0.01 | 0.034 |
| Máximo | 93 | 10.19 | 3.18 | 1.789 | 0.09 | 4.19 | 56 | 205 | 30.4 | 100 | 100 | 82.09 | 83 | 100.4 | 1.116 | 3.754 | 0.881 |
| Media | 78.58 | 1.55 | 0.61 | 0.19 | 0.01 | 0.99 | 4.46 | 195.5 | 16.38 | 62.49 | 33.51 | 45.39 | 56.75 | 72.93 | 0.16 | 0.80 | 0.20 |
| Mediana | 79.68 | 1.20 | 0.37 | 0.06 | 0.00 | 0.82 | 3.15 | 196 | 15.45 | 63.33 | 33.33 | 44.88 | 59.53 | 75.46 | 0.10 | 0.64 | 0.16 |
| Rango | 54.50 | 10.11 | 3.17 | 1.79 | 0.09 | 4.03 | 55.52 | 15.00 | 24.50 | 71.72 | 98.21 | 70.06 | 64.08 | 61.34 | 1.12 | 3.74 | 0.85 |
| Desv Std | 6.76 | 1.52 | 0.65 | 0.34 | 0.02 | 0.66 | 5.99 | 4.15 | 5.98 | 16.05 | 25.78 | 17.07 | 13.53 | 12.74 | 0.20 | 0.76 | 0.17 |
| Varianza | 45.71 | 2.32 | 0.42 | 0.12 | 0.003 | 0.44 | 35.85 | 17.18 | 35.81 | 257.7 | 664.6 | 291.2 | 183.1 | 162.3 | 0.04 | 0.58 | 0.03 |
| Coef. Variación[%] | 8.60 | 98 | 106.9 | 178.9 | 176.4 | 67.13 | 134.3 | 2.12 | 36.54 | 25.69 | 76.92 | 37.61 | 23.85 | 17.47 | 127.40 | 95.26 | 85.29 |
| Percentil 25 | 75.9 | 0.52 | 0.15 | 0.02 | 0.00 | 0.55 | 2.00 | 191 | 11.05 | 52.19 | 12.50 | 32.48 | 46.92 | 65.95 | 0.01 | 0.25 | 0.08 |
| Percentil 50 | 79.68 | 1.20 | 0.37 | 0.06 | 0.005 | 0.82 | 3.15 | 196 | 15.45 | 63.33 | 33.33 | 44.88 | 59.53 | 75.46 | 0.10 | 0.64 | 0.16 |
| Percentil 75 | 82.15 | 2.00 | 0.90 | 0.18 | 0.01 | 1.26 | 4.66 | 199 | 20 | 72.76 | 45 | 57.73 | 66.85 | 80.9 | 0.24 | 1.01 | 0.24 |

TABLA 12.2: ESTADÍSTICA BÁSICA DE VARIABLES PARA MUESTRAS DE SEDIMENTARIO LO PRADO.

| Sedimentario Lo Prado | RecT | Cpy | Bn | Cc | Cv | CUT | Fact orK | D80 | TM OL | Lib Cc | Lib Cv | Lib Cpy | Lib Bn | Lib Min | Hmt | Lim | Arc |
|-----------------------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|----------|-------|-------|--------|--------|---------|--------|---------|-------|-------|-------|
| Cuenta de Datos | 105 | 86 | 78 | 57 | 17 | 105 | 105 | 71 | 105 | 11 | 9 | 11 | 11 | 11 | 40 | 25 | 11 |
| Valores Nulos | 0 | 19 | 27 | 48 | 88 | 0 | 0 | 34 | 0 | 94 | 96 | 94 | 94 | 94 | 65 | 80 | 94 |
| Mínimo | 12.60 | 0.01 | 0.01 | 0.004 | 0.01 | 0.32 | 1.10 | 180 | 5.00 | 23.56 | 1.79 | 27.49 | 30.67 | 57.74 | 0.003 | 0.01 | 0.13 |
| Máximo | 86.50 | 4.37 | 3.87 | 1.73 | 0.02 | 3.10 | 82.97 | 208 | 23.60 | 65.28 | 50.00 | 65.39 | 68.10 | 83.68 | 0.65 | 3.44 | 0.35 |
| Media | 66.82 | 1.17 | 0.56 | 0.10 | 0.01 | 0.78 | 9.70 | 197.2 | 13.20 | 51.18 | 28.22 | 43.52 | 52.14 | 69.01 | 0.11 | 0.51 | 0.22 |
| Mediana | 68.90 | 1.01 | 0.38 | 0.04 | 0.01 | 0.61 | 5.40 | 198 | 13.10 | 51.08 | 28.57 | 45.21 | 54.95 | 70.12 | 0.10 | 0.02 | 0.18 |
| Rango | 73.90 | 4.36 | 3.86 | 1.73 | 0.01 | 2.78 | 81.87 | 28 | 18.60 | 41.72 | 48.21 | 37.90 | 37.43 | 25.94 | 0.65 | 3.43 | 0.22 |
| Desv Std | 12.00 | 0.91 | 0.68 | 0.24 | 0.004 | 0.48 | 12.99 | 5.55 | 4.65 | 13.51 | 20.85 | 11.16 | 13.75 | 9.03 | 0.12 | 0.80 | 0.07 |
| Varianza | 144.00 | 0.83 | 0.47 | 0.06 | 0.0002 | 0.23 | 168.6 | 30.76 | 21.60 | 182.4 | 434.8 | 124.5 | 189.0 | 81.58 | 0.02 | 0.63 | 0.01 |
| Coef. Variación[%] | 17.96 | 77.53 | 121.6 | 252.9 | 35.40 | 62.10 | 133.9 | 2.81 | 35.20 | 26.40 | 73.89 | 25.64 | 26.37 | 13.09 | 110.2 | 155.9 | 33.87 |
| Percentil 25 | 61.15 | 0.46 | 0.10 | 0.01 | 0.01 | 0.45 | 3.10 | 192 | 9.15 | 40.48 | 8.07 | 34.44 | 38.52 | 59.62 | 0.02 | 0.01 | 0.17 |
| Percentil 50 | 68.90 | 1.01 | 0.38 | 0.04 | 0.01 | 0.61 | 5.40 | 198 | 13.10 | 51.08 | 28.57 | 45.21 | 54.95 | 70.12 | 0.10 | 0.02 | 0.18 |
| Percentil 75 | 74.35 | 1.67 | 0.69 | 0.07 | 0.02 | 0.94 | 10.85 | 200 | 16.65 | 63.10 | 50.00 | 51.47 | 65.21 | 75.15 | 0.17 | 0.84 | 0.29 |

TABLA 12.3: ESTADÍSTICA BÁSICA DE VARIABLES PARA MUESTRAS DE TOBA LO PRADO.

| Toba Lo Prado | Rec T | Cpy | Bn | Cc | Cv | CUT | Fact orK | D80 | TM OL | Lib Cc | Lib Cv | Lib Cpy | Lib Bn | Lib Min | Hmt | Lim | Arc |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|--------|--------|---------|--------|---------|-------|-------|-------|
| Cuenta de Datos | 100 | 75 | 63 | 52 | 32 | 100 | 100 | 89 | 100 | 41 | 26 | 42 | 42 | 42 | 54 | 50 | 42 |
| Valores Nulos | 0 | 25 | 37 | 48 | 68 | 0 | 0 | 11 | 0 | 59 | 74 | 58 | 58 | 58 | 46 | 50 | 58 |
| Mínimo | 48.73 | 0.06 | 0.01 | 0.002 | 0.001 | 0.11 | 0.20 | 190 | 4.30 | 22.85 | 3.13 | 11.58 | 28.07 | 34.27 | 0.001 | 0.01 | 0.04 |
| Máximo | 89.00 | 9.21 | 3.26 | 1.19 | 0.07 | 3.48 | 31.08 | 207 | 30.10 | 90.00 | 100 | 69.17 | 74.17 | 92.82 | 0.66 | 2.63 | 0.65 |
| Media | 75.79 | 1.79 | 0.75 | 0.21 | 0.01 | 1.08 | 4.84 | 195.1 | 13.88 | 56.23 | 28.51 | 35.94 | 50.81 | 68.25 | 0.16 | 0.82 | 0.24 |
| Mediana | 76.39 | 1.41 | 0.66 | 0.06 | 0.004 | 0.90 | 3.54 | 195 | 14.05 | 60 | 25 | 33.57 | 48.39 | 69.93 | 0.09 | 0.74 | 0.22 |
| Rango | 40.27 | 9.15 | 3.25 | 1.18 | 0.07 | 3.37 | 30.88 | 17.00 | 25.80 | 67.15 | 96.88 | 57.59 | 46.10 | 58.55 | 0.66 | 2.62 | 0.61 |
| Desv Std | 7.94 | 1.66 | 0.70 | 0.31 | 0.01 | 0.70 | 4.69 | 4.30 | 5.52 | 16.60 | 21.79 | 15.40 | 12.43 | 13.97 | 0.18 | 0.68 | 0.16 |
| Varianza | 63.10 | 2.76 | 0.50 | 0.10 | 0.002 | 0.48 | 22.03 | 18.50 | 30.47 | 275.4 | 474.7 | 237 | 154.5 | 195.1 | 0.03 | 0.46 | 0.03 |
| Coef. Variación[%] | 10.48 | 92.58 | 93.51 | 148.1 | 151.7 | 64.45 | 96.94 | 2.20 | 39.78 | 29.51 | 76.41 | 42.85 | 24.46 | 20.47 | 110.8 | 82.51 | 68.05 |
| Percentil 25 | 70.74 | 0.71 | 0.22 | 0.02 | 0.002 | 0.57 | 2.23 | 191 | 9.15 | 43.78 | 15.63 | 22.00 | 41.71 | 58.54 | 0.03 | 0.27 | 0.09 |
| Percentil 50 | 76.39 | 1.41 | 0.66 | 0.06 | 0.004 | 0.90 | 3.54 | 195 | 14.05 | 60.00 | 25.00 | 33.57 | 48.39 | 69.93 | 0.09 | 0.74 | 0.22 |
| Percentil 75 | 81.70 | 2.31 | 1.07 | 0.26 | 0.01 | 1.38 | 5.99 | 198 | 16.60 | 69.22 | 34.35 | 48.53 | 61.15 | 79.70 | 0.25 | 1.38 | 0.34 |

TABLA 12.4: ESTADÍSTICA BÁSICA DE VARIABLES PARA MUESTRAS DE ANDESITA LO PRADO.

| Andesita Lo Prado | Rec T | Cpy | Bn | Cc | Cv | CUT | Fact orK | D80 | TM OL | Lib Cc | Lib Cv | Lib Cpy | Lib Bn | Lib Min | Hmt | Lim | Arc |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|----------|-------|-------|--------|--------|---------|--------|---------|-------|-------|-------|
| Cuenta de Datos | 96 | 53 | 49 | 45 | 29 | 96 | 96 | 82 | 96 | 39 | 26 | 39 | 39 | 39 | 40 | 43 | 39 |
| Valores Nulos | 0 | 43 | 47 | 51 | 67 | 0 | 0 | 14 | 0 | 57 | 70 | 57 | 57 | 57 | 56 | 53 | 57 |
| Mínimo | 59.80 | 0.04 | 0.02 | 0.001 | 0.001 | 0.18 | 0.50 | 189 | 5.00 | 48.78 | 11.86 | 20.81 | 38.14 | 41.22 | 0.01 | 0.01 | 0.07 |
| Máximo | 91.30 | 6.05 | 5.63 | 1.16 | 0.04 | 5.07 | 50.85 | 206 | 24.00 | 85.71 | 100 | 70.56 | 82.23 | 95.03 | 1.25 | 8.20 | 1.27 |
| Media | 79.49 | 1.89 | 1.08 | 0.22 | 0.01 | 1.11 | 6.48 | 195.1 | 13.45 | 67.85 | 29.54 | 41.37 | 59.07 | 69.32 | 0.15 | 1.53 | 0.32 |
| Mediana | 80.30 | 1.59 | 0.65 | 0.09 | 0.01 | 0.88 | 5.49 | 194.5 | 13.25 | 70.28 | 25.00 | 39.49 | 57.50 | 68.50 | 0.06 | 0.98 | 0.23 |
| Rango | 31.50 | 6.01 | 5.61 | 1.16 | 0.04 | 4.89 | 50.35 | 17.00 | 19.00 | 36.93 | 88.14 | 49.75 | 44.09 | 53.80 | 1.25 | 8.19 | 1.20 |
| Desv Std | 5.91 | 1.53 | 1.20 | 0.30 | 0.01 | 0.88 | 6.24 | 4.62 | 4.04 | 8.95 | 20.11 | 13.82 | 10.89 | 15.12 | 0.24 | 1.75 | 0.28 |
| Varianza | 34.95 | 2.35 | 1.44 | 0.09 | 0.0001 | 0.77 | 38.95 | 21.32 | 16.36 | 80.05 | 404.5 | 190.9 | 118.6 | 228.7 | 0.06 | 3.06 | 0.08 |
| Coef. Variación[%] | 7.44 | 81.17 | 110.5 | 139.5 | 97.07 | 79.08 | 96.38 | 2.37 | 30.06 | 13.19 | 68.07 | 33.40 | 18.44 | 21.82 | 160.1 | 114.6 | 87.33 |
| Percentil 25 | 75.81 | 0.56 | 0.25 | 0.01 | 0.003 | 0.49 | 2.45 | 190 | 10.50 | 61.85 | 16.75 | 30.64 | 50.43 | 57.22 | 0.02 | 0.39 | 0.15 |
| Percentil 50 | 80.30 | 1.59 | 0.65 | 0.09 | 0.01 | 0.88 | 5.49 | 194.5 | 13.25 | 70.28 | 25.00 | 39.49 | 57.50 | 68.50 | 0.06 | 0.98 | 0.23 |
| Percentil 75 | 83.35 | 2.70 | 1.69 | 0.27 | 0.01 | 1.45 | 7.98 | 200 | 16.00 | 74.41 | 35.03 | 50.62 | 66.19 | 84.51 | 0.17 | 2.12 | 0.38 |

TABLA 12.5: ESTADÍSTICA BÁSICA DE VARIABLES PARA MUESTRAS DE VETA NEGRA.

| Veta Negra | Rec T | Cpy | Bn | Cc | Cv | CUT | Fact orK | D80 | TM OL | Lib Cc | Lib Cv | Lib Cpy | Lib Bn | Lib Min | Hmt | Lim | Arc |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|-------|-------|
| Cuenta de Datos | 46 | 17 | 17 | 17 | 15 | 46 | 46 | 44 | 46 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 16 | 17 | 15 |
| Valores Nulos | 0 | 29 | 29 | 29 | 31 | 0 | 0 | 2 | 0 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 30 | 29 | 31 |
| Mínimo | 62.00 | 0.02 | 0.30 | 0.03 | 0.002 | 0.30 | 1.82 | 189 | 6.20 | 44.86 | 2.83 | 23.22 | 41.38 | 57.37 | 0.00 | 0.04 | 0.06 |
| Máximo | 90.70 | 4.13 | 2.44 | 1.09 | 0.13 | 3.67 | 16.97 | 204 | 21.70 | 82.35 | 62.50 | 72.80 | 76.04 | 85.97 | 1.48 | 4.36 | 0.85 |
| Media | 80.73 | 0.96 | 0.92 | 0.36 | 0.02 | 1.23 | 7.75 | 195.8 | 12.24 | 62.92 | 28.35 | 39.20 | 56.60 | 72.91 | 0.39 | 1.67 | 0.22 |
| Mediana | 81.00 | 0.28 | 0.81 | 0.25 | 0.01 | 0.85 | 6.92 | 195.5 | 11.85 | 60.87 | 27.78 | 39.16 | 55.67 | 74.29 | 0.26 | 1.49 | 0.19 |
| Rango | 28.70 | 4.11 | 2.14 | 1.05 | 0.13 | 3.37 | 15.15 | 15 | 15.50 | 37.50 | 59.67 | 49.59 | 34.66 | 28.60 | 1.48 | 4.32 | 0.78 |
| Desv Std | 5.52 | 1.30 | 0.62 | 0.33 | 0.03 | 0.92 | 3.74 | 4.52 | 2.96 | 10.86 | 13.54 | 12.31 | 10.87 | 9.51 | 0.41 | 1.01 | 0.18 |
| Varianza | 30.44 | 1.70 | 0.39 | 0.11 | 0.001 | 0.84 | 13.98 | 20.45 | 8.76 | 117.9 | 183.2 | 151.6 | 118.1 | 90.47 | 0.17 | 1.03 | 0.03 |
| Coef. Variación[%] | 6.83 | 136.2 | 67.98 | 92.25 | 162.9 | 74.48 | 48.25 | 2.31 | 24.19 | 17.26 | 47.74 | 31.42 | 19.21 | 13.05 | 103.68 | 60.77 | 82.38 |
| Percentil 25 | 77.60 | 0.19 | 0.40 | 0.10 | 0.003 | 0.55 | 4.73 | 191.2 | 10 | 54.69 | 18.75 | 29.95 | 46.71 | 65.16 | 0.14 | 1.14 | 0.12 |
| Percentil 50 | 81.00 | 0.28 | 0.81 | 0.25 | 0.01 | 0.85 | 6.92 | 195.5 | 11.85 | 60.87 | 27.78 | 39.16 | 55.67 | 74.29 | 0.26 | 1.49 | 0.19 |
| Percentil 75 | 84.68 | 1.52 | 1.17 | 0.68 | 0.03 | 1.52 | 10.68 | 200 | 15.00 | 70.71 | 33.33 | 45.91 | 66.97 | 80.97 | 0.65 | 2.17 | 0.25 |

ANEXO D: RELACIÓN ENTRE LAS FASES DE MENA Y LA LEY DE CU

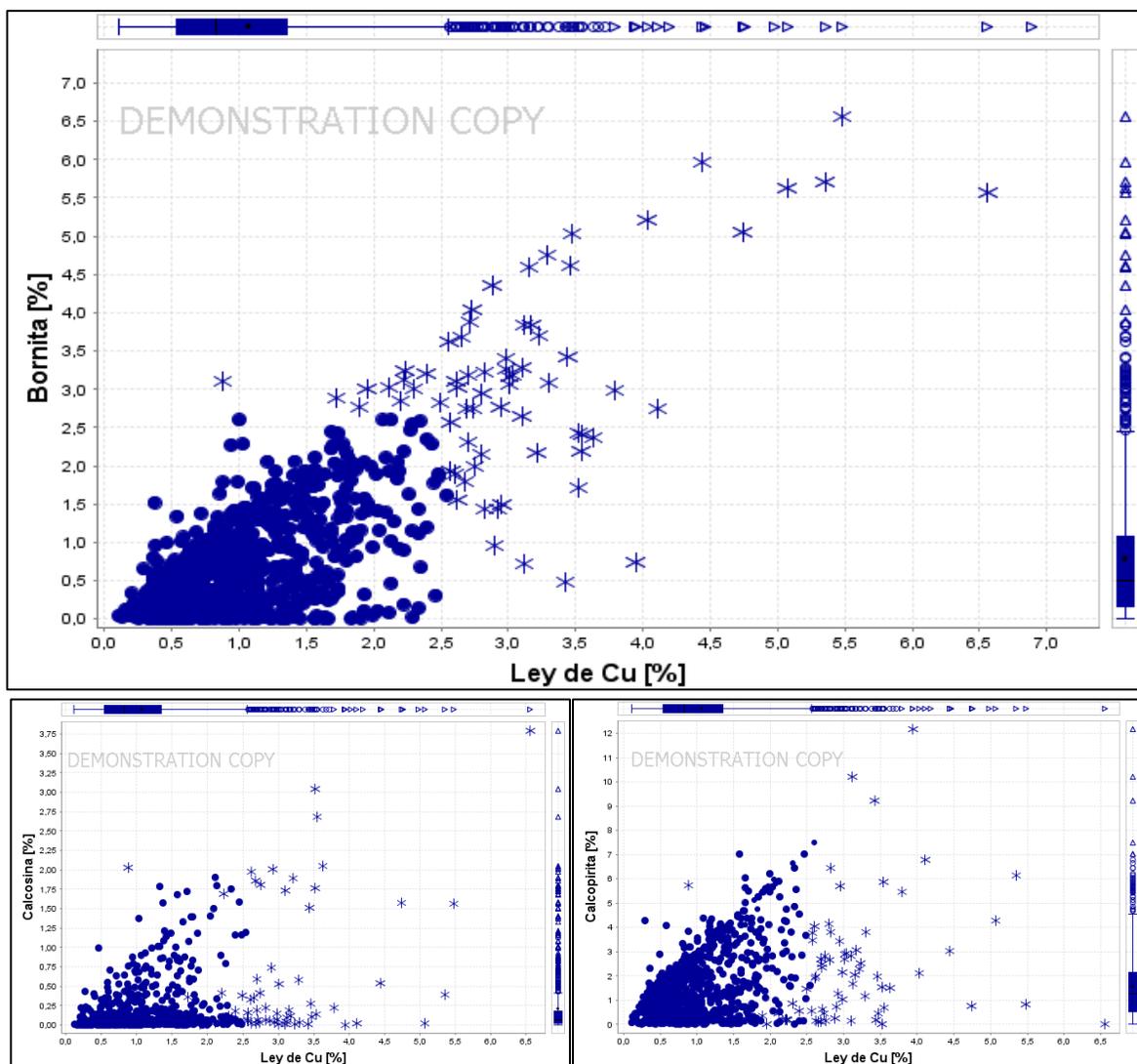


FIGURA 12.3: SCATTER PLOT QUE MUESTRA LA CORRELACIÓN ENTRE LOS SULFUROS DE COBRE PRINCIPALES DE LA MINA Y LA LEY DE COBRE ASOCIADA. SUPERIOR (BORNITA VS LEY DE CU), INFERIOR IZQUIERDO (CALCOSINA VS LEY DE CU), INFERIOR DERECHO (CALCOPIRITA VS LEY DE CU).

TABLA 12.6: MATRIZ DE CORRELACIÓN ENTRE SULFUROS DE COBRE PRINCIPALES Y LEY DE CU.

| | Ley de Cu | Calcopirita | Bornita | Calcosina |
|-------------|-----------|-------------|---------|-----------|
| Ley de Cu | 1 | 0.42 | 0.79 | 0.46 |
| Calcopirita | 0.42 | 1 | -0.044 | -0.21 |
| Bornita | 0.79 | -0.044 | 1 | 0.34 |
| Calcosina | 0.46 | -0.21 | 0.34 | 1 |

ANEXO E: MATRICES DE CORRELACIÓN

Este anexo da a conocer las matrices de correlación de las variables utilizadas en este trabajo, agrupadas según las litologías de yacimiento y principales UGM definidas. Desde las tablas 12.7 a 12.11.

TABLA 12.7: MATRIZ DE CORRELACIÓN DE VARIABLES PARA MUESTRAS DE ANDESITA LO PRADO.

| Andesita Lo Prado (38 datos) | Rec de Cu | Pirita | Rutilo | Silicatos de Cu | Carbonatos de Cu | Cuarzo | Plagioclasa | Feldespato K | Biotita/Flogopita | Piroxeno | Anfibol | Sericita | Clorita | Epidota | Carbonatos | Sulfatos | Apatito | Esfeno |
|------------------------------|-----------|--------|--------|-----------------|------------------|--------|-------------|--------------|-------------------|----------|---------|----------|---------|---------|------------|----------|---------|--------|
| Recuperación de Cu | 1 | 0.056 | 0.360 | 0.450 | 0.370 | 0.190 | 0.190 | 0.230 | 0.010 | 0.150 | 0.120 | 0.220 | 0.240 | 0.150 | 0.110 | 0.087 | 0.230 | 0.003 |
| Pirita | | 1 | -0.05 | 0.130 | 0.290 | 0.061 | 0.043 | 0.120 | 0.093 | 0.021 | 0.067 | 0.110 | 0.120 | 0.051 | 0.130 | 0.600 | 0.002 | 0.150 |
| Rutilo | | | 1 | 0.420 | 0.110 | 0.083 | 0.380 | 0.220 | 0.120 | 0.300 | 0.100 | 0.080 | 0.330 | 0.160 | 0.510 | 0.110 | 0.530 | 0.380 |
| Silicatos de Cu | | | | 1 | 0.090 | 0.160 | 0.130 | 0.085 | 0.035 | 0.091 | 0.200 | 0.170 | 0.250 | 0.160 | 0.330 | 0.130 | 0.024 | 0.046 |
| Carbonatos de Cu | | | | | 1 | 0.280 | 0.130 | 0.025 | 0.170 | 0.160 | 0.075 | 0.190 | 0.043 | 0.094 | 0.160 | 0.370 | 0.290 | 0.040 |
| Cuarzo | | | | | | 1 | 0.110 | 0.090 | 0.110 | 0.310 | 0.450 | 0.160 | 0.460 | 0.180 | 0.170 | 0.008 | 0.082 | 0.630 |
| Plagioclasa | | | | | | | 1 | 0.500 | 0.690 | 0.085 | 0.024 | 0.270 | 0.016 | 0.250 | 0.160 | 0.023 | 0.400 | 0.180 |
| Feldespato K | | | | | | | | 1 | 0.510 | 0.088 | 0.120 | 0.110 | 0.180 | 0.100 | 0.340 | 0.025 | 0.310 | 0.230 |
| Biotita/Flogopita | | | | | | | | | 1 | 0.180 | 0.086 | 0.300 | 0.210 | 0.240 | 0.088 | 0.077 | 0.280 | 0.094 |
| Piroxeno | | | | | | | | | | 1 | 0.750 | 0.450 | 0.670 | 0.080 | 0.390 | 0.230 | 0.035 | 0.058 |
| Anfibol | | | | | | | | | | | 1 | 0.280 | 0.370 | 0.290 | 0.250 | 0.050 | 0.082 | 0.089 |
| Sericita | | | | | | | | | | | | 1 | 0.500 | 0.200 | 0.042 | 0.470 | 0.120 | 0.130 |
| Clorita | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.099 | 0.340 | 0.400 | 0.022 | 0.120 |
| Epidota | | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.160 | 0.110 | 0.230 | 0.160 |
| Carbonatos | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.011 | 0.130 | 0.240 |
| Sulfatos | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.170 | 0.190 |
| Apatito | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.010 |
| Esfeno | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 |

TABLA 12.8: MATRIZ DE CORRELACIÓN DE VARIABLES PARA MUESTRAS DE RIODACITA LO PRADO.

| Riodacita Lo Prado (61 muestras) | Rec de Cu | Pirit a | Rutil o | Silica tos de Cu | Carb onatos de Cu | Cuar zo | Plagi oclasa | Felde spato K | Bioti ta/Flogopita | Pirox eno | Anfi bol | Seric ita | Clori ta | Epid ota | Carb onatos | Sulfa tos | Apat ito | Esfeno |
|----------------------------------|-----------|---------|---------|------------------|-------------------|---------|--------------|---------------|--------------------|-----------|----------|-----------|----------|----------|-------------|-----------|----------|--------|
| Recuperación de Cu | 1 | -0.078 | 0.17 | -0.035 | -0.056 | 0.32 | -0.26 | -0.13 | -0.33 | -0.28 | -0.14 | 0.38 | -0.13 | -0.071 | -0.16 | -0.016 | -0.24 | -0.17 |
| Pirit a | | 1 | -0.07 | -0.18 | -0.074 | -0.19 | 0.14 | 0.0084 | -0.17 | 0.066 | 0.0095 | -0.18 | 0.24 | -0.075 | 0.091 | 0.29 | -0.17 | 0.17 |
| Rutil o | | | 1 | 0.14 | 0.45 | 0.091 | -0.046 | -0.36 | 0.063 | -0.2 | 0.12 | 0.28 | -0.16 | -0.021 | 0.076 | 0.064 | -0.12 | -0.34 |
| Silicatos de Cu | | | | 1 | 0.15 | -0.015 | -0.068 | 0.082 | 0.017 | -0.25 | -0.036 | 0.19 | -0.17 | -0.12 | -0.2 | 0.021 | 0.034 | -0.062 |
| Carbonatos de Cu | | | | | 1 | 0.14 | -0.56 | 0.42 | 0.28 | -0.15 | -0.34 | 0.47 | -0.15 | -0.2 | -0.29 | -0.19 | 0.32 | -0.17 |
| Cuarzo | | | | | | 1 | -0.45 | -0.31 | -0.62 | -0.43 | -0.66 | 0.52 | -0.63 | -0.42 | -0.095 | 0.26 | -0.023 | -0.68 |
| Plagioclasa | | | | | | | 1 | -0.11 | 0.13 | 0.26 | 0.12 | -0.7 | 0.28 | 0.15 | 0.027 | -0.26 | 0.19 | 0.21 |
| Feldespato K | | | | | | | | 1 | 0.38 | -0.13 | -0.23 | -0.31 | -0.15 | -0.17 | -0.49 | -0.31 | 0.33 | 0.21 |
| Biotita/Flogopita | | | | | | | | | 1 | 0.33 | 0.31 | -0.37 | 0.2 | 0.019 | -0.12 | -0.33 | 0.1 | 0.55 |
| Piroxeno | | | | | | | | | | 1 | 0.45 | -0.48 | 0.67 | 0.37 | 0.063 | -0.17 | -0.056 | 0.65 |
| Anfibol | | | | | | | | | | | 1 | -0.19 | 0.76 | 0.73 | 0.39 | 0.098 | -0.28 | 0.57 |
| Sericita | | | | | | | | | | | | 1 | -0.39 | -0.19 | -0.052 | 0.22 | -0.22 | -0.48 |
| Clorita | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.81 | 0.11 | -0.15 | -0.29 | 0.73 |
| Epidota | | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.017 | -0.064 | -0.23 | 0.44 |
| Carbonatos | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.45 | -0.078 | -0.035 |
| Sulfatos | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | -0.11 | -0.26 |
| Apatito | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | -0.065 |
| Esfeno | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 |

TABLA 12.9: MATRIZ DE CORRELACIÓN DE VARIABLES PARA MUESTRAS DE SEDIMENTARIO LO PRADO.

| Sedimentario Lo Prado (7 muestras) | Rec de Cu | Pirita | Rutilo | Silicatos de Cu | Carbonatos de Cu | Cuarzo | Plagioclasa | Feldespato K | Biotita/Flogopita | Piroxeno | Anfibol | Sericita | Clorita | Epidota | Carbonatos | Sulfatos | Apatito | Esfeno |
|------------------------------------|-----------|--------|--------|-----------------|------------------|--------|-------------|--------------|-------------------|----------|---------|----------|---------|---------|------------|----------|---------|--------|
| Recuperación de Cu | 1 | 0.23 | 0.13 | -0.2 | - | -0.61 | -0.26 | -0.52 | -0.18 | 0.53 | 0.78 | -0.38 | 0.017 | 0.64 | 0.42 | -0.25 | -0.46 | 0.55 |
| Pirita | | 1 | 0.012 | -0.73 | - | -0.29 | 0.16 | -0.36 | -0.31 | -0.57 | 0.47 | 0.015 | -0.59 | 0.62 | 0.72 | 1 | -0.59 | 0.041 |
| Rutilo | | | 1 | -0.81 | - | -0.61 | 0.55 | -0.51 | -0.48 | 0.25 | 0.11 | -0.56 | 0.056 | 0.27 | 0.26 | -0.18 | -0.13 | 0.14 |
| Silicatos de Cu | | | | 1 | - | 0.64 | -0.56 | 0.77 | 0.98 | 0.93 | -0.097 | 0.94 | 0.86 | -0.51 | -0.67 | -1 | 0.56 | -0.8 |
| Carbonatos de Cu | | | | | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Cuarzo | | | | | | 1 | -0.34 | 0.98 | 0.63 | 0.2 | -0.66 | 0.84 | 0.63 | -0.78 | -0.84 | 0.066 | 0.76 | -0.71 |
| Plagioclasa | | | | | | | 1 | -0.34 | -0.61 | -0.49 | -0.38 | -0.48 | -0.27 | -0.11 | 0.19 | 0.2 | 0.11 | -0.16 |
| Feldespato K | | | | | | | | 1 | 0.73 | 0.3 | -0.62 | 0.88 | 0.76 | -0.81 | -0.89 | -0.2 | 0.82 | -0.78 |
| Biotita/Flogopita | | | | | | | | | 1 | 0.28 | -0.095 | 0.83 | 0.63 | -0.45 | -0.6 | -0.28 | 0.44 | -0.57 |
| Piroxeno | | | | | | | | | | 1 | 0.043 | 0.18 | 0.75 | -0.14 | -0.46 | -0.57 | 0.31 | 0.0084 |
| Anfibol | | | | | | | | | | | 1 | -0.26 | -0.41 | 0.9 | 0.75 | 0.42 | -0.83 | 0.6 |
| Sericita | | | | | | | | | | | | 1 | 0.61 | -0.48 | -0.59 | 0.18 | 0.51 | -0.77 |
| Clorita | | | | | | | | | | | | | 1 | -0.65 | -0.84 | -0.52 | 0.79 | -0.63 |
| Epidota | | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.93 | 0.64 | -0.96 | 0.7 |
| Carbonatos | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.75 | -0.94 | 0.64 |
| Sulfatos | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | -0.59 | -0.16 |
| Apatito | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | -0.75 |
| Esfeno | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 |

TABLA 12.10: MATRIZ DE CORRELACIÓN DE VARIABLES PARA MUESTRAS DE TOBA LO PRADO.

| Toba Lo Prado (40 muestras) | Rec de Cu | Pirita | Rutilo | Silicatos de Cu | Carbonatos de Cu | Cuarzo | Plagioclasa | Feldespatos K | Biotita/Flogopita | Piroxeno | Anfibol | Sericita | Clorita | Epidota | Carbonatos | Sulfatos | Apatito | Esfeno |
|-----------------------------|-----------|--------|--------|-----------------|------------------|--------|-------------|---------------|-------------------|----------|---------|----------|---------|---------|------------|----------|----------|--------|
| Recuperación de Cu | 1 | 0.15 | -0.03 | -0.41 | -0.16 | -0.13 | 0.14 | -0.16 | -0.54 | 0.096 | -0.053 | -0.19 | 0.17 | -0.16 | 0.14 | 0.26 | -0.3 | 0.12 |
| Pirita | | 1 | -0.1 | -0.36 | -0.18 | -0.16 | -0.15 | 0.011 | -0.24 | -0.043 | -0.033 | 0.07 | 0.066 | -0.12 | 0.19 | 0.81 | -0.045 | 0.14 |
| Rutilo | | | 1 | 0.19 | 0.38 | -0.17 | -0.25 | 0.21 | 0.28 | 0.12 | 0.34 | 0.29 | 0.048 | 0.16 | -0.29 | -0.18 | -0.052 | -0.21 |
| Silicatos de Cu | | | | 1 | 0.29 | 0.033 | -0.2 | 0.19 | 0.48 | 0.0064 | 0.048 | 0.21 | -0.066 | -0.006 | -0.058 | -0.26 | -0.082 | -0.094 |
| Carbonatos de Cu | | | | | 1 | 0.58 | -0.57 | 0.044 | 0.42 | -0.24 | -0.2 | 0.38 | -0.26 | -0.24 | 0.087 | -0.26 | 0.14 | -0.47 |
| Cuarzo | | | | | | 1 | -0.2 | 0.3 | 0.025 | -0.58 | -0.46 | 0.37 | -0.7 | -0.29 | -0.32 | -0.15 | 0.11 | -0.79 |
| Plagioclasa | | | | | | | 1 | -0.59 | -0.35 | 0.31 | 0.13 | -0.84 | 0.17 | 0.37 | 0.039 | -0.26 | 0.3 | 0.29 |
| Feldespatos K | | | | | | | | 1 | 0.31 | -0.56 | -0.32 | 0.66 | -0.48 | -0.26 | -0.14 | 0.062 | -0.14 | -0.41 |
| Biotita/Flogopita | | | | | | | | | 1 | -0.086 | -0.19 | 0.24 | -0.018 | -0.2 | -0.16 | -0.3 | -0.068 | 0.0036 |
| Piroxeno | | | | | | | | | | 1 | 0.59 | -0.57 | 0.74 | 0.25 | -0.11 | -0.22 | 0.012 | 0.56 |
| Anfibol | | | | | | | | | | | 1 | -0.17 | 0.23 | 0.58 | -0.048 | -0.016 | 0.081 | 0.23 |
| Sericita | | | | | | | | | | | | 1 | -0.44 | -0.22 | -0.21 | 0.17 | -0.22 | -0.5 |
| Clorita | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.062 | -0.11 | -0.13 | 8.20E-04 | 0.74 |
| Epidota | | | | | | | | | | | | | | 1 | -0.033 | -0.1 | 0.17 | 0.049 |
| Carbonatos | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.47 | -0.19 | 0.25 |
| Sulfatos | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | -0.12 | -0.017 |
| Apatito | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | -0.07 |
| Esfeno | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 |

TABLA 12.11: MATRIZ DE CORRELACIÓN DE VARIABLES PARA MUESTRAS DE VETA NEGRA.

| Veta Negra (13 datos) | Rec de Cu | Pirit a | Rutil o | Silica tos de Cu | Carb onatos de Cu | Cuar zo | Plagi oclasa | Felde spato K | Bioti ta/Flogopita | Pirox eno | Anfi bol | Seric ita | Clori ta | Epid ota | Carb onatos | Sulfa tos | Apat ito | Ese no |
|-----------------------|-----------|---------|---------|------------------|-------------------|---------|--------------|---------------|--------------------|-----------|----------|-----------|----------|----------|-------------|-----------|----------|--------|
| Recuperaci ón de Cu | 1 | 0.23 | -0.24 | -0.49 | 0.027 | -0.12 | -0.25 | 0.26 | -0.33 | 0.028 | 0.26 | 0.12 | 0.033 | 0.29 | 0.37 | 0.1 | 0.034 | -0.05 |
| Pirit a | | 1 | -0.37 | -0.31 | 0.34 | -0.12 | -0.59 | 0.91 | 0.093 | -0.32 | -0.18 | 0.16 | -0.38 | -0.043 | 0.84 | 0.71 | 0.17 | 0.074 |
| Rutil o | | | 1 | 0.0033 | -0.56 | 0.71 | 0.2 | -0.56 | -0.29 | -0.36 | -0.24 | -0.04 | -0.18 | -0.18 | -0.17 | 0.18 | 0.14 | -0.29 |
| Silicatos de Cu | | | | 1 | -0.051 | -0.026 | 0.36 | 0.046 | 0.72 | -0.092 | -0.53 | -0.4 | -0.011 | -0.45 | -0.36 | -0.12 | -0.48 | -0.029 |
| Carbonatos de Cu | | | | | 1 | -0.64 | 0.56 | 0.3 | -0.1 | -0.33 | 0.12 | 0.43 | -0.67 | -0.19 | -0.31 | 0.49 | -0.55 | -0.57 |
| Cuarzo | | | | | | 1 | 0.052 | -0.28 | -0.18 | -0.46 | -0.32 | 0.067 | -0.68 | -0.23 | 0.079 | 0.57 | -0.27 | -0.61 |
| Plagioclasa | | | | | | | 1 | -0.47 | 0.3 | -0.25 | -0.36 | -0.58 | 0.01 | -0.41 | -0.5 | -0.4 | -0.57 | 0.011 |
| Feldespato K | | | | | | | | 1 | 0.35 | -0.33 | -0.32 | 0.1 | -0.32 | -0.21 | 0.71 | 0.59 | 0.0084 | 0.051 |
| Biotita/Flogopita | | | | | | | | | 1 | -0.18 | -0.6 | -0.67 | -0.015 | -0.3 | -0.12 | 0.022 | -0.56 | 0.29 |
| Piroxeno | | | | | | | | | | 1 | 0.8 | 0.22 | 0.6 | 0.74 | -0.51 | -0.64 | 0.22 | 0.32 |
| Anfibol | | | | | | | | | | | 1 | 0.54 | 0.46 | 0.8 | -0.33 | -0.47 | 0.42 | 0.09 |
| Sericita | | | | | | | | | | | | 1 | -0.093 | 0.23 | 0.11 | 0.13 | 0.49 | -0.48 |
| Clorita | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.45 | -0.41 | -0.83 | 0.47 | 0.72 |
| Epidota | | | | | | | | | | | | | | 1 | -0.26 | -0.35 | 0.29 | 0.26 |
| Carbonatos | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.7 | 0.23 | -0.014 |
| Sulfatos | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | -0.077 | -0.43 |
| Apatito | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.37 |
| Esfeno | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 |