



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

Redefinición de las unidades de modelamiento mineralógico
de la zona de enriquecimiento de Rosario Oeste con foco en
la optimización de procesos Geometalúrgicos, Compañía
Minera Doña Inés de Collahuasi S.C.M., Región de
Tarapacá, Chile

“Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
Título de Geólogo”
Universidad de Atacama

Profesor guía: Dr. Karl Riveros Jensen

Tutor: Josefa Quiroga González

Fabiola Valentina Pastén Andrade

Copiapó, Chile 2024

**Dedicado a mi abuela
Clementina Torres Lazo (Q.E.P.D)**

RESUMEN

La Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi opera dos depósitos minerales: Rosario, de tipo pórfido de cobre, y Rosario Oeste, epitermal de alta sulfuración. Estos yacimientos están situados en el Distrito Minero Collahuasi (21°S, 68°45'W), en la región de Tarapacá, al norte de la franja metalogénica Eoceno-Oligoceno. Hasta ahora, el modelamiento de las zonas minerales se ha basado en una metodología que divide los depósitos en seis macrozonas. Sin embargo, en Rosario Oeste, donde se encuentra una amplia zona de enriquecimiento supérgeno con sulfuros secundarios y primarios de cobre, este enfoque ha demostrado ser insuficiente para abordar la complejidad geológica del área. El objetivo de este estudio es actualizar el modelo geológico de zona mineral, a partir del desarrollo de una nueva metodología que permita modelar con mayor precisión las unidades geológicas de Rosario Oeste, enfocándose en la delimitación de las zonas de enriquecimiento mineralógico. Para ello, se realizó un análisis detallado de la información mineralógica histórica del depósito, seguido de una evaluación de los hallazgos obtenidos en las etapas de campo y de la toma de muestras para análisis de laboratorio. Posteriormente, se recategorizó la información sobre el enriquecimiento supérgeno utilizando la base de datos de extracción parcial (PtXt), generando nuevas zonas mineralógicas. Además, se revisó la base de datos de televiewers (TVW) para redefinir la orientación de la mineralización secundaria en Rosario Oeste. Los resultados de este análisis permitieron segmentar el modelo de mineralización secundaria en unidades de alto, bajo y transicional enriquecimiento, separando el enriquecimiento supérgeno de la mineralización primaria. También se estableció la orientación específica de la mineralización secundaria, contribuyendo a un modelamiento geológico más preciso y disminuyendo la variabilidad. El aporte en la redefinición de estas unidades geológicas en Rosario Oeste proporciona múltiples beneficios. Reduce las incertidumbres mineralógicas asociadas con el modelamiento geológico y la estimación de recursos, facilitando la planificación minera y el procesamiento del mineral. Además, aporta información valiosa para la optimización de los procesos metalúrgicos de recuperación de cobre en la planta, incrementando la eficiencia y rentabilidad de las operaciones. En resumen, este nuevo enfoque mejorará la estimación de recursos y optimizará los procesos mineros y metalúrgicos, fortaleciendo la posición competitiva de Collahuasi frente a futuros desafíos.

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar expresando mi más profundo agradecimiento a mis padres, quienes, desde el primer momento, me han brindado un apoyo incondicional en todos los desafíos que he enfrentado. Gracias por su sabiduría, paciencia y respaldo, elementos fundamentales a lo largo de toda mi vida. No hay palabras suficientes para expresar mi gratitud por darme la oportunidad de llegar hasta aquí. Los amo profundamente. A ti, mamá, por tu constante acompañamiento y por calmarme en los momentos de mayor incertidumbre.

A mi hermana, por estar siempre presente cuando la he necesitado, y a mi cuñado, por todas esas travesuras, enojos y risas que hemos compartido. A mi sobrina bebé, que llegará a alegrar nuestras vidas.

A mi abuela C.T., quien, aunque ya no esté físicamente conmigo, siempre fue mi mayor seguidora. Este logro también es tuyo y te lo dedico con todo mi corazón.

A mis queridas Bruna e Ima, por ser mis fieles compañeras de estudio y trabajo (Geólogas Perrunas).

A J.C., por darme ese último empujoncito cuando más lo necesitaba y por ser incondicional. A V.C., mi amiga del alma, que, desde el extremo sur de Chile, ha estado celebrando mis logros y apoyándome en mis derrotas, siempre con una sonrisa.

A mis amigos, S.Z. y P.M., por su paciencia y por acompañarme durante toda la carrera. Gracias por todas las risas, las rabias y las alegrías compartidas. La amistad que hemos forjado es uno de los mayores tesoros que me llevo de esta etapa.

A mis queridas compañeras de la selección de baloncesto de la UDA, que, a lo largo de estos años, se han convertido en parte fundamental de mi día a día, logrando juntos triunfos históricos para nuestra universidad. También, a UDA Deportes, por confiar en mí y por reconocer mi constante pasión por representar a la institución de la mejor forma posible.

A mi profesor guía, Dr. Karl Riveros, por su apoyo y orientación a lo largo de la realización de esta memoria. También, agradezco a todos los profesores del Departamento de Geología, por los conocimientos que me han transmitido a lo largo de mi carrera.

Mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron al desarrollo de esta memoria. A la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi S.C.M., por brindarme la oportunidad de realizar mi práctica y memoria de título en una compañía minera de clase mundial. A los geólogos Alejandro Sanhueza y Reycardo Orbezo, por su apoyo, conocimientos, paciencia y buena onda a lo largo de este proceso. A Felipe Ibarra, por su disposición para aportar y por estar siempre dispuesto a ayudarme en todo lo he necesitado en este último tiempo. Especialmente, quiero agradecer a mi tutora, Josefa Quiroga, quien desde el primer día confió en mí y en mis capacidades, guiándome con generosidad y compromiso. Gracias por siempre estar disponible para ayudarme.

A mi querido equipo de Geoblast, muestrera Pozo Almonte, por la maravillosa experiencia que compartimos durante el desarrollo de esta memoria. Gracias por el apoyo constante y por siempre confiar en mí. Por último, una mención especial para el área de modelamiento y estimación de recursos de Geoblast, de la cual actualmente soy parte. Agradezco todo lo que me enseñan día a día, sus consejos, la disposición para escucharme y el tiempo que me han dedicado para ayudarme a crecer profesionalmente.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 GENERALIDADES.....	11
1.2 PROBLEMÁTICA.....	12
1.3 HIPÓTESIS	13
1.4 OBJETIVOS	13
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	13
1.4.2 <i>Objetivo Específicos</i>	14
1.6 ÁREA DE ESTUDIO.....	14
1.7 TRABAJOS ANTERIORES	16
CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL Y TECTÓNICO.....	19
2.1 EVOLUCIÓN TECTÓNICA PALEOZOICO-NEÓGENO DEL SEGMENTO 19°-26° LATITUD SUR	19
2.2 GEOLOGÍA DEL DISTRITO COLLAHUASI	23
2.2.1 <i>Generalidades</i>	23
2.2.2 <i>Rocas Estratificadas</i>	26
2.2.3 ROCAS INTRUSIVAS	33
2.2.4 ESTRUCTURAS TECTÓNICAS.....	33
2.2.5 GEOLOGÍA ECONÓMICA	36
CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO ROSARIO OESTE.....	38
3.1 GENERALIDADES.....	38
3.2 LITOLOGÍA	38
3.2.1 <i>Rocas Estratificadas</i>	38
3.2.2 <i>Rocas Intrusivas</i>	41
3.3 ESTRUCTURAS ROSARIO OESTE	41
3.4 ALTERACIÓN HIDROTERMAL.....	44
3.4.1 <i>Alteración propilítica</i>	44
3.4.2 <i>Alteración argílica</i>	44
3.4.3 <i>Alteración supérgena</i>	45
3.5 MINERALIZACIÓN.....	45
3.5.1 <i>Sulfuros</i>	45
3.5.2 <i>Óxidos</i>	45
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	47
4.1 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN HISTÓRICA	47
4.1.1 <i>Análisis mineralógico en información histórica de mapeo en Rosario Oeste</i>	48
4.1.2 <i>Análisis mineralógico de datos históricos QEMSCAN en Rosario Oeste</i>	48
4.1.3 <i>Análisis mineralógico de resultados históricos de extracción parcial en Rosario Oeste</i>	49

4.2 ANÁLISIS DE HALLAZGOS.....	49
4.2.1 <i>Análisis de hallazgos mineralógicos en información histórica de Rosario Oeste</i>	50
4.2.2 <i>Hallazgos en el mapeo y muestreo de sondajes en Rosario Oeste</i>	50
4.2.3 <i>Comprobación de hallazgos mineralógicos en resultados calcográficos de laboratorio</i>	50
4.2.4 <i>Hallazgos estructurales en el análisis de datos televiewers históricos de Rosario Oeste</i>	50
4.3 REDEFINICIÓN DE UNIDADES DE MODELAMIENTO DE LA ZONA DE ENRIQUECIMIENTO DE ROSARIO OESTE.....	51
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....	52
5.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE INFORMACIÓN HISTÓRICA	52
5.1.1 <i>Resultados del análisis mineralógico en información histórica de mapeo en Rosario Oeste</i>	52
5.1.2 <i>Resultados del análisis mineralógico de datos históricos QEMSCAN en Rosario Oeste</i>	54
5.1.3 <i>Resultados del análisis mineralógico de datos históricos de extracción parcial en Rosario Oeste</i>	58
5.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE HALLAZGOS	61
5.2.1 <i>Resultados del análisis de hallazgos mineralógicos en información histórica en Rosario Oeste</i>	61
5.2.2 <i>Resultados de hallazgos en el mapeo geológico y muestreo de sondajes en RW</i> . 74	
5.2.3 <i>Resultados de validación de hallazgos mineralógicos en resultados calcográficos de laboratorio</i>	78
5.2.4 <i>Resultados de los hallazgos estructurales en el análisis de datos televiewers históricos de Rosario Oeste</i>	82
5.3 RESULTADOS DE LA REDEFINICIÓN DE UNIDADES DE MODELAMIENTO EN LA ZONA DE ENRIQUECIMIENTO DE ROSARIO OESTE.....	85
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN.....	88
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio. A) Mapa de ubicación y accesos del área de estudio. Modificado de Muñoz (2009). B) Yacimientos y proyectos del Distrito Collahuasi. Modificado de Sobarzo (2010).	15
Figura 2. Mapa estructural esquemático entre los 21° y 27° S con la ubicación de los yacimientos tipo pórfido asociado al sistema de falla de Domeyko. Extraído de Charrier y otros. (2009).	22
Figura 3. A) Mapa geológico del Distrito de Collahuasi. Modificado de carta geológica del SERNAGEOMIN, Hoja Collacagua, Región de Tarapacá, mapa escala 1:250.000 de Vergara y Thomas (1984). B) Pórfidos de Cu y vetas epitermales en el Distrito Collahuasi. Modificado de Masterman y otros. (2004).	25
Figura 4. Mapa de bloques tectónicos principales separados por las fallas Domeyko y Loa. Están ilustradas las unidades geológicas principales en el distrito y los yacimientos Quebrada Blanca (QB), Rosario (R) y Ujina (U). Modificado de Muñoz (2009).	26
Figura 5. Columna estratigráficas Regional del Distrito Collahuasi (izquierda) y yacimiento Rosario (derecha). Se puede apreciar la relación entre las distintas formaciones, en el sector Rosario se destaca la intrusión de los pórfidos Collahuasi y Rosario. Modificado de Masterman (2003).	29
Figura 6. Esquema estructural regional del distrito Collahuasi, donde resaltan los sistemas estructurales principales. Tomado de Sanhueza y otros. (2006).	35
Figura 7. Componente de movimiento horizontal y vertical en Fallas principales de Rosario. Tomado de Informe interno de la Compañía, Superintendencia de Modelamiento y Reservas (2010).	35
Figura 8. Mapa del distrito Collahuasi, donde resaltan los sistemas estructurales principales Falla Oeste y Loa, los principales yacimientos Quebrada Blanca (QB), Rosario (R) y Ujina (U). Modificado de Masterman (2003).	37
Figura 9. Mapa litológico de Rosario Oeste. Tomado de informe interno de la Compañía (2009).	39
Figura 10. Diagrama de Rosetas en que se muestra las orientaciones preferenciales de fallas mayores y menores (a y b, respectivamente) en Rosario Oeste. Tomado de Oyarzun (2010).	42
Figura 11. Plano compilado con estructuras principales en Rosario Oeste. Fallas proyectadas de planta 4.500, vetas de mapa de superficie. Tomado de Sanhueza y otros. (2006).	43
Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología utilizada secuencialmente en esta investigación.	47
Figura 13. Representación de los sondajes históricos en planta y perfil para Rosario Oeste.	52
Figura 14. Distribución porcentual de la zona mineral de Rosario Oeste.	53
Figura 15. Distribución porcentual de la zona mineral secundaria (SEC), clasificada en Secundario Fuerte (SECF) y Secundario Débil (SECD) en Rosario Oeste.	53
Figura 16. Asociaciones minerales correspondiente al secundario de Rosario Oeste.	54
Figura 17. Representación espacial de muestras QEMSCAN en planta y perfil para RW.	55

Figura 18. Gráficos de la composición promedio de sulfuros en la base de datos QEMSCAN para RW. A Mineralogía de sulfuros de cobre. B Pirita más sulfuros de cobre.....	57
Figura 19. Representación espacial de las muestras analizadas en planta y perfil en RW. .	59
Figura 20. Radios de extracción parcial (CNCu/CuT y FSCu/CuT) para sulfuros de cobre en RW.	60
Figura 21. Distribución espacial del sondaje DDH648 dentro del sólido caja de Rosario Oeste (RW) con la topografía del rajo como fondo, visualizado en Leapfrog.	62
Figura 22. Comportamiento de las leyes químicas y distribución de tramos con análisis de laboratorio para el sondaje DDH648.	63
Figura 23. Representación de sulfuros primarios y secundarios en tramos analizados con los tres métodos para el sondaje DDH648.	65
Figura 24. Distribución espacial del sondaje DDHR552 dentro del sólido caja de Rosario Oeste (RW) con la topografía del rajo como fondo, visualizado en Leapfrog.	66
Figura 25. Comportamiento de las leyes químicas y distribución de tramos con análisis de laboratorio para el sondaje DDHR552.	67
Figura 26. Representación de sulfuros primarios y secundarios en tramos analizados con los tres métodos para el sondaje DDHR552.....	68
Figura 27. Distribución espacial del sondaje DDHR556 dentro del sólido caja de Rosario Oeste (RW) con la topografía del rajo como fondo, visualizado en Leapfrog.	68
Figura 28. Comportamiento de las leyes químicas y distribución de tramos con análisis de laboratorio para el sondaje DDHR556.	69
Figura 29. Representación de sulfuros primarios y secundarios en tramos analizados con los tres métodos para el sondaje DDHR556.....	70
Figura 30. Distribución espacial del sondaje DDHR544 dentro del sólido caja de Rosario Oeste (RW) con la topografía del rajo como fondo, visualizado en Leapfrog.	70
Figura 31. Comportamiento de las leyes químicas y distribución de tramos con análisis de laboratorio para el sondaje DDHR544.	71
Figura 32. Representación de sulfuros primarios y secundarios en tramos analizados con los tres métodos para el sondaje DDHR544.....	72
Figura 33. Distribución espacial del sondaje DDHR553 dentro del sólido caja de Rosario Oeste (RW) con la topografía del rajo como fondo, visualizado en Leapfrog.	72
Figura 34. Comportamiento de las leyes químicas y distribución de tramos con análisis de laboratorio para el sondaje DDHR553.	73
Figura 35. Representación de sulfuros primarios y secundarios en tramos analizados con los tres métodos para el sondaje DDHR553.....	74
Figura 36. Distribución espacial de los siete sondajes revisados. En la imagen superior se muestra la vista en planta, mientras que en la imagen inferior se presenta la vista lateral. .	75
Figura 37. Fotografías de mineralogía de sulfuros primarios no reconocida durante el mapeo de los sondajes.	77
Figura 38. Descripciones calcográficas de 6 sondajes con sulfuros primarios y secundarios coexistiendo en RW. A Veta en sondaje DDH624a aumento 10x, con sulfuros primarios (Cpy-Bo) con leve patina de sulfuro secundario (Cc). B Veta en sondaje DDH697 a aumento 4x, Bo con remplazo moderado de Cc. C Veta en sondaje DDH795 a aumento	

200x, con gran remplazo de Dg y relictos de Cpy y Bo. D Veta en sondaje DDHR207a aumento 500x, Py siendo reemplazada por En y Bo. E Veta de DDH693 a aumento 10x, remplazo de Bo-Cpy con patina de Cc.	80
Figura 39. Orientaciones principales para el dominio 1 y dominio 2 reconocidos para el depósito de Rosario Oeste.	83
Figura 40. Distribución espacial de los dominios estructurales identificados en Rosario Oeste (RW). El Dominio 1 ("Comportamiento Rosario") presenta una orientación predominante de azimut 323°, mientras que el Dominio 2 ("Rosario Oeste") muestra una orientación N.	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de Dominios estructurales de los yacimientos Rosario y Rosario Oeste. Modificado de Sanhueza y otros, 2006.	43
Tabla 2. Datos históricos de las campañas QEMSCAN (2011-2022) para RW.	55
Tabla 3. Composición mineralógica promedio (% en peso) de sulfuros en datos QEMSCAN para RW.	56
Tabla 4. Datos históricos de las campañas de extracción parcial (2008-2022) para Rosario Oeste.	59
Tabla 5. Valores límite de extracción específicos para el depósito epitermal de alta sulfurización Rosario Oeste en CMDIC.	60
Tabla 6. Sondajes seleccionados para identificar hallazgos mineralógicos en zonas de enriquecimiento de RW mediante comparación entre análisis químicos y mapeo geológico.	76
Tabla 7. Datos de los informes de Televewers (TVW) para RW y la Zona Mineralizada SEC.	82
Tabla 8. Redefinición de Unidades de Modelamiento: Zonificación Mineralógica Basada en Resultados del Método de PtXt.	87

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

El yacimiento Rosario Oeste, proyecto de exploración de la Compañía Doña Inés de Collahuasi S.C.M, propiedad de Angloamerican (44%), Glencore (44%) y Japan Collahuasi Resources B.V (12%), constituye un depósito de Cu-Ag (Au) de tipo epitermal de alta sulfuración, ubicado a 1.5 km al suroeste del pórfido cuprífero Rosario, en explotación y reconocido mundialmente. Situado en el Distrito Minero Collahuasi, en la región de Tarapacá, al norte de Chile, este yacimiento ha sido objeto de exploración desde finales del siglo XIX, destacando la explotación de las vetas Poderosa y La Grande, mineralizadas con Cu, Ag y Au.

Con su próxima inclusión en el plan minero de la compañía, surge la necesidad de consolidar la información disponible y realizar estudios específicos que reduzcan la incertidumbre y permitan una definición exhaustiva de la distribución espacial de la mineralización en Rosario Oeste.

La mineralización de cobre de alta ley está vinculada directamente a una serie de estructuras de rumbo NNW-SSE y otras N-S, con manteos subverticales, cubriendo un área de aproximadamente 2 km de largo por 1 km de ancho. El enriquecimiento secundario es resultado de sulfuros de cobre primarios (PRI) y secundarios (SEC), como calcosina, enargita, calcopirita y bornita, asociados principalmente a pirita, con modos de ocurrencia en vetas, vetillas y diseminados asociados a estructuras de fallas, zonas de fallas, zona de vetas y vetas.

Aunque se ha postulado una relación espacial y genética entre los yacimientos Rosario y Rosario Oeste, basada en la evolución de un gran sistema magmático-hidrotermal, las características geológicas de ambos sugieren diferencias claras. Mientras que Rosario está asociado en su mayoría a una mineralización de origen hipógeno, vinculado a intrusivos de la edad Eoceno-Oligoceno, en cambio, en Rosario Oeste más del 90% de la mineralización de Cu es de carácter supérgeno en fallas y vetas emplazadas en rocas volcano-sedimentarias.

1.2 Problemática

El modelamiento geológico es una herramienta fundamental para optimizar la planificación y eficiencia de las operaciones en la industria minera. Actualmente, la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi utiliza un enfoque basado en seis macrozonas minerales para definir el depósito Rosario Oeste, que es un epitermal de alta sulfuración ubicado en la región de Tarapacá, Chile. Sin embargo, esta metodología resulta inadecuada para abordar la complejidad geológica del yacimiento, especialmente considerando que la principal mineralización está asociada con sulfuros secundarios agrupados en una única envolvente.

Esta limitación en el modelamiento geológico genera problemas significativos para la operación minera. Primero, la aproximación actual puede llevar a recuperaciones subóptimas de cobre. Al tratar la zona de mineralización secundaria como una única entidad, se ignora la heterogeneidad mineralógica que caracteriza al yacimiento, lo que puede resultar en un rendimiento reducido en la recuperación de cobre. Esto ocurre porque diferentes especies minerales presentan propiedades metalúrgicas distintas y grados variables de recuperación.

En segundo lugar, la falta de una adecuada discretización de la zona de enriquecimiento afecta la planificación minera, lo que puede llevar a extracciones incorrectas y a un uso ineficiente de los recursos. La ausencia de una segmentación precisa dificulta la optimización de las estrategias de extracción y procesamiento, impactando directamente en la eficiencia operativa.

Además, esta falta de claridad en la definición de las zonas minerales introduce incertidumbre en la estimación de recursos, lo cual puede tener un impacto negativo en la toma de decisiones estratégicas y en la planificación a largo plazo. Un modelamiento geológico impreciso puede llevar a errores significativos en el cálculo de recursos y reservas, afectando la sostenibilidad de la operación.

Por último, la eficiencia metalúrgica también se ve afectada por la falta de segmentación clara. Sin una definición precisa de las zonas de mineralización, se dificulta la estandarización de los procesos metalúrgicos, lo que puede resultar en una recuperación de cobre menor y en un rendimiento reducido en la planta de procesamiento.

En resumen, la actual metodología de modelamiento geológico para Rosario Oeste presenta desafíos importantes que afectan la recuperación de cobre, la planificación minera, la estimación de recursos y la eficiencia metalúrgica. Para superar estos problemas, se requiere un enfoque más detallado y preciso que permita abordar la complejidad del yacimiento y mejorar la rentabilidad de las operaciones.

1.3 Hipótesis

En el sistema epitermal de alta sulfuración de Rosario Oeste, se plantea que la zona de enriquecimiento supérgeno presenta heterogeneidades mineralógicas que pueden ser clasificadas en unidades geológicas modelables diferenciadas. La segmentación de estas variaciones en zonas transicionales y alto enriquecimiento, junto con la delimitación de áreas primarias, permitirá una caracterización más precisa de la mineralización en este depósito.

Esta diferenciación no solo optimizará la definición de las zonas mineralizadas, sino que también facilitará la toma de decisiones estratégicas y operativas en la planificación minera. Una identificación más precisa de la mineralización secundaria permitirá mejorar la eficiencia en los procesos de extracción y recuperación de cobre, reduciendo la variabilidad metalúrgica y contribuyendo a una mayor rentabilidad para la compañía.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Actualizar el modelo geológico de zona mineral, específicamente la zona de enriquecimiento y primaria del depósito Rosario Oeste, ubicado en el distrito de Collahuasi, con el objetivo de mejorar la precisión del modelamiento mineral y contribuir a una planificación y operación minera más eficiente.

1.4.2 Objetivo Específicos

- Identificar las distintas asociaciones minerales y sus respectivas propiedades geológicas y/o geometalúrgicas.
- Discretizar la zona de enriquecimiento en unidades de alto, mediano y transición de enriquecimiento, así como en zonas primarias.
- Determinar la orientación preferencial de la mineralización secundaria y mejorar la precisión del modelamiento geológico.
- Actualizar la estimación de recursos de Rosario Oeste de acuerdo con la nueva discretización definida.
- Evaluar el impacto de la discretización en los procesos de extracción y recuperación de cobre en la planta, con el fin de aumentar la eficiencia metalúrgica.

1.6 Área de Estudio

El distrito minero Collahuasi se encuentra en el altiplano de la región de Tarapacá, Chile, en las coordenadas aproximadas 20°58' S y 68°43' W, ocupando un área de alrededor de 1,200 km². El distrito se localiza en la Cordillera de Domeyko, con altitudes que varían entre 4,300 y 4,800 metros sobre el nivel del mar. Dentro de este distrito, el área de estudio se centra en el yacimiento Rosario Oeste, ubicado específicamente entre las coordenadas 7,678,000 - 7,676,800 N y 529,000 - 530,800 E, aproximadamente 200 kilómetros al sureste de la ciudad de Iquique y a 2 kilómetros al suroeste del actual *pit* de Rosario.

El acceso a la zona de operaciones desde Iquique se realiza por la ruta A-16 hacia el sur, recorriendo 7 kilómetros hasta la dirección a Pozo Almonte. Luego, se toma la ruta A-65 hacia el oriente por 14 kilómetros hasta llegar al cruce con la ruta A-687. Desde allí, se sigue hacia el sector de Garita Norte por una carretera sellada desde la carretera Panamericana. Alternativamente, se puede llegar desde Calama a través de una ruta de 190 kilómetros que no está asfaltada (figura 1).

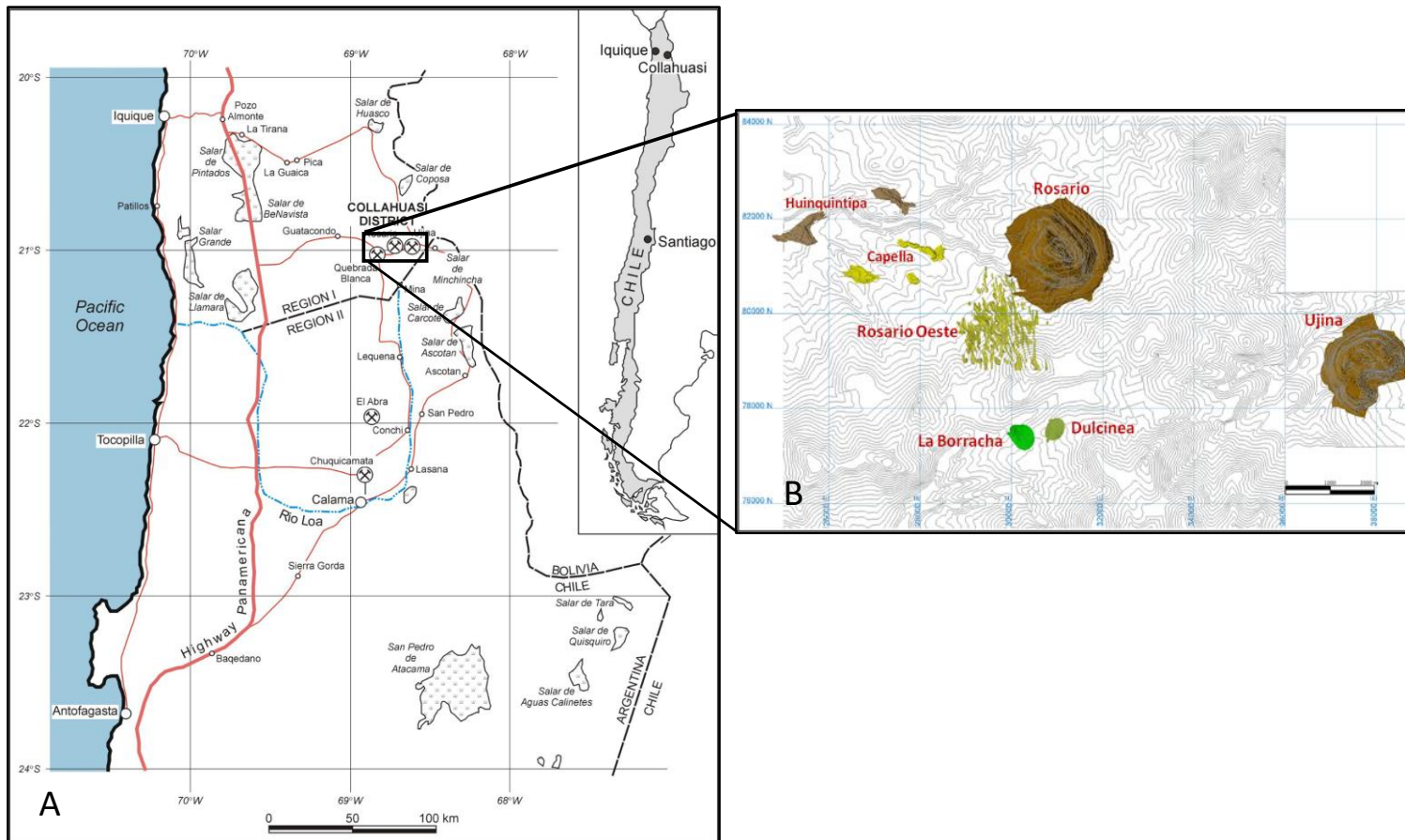


Figura 1. Ubicación del área de estudio. A) Mapa de ubicación y accesos del área de estudio. Modificado de Muñoz (2009). B) Yacimientos y proyectos del Distrito Collahuasi. Modificado de Sobarzo (2010).

1.7 Trabajos Anteriores

A continuación, se presenta una recopilación de los trabajos realizados en el sector, los cuales corresponden a informes internos elaborados por el área de geología de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi y por el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). A continuación, se detallan las publicaciones realizadas en el sector de estudio:

García (1967) realizó un estudio sobre la Geología del Norte Grande de Chile, contribuyendo significativamente a la definición de unidades geológicas como la Formación Agua Dulce, presente en Collahuasi.

Vergara (1978) llevó a cabo el levantamiento geológico del “Cuadrángulo Ujina” a escala 1:50.000, describiendo rocas estratificadas volcánicas depositadas entre el Cretácico inferior y el Cenozoico.

Münchmeyer y otros (1984) definieron unidades estratigráficas informales, realizaron dataciones radiométricas y recopilaron antecedentes estructurales del distrito.

Vergara y Thomas (1984) publicaron la “Hoja Cochagua” a escala 1:250.000, redefiniendo la edad y litología de la Formación Collahuasi.

Bogdanic (1990) estableció perfiles y correlaciones estratigráficas en los alrededores del área de estudio.

Lee (1994) analizó la evolución del depósito Rosario y su sistema de vetas asociado, enfocándose en las orientaciones de los sistemas de vetillas principales.

Dick y otros (1994) describieron el emplazamiento geológico y estructural del sistema de vetas Cu-Ag- (Au) de Rosario, así como su relación con la mineralización diseminada en el Distrito Collahuasi.

Munizaga (1995) presentó un estudio interno sobre las edades ^{40}Ar - ^{39}Ar en el distrito Minero Collahuasi, con el objetivo de mejorar la geocronología de los eventos intrusivos de los yacimientos Ujina y Rosario.

Bisso y otros (1998) entregaron información sobre la geología de los pórfidos Ujina y Rosario, presentando modelos de formación para cada uno.

Ardill (1998) estudió la secuencia estratigráfica de la Cuenca Mesozoica Domeyko, indicando el control dominante de variaciones globales en el nivel del mar en su sucesión.

Tomlinson (2001) describió la geología de la precordillera andina entre Quebrada Blanca y Chuquicamata, considerando la formación presente en el sector de Collahuasi.

Moore y Masterman (2002) realizaron una descripción de la historia del distrito Collahuasi y su geología.

Janssen (2002) estudió la estructura interna del sistema de falla Precordillerana (Falla Oeste), utilizando información estructural y geofísica.

Masterman (2003) expuso la geología del Distrito Collahuasi, destacando el sector de Rosario Oeste.

Masterman y otros (2004) llevaron a cabo un estudio geocronológico de los depósitos porfídicos de Rosario y Ujina, y su relación con el sistema de vetas de Cu-Ag de Rosario.

Mansterman y otros (2005) realizaron un estudio del emplazamiento estructural y geoquímico de los fluidos en el pórfido de Cu-Mo Rosario y en el sistema epitermal asociado de vetas de Cu-Ag- (Au).

Sanhueza y otros (2006) desarrollaron un informe interno de la compañía sobre las campañas de exploraciones del proyecto Rosario Oeste, actualizando la geología del yacimiento.

Munizaga y otros (2008) realizaron consideraciones acerca del magmatismo Paleozoico tardío- Triásico temprano en el área de Collahuasi.

Muñoz (2009) estudió la caracterización petrográfica de las unidades en Rosario Oeste y estableció la relación entre la geología de Rosario Oeste y trabajos anteriores.

AURUM (2009) llevó a cabo un estudio geológico-metalogénico del Distrito Collahuasi, confeccionando mapas a escalas 1:25.000 y 1:50.000.

Oyarzun (2010) realizó una caracterización estructural del yacimiento Rosario Oeste y su control sobre la mineralización.

Baker y otros (2010) estudiaron la variación de los isótopos de Talio en la Formación Collahuasi, concluyendo sobre los cambios en la concentración gobernados por reacciones hidrotermales que destruyen las fases ricas en K y Rb.

Ireland (2010) elaboró el marco geológico de los depósitos minerales del distrito de Collahuasi.

Ávalos (2019) realizó un estudio sobre la petrografía de las inclusiones fluidas en el yacimiento Rosario, con el propósito de determinar parámetros para la exploración, concluyendo que existen al menos dos pulsos mineralizadores en el yacimiento.

Quiroga (2019) llevó a cabo la caracterización y modelamiento de las vetillas en el rajo Rosario, con el fin de determinar su geometría y distribución.

Vivanco (2019) desarrolló un modelo de la ocurrencia del molibdeno en el rajo Rosario, con el objetivo de identificar oportunidades de mejora en la recuperación de Mo.

Garay (2021) realizó un modelamiento estructural de la ocurrencia y distribución del arsénico en el yacimiento Rosario, con el propósito de reducir la incertidumbre geológica.

CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL Y TECTÓNICO

2.1 Evolución tectónica Paleozoico-Neógeno del segmento 19°-26° Latitud Sur

Durante el Proterozoico superior, tuvo lugar la acreción del terrane Arequipa, el cual colisionó con el margen occidental de Gondwana. Este evento generó, desde el Cámbrico hasta el Ordovícico inferior, un margen pasivo (Ramos y otros.,1986). Posteriormente, Ramos (2010) afirmó que en el supercontinente Gondwana, no solo se interpretó la colisión del terrane de Arequipa, sino también múltiples acreciones de terranes en el margen oeste, donde se encuentra Chile. Desde el Ordovícico inferior se desarrolló un sistema de subducción, generando un prisma de acreción hasta el Silúrico. Durante el Devónico, se formó un prisma debido a la subducción y acreción del terrane Chilenia (Charrier y otros ., 2007).

A principios del Pérmico, hubo una reactivación del proceso de subducción en el margen continental Sudamericano, dando lugar a un arco magmático de edad Pérmico superior - Triásico inferior, junto con una cuenca tras arco asociada. Estos depósitos ahora forman parte del basamento cristalino en la actual cordillera Domeyko (Charrier y otros., 2007). Durante el Triásico, cesó nuevamente la subducción, generando una extensión generalizada hasta el Jurásico inferior, manifestada por la formación de sistemas de rift que perduraron hasta el Jurásico, creando cuencas con orientación NNW-SSE en los bloques colgantes de los sistemas de sutura Paleozoicas (Charrier, 1979; Charrier y otros., 2007; Ramos y Kay, 1991).

Posterior a la fase de rifting del Triásico-Jurásico temprano, específicamente a comienzos del Jurásico medio, se presentó una extensa sedimentación en las cuencas de *rift*, con un reinicio de la subducción oblicua, generando deformación transtensional asociada al Sistema de Falla de Atacama y un arco magmático activo en el margen occidental de Sudamérica, marcando el inicio del ciclo Andino y generando la Formación La Negra, con una extensa cuenca tras arco asociada como la cuenca ensiálica de Tarapacá (Charrier y otros.,2007).

En el Cretácico inferior tardío, el arco magmático migró hacia el este y la subducción cambió a tipo Chilena, iniciándose la fase peruana que produjo la inversión tectónica de la cuenca de tras arco de Tarapacá y transformándola en un elemento positivo del relieve protocordillera de Domeyko (Ramos, 2010). En cuanto al Cretácico superior, ocurrió una disminución en el ángulo de inclinación del plano de subducción, dando lugar a una subducción tipo Chileno. En estas latitudes, se desarrolló el Rift de Salta en el sector noreste Argentino, generando un régimen compresivo que provocó una cuenca antepaís de retro arco hacia el lado oriental del relieve formado (Charrier y otros., 2007).

Ya en el Cenozoico, a comienzos del Eoceno, se produjo la fase incaica formando la cordillera incaica en el Eoceno medio, lo que produjo compresión al norte de los 27°S, el alzamiento andino y la configuración del relieve actual. Entre el Eoceno superior y el Oligoceno, al oriente de la cordillera incaica, cesó el volcanismo hasta la erupción de ignimbritas del Mioceno (Mpodozis y Ramos, 2008). El cese del volcanismo andino central entre ~ 50 Ma. y 27 Ma. se atribuye a la subducción de una sección de losa plana en el norte de Chile. La intrusión de magmas félsicos a intermedios asociados con la mineralización pórfidos de Cu y Epitermales de Eoceno superior-Oligoceno en el sistema de Fallas de Domeyko (figura 2) como Quebrada Blanca, Collahuasi, Chuquicamata, entre otros, ocurrió durante el hiato volcánico (Ramos, 2010).

Durante el período Oligoceno – Mioceno inferior, se observan procesos supérgenos de oxidación y enriquecimiento secundario sobre la mineralización hipógena en el norte de Chile. En paralelo, la tectónica se caracteriza por un episodio dextral de corta duración con movimiento dominante de tipo transcurrente. Posteriormente, se estimaron entre 35 y 37 km de desplazamiento transpresivo sinistral post-mineral a lo largo de la Falla Oeste entre Chuquicamata y El Abra (Dilles y otros., 1997; Tomlinson y Blanco, 1997).

Sin embargo, a fines del Oligoceno superior, Muñoz y otros. (2000), reconocen el inicio de un período de expansión del arco magmático, junto con un episodio regional de expansión cortical de aproximadamente 10 Ma. Esto se atribuye a un cambio en la geometría de subducción y a un período transitorio de circulación astenosférica vigorosa, generados por el incremento en las tasas de convergencia. Esta combinación provocó una extensión moderada en el margen continental del sector sur de Sudamérica, induciendo un episodio de 'rollback'

de la Placa de Nazca subductada. Durante el Mioceno superior al Plioceno, las altas tasas de convergencia produjeron engrosamiento cortical y gran alzamiento tectónico relacionado con pulsos compresivos de la fase tectónica Quechua (Muñoz y otros., 2000).

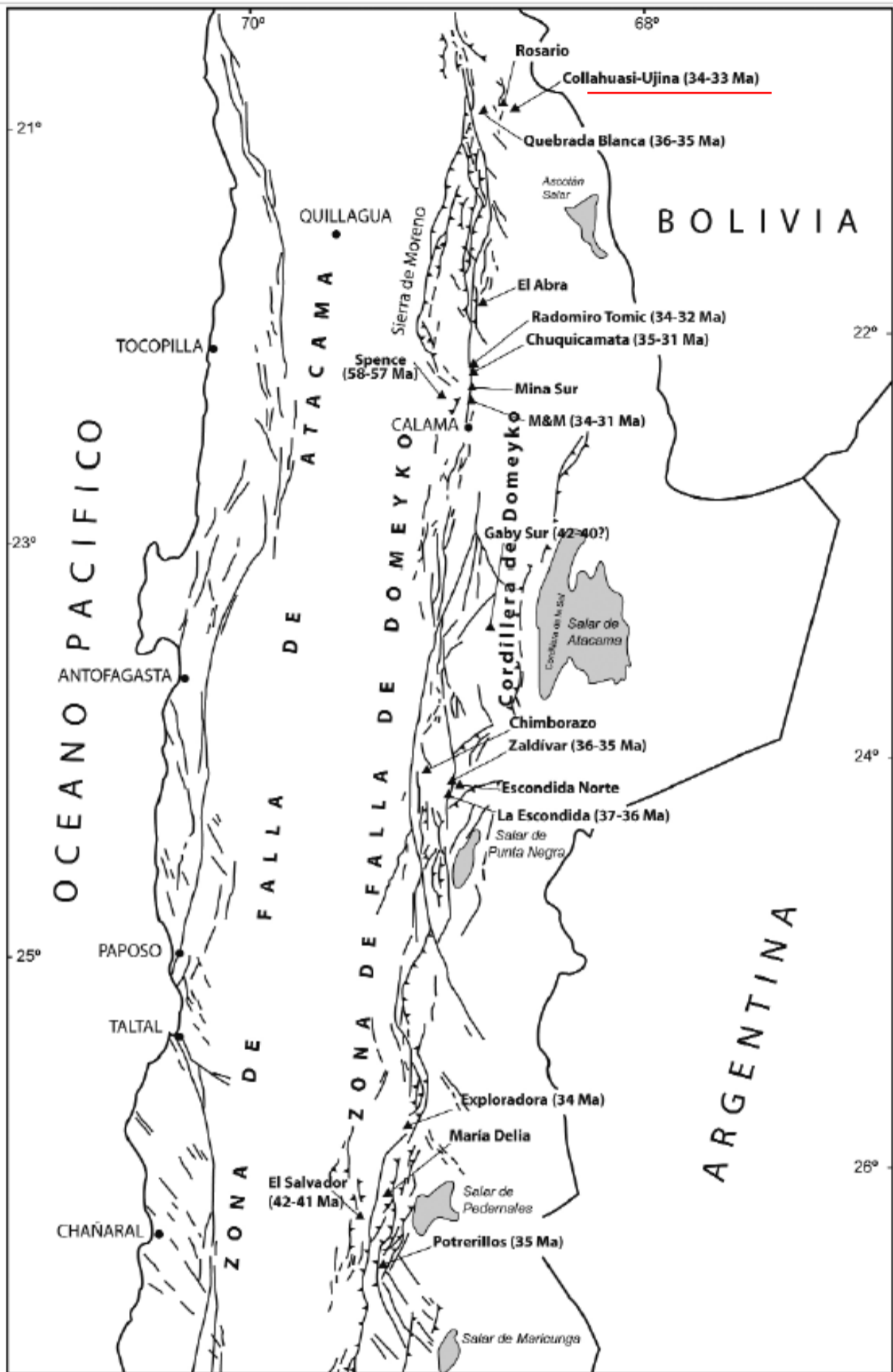


Figura 2. Mapa estructural esquemático entre los 21° y 27° S con la ubicación de los yacimientos tipo pórfido asociado al sistema de falla de Domeyko. Extraído de Charrier y otros. (2009).

2.2 Geología del distrito Collahuasi

2.2.1 Generalidades

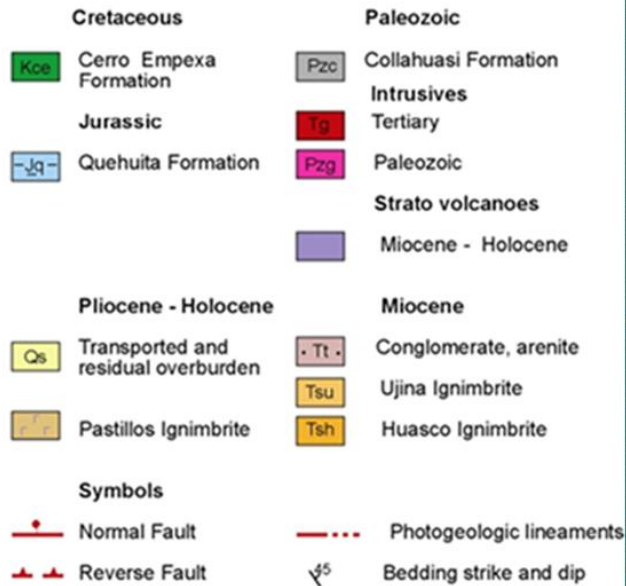
El Distrito Minero Collahuasi se localiza en los Andes del norte de Chile, específicamente en las coordenadas 20°58' S y 68°43' W, abarcando un área de aproximadamente 1200 km². Este distrito se define como un conjunto de pórfidos de Cu-Mo situados en el extremo norte de la franja del Eoceno-Oligoceno, que comprende tres pórfidos principales: Quebrada Blanca, Ujina y Rosario. Este último está asociado con un evento epitermal de alta sulfuración, que incluye vetas de Cu-Ag como Poderosa, Moctezuma y La Grande. Además, al noroeste del depósito Rosario se encuentra un yacimiento exótico de Cu llamado Huinquintipa, situado en gravas (Camus, 2003).

Según Bissó y otros. (1998), el Distrito Collahuasi está delimitado por dos sistemas estructurales principales a escala regional. En el sector occidental se encuentra la Falla de Domeyko o Falla Oeste, de orientación norte-sur, mientras que en el oriente se sitúa el Dominio Paleozoico central, separado del Dominio Cenozoico Oriental por el Sistema Falla El Loa. Estos límites definen un horst con rocas paleozoicas, flanqueado por rocas mesozoicas y cenozoicas. El autor clasifica las unidades geológicas presentes en el distrito en tres bloques tectónicos: occidental, central y oriental (figura 3).

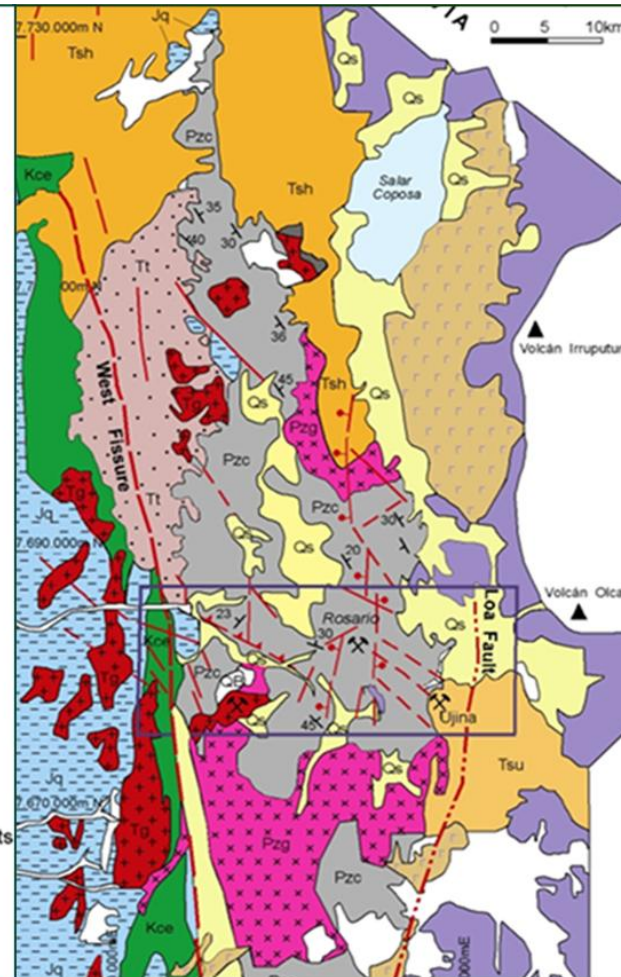
El Bloque Occidental está compuesto por rocas de edad mesozoica y se caracteriza por la presencia de pliegues en rocas sedimentarias marinas jurásicas pertenecientes a la Formación Quehuita. También se han identificado la Formación Cerro Empexa (Cretácico superior - Paleoceno) y conglomerados rojos de la Formación Tolar (Cretácico superior). Por su parte, el Bloque Central cuenta con un basamento paleozoico asociado a plutones graníticos que intruyen en la Formación Collahuasi, una secuencia volcano-sedimentaria. Posteriormente, estas rocas son afectadas por la intrusión de pórfidos mineralizados del Oligoceno, los cuales son responsables de la formación de los depósitos en el distrito. Por último, el Bloque Oriental se encuentra al este de la Falla El Loa y se caracteriza por la presencia de ignimbritas y depósitos volcano-clásticos del Neógeno al Cuaternario.

Tres Dominios Principales

Secuencia Mesozoica (Oeste)
 Bloque Paleozoico (Central)
 Volcanismo Cenozoico Superior (Este)



A



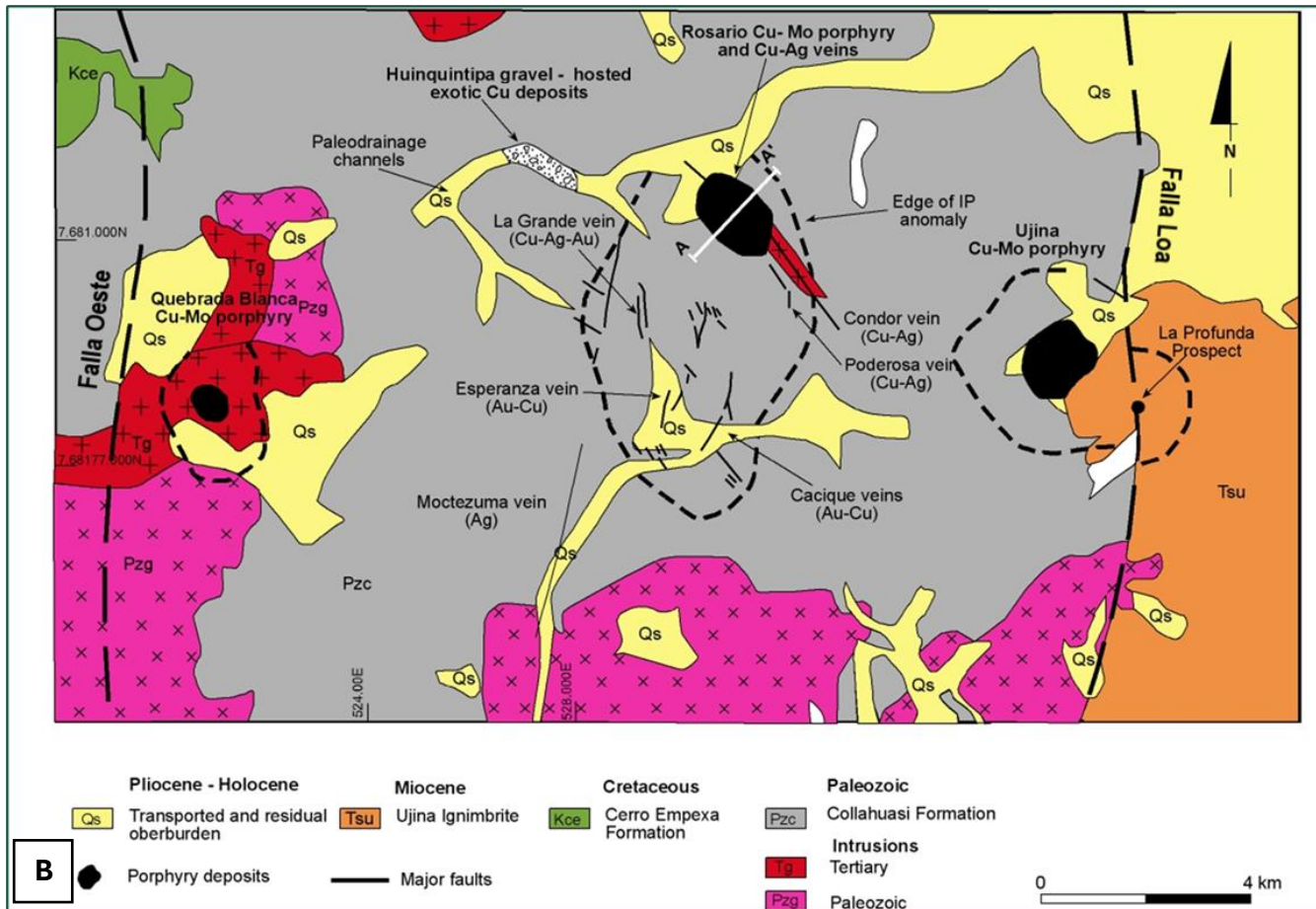


Figura 3. A) Mapa geológico del Distrito de Collahuasi. Modificado de carta geológica del SERNAGEOMIN, Hoja Collacagua, Región de Tarapacá, mapa escala 1:250.000 de Vergara y Thomas (1984). B) Pórfidos de Cu y vetas epitermales en el Distrito Collahuasi. Modificado de Masterman y otros. (2004).

2.2.2 Rocas Estratificadas

La sucesión estratigráfica del distrito Collahuasi está mayormente compuesta por rocas volcano-sedimentarias que van desde una naturaleza andesítica hasta riolítica. Estas rocas se han subdividido en unidades litoestratigráficas formales e informales, que abarcan desde el Paleozoico superior hasta la actualidad (Figura 4).

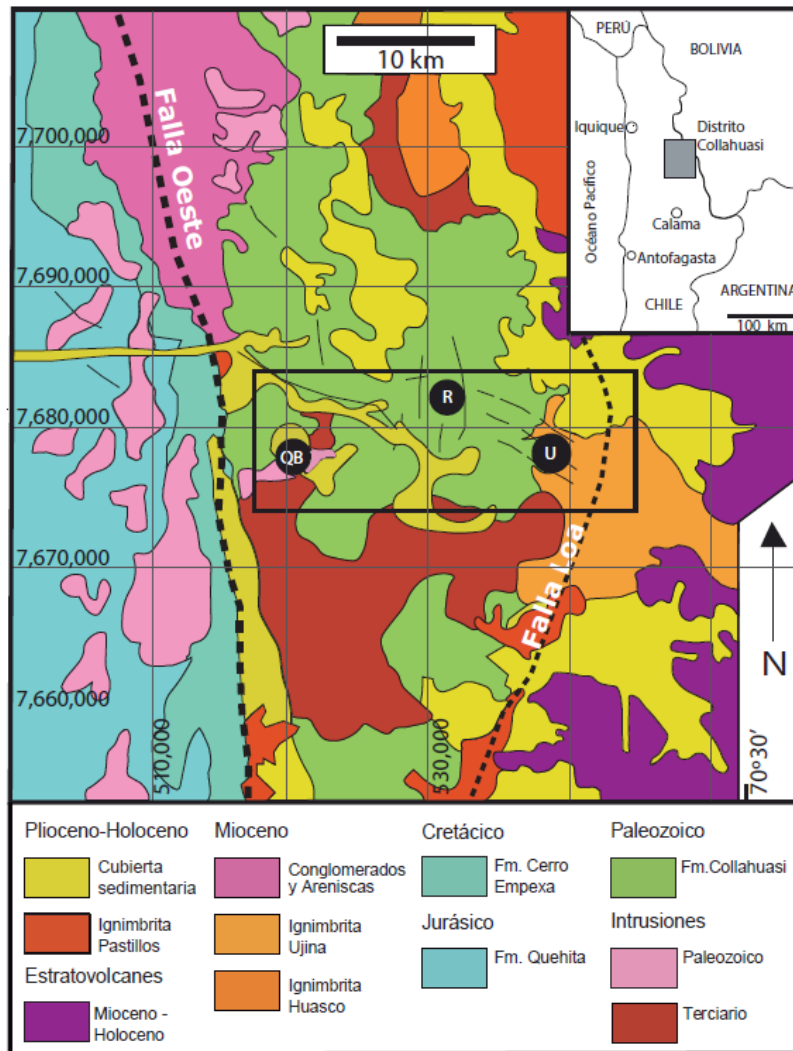


Figura 4. Mapa de bloques tectónicos principales separados por las fallas Domeyko y Loa. Están ilustradas las unidades geológicas principales en el distrito y los yacimientos Quebrada Blanca (QB), Rosario (R) y Ujina (U). Modificado de Muñoz (2009).

2.2.2.1 Formación Collahuasi

La unidad volcano-sedimentaria, documentada por Vergara y Thomas (1984), data del Permo-Triásico y tiene un grosor de aproximadamente 4 km. Esta unidad está compuesta por rocas andesíticas, dacitas, riolitas, tobas y cuerpos intrusivos menores, como se ilustra en la columna estratigráfica de la Figura 5. Las rocas volcánicas muestran la presencia de dos o más ciclos de flujos, desde andesita hasta riolita, intercalados con sedimentación de calizas y areniscas, que indican un ambiente continental (Bisso y otros., 1998). Se identifican dos eventos magmáticos principales: uno en el Pérmico inferior, hace aproximadamente 296 millones de años, y otro en el Triásico medio, hace unos 242 millones de años (AURUM, 2009).

Los límites geográficos que determinan la extensión y distribución de esta unidad están definidos por la Ignimbrita Huasco en el lado norte, debajo de la cual se encuentra la Formación Collahuasi (Masterman, 2003). Al oeste, su límite está marcado por el Sistema de Falla Domeyko (Bisso y otros., 1998). Aunque el límite oriental no está expuesto, probablemente esté influenciado por la Falla El Loa, mientras que hacia el sur se extiende hasta Chuquicamata (Masterman, 2003).

Münchmeyer y otros. (1984) subdividen esta Formación en tres unidades informales, que son:

- **Unidad La Grande:** Esta sucesión está compuesta por rocas riolíticas, dacíticas y andesíticas, intercaladas con areniscas y brechas sedimentarias, con un espesor de al menos 3000 m, y se encuentra en la mitad sur del Distrito Collahuasi. Las dataciones de K/Ar en hornblenda sugieren una edad mínima Permo-Triásica. Está intruida por un batolito granodiorítico del Permo-Triásico, y está sobrepuesta por las unidades Condor y Capella en el sector de Rosario, y discordantemente por la Formación Chacarillas al suroeste de Quebrada Blanca (Münchmeyer y otros., 1984).
- **Unidad Capella:** Esta unidad consiste en coladas riolíticas alternadas con lentes y horizontes de areniscas y calizas. Tiene un espesor mínimo de 1,700 m y se encuentra en discordancia angular sobre la Unidad La Grande. Se ubica en el sector noroeste

del Distrito Collahuasi, cerca de la localidad de Capella, y se le asigna una edad del Triásico y/o Jurásico (?) (Münchmeyer y otros., 1984).

- **Unidad Cóndor:** Esta sucesión está compuesta por rocas efusivas riolíticas, con un horizonte basal de areniscas y calizas. Tiene un espesor mínimo de 1,050 m y aflora en la serranía que separa Rosario de la localidad de Ujina. Aunque la posición estratigráfica de la Unidad Cóndor es similar a la de la Unidad Capella, y los eventos sedimentarios son parecidos para ambas, se ha decidido diferenciarlas debido a su discontinuidad distrital y a las características distintivas de sus riolitas (Münchmeyer y otros., 1984).

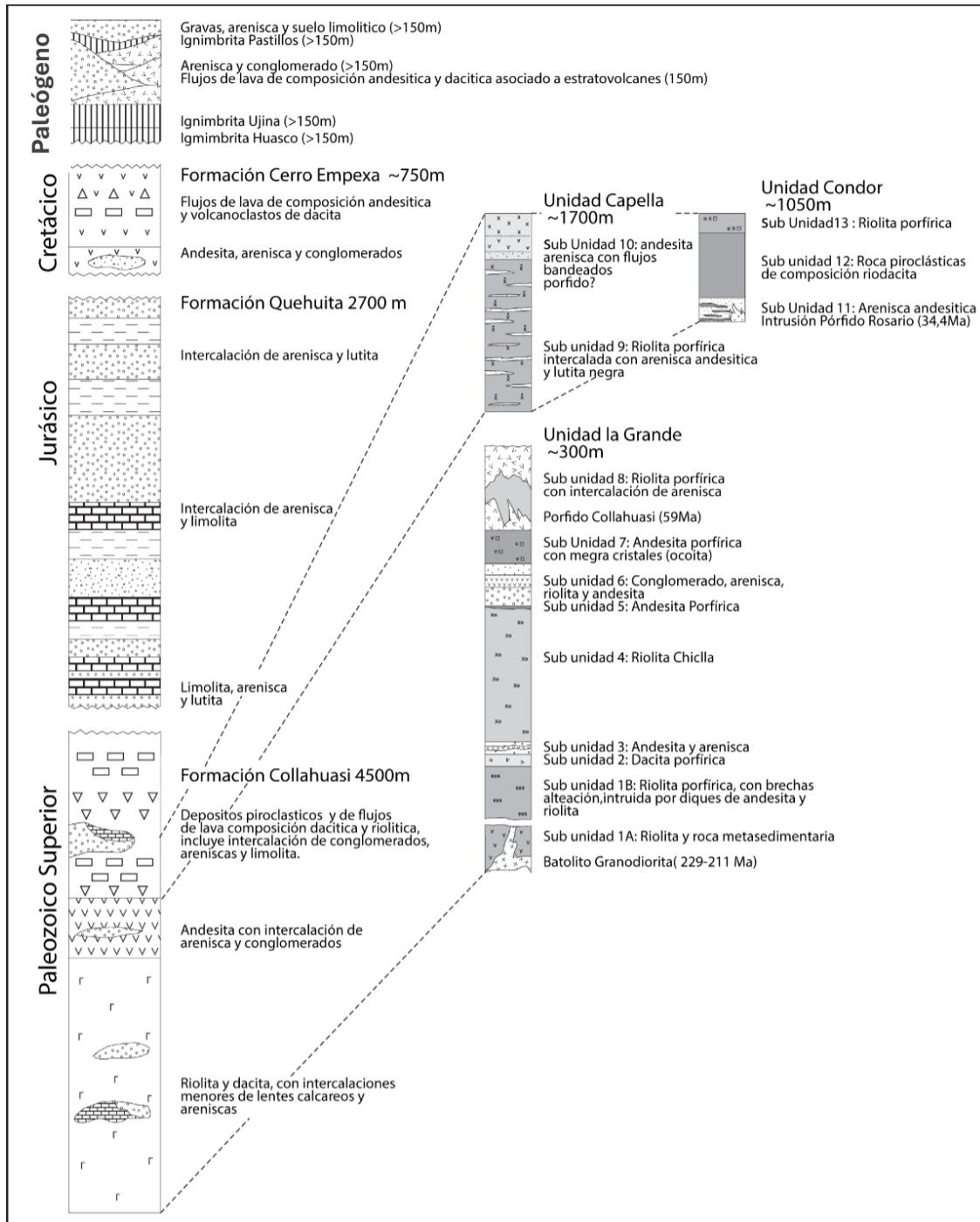


Figura 5. Columna estratigráfica Regional del Distrito Collahuasi (izquierda) y yacimiento Rosario (derecha). Se puede apreciar la relación entre las distintas formaciones, en el sector Rosario se destaca la intrusión de los pórfidos Collahuasi y Rosario. Modificado de Masterman (2003).

2.2.2.2 Formación Quehuita

La secuencia marino-continental, según Vergara y Thomas (1984), se compone de dos miembros distintos: un miembro inferior que consiste en fangolitas, calizas y limolitas marinas, y un miembro superior compuesto por calizas, areniscas calcáreas y conglomerados. Las calizas del miembro inferior contienen fósiles de edad Jurásica. Estratigráficamente, esta secuencia se ubica en discordancia angular y erosiva sobre la Formación Collahuasi, mientras que se encuentra infrayacente a la Formación Cerro Empexa (Vergara y Thomas, 1984; Münchmeyer y otros.,1984). Su ambiente de deposición se corresponde con una cuenca extensional de tras arco que se formó durante el desarrollo del arco Jurásico en el norte de Chile, evolucionando desde un ambiente marino profundo inicial a un ambiente marino somero como resultado de un evento regresivo (Masterman, 2003).

- **Miembro inferior:** Se trata de rocas sedimentarias bien estratificadas, con un espesor de capas que oscila entre 0.10 y 2 m, con abundantes fósiles marinos, principalmente compuestas por rocas calcáreas (calizas, calcarenitas, areniscas calcáreas y calcilutitas) y lutitas (Tomlinson y otros., 2001). En su parte basal se presenta una unidad clástica compuesta de conglomerados y areniscas de color amarillo o rojizo, con un espesor variable entre 4 y 50 m. En conjunto, su espesor total varía entre 800 y 1,200 m.

- **Miembro superior:** Este miembro se caracteriza por una secuencia bien estratificada de areniscas y limolitas láminadas de color rojo oscuro, intercaladas con limolitas verdes y areniscas cuarcíferas pardas. Estas rocas presentan características como estratificación cruzada, láminas paralelas y flaser, ondulitas, grietas de barro y restos vegetales fósiles, así como niveles arenosos en la parte superior con huellas de pisadas de dinosaurios. Su espesor aproximado es de 1,300 m (Tomlinson y otros., 2001).

2.2.2.3 Formación Cerro Empexa

La secuencia elongada, orientada de norte a sur, está compuesta principalmente por andesitas, dacitas y brechas volcánicas, con intercalaciones de areniscas rojas y conglomerados. Basado en stocks graníticos datados en 95 Ma, de edad Cretácica superior (Vergara y Thomas, 1984), esta secuencia se deposita en un ambiente continental volcano-sedimentario similar al arco actual de la Cordillera del Este (Masterman, 2003). Se compone de dos miembros:

-Miembro inferior: Este miembro es una secuencia volcano-sedimentaria con aproximadamente 200 m de espesor, que aflora principalmente al norte del Cerro Empexa y al sur de la Quebrada Rosario. Su espesor máximo alcanza 1,300 m e incluye conglomerados, areniscas, fangolitas y brechas.

- Miembro superior: Esta secuencia volcánica tiene un espesor aproximado de 550 m y está compuesta por una secuencia de alrededor de 1,400 m de rocas volcánicas, que incluyen andesitas, brechas tobáceas, tobas líticas y andesitas porfídicas.

2.2.2.4 Ignimbrita Huasco

Estas secuencias piroclásticas, que van desde dacíticas hasta riolíticas, están asociadas a calderas de colapso del Mioceno inferior a medio. Consisten en tobas, total o parcialmente soldadas, que en perfil pueden presentar un sector basal de vitrófiros negros, una parte media de tobas riolíticas compactas muy soldadas, y un nivel superior de color gris claro, medianamente soldado. Las dataciones (K-Ar en biotita) indican una edad del Mioceno medio que fluctúa entre 14.4 ± 0.4 y 17.1 ± 0.8 Ma (Vergara y Thomas, 1984). Las características litológicas sugieren que estas secuencias se depositaron en un ambiente continental que, en algunos sectores, albergaba cuencas lacustres someras.

2.2.2.5 Ignimbrita Ujina

El depósito ignimbrítico está compuesto por tobas soldadas que ocasionalmente contienen lentes de material piroclástico, y en ocasiones se pueden distinguir estructuras de flujo (Vergara, 1978). Dataciones K-Ar han determinado una edad del Mioceno superior de 9.3 ± 0.4 Ma para estas unidades (Vergara y Thomas, 1984).

2.2.2.6 Depósitos Aterrazados

Depósitos de gravas y arenas polimícticas, en menor parte tobas dacíticas, de disposición horizontal. Cercanos a zonas de alteración hidrotermal, un gran porcentaje de sus constituyentes son rocas alteradas y mineralizadas con sulfuros, en tanto que la matriz aparece cementada, fundamentalmente por silicatos de cobre, conformando depósitos de minerales exóticos. Se encuentran cubriendo a las unidades del Mioceno e infrayacen a depósitos clásticos no consolidados del periodo Reciente (Vergara y Thomas, 1984).

2.2.2.7 Estratovolcanes

Estratovolcanes, domos y flujos de lava compuestos principalmente de andesita y dacita, con una edad que varía desde el Mioceno superior hasta el presente (Vergara, 1978). Estas formaciones exhiben diferentes grados de conservación; los más antiguos muestran conos altamente erosionados con sus núcleos expuestos. Sin embargo, la mayoría presenta conos relativamente bien conservados y cráteres moderadamente erosionados (Vergara y Thomas, 1984). Las rocas que conforman estos volcanes son principalmente andesitas y dacitas, con volúmenes aproximadamente equivalentes. En algunos sectores, las lavas de los centros volcánicos más recientes cubren a los volcanes de características similares, que son parcialmente más antiguos. Además, algunos de los centros volcánicos atribuidos al Mioceno superior-Plioceno están cubiertos por depósitos ignimbríticos más recientes (Vergara y Thomas, 1984).

2.2.2.8 Ignimbrita Pastillos

Secuencia de ignimbritas y depósitos de ceniza volcánica que se divide en dos miembros distintos: un Miembro Inferior compuesto por tobas parcialmente soldadas y depósitos laháricos, y un Miembro Superior compuesto principalmente por tobas cineríticas no soldadas. En la cuenca del Salar de Coposa, se incluyen en la unidad superior niveles de arcillolitas, limos y diatomitas (Vergara y Thomas, 1984). La edad asignada por Vergara y Thomas (1984) es del Pleistoceno medio, corroborada por las dataciones realizadas en diatomitas por Stoertz y Ericksen (1974).

2.2.2.9 Depósitos No Consolidados

Esta unidad representa las formaciones más recientes del área, que incluyen una variedad de depósitos como salinas, aluviales, arenas eólicas, cenizas volcánicas con costras salinas, así como depósitos aluviales de ceniza y lapilli (Vergara y Thomas, 1984).

2.2.3 Rocas Intrusivas

La composición de los cuerpos intrusivos en el área de estudio abarca desde dioritas y monzonitas hasta granodioritas y granitos. Según Münchmeyer y otros., (1984), se pueden distinguir tres períodos de emplazamiento. El primero, durante el Pérmico-Triásico, está marcado por la presencia de granitos y granodioritas confinados principalmente en la Formación Collahuasi, asociados al pórfido que lleva el mismo nombre.

El segundo período, representado por dioritas cuarcíferas y granodioritas del Cretácico superior al Paleógeno inferior, corresponde a las formaciones Cerro Empexa, Quehuita y Collahuasi. Según Münchmeyer y otros (1984), intrusiones cuarzo-monzoníticas se emplazaron más tarde en la Formación Collahuasi durante el período Eoceno superior-Oligoceno inferior. Este último evento está relacionado con la formación de los pórfidos cupríferos de Rosario y Ujina.

Datos más recientes de U-Pb en circón, proporcionados por MaksaeV y otros (2009), revelan edades de cristalización de 35 a 36 Ma para los pórfidos de los depósitos Rosario, Rosario Oeste y Ujina. En cambio, la actividad magmática en el depósito Quebrada Blanca comenzó un poco antes (37 Ma), pero las edades de U-Pb en circón para los pórfidos tardíos de Quebrada Blanca son contemporáneas a los depósitos Rosario y Ujina. Por lo tanto, se identifican al menos dos eventos de intrusión de pórfido para estos yacimientos. En Rosario y Rosario Oeste, se ha identificado una superposición hidrotermal de alta sulfuración, que según datos de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ocurrió entre los 28 y 33 Ma (Masterman y otros, 2004).

2.2.4 Estructuras Tectónicas

La Geología Estructural del Distrito está dominada por dos sistemas de fallas regionales con orientación N-S, conocidos como el Sistema de Falla Oeste y el Sistema de Falla El Loa. Estos sistemas ejercen un control principal sobre la ubicación de los pórfidos de Cu-Mo en la franja magmática del Oligoceno. Un tercer sistema estructural en el distrito es un conjunto marcado de estructuras NW, informalmente denominado Sistema Collahuasi, interpretado como un antiguo y profundo sistema de fallas que se extiende desde Ujina en el sur hasta

Characolla en el norte (Sanhueza y otros., 2006). El margen entre el Sistema de Falla Oeste y El Loa define una franja de deformación de unos 30 km de ancho y constituye uno de los principales controles de los depósitos de Ujina y Rosario.

La cinemática del arreglo estructural descrito es muy compleja, con movimientos pre, syn y post mineralización. En este esquema, los depósitos de Capella y Quebrada Blanca están asociados con estructuras subsidiarias del Sistema de Falla Oeste; Ujina se relaciona espacialmente con estructuras secundarias del Sistema de Falla El Loa, mientras que el depósito Rosario se encuentra en una zona de traspaso estructural entre ambos sistemas (figura 6) (CMDIC, 2014).

Rosario se encuentra dentro de un complejo sistema estructural, en el cual destaca la Falla Lulú, Falla Última, Falla Penúltima y Falla Pique. Las fallas Mari y Oeste limitan el sistema por el oeste y este, respectivamente. En estas estructuras es posible distinguir dos componentes de movimiento, uno horizontal de tipo dextral y otro vertical (figura 7). Al de tipo horizontal se le asocia el emplazamiento del pulso hidrotermal con altos contenidos de arsénico y cobre, mientras que el movimiento vertical posterior generaría la dislocación de la mineralización primaria delimitando las leyes de cobre y molibdeno (Informe Modelamiento y Reservas CMDIC, 2010).



Figura 6. Esquema estructural regional del distrito Collahuasi, donde resaltan los sistemas estructurales principales. Tomado de Sanhueza y otros. (2006).

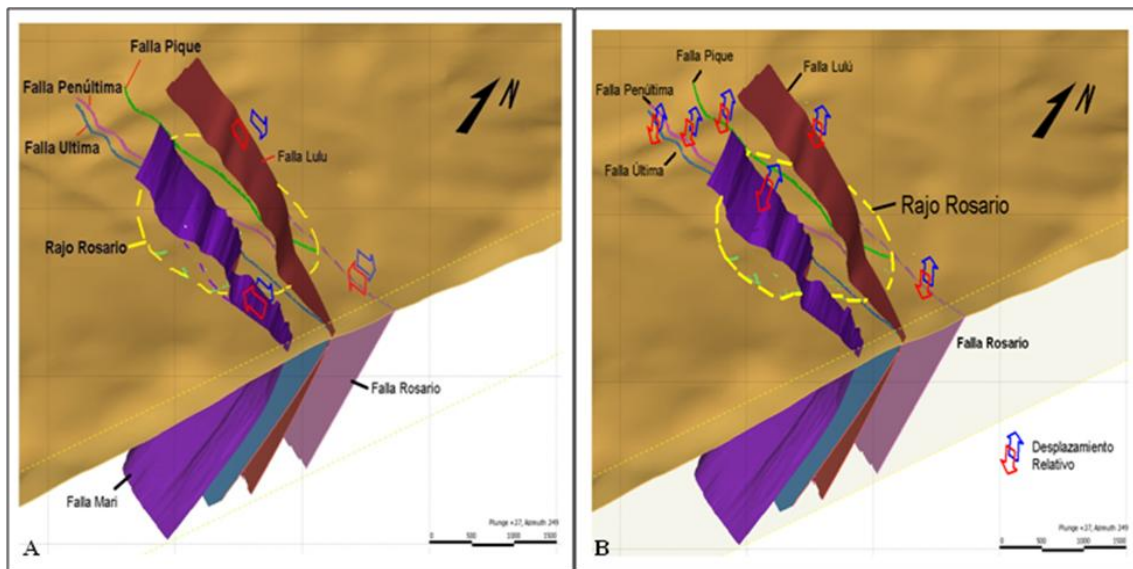


Figura 7. Componente de movimiento horizontal y vertical en Fallas principales de Rosario. Tomado de Informe interno de la Compañía, Superintendencia de Modelamiento y Reservas (2010).

2.2.5 Geología Económica

El Distrito Collahuasi alberga una variedad de recursos minerales, tanto metálicos como no metálicos, de gran importancia. En el ámbito metálico, se encuentran sectores con mineralización de cobre, molibdeno, oro y plata, mientras que en el ámbito no metálico destacan los depósitos de azufre y salares (Sobarzo, 2010).

De acuerdo con Camus (2003), la principal fuente de mineralización son los sistemas de pórfidos Cu-Mo, especialmente notables en los sistemas hidrotermales de Rosario, Ujina, Quebrada Blanca y Copaquire (figura 8). El cobre es el recurso de mayor relevancia económica, seguido del molibdeno y la plata, con una distribución de la mineralización a lo largo de fracturas tipo veta-falla, en vetillas y de manera disseminada.

Entre las principales menas se encuentran calcopirita, bornita, molibdenita, y localmente, tenantita y enargita, mientras que las menas supérgenas incluyen calcosina y covelina (Camus, 2003). Los eventos de mineralización principales se registran en Ujina, Quebrada Blanca y Rosario, con edades de 35.2 ± 0.3 Ma, 35 ± 0.4 Ma y 34.4 ± 0.3 Ma, respectivamente, según datos de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Masterman y otros., 2004). Además, el distrito cuenta con depósitos de tipo epitermal de alta sulfuración, asociados a sistemas de vetas de Cu-Au-Ag, así como con mineralización exótica de cobre que cementa gravas en los remanentes de paleocanales del Neógeno, asociados al sistema Rosario (Masterman, 2003).

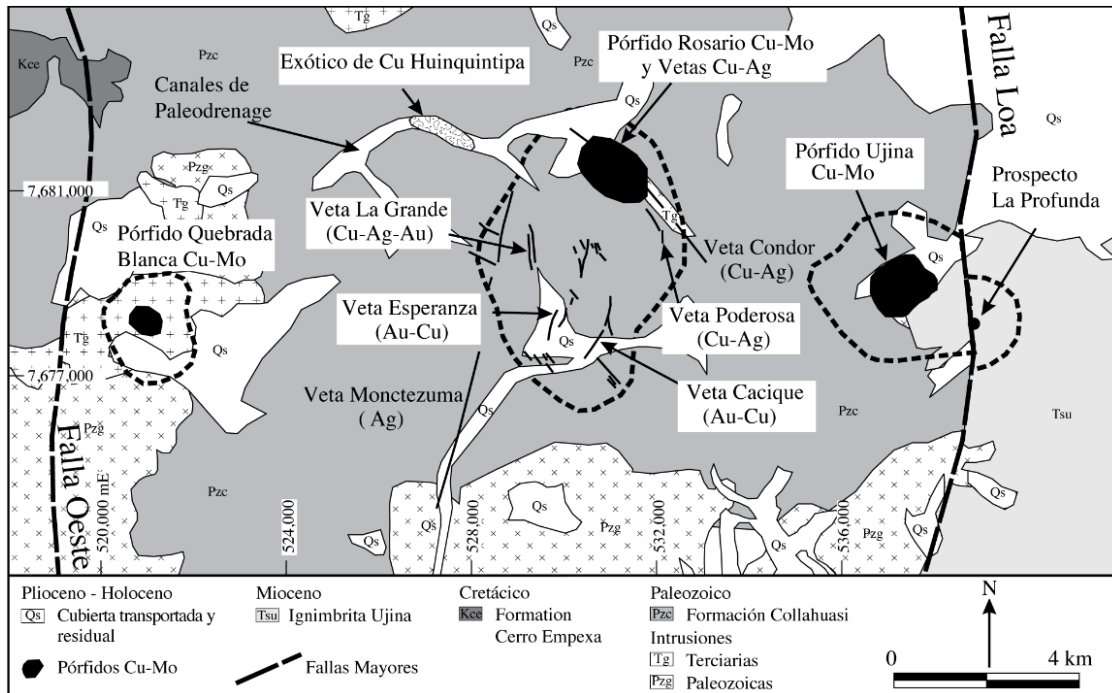


Figura 8. Mapa del distrito Collahuasi, donde resaltan los sistemas estructurales principales Falla Oeste y Loa, los principales yacimientos Quebrada Blanca (QB), Rosario (R) y Ujina (U). Modificado de Masterman (2003).

CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO ROSARIO OESTE

3.1 Generalidades

El yacimiento Rosario Oeste representa un depósito de Cu-(Ag) tipo epitermal de alta sulfuración, situado a una distancia de 1,5 kilómetros al suroeste del pórfido cuprífero de Rosario. Existe una relación espacial y genética entre ambos yacimientos, vinculada a un sistema magmático-hidrotermal. No obstante, se observan diferencias geológicas significativas: el depósito epitermal de alta sulfuración de Rosario Oeste está controlado por estructuras N-S, NNW-SSE y NNE-SSW subverticales, mientras que Rosario corresponde a un pórfido cuprífero Cu-Mo-(Ag) con un control estructural NW/30-40° SW.

En cuanto a la mineralización, en Rosario Oeste, más del 90% es de carácter supérgeno, alojado en fallas-vetas emplazadas en rocas volcano-sedimentarias, mientras que, en Rosario el 95% es de origen hipógeno, asociado a intrusivos Eoceno-Oligoceno.

3.2 Litología

3.2.1 Rocas Estratificadas

Las rocas estratificadas presentes en el yacimiento Rosario Oeste forman parte del miembro La Grande de la Formación Collahuasi, datada en el Paleozoico superior. Esta secuencia está principalmente compuesta por unidades volcánicas de base ácida, como dacitas y riolitas, las cuales se superponen con rocas volcánicas andesíticas intercaladas con niveles sedimentarios de origen volcanogénico. A partir de esta descripción, se han identificado localmente tres unidades distintas: la Unidad Dacítica, la Unidad Andesítica y la Unidad Sedimentaria Clástica (Figura 9). Estas unidades se encuentran dispuestas en una secuencia homoclinal, con una orientación predominante de N30°W/ 35-50°NE (Sanhueza y otros, 2006).

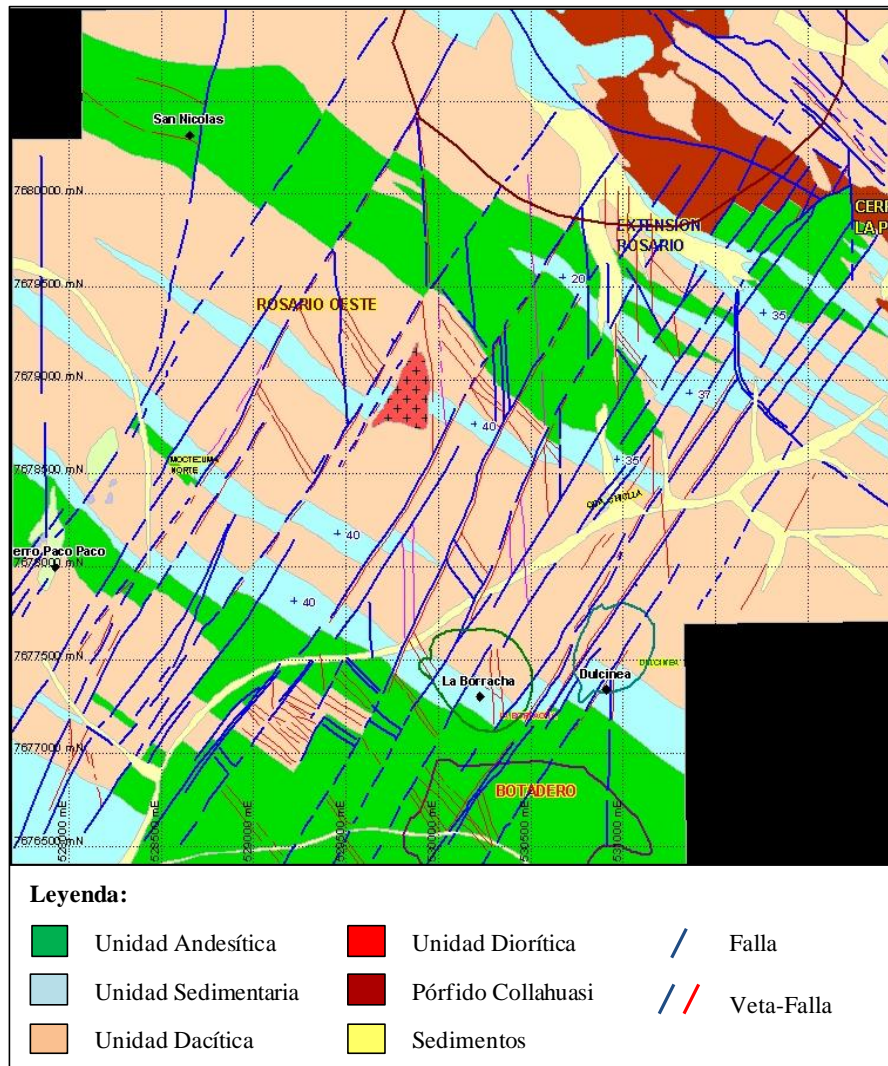


Figura 9. Mapa litológico de Rosario Oeste. Tomado de informe interno de la Compañía (2009).

3.2.1.1 Unidad Dacítica

Está compuesta por dacitas, riolitas, tobas de cristales y brechas de composición dacítica. El tipo litológico más abundante son tobas dacíticas de cristales, localmente con textura de soldamiento, con predominio de fragmentos de cristales, y en menor medida fragmentos líticos de tamaño lapilli, en una matriz vítrea. En cortes transparentes (Cornejo, 2005) se describen nítidamente rasgos piroclásticos, ojos de cuarzo parcialmente absorbidos, shards quebrantados y pómez aplastadas (Sanhueza y otros., 2006). Estos afloramientos se encuentran predominantemente hacia el sur del depósito donde presentan gran extensión de superficie.

3.2.1.2 Unidad Andesítica

La unidad está compuesta por andesitas, andesitas basálticas, brechas andesíticas, ocoítas y sills andesíticos y microdioríticos en cantidades limitadas. Las andesitas típicamente muestran una textura porfídica, pudiendo variar entre afaníticas y, en algunos casos, amigdaloidales. Al observarlas bajo microscopio, se pueden identificar fenocristales relictos de piroxeno y olivino, inmersos en una matriz de plagioclasa, piroxeno, magnetita y, ocasionalmente, apatito (Cornejo, 2005). Se encuentran niveles comunes de andesitas parcialmente brechizadas o intercalaciones más potentes de brechas andesíticas. En general, es frecuente la presencia de digitaciones de areniscas o brechas sedimentarias (Sanhueza y otros, 2006). Estas rocas tienen una distribución predominante en el sector centro y norte del área.

3.2.1.3 Unidad Sedimentaria

La formación consiste en intercalaciones de potencia variable y está compuesta por rocas clásticas de diversos orígenes y tamaños de clastos. Predominantemente, estas rocas son brechas sedimentarias y brechas conglomerádicas que contienen clastos principalmente de rocas andesíticas, con escasas presencias de dacitas. La matriz está compuesta por fragmentos de andesita, minerales arcillosos, clorita y esmectitas.

En menor medida, se encuentran areniscas feldespáticas con una matriz principalmente clorítica y arcillosa, que pueden contener una proporción mayor de fragmentos de dacitas o cuarzo, aunque siempre subordinados a los de composición andesítica. Las areniscas finas y las limolitas se presentan en forma de digitaciones menores a 1 m (según Sanhueza y otros, 2006). Estas rocas clásticas se encuentran intercaladas principalmente en la unidad andesítica, siendo más abundantes hacia el extremo norte del proyecto.

3.2.2 Rocas Intrusivas

La ocurrencia de rocas intrusivas es más acotada y se limitan a cuerpos menores, localmente se encuentran pórfidos de composición granodiorítica a granítica cuya relación con los pórfidos cercanos Collahuasi (59 Ma, Vergara, 1978; Munchmeyer y otros, 1984; Clark y otros, 1997) y Rosario (34.2 a 32.9 Ma, Vergara, 1978; Munchmeyer y otros, 1984; Clark y otros, 1997) no se ha definido claramente. Además, se reconocen en sondajes diques y pequeños stocks de composición diorítica y grano fino. Los cuerpos intrusivos reconocidos indican que el sistema vetiforme de Rosario Oeste podría representar la expresión superficial de mineralización tipo pórfido en profundidad (Masterman, 2003).

Se reconocen dos tipos de rocas porfídicas en Rosario Oeste:

- **Pórfido de Grano Grueso**

Pórfido granodiorítico a granítico que se puede considerar equivalente al Pórfido Collahuasi. Típicamente es de grano grueso con masa fundamental fanerítica, sin embargo, pueden ocurrir variaciones texturales. Los fenocristales corresponden a feldespato-K, plagioclasa y cuarzo, y los máficos presentes son biotita y hornblenda (Sanhueza y otros, 2006).

- **Pórfido de Grano Fino**

Composición granodiorítica de grano medio a fino, correlacionable al Pórfido Rosario. Los fenocristales predominantes son plagioclasa y cuarzo, los máficos corresponden a biotita y hornblenda (Sanhueza y otros, 2006).

3.3 Estructuras Rosario Oeste

Las estructuras presentes en Rosario Oeste se clasificaron respecto a su rumbo y magnitud, las fallas mayores y fallas menores corresponden a las superiores e inferiores a 30 cm de potencia, respectivamente (Figura 10). De acuerdo a lo anterior, las fallas expuestas en

superficie se agrupan en tres familias principales de orientación NE-SW, N-S, y NNW-SSE a NW-SE (Figura 2.6), (Oyarzún, 2010).

- Estructuras NE-SW : A este grupo pertenecen las vetas “Monctezuma”, “La Grande” y “Anita” (Figura 2.6), representan los lineamientos mayores en el yacimiento con una actitud general $N20^{\circ}-35^{\circ}E$ y manteos subverticales. Estas estructuras tienen continuidad fuera de los límites del yacimiento y forman parte de una serie de fallas relacionadas a la mineralización en Rosario Oeste (Oyarzún, 2010).
- Estructuras N-S: Representadas por las vetas Don Manuel y Esperanza, con actitud N-S ($\pm 5^{\circ}$) y manteos subverticales. Se ubican en el centro-sur y extremo este del yacimiento (Oyarzún, 2010).
- Estructuras NNW-SSE a NW-SE: Estas fallas tienen una mayor frecuencia en el yacimiento, presentan rumbos generales $N20^{\circ}W$ y $N40^{\circ}W$ con manteos de 60° a 85° al este. La estructura de mayor envergadura es la falla (veta) Forastera de orientación $N35^{\circ}W$ (Oyarzún, 2010).

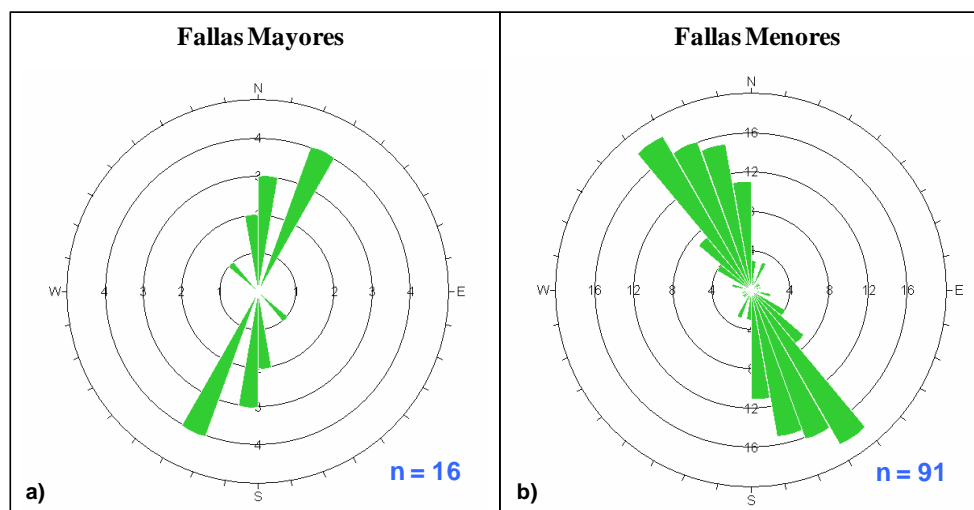


Figura 10. Diagrama de Rosetas en que se muestra las orientaciones preferenciales de fallas mayores y menores (a y b, respectivamente) en Rosario Oeste. Tomado de Oyarzun (2010).

El patrón de fallas coincide espacialmente con el emplazamiento de la mayor parte de las vetas reconocidas en el pasado como, por ejemplo, las vetas Don Manuel, Esperanza y Forastera, que corresponden a las fallas O, P, Q de la Figura 11 (Sanhueza y otros, 2006).

Los rasgos estructurales identificados en Rosario Oeste son difíciles de reconocer y difieren de los observados en el yacimiento Rosario, donde domina el Sistema de falla Rosario correspondiente a un set de fallas normales reactivadas dextralmente, de rumbo NW con manteos entre 30°- 40° al SW. Lo anterior sugiere que se trataría de dominios estructurales distintos, como se observa en el siguiente cuadro comparativo (tabla 1).

Tabla 1. Caracterización de Dominios estructurales de los yacimientos Rosario y Rosario Oeste. Modificado de Sanhueza y otros, 2006.

Dominio Estructural Rosario Oeste	Dominio Estructural Rosario
Fallas verticales de rumbo NNW-SSE, NW-SE y NNE-SSW	Fallas normales NW-SE de bajo ángulo
Asociadas a deformación transtensional	Asociadas a zona de acortamiento
Débil alzamiento-exhumación	Fuerte alzamiento-exhumación
Profuso fracturamiento secundario	Zonas de fracturamiento delgadas y de bajo ángulo
Favorable para enriquecimiento secundario	Enriquecimiento restringido a fallas
Mineralización primaria profunda	Mineralización primaria somera o aflorando

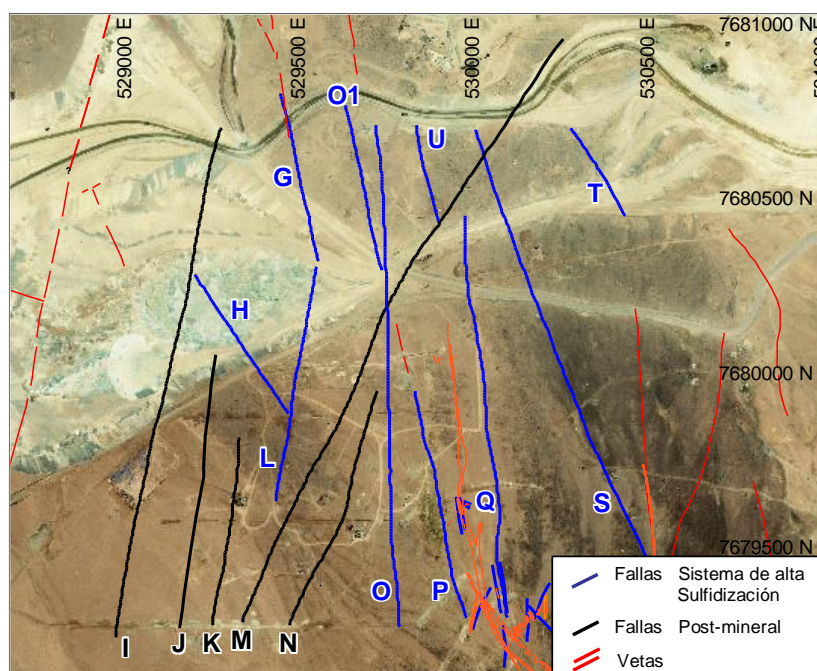


Figura 11. Plano compilado con estructuras principales en Rosario Oeste. Fallas proyectadas de planta 4.500, vetas de mapa de superficie. Tomado de Sanhueza y otros. (2006).

3.4 Alteración Hidrotermal

En el depósito epitermal de alta sulfuración se reconocen tres tipos de alteraciones, la alteración propilítica, argílica y alteración supérgena.

3.4.1 Alteración propilítica

Se hace referencia a la presencia de rocas verdes con la asociación clorita-epidota-pirita, sin embargo, el origen de la misma no se ha definido claramente. Esta es anterior a la argilización y podría estar relacionada al sistema hidrotermal asociado al yacimiento, o a un sistema pórfido, ya sea el Sistema Rosario o un cuerpo en profundidad aún no reconocido.

La alteración propilítica ocurre en todas las rocas del entorno, aunque con distintas intensidades, afectando principalmente a la unidad andesítica. En dacitas de la periferia del depósito ocurre como propilitización de minerales ferromagnesianos y como vetillas de clorita-epidota. En términos generales esta alteración podría considerarse como background en todo el depósito, a la cual se le sobreimpone la alteración argílica. Al interior del depósito, son observables bloques de propilítico que no han sido afectados por la argilización, especialmente asociados a zonas con escaso fallamiento o fracturamiento (Sanhueza y otros, 2006).

3.4.2 Alteración argílica

La alteración argílica se sobreimpone a la alteración propilítica y constituye el rasgo más característico del depósito, encontrándose fuertemente asociada a la mineralización y controlada fundamentalmente por el fallamiento, tanto en ocurrencia e intensidad. Se relaciona a dos eventos hidrotermales mayores:

- Argilización relacionada a un sistema epitermal de alta sulfuración (argílica temprana), cuya ocurrencia aparentemente estaría controlada por litología caracterizada por la asociación pirofilita-dickita-caolinita-(alunita) en las fallas principales, y caolinita hacia sectores laterales, mientras que en las zonas ubicadas entre fallas domina la asociación illita-sericita.
- Argilización relacionada a los eventos supérgenos.

3.4.3 Alteración supérgena

Caracterizada principalmente por caolinita, asociaciones de arcillas de baja temperatura como halloysita, montmorillonita, y esmectitas, además de óxidos de Fe, la alteración supérgena se superpone a las alteraciones propilítica y argílica (Sanhueza y otros, 2006).

3.5 Mineralización

La mineralización de Cu en Rosario Oeste se asocia a un sistema de vetas de alta sulfuración con altas leyes de cobre y amplias zonas de enriquecimiento secundario, además de mineralización diseminada de menor ley, que antiguamente fueron explotadas por sus contenidos de Cu y Au (Masterman, 2003). Un rasgo característico dentro del depósito es la ocurrencia de vetillas y vetas masivas de sulfuros, que son responsables de los mayores aportes de Cu. Se reportan contenidos de plata relativamente altos (3.68 gr/ton) y de Mo bajos (17.93 ppm). Cabe destacar que no se han reconocido sistemas porfídicos tipo Rosario en la zona (Sanhueza y otros, 2006).

3.5.1 Sulfuros

Los sulfuros de Cu recurrentes dentro del depósito son enargita, covelina, calcopirita, bornita y calcosina secundaria, siendo esta última la más abundante (~95% del total de sulfuros de Cu). Por otro lado, dentro de la zona de enriquecimiento la pirita es muy común, y de una abundancia estimada de 75% del total de sulfuros.

La calcosina ocurre como reemplazo sobre pirita, por tanto, adquiere la fábrica y distribución de ésta, encontrándose diseminada, en vetillas y vetas. La ley en el secundario es bastante variable, con un valor medio de 1.22% CuT, con algunos altos que superan el 20% CuT, relacionado a vetas de pirita – calcosina (Sanhueza y otros, 2006).

3.5.2 Óxidos

La ocurrencia de óxidos está relacionada a rocas argilizadas principalmente en zonas de falla, y se caracteriza por la presencia de óxidos de Fe o limonitas derivadas de la lixiviación de pirita y sulfuros de cobre, y óxidos negros principalmente copper wad, y neotocita. También

hay zonas con mineralización oxidada de cobre compuesta principalmente por crisocola, pero en general corresponden a zonas de poca expresión y continuidad. La ley media de los óxidos negros es 0.25% CuT, mientras que para los óxidos verdes es de 0.46 % CuT (Sanhueza y otros, 2006).

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

Las metodologías utilizadas para abordar esta investigación fueron divididas en 3 etapas: Análisis de información histórica, análisis de hallazgos y redefinición de unidades para modelamiento. Estas contemplan etapas de gabinete y terreno. A continuación, se describen las actividades desarrolladas en cada una de las etapas y su flujo de trabajo (Figura 12).

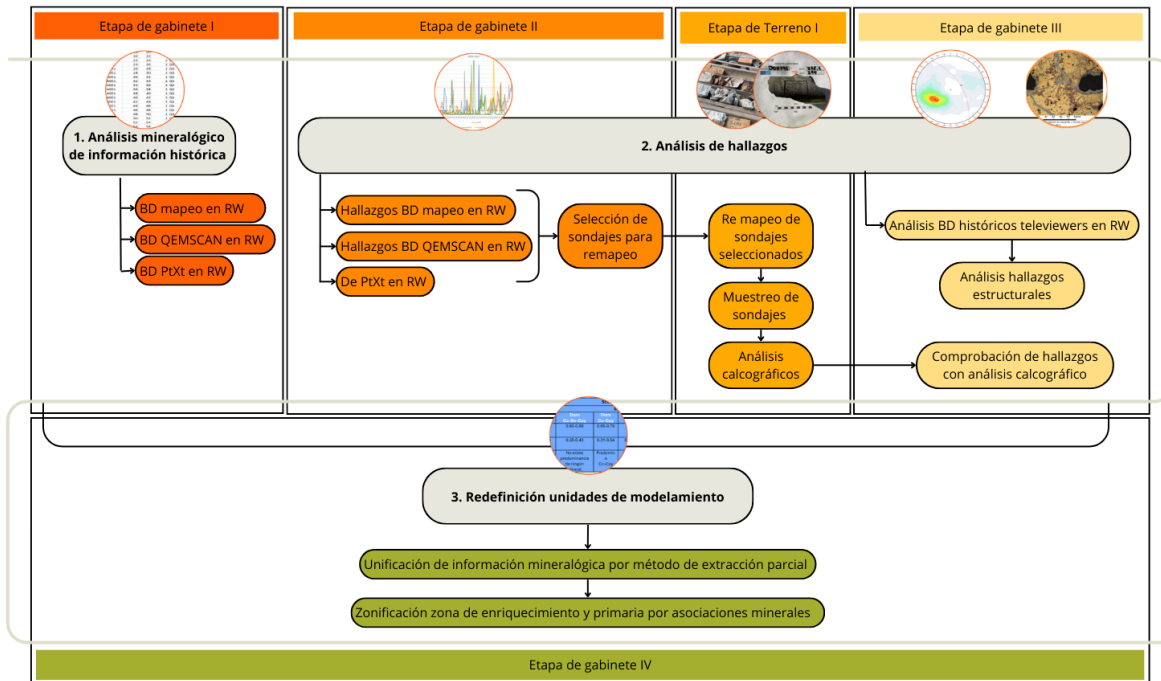


Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología utilizada secuencialmente en esta investigación.

4.1 Análisis de información histórica

Esta primera etapa es la más extensa, correspondió a un trabajo de gabinete que consistió en la revisión de tres bases de datos relevantes para el análisis mineralógico: la base de datos del mapeo geológico de sondajes, los reportes históricos de análisis QEMSCAN, y los datos de PtXt. Estos dos últimos métodos provienen de la información geometalúrgica existente, adaptados a sus fines específicos.

4.1.1 Análisis mineralógico en información histórica de mapeo en Rosario Oeste

El análisis comenzó con la revisión de la base de datos histórica. Según esta, se adoptó el uso del punto (.) como separador decimal y de la coma (,) para los miles a lo largo de todo el documento, manteniendo coherencia con el formato original de los datos. A continuación, se aplicó un filtro para aislar la información correspondiente a Rosario Oeste (RW). Una vez filtrada la información, se procedió a la categorización de los datos disponibles, enfocándose en los términos utilizados en el mapeo geológico del secundario. Esta categorización incluyó tanto las asociaciones minerales estandarizadas como los términos "Secundario Fuerte" (SECF) y "Secundario Débil" (SECD), definidos para distinguir las distintas manifestaciones mineralógicas observadas durante el mapeo.

4.1.2 Análisis mineralógico de datos históricos QEMSCAN en Rosario Oeste

El análisis mineralógico mediante el equipo QEMSCAN comenzó con la recopilación de información geometalúrgica, abarcando reportes históricos de campañas realizadas entre 2011 y 2022. Esto permitió construir una base de datos histórica para analizar las relaciones mineralógicas del depósito completo.

Inicialmente, se aplicaron dos filtros a los datos. El primero consistió en seleccionar exclusivamente la información correspondiente a Rosario Oeste. El segundo filtro, orientado al análisis del secundario, consideró las siguientes reglas de negocio: una ley de cobre total (CuT) mayor a 0.3% y una razón de solubilidad superior a 0.2.

Con la información filtrada, se realizó un análisis detallado de los datos mineralógicos. Este análisis se centró en los conceptos SECF y SECD utilizados en el mapeo, con el objetivo de identificar patrones y generar zonas discretas para el secundario en Rosario Oeste. El método QEMSCAN se consideró el más preciso para el reconocimiento mineralógico debido a su capacidad para identificar minerales con alta resolución.

4.1.3 Análisis mineralógico de resultados históricos de extracción parcial en Rosario Oeste

De manera similar al análisis QEMSCAN, se recopiló información de reportes geometalúrgicos históricos poniendo énfasis en parámetros de cobre férrico y cobre cianurable, esta vez de campañas realizadas entre 2008 y 2022, para construir una base de datos de PtXt. A esta base de datos se le aplicaron los mismos filtros previamente descritos: uno para aislar la información específica de Rosario Oeste y otro basado en las reglas de negocio (ley de CuT > 0.3% y razón de solubilidad > 0.2) para enfocar el análisis en el secundario de Rosario Oeste.

El análisis incluyó el cálculo de promedios de los conceptos mineralógicos SECF y SECD reconocidos en el mapeo, así como un estudio de los radios de PtXt para evaluar su comportamiento cualitativo. Cabe destacar las limitaciones cuantitativas de este método, ya que considera únicamente tres elementos en sus cálculos normativos, lo que no es plenamente aplicable al contexto de cinco minerales interactuando, como es el caso en CMDIC.

4.2 Análisis de hallazgos

Esta etapa incluye dos fases de gabinete y una de terreno, destinadas a analizar, validar y complementar los hallazgos encontrados en la información histórica:

1. **Trabajo de gabinete inicial:** En esta fase, se analizan los hallazgos identificados en las bases de datos históricas, buscando establecer relaciones entre los datos disponibles.
2. **Trabajo de terreno:** En esta etapa, se realizaron actividades de remapeo y recolección de muestras, con el objetivo de obtener información adicional mediante análisis de laboratorio en cortes pulidos.
3. **Trabajo de gabinete posterior:** Finalmente, se analizó la información generada en el laboratorio. Además, se llevó a cabo un análisis de datos televiewer para los

secundarios de Rosario Oeste, a fin de complementar la caracterización mineralógica con la orientación preferencial de la zona enriquecida.

4.2 1 Análisis de hallazgos mineralógicos en información histórica de Rosario Oeste

En esta fase de gabinete, se compararon los resultados mineralógicos obtenidos de las bases de datos generadas a partir de los tres métodos analizados (mapeo, QEMSCAN y PtXt). El objetivo fue identificar relaciones y asociaciones mineralógicas que permitieran delimitar zonas del secundario, sustentando estas zonas en observaciones visuales del mapeo y en los análisis mineralógicos realizados en laboratorio. Para ello, se seleccionaron tramos de sondajes que contaran con información de los tres métodos, permitiendo así un análisis comparativo de los datos mineralógicos disponibles.

4.2.2 Hallazgos en el mapeo y muestreo de sondajes en Rosario Oeste

La fase de terreno se llevó a cabo en función de los hallazgos previos. Inicialmente, se mapearon tramos de sondajes analizados en la etapa anterior, seleccionando aquellos que contuvieran información de los tres métodos estudiados. Posteriormente, se recolectaron muestras de estos tramos para realizar descripciones calcográficas que facilitaran el reconocimiento mineralógico, permitiendo comprender y validar los hallazgos obtenidos en el cruce de información histórica.

4.2.3 Comprobación de hallazgos mineralógicos en resultados calcográficos de laboratorio

Tras la etapa de terreno, se retornó al gabinete para analizar los resultados calcográficos obtenidos en el laboratorio. Esta fase se centró en validar las conclusiones preliminares generadas a partir de la inspección visual durante la fase de terreno, consolidando así los hallazgos mineralógicos.

4.2.4 Hallazgos estructurales en el análisis de datos televiseurs históricos de Rosario Oeste

En esta etapa, se buscó complementar la zonificación del secundario de Rosario Oeste incorporando la orientación estructural específica de la mineralización de alta ley en el depósito, excluyendo otras zonas minerales. Para ello, se generó una base de datos de

televiewer que incluyó únicamente tramos pertenecientes a zonas del secundario. Los datos recopilados fueron analizados mediante proyección estereográfica en el software DIPS, lo que permitió identificar dominios estructurales según la información obtenida.

4.3 Redefinición de unidades de modelamiento de la zona de enriquecimiento de Rosario Oeste.

En esta etapa, se consolidó la información recopilada para unificar y representar las zonas de enriquecimiento, enfocándose en su viabilidad y aplicabilidad práctica. Se utilizaron los datos obtenidos mediante el método de PtXt, analizando los radios de extracción para establecer relaciones que permitieran diferenciar y clasificar la información.

Además, estos datos fueron complementados con los resultados mineralógicos específicos proporcionados por el método QEMSCAN, lo que permitió asignar rangos numéricos a las asociaciones mineralógicas identificadas. Este enfoque facilitó la delimitación precisa de las zonas, proporcionando una base sólida para el modelamiento de la zona de enriquecimiento en Rosario Oeste.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1 Resultados del análisis de información histórica

5.1.1 Resultados del análisis mineralógico en información histórica de mapeo en Rosario Oeste

La base de datos histórica (BD) abarcó información de ambos depósitos, diferenciados mediante un indicador ("Flag") que señala si el sondaje corresponde al yacimiento Rosario (Flag=1) o Rosario Oeste (Flag=2). Estas bases de datos, actualizadas y publicadas anualmente, constituyen el insumo principal para los procesos de modelamiento y estimación de la compañía.

La BD histórica completa utilizada en este análisis corresponde a la versión cerrada al 15 de marzo de 2023, que incluye un total de 3,600 sondajes, equivalentes a 1 millón de metros perforados. Sin embargo, para los fines de este estudio, se analizó únicamente la información del depósito Rosario Oeste, que comprende 1,300 sondajes y un total de 440 mil metros de mapeo. La distribución espacial de los sondajes históricos se representa en planta y perfil en la Figura 13.

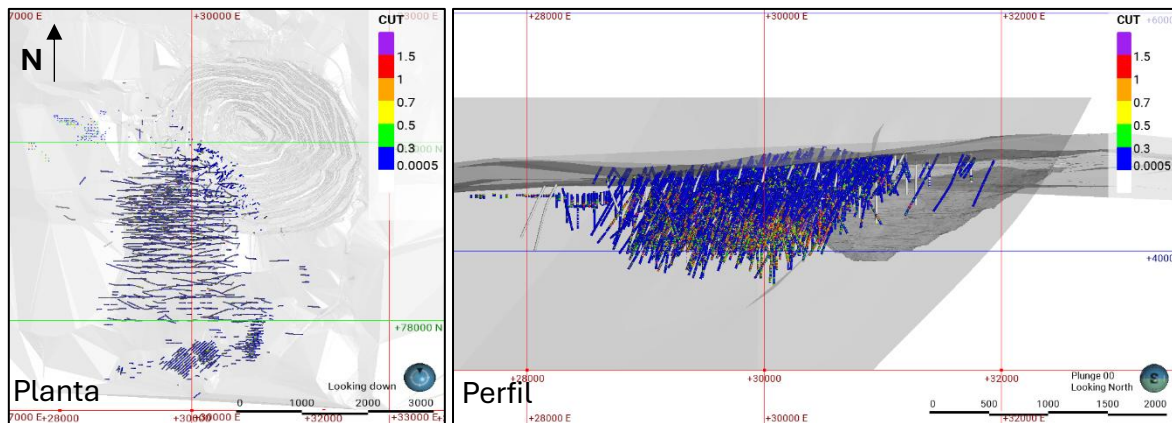


Figura 13. Representación de los sondajes históricos en planta y perfil para Rosario Oeste.

De estos 440 mil metros, aproximadamente 81 mil metros corresponden a la macrozona mineral de secundario, representando el 21% de los datos mapeados en Rosario Oeste (Figura 14).

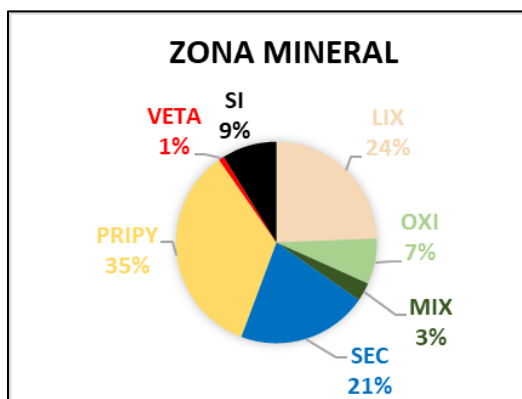


Figura 14. Distribución porcentual de la zona mineral de Rosario Oeste.

En la zona de enriquecimiento de Rosario Oeste, el mapeo identificó dos categorías mineralógicas principales: Secundario Fuerte (SECF) y Secundario Débil (SECD). Estas categorías se definen en función de la proporción de sulfuros secundarios:

- SECF: Más del 80% de sulfuros secundarios.
- SECD: Coexistencia de sulfuros primarios y secundarios, con una proporción de sulfuros secundarios entre el 20% y el 80%.

Estas categorías fueron reconocidas en los tramos mapeados de los sondajes, con un total de 41 mil metros discretizados bajo estos conceptos, lo que representa aproximadamente el 50% del total de los secundarios en Rosario Oeste (Figura 15).

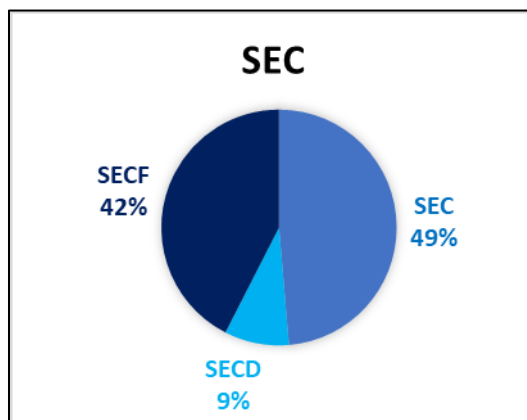


Figura 15. Distribución porcentual de la zona mineral secundaria (SEC), clasificada en Secundario Fuerte (SECF) y Secundario Débil (SECD) en Rosario Oeste.

Adicionalmente, la BD histórica de mapeo identificó asociaciones mineralógicas características de la zona de enriquecimiento, basadas en los minerales predominantes. De los 81 mil metros clasificados como secundarios en Rosario Oeste, solo 10 mil metros (13% del total de datos secundarios) han sido discretizados por asociaciones minerales específicas.

Dentro de este grupo:

- El 93% corresponde a la asociación Pirita-Calcosina (Py-Cc), típica de la definición de SECF (Figura 16).
- El 7% restante se distribuye entre otras asociaciones minerales presentes, correspondientes a SECD (Figura 16).

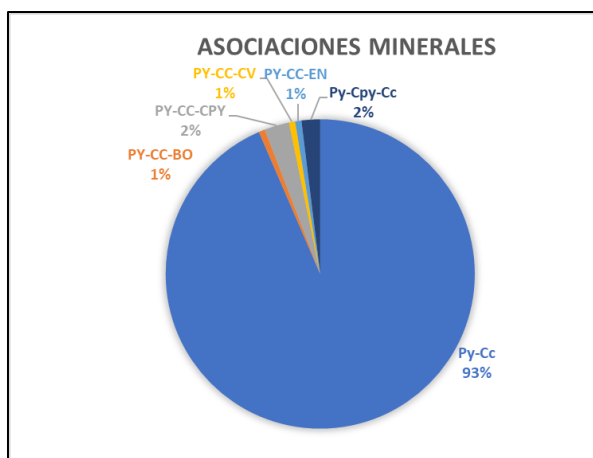


Figura 16. Asociaciones minerales correspondiente al secundario de Rosario Oeste.

5.1.2 Resultados del análisis mineralógico de datos históricos QEMSCAN en Rosario Oeste

obtenida mediante el método QEMSCAN, se recopiló información de todas las campañas realizadas entre 2011 y 2022, disponibles en el área de Geometalurgia de la compañía. Esta tarea permitió construir una base de datos que incluye un total de 100 sondajes con 2,079 metros de muestras analizadas específicamente para Rosario Oeste (RW).

A fin de enfocar el análisis en la zona de mineralización secundaria, se aplicaron dos filtros:

- Ley de cobre total (CuT) > 0.3%.
- Razón de solubilidad > 0.2.

Tras aplicar estos criterios, la base de datos se redujo a 57 sondajes que contienen 1,213 metros de muestras QEMSCAN, cuya distribución espacial en el depósito se ilustra en la Figura 17.

Tabla 2. Datos históricos de las campañas QEMSCAN (2011-2022) para RW.

BD QEMSCAN RW		BD QEMSCAN (Filtrada)	
N° Sondajes	100	N° Sondajes	57
Metros totales	2,079	Metros totales	1,213

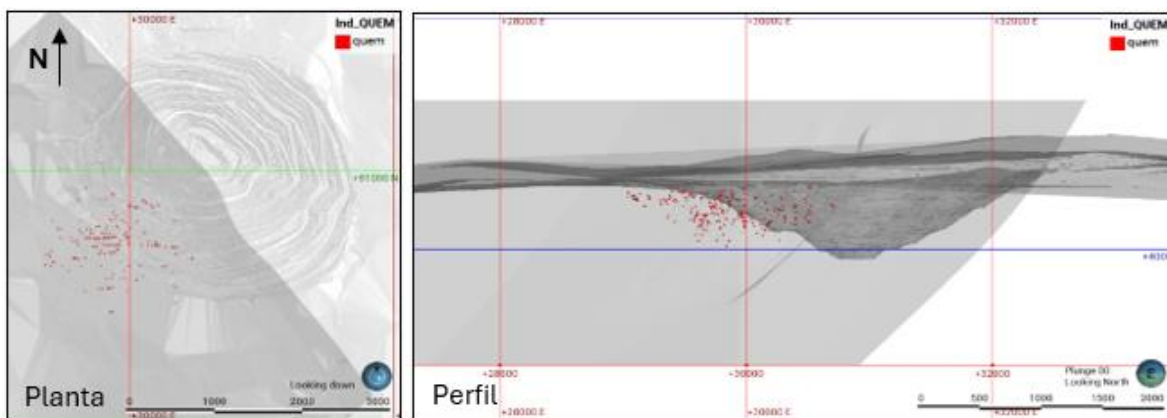


Figura 17. Representación espacial de muestras QEMSCAN en planta y perfil para RW.

Se analizaron los promedios en peso de los sulfuros presentes en las muestras filtradas, clasificándolos según las definiciones de Secundario Fuerte (SECF) y Secundario Débil (SECD) establecidas en el mapeo, para observar su comportamiento mineralógico en laboratorio (Tabla 3).

Tabla 3. Composición mineralógica promedio (% en peso) de sulfuros en datos QEMSCAN para RW.

Zona Mineral	Calcopirita	Bornita	Calcosina - Diagenita	Covelina	Enargita - Tenantita	Pirita
SEC	0.28	0.16	1.20	0.04	0.29	8.97
SECD	0.23	0.09	0.96	0.01	0.90	17.27
SECF	0.31	0.20	1.22	0.01	0.11	8.33

Los datos obtenidos del análisis mineralógico mediante QEMSCAN confirman que el depósito Rosario Oeste corresponde a un depósito epitermal de alta sulfuración, con una presencia extremadamente baja de covelina, representando solo el 0.01% de su composición (Tabla 3). Este resultado reafirma la naturaleza geológica del depósito y su mineralización característica.

Al analizar la relación entre sulfuros primarios y secundarios gráficamente en Figura 18A, los datos no discretizados (SEC) muestran una proporción promedio de 40% de sulfuros primarios y 60% de sulfuros secundarios, estableciendo un comportamiento general para el depósito. En cuanto a la categoría de Secundario Fuerte (SECF), su composición mineralógica refleja una relación similar a la de los datos no discretizados, con una proporción de 40% de sulfuros primarios y 60% de sulfuros secundarios. Esto no coincide con su definición conceptual, que requiere que más del 80% de los sulfuros presentes sean secundarios. Por otro lado, la categoría de Secundario Débil (SECD) presenta una relación promedio de 45% de sulfuros primarios y 55% de sulfuros secundarios, lo que sí está dentro del rango definido para esta categoría, que abarca entre un 20% y un 80% de sulfuros secundarios.

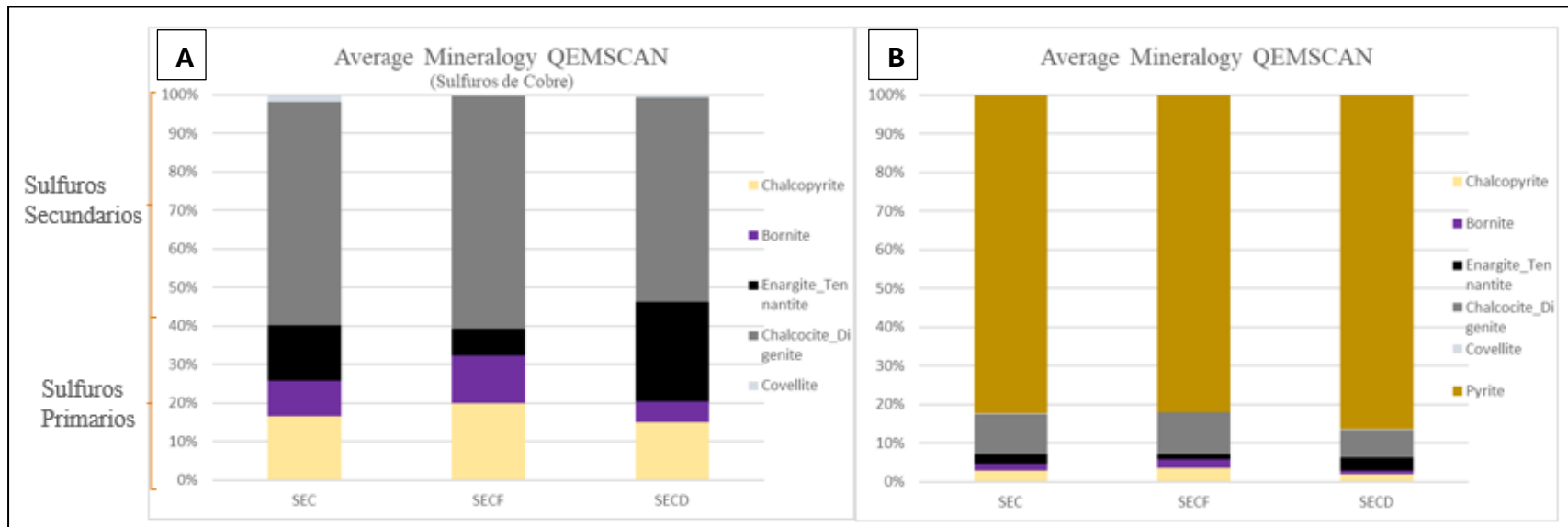


Figura 18. Gráficos de la composición promedio de sulfuros en la base de datos QEMSCAN para RW. **A** Mineralogía de sulfuros de cobre. **B** Pirita más sulfuros de cobre.

El análisis confirma que el método QEMSCAN, reconocido por su alta precisión en la identificación mineralógica, revela inconsistencias significativas entre las definiciones teóricas utilizadas en el mapeo y los datos obtenidos en laboratorio. La definición de Secundario Fuerte (SECF) no es respaldada por los resultados analíticos, ya que no se alcanza el umbral de sulfuros secundarios estipulado. Por su parte, aunque la categoría de Secundario Débil (SECD) sí se ajusta a los datos, su definición es demasiado amplia, lo que dificulta su utilidad para una discretización precisa y funcional de la mineralización secundaria en Rosario Oeste.

5.1.3 Resultados del análisis mineralógico de datos históricos de extracción parcial en Rosario Oeste

El análisis de los datos históricos obtenidos mediante el método de PtXt comenzó con la recopilación de reportes de campañas realizadas entre 2008 y 2022, proporcionados por el área de geometalurgia de la compañía. Esta información fue utilizada para generar la base de datos inicial.

Para focalizar el análisis en el secundario de Rosario Oeste (RW), se aplicaron dos filtros (Tabla 4):

1. Filtro espacial, para delimitar los datos exclusivamente al depósito Rosario Oeste, lo que permitió obtener 28,264 metros correspondientes a 261 sondajes.
2. Filtro técnico, diseñado para restringir la información a las reglas de negocio de la compañía, considerando una ley de cobre mayor al 0.3% ($CuT > 0.3$) y una razón de solubilidad mayor a 0.2. Este filtro redujo la base de datos a 3,623 metros correspondientes a 89 sondajes. La distribución espacial de los datos resultantes se muestra en la Figura 19.

Tabla 4. Datos históricos de las campañas de extracción parcial (2008-2022) para Rosario Oeste.

BD RW		BD RW (Filtrada)	
N° drilling	261	N° drilling	89
Total meters	28,264	Total meters	3,623

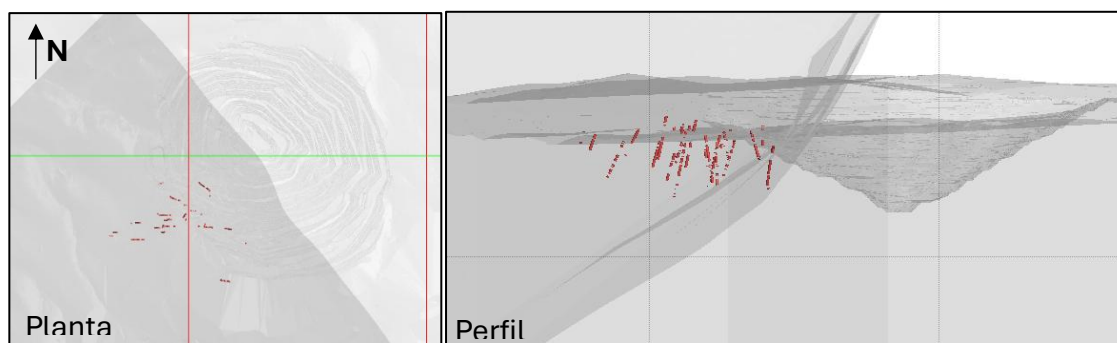


Figura 19. Representación espacial de las muestras analizadas en planta y perfil en RW.

Este método ofrece información sobre el cobre férrico (FSCu) y el cobre cianurable (CNCu), los cuales, a través de la mineralogía normativa, permiten calcular el porcentaje en peso de los minerales. Sin embargo, presenta una desventaja significativa: su aplicación se limita a sistemas ternarios, es decir, aquellos con tres minerales principales. En el caso de Rosario Oeste, el sistema incluye cinco sulfuros de cobre principales: calcopirita (Cpy), calcosina (Cc), bornita (Bo), covelina (Cv) y enargita (En). Esto dificulta relacionar los resultados históricos directamente con la mineralogía normativa.

Para superar esta limitación, se analizaron los datos mediante radios de PtXt, calculados como la relación entre el FSCu o CNCu y el CuT de cada muestra. Esto generó una nube de puntos (Figura 19) que se superpuso a valores límite estandarizados de PtXt para cada mineral (Tabla 5), lo que permitió generar triangulaciones mineralógicas de sulfuros de cobre y analizar la mineralogía específica.

En la Figura 20 se muestran los 3,623 metros de muestras analizadas, y se observa que la mayoría de los puntos se agrupan en el triángulo pequeño superior, definido por Cpy, Bo y Cc. Esto confirma lo señalado por los datos QEMSCAN, que indican que la Cv no es un mineral predominante en este depósito epitermal de alta sulfurización. Los puntos fuera del triángulo corresponden a muestras con mineralogía de óxidos.

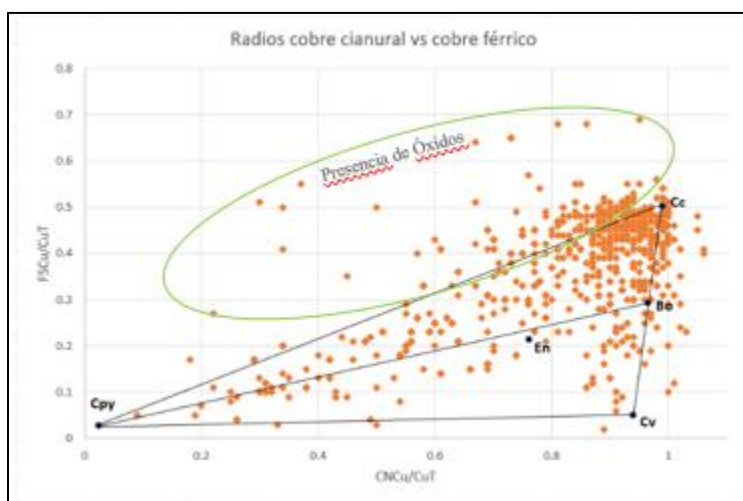


Figura 20. Radios de extracción parcial (CNCu/CuT y FSCu/CuT) para sulfuros de cobre en RW.

Tabla 5. Valores límite de extracción específicos para el depósito epitermal de alta sulfurización Rosario Oeste en CMDIC.

	CuT	CNCu	FSCu	CuSol	CNCu/CuT	FSCu/CuT	CuS/CNCu	CuS/FSCu	RS
Cpy	1	0.025	0.027	0.016	0.025	0.027	0.06	0.06	0.016
Cc	1	0.992	0.536	0.176	0.99	0.501	0.18	0.33	0.176
Bo	1	0.965	0.293	0	0.965	0.293			
Cv	1	0.96	0.015	0.024	0.94	0.05	0.03	1.6	0.024
En	1	0.761	0.213	0	0.761	0.213			

5.2 Resultados del análisis de hallazgos

5.2.1 Resultados del análisis de hallazgos mineralógicos en información histórica en Rosario Oeste

El análisis de los hallazgos mineralógicos en la información histórica de RW se centró en la comparación de tres bases de datos generadas mediante diferentes métodos: mapeo geológico, QEMSCAN y PtXt. El objetivo de esta comparación fue identificar asociaciones minerales y zonificar la mineralogía del depósito en su sector secundario, apoyándose tanto en la observación visual como en los resultados obtenidos en los laboratorios. Se seleccionaron sondajes que contenían datos de los tres métodos para realizar un análisis detallado y completo.

- Sondaje DDH648

Este sondaje diamantino tiene una profundidad total de 304 metros y está ubicado en Rosario Oeste (RW), como se muestra en la Figura 20. A lo largo de su extensión, se dispone de información completa de ley química y mapeo geológico. Además, cuenta con resultados obtenidos mediante los métodos QEMSCAN y PTXT en tramos específicos, los cuales se visualizan en la Figura 21.

El análisis de las leyes químicas a lo largo del sondaje permitió identificar tramos específicos con resultados de QEMSCAN y PTXT, así como aquellos que presentan ambos análisis (Figura 22). Los tramos marcados en color naranja corresponden a estas muestras combinadas, que fueron utilizadas para comparar y buscar asociaciones mineralógicas típicas.

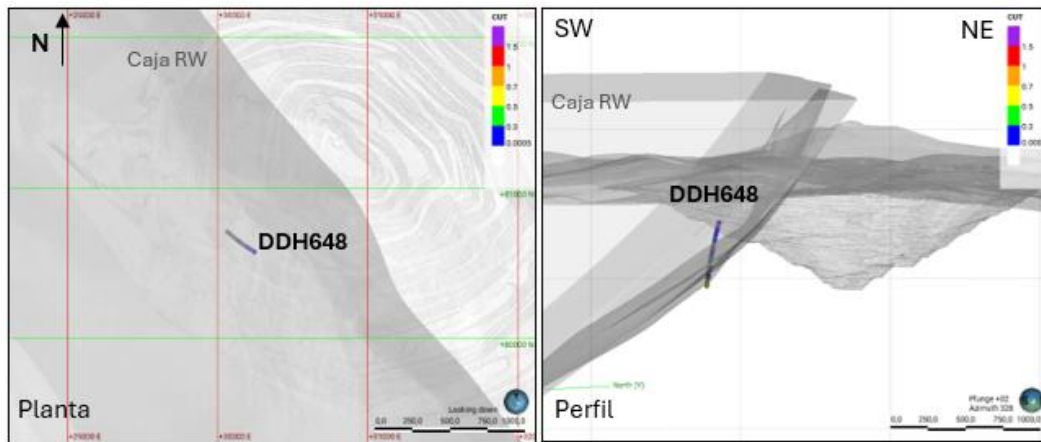


Figura 21. Distribución espacial del sondaje DDH648 dentro del sólido caja de Rosario Oeste (RW) con la topografía del rajo como fondo, visualizado en Leapfrog.

Comportamiento de las leyes DDH648

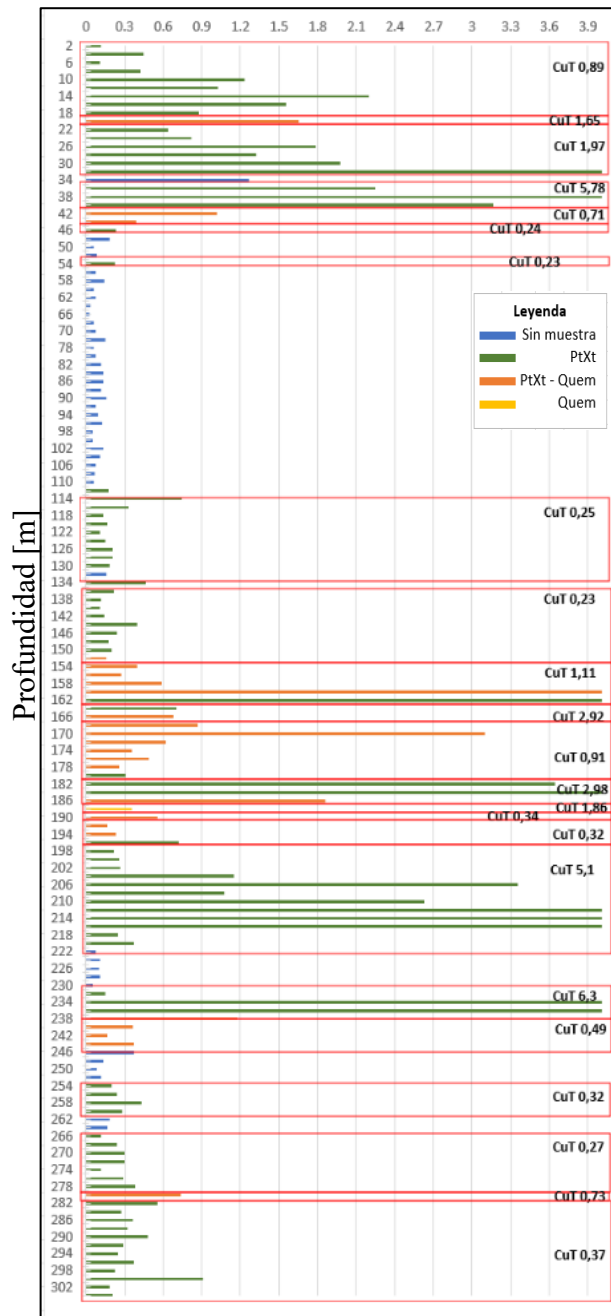


Figura 22. Comportamiento de las leyes químicas y distribución de tramos con análisis de laboratorio para el sondaje DDH648.

En la Figura 22 se observa el comportamiento de las leyes químicas a lo largo del sondaje, con tramos resaltados en color naranja que representan las secciones con resultados de ambos análisis (QEMSCAN y PTXT). Estas secciones se seleccionaron para realizar una comparación integral entre los datos de mapeo, QEMSCAN y PtXt, con el objetivo de identificar patrones mineralógicos representativos en la información histórica del depósito. Cada tramo con resultados de los tres métodos fue analizado en detalle, comparando la mineralogía a partir de los compósitos generados por QEMSCAN. La Figura 23 muestra la representación de los sulfuros primarios y secundarios en estos tramos.

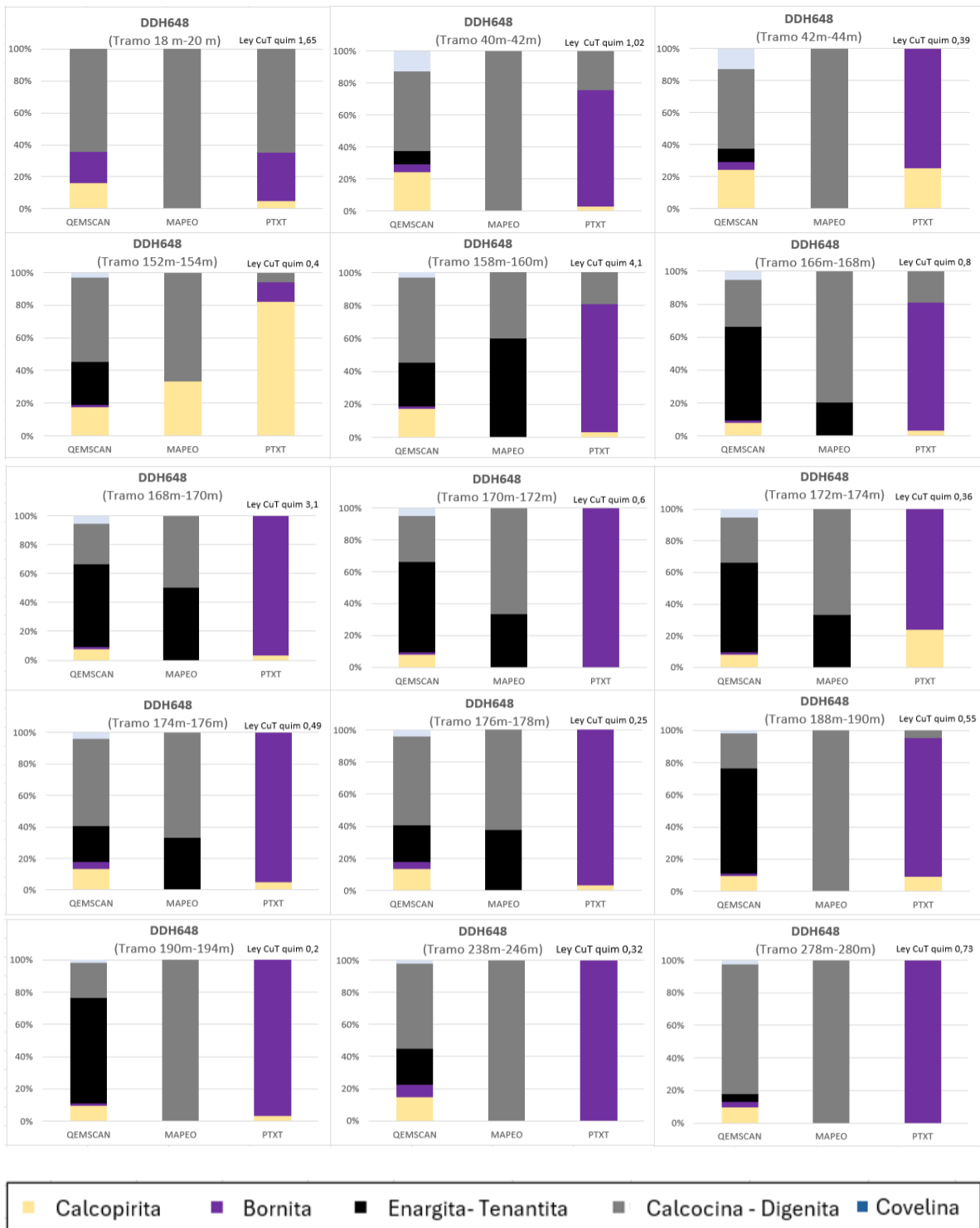


Figura 23. Representación de sulfuros primarios y secundarios en tramos analizados con los tres métodos para el sondaje DDH648.

- **Sondaje DDHR552**

Este sondaje diamantino, con una profundidad total de 397 metros y localizado en Rosario Oeste (RW), presenta información de leyes químicas y mapeo geológico a lo largo de toda su longitud (Figura 24). Este sondaje incluye tres tramos con resultados de los métodos QEMSCAN y PTXT, que se visualizan en la Figura 25.

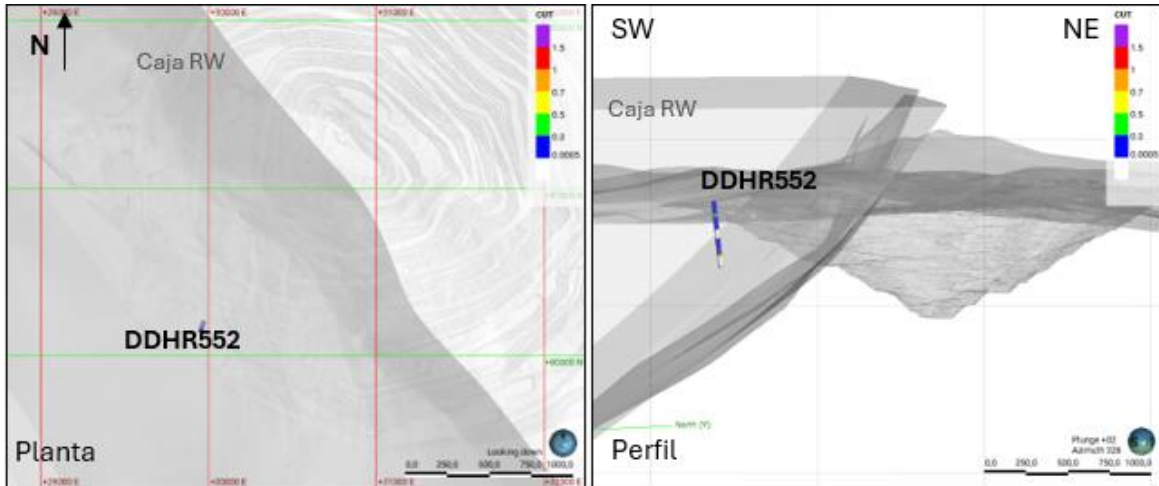


Figura 24. Distribución espacial del sondaje DDHR552 dentro del sólido caja de Rosario Oeste (RW) con la topografía del rajo como fondo, visualizado en Leapfrog.

Comportamiento de las leyes DDHR552

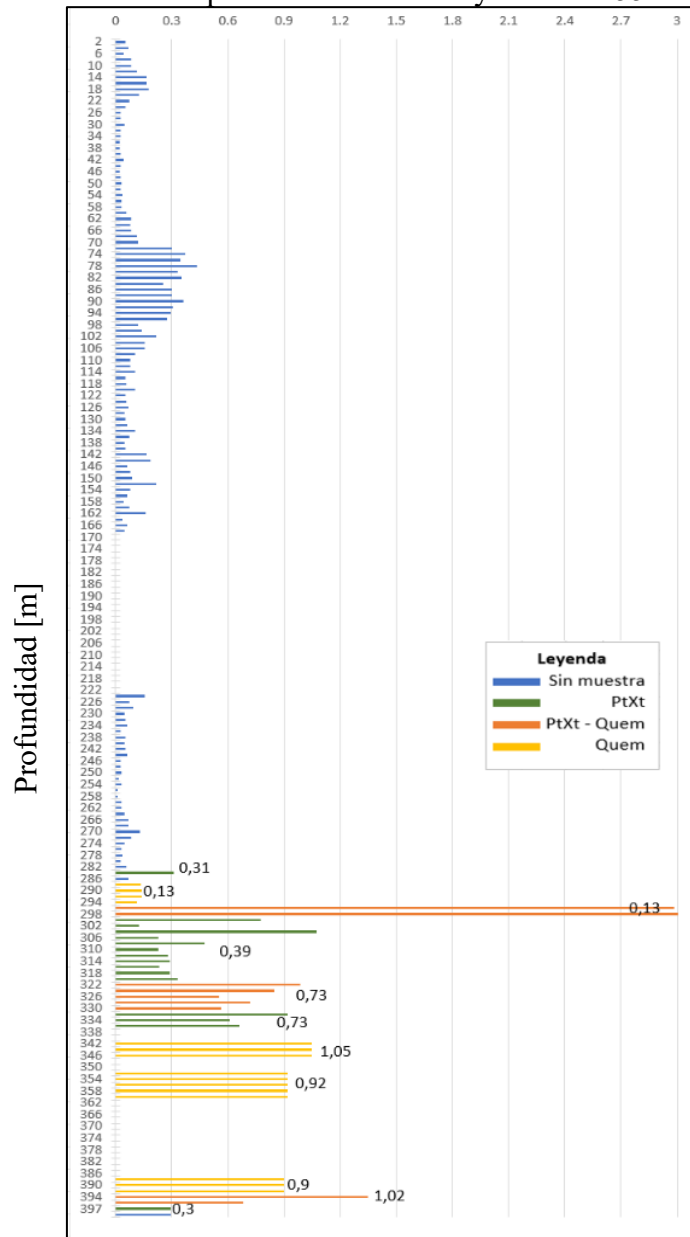


Figura 25. Comportamiento de las leyes químicas y distribución de tramos con análisis de laboratorio para el sondaje DDHR552.

El comportamiento de las leyes químicas por tramo se muestra en la Figura 25, donde los tramos resaltados en color naranja representan zonas con resultados de ambos métodos. Estos tramos fueron analizados para realizar una comparación mineralógica detallada, utilizando datos combinados de mapeo geológico, QEMSCAN y PtXt. En la Figura 26 se ilustra la mineralogía de los sulfuros primarios y secundarios identificados en estos tramos.

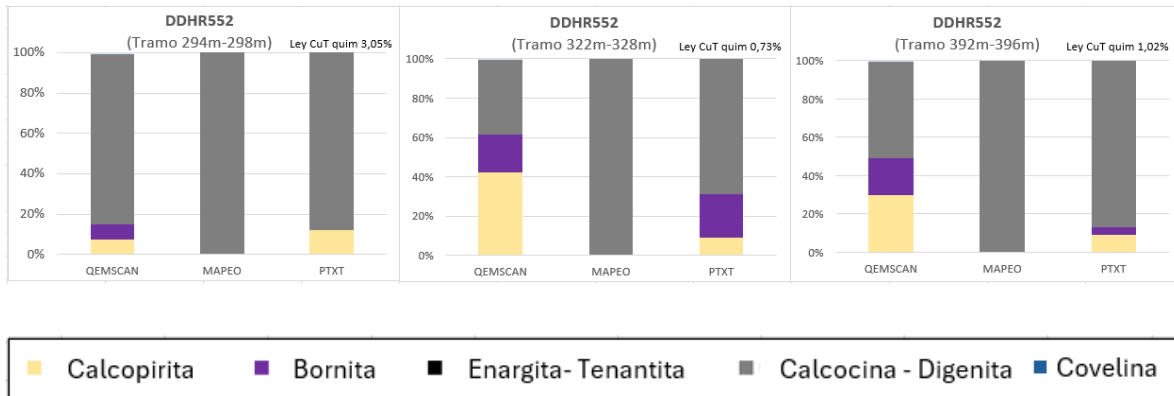


Figura 26. Representación de sulfuros primarios y secundarios en tramos analizados con los tres métodos para el sondaje DDHR552.

- Sondaje DDHR556

El sondaje diamantino DDHR556 tiene una profundidad total de 380 metros y se encuentra ubicado en RW (Figura 27). Registra información de leyes químicas y mapeo geológico a lo largo de toda su longitud, y contiene seis tramos con resultados de QEMSCAN y PTXT, señalados en color naranja en la Figura 28.

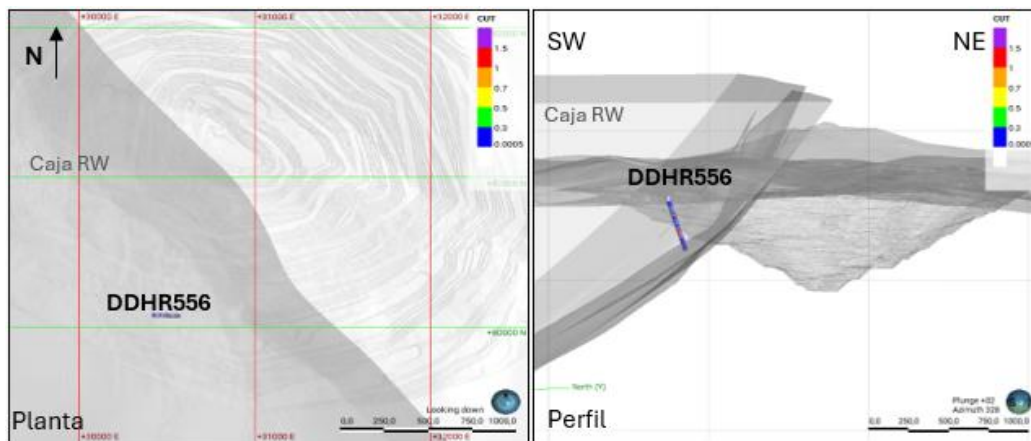


Figura 27. Distribución espacial del sondaje DDHR556 dentro del sólido caja de Rosario Oeste (RW) con la topografía del rajo como fondo, visualizado en Leapfrog.

Comportamiento de las leyes DDHR556

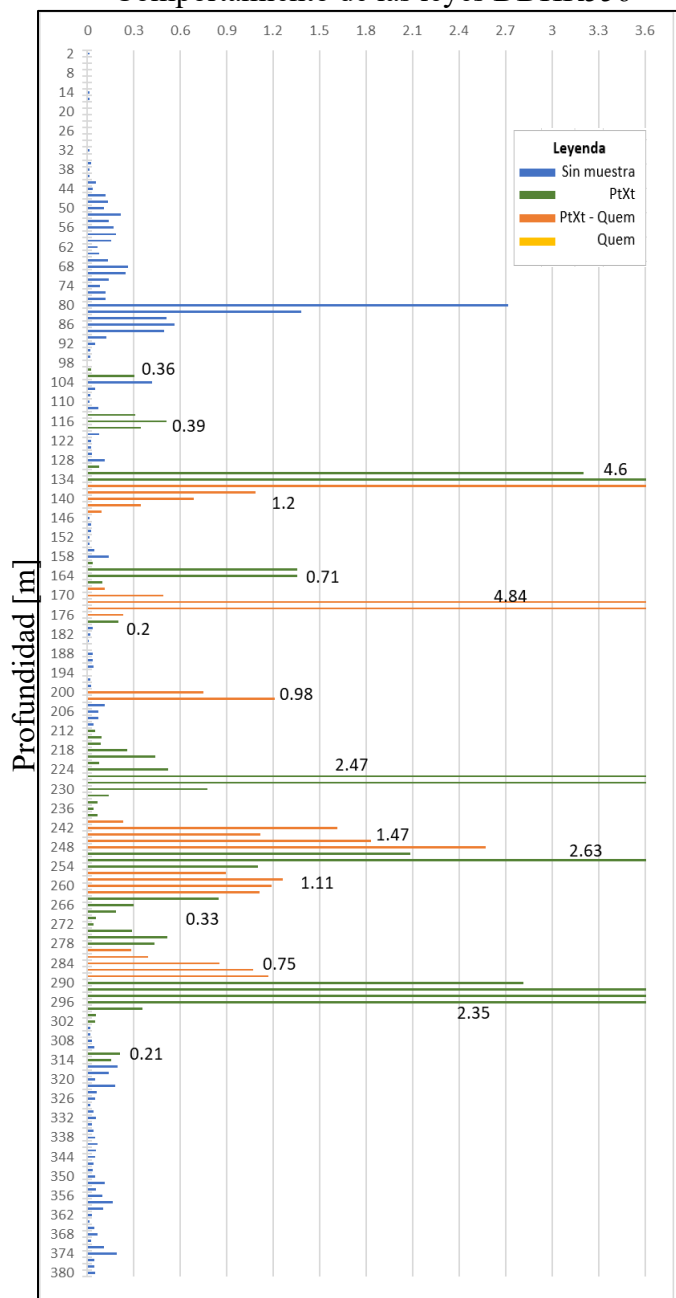


Figura 28. Comportamiento de las leyes químicas y distribución de tramos con análisis de laboratorio para el sondaje DDHR556.

La Figura 28 muestra el comportamiento de las leyes químicas a lo largo del sondaje, destacando los tramos con resultados de ambos métodos. Cada uno de estos tramos fue analizado para integrar los datos de los tres métodos y determinar asociaciones mineralógicas relevantes.

La Figura 29 presenta la representación de los sulfuros primarios y secundarios identificados en estos tramos.

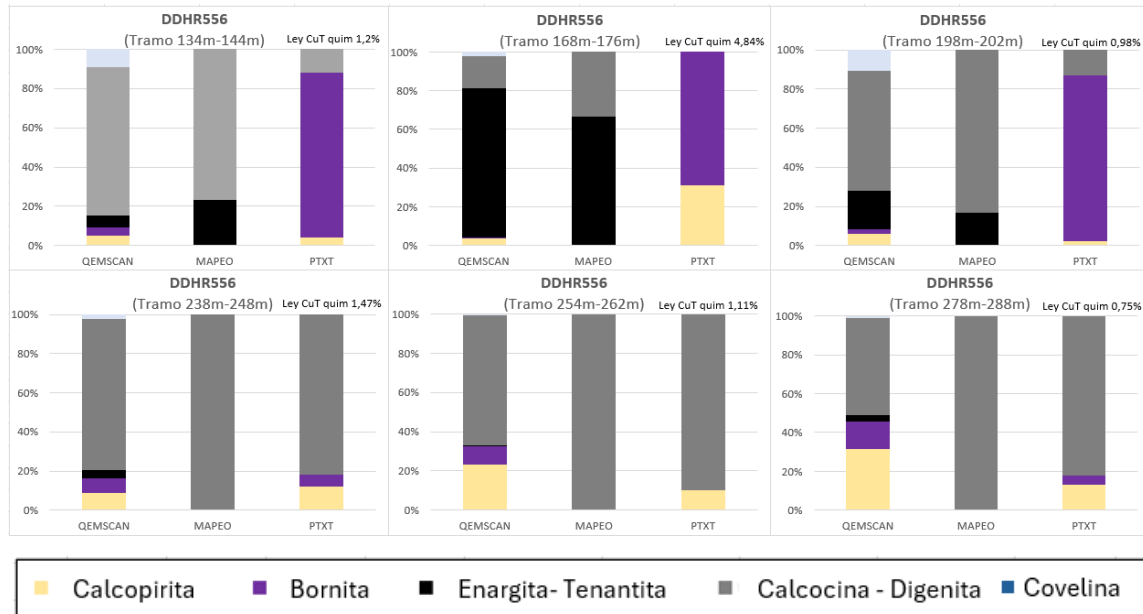


Figura 29. Representación de sulfuros primarios y secundarios en tramos analizados con los tres métodos para el sondaje DDHR556.

- Sondaje DDHR544

El sondaje diamantino DDHR544, ubicado en RW, tiene una profundidad total de 456 metros, como se muestra en la Figura 30. Este sondaje dispone de información de leyes químicas y mapeo geológico, además de dos tramos con resultados de QEMSCAN y PTXT, indicados en color naranja en la Figura 31.

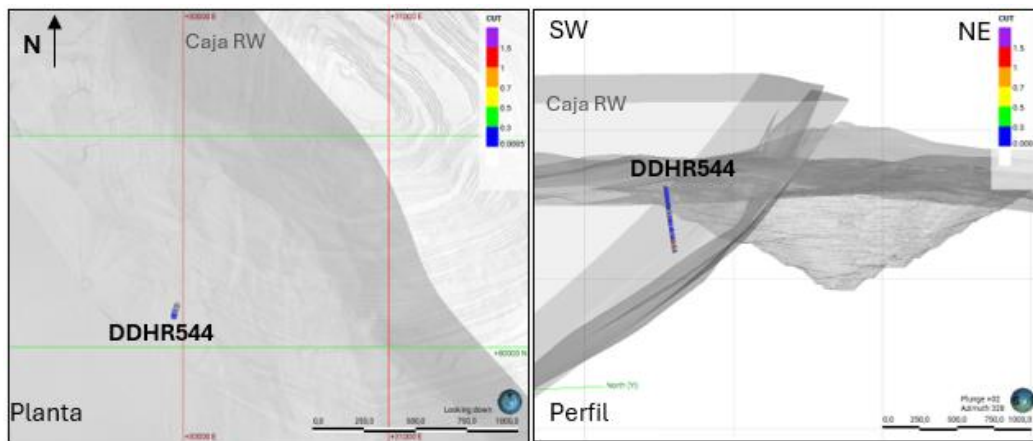


Figura 30. Distribución espacial del sondaje DDHR544 dentro del sólido caja de Rosario Oeste (RW) con la topografía del rajo como fondo, visualizado en Leapfrog.

Comportamiento de las leyes DDHR544

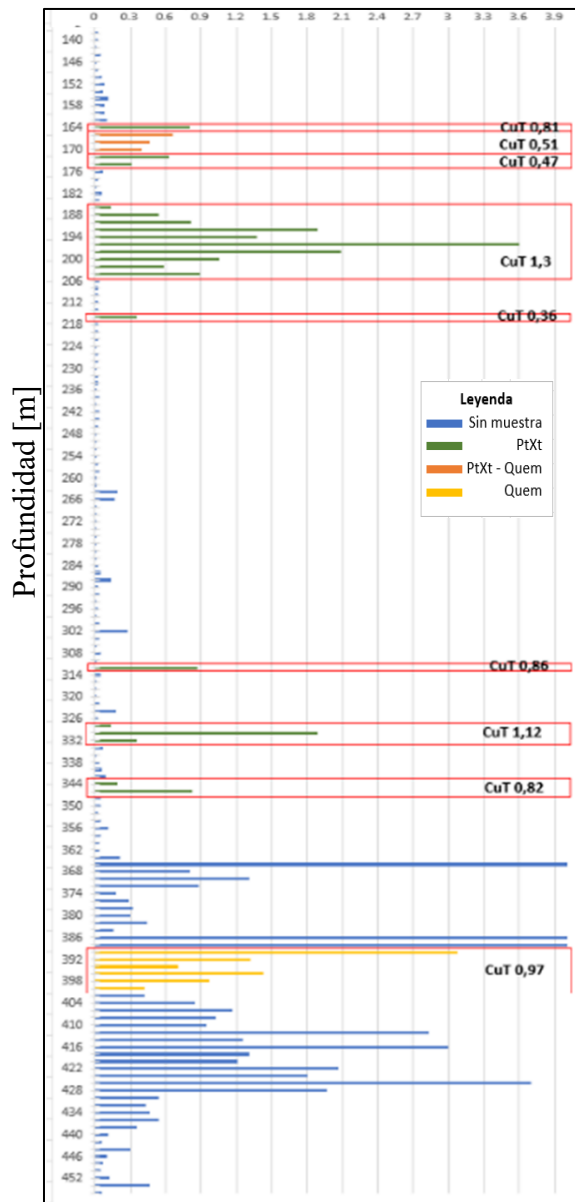


Figura 31. Comportamiento de las leyes químicas y distribución de tramos con análisis de laboratorio para el sondaje DDHR544.

El comportamiento de las leyes químicas por tramo se ilustra en la Figura 31, destacando las zonas con resultados de laboratorio. Estos dos tramos fueron analizados para realizar una comparación integral utilizando los datos de mapeo, QEMSCAN y PtXt, además de sus respectivas leyes químicas. La Figura 32 muestra la representación de los sulfuros primarios y secundarios en estos tramos.

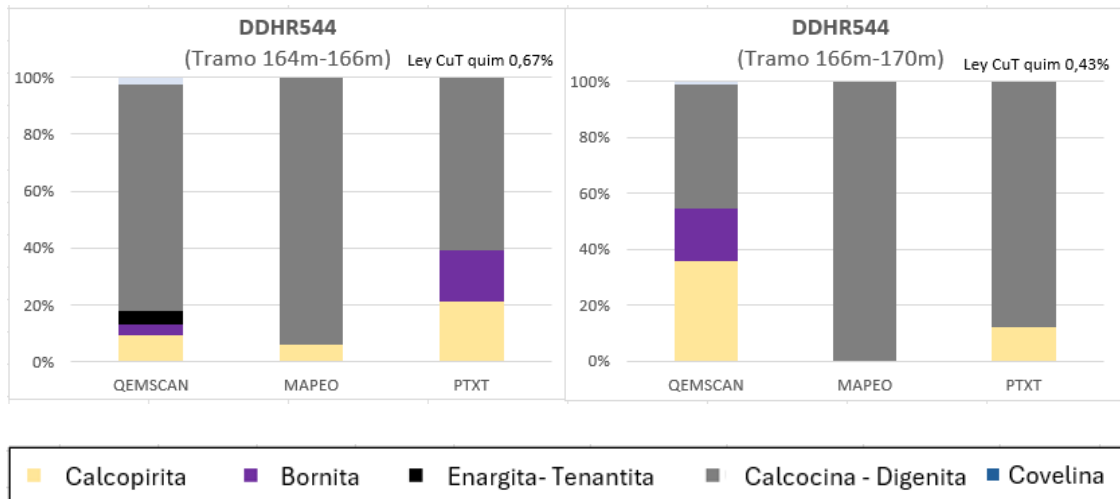


Figura 32. Representación de sulfuros primarios y secundarios en tramos analizados con los tres métodos para el sondaje DDHR544.

- Sondaje DDHR553

El sondaje diamantino DDHR553, con una profundidad total de 520 metros, está ubicado en RW, como se observa en la Figura 33. Este sondaje incluye información de leyes químicas y mapeo geológico a lo largo de toda su extensión, además de cuatro tramos con resultados de QEMSCAN y PTXT, señalados en color naranja en la Figura 34.

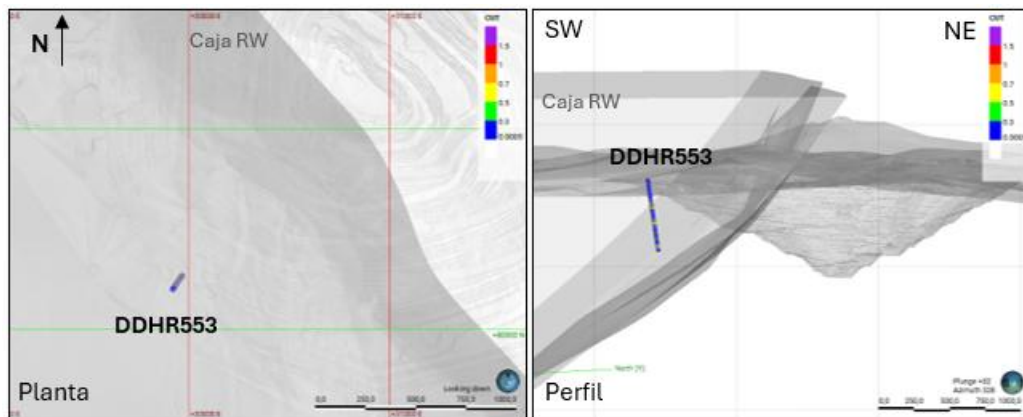


Figura 33. Distribución espacial del sondaje DDHR553 dentro del sólido caja de Rosario Oeste (RW) con la topografía del rajo como fondo, visualizado en Leapfrog.

Comportamiento de las leyes DDHR553

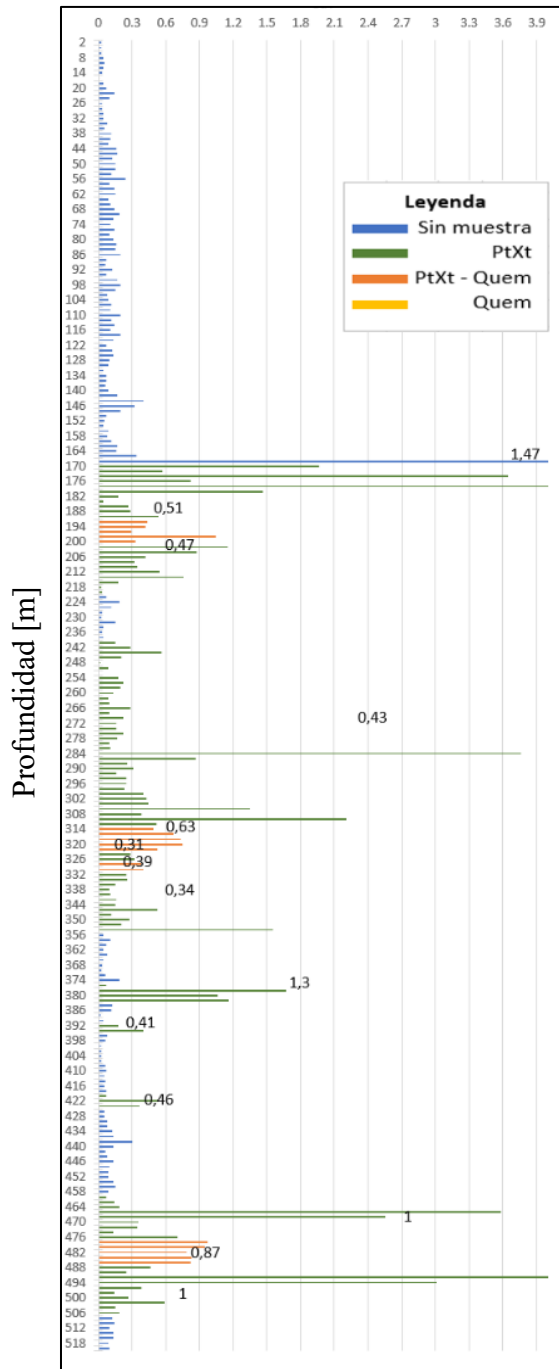


Figura 34. Comportamiento de las leyes químicas y distribución de tramos con análisis de laboratorio para el sondaje DDHR553.

En la Figura 34 se observa el comportamiento de las leyes químicas a lo largo del sondaje, destacando los tramos que presentan resultados de ambos métodos. Estos tramos fueron analizados comparativamente utilizando datos de los tres métodos y sus respectivas leyes

químicas. En la Figura 35 se representa la mineralogía de los sulfuros primarios y secundarios identificados en los tramos evaluados.

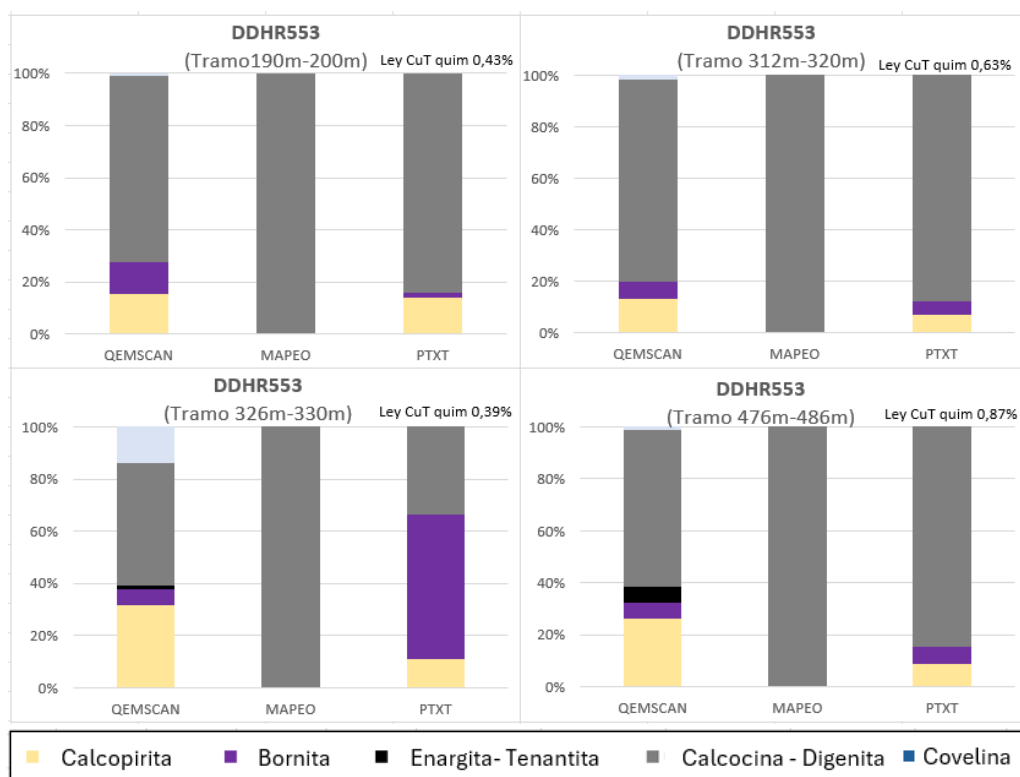


Figura 35. Representación de sulfuros primarios y secundarios en tramos analizados con los tres métodos para el sondaje DDHR553.

5.2.2 Resultados de hallazgos en el mapeo geológico y muestreo de sondajes en RW

Con base en los hallazgos mineralógicos registrados en diferentes bases de datos históricas, se seleccionaron siete sondajes para remapear las zonas de secundarios (Figura 36). El objetivo fue identificar la mineralogía presente y compararla con la información declarada en las cartillas de mapeo histórico.

La selección de estos sondajes se basó en los siguientes criterios:

- Dos sondajes que contaran con información de los tres métodos analizados previamente (mapeo, QEMSCAN y PtXt).
- Dos sondajes históricos con extensos metrajés en zonas de minerales secundarios.

- Un sondaje con únicamente análisis QEMSCAN y mapeo geológico.
- Un sondaje con análisis de PtXt además de mapeo geológico.
- Un sondaje nuevo, revisado en tiempo real a medida que se realizaba el mapeo (No aparece en la imagen al no estar ingresado en la base de datos analizada).

En total, se analizaron aproximadamente 2,028 metros para identificar mineralogía presente en los análisis químicos que no había sido reconocida en el mapeo histórico.

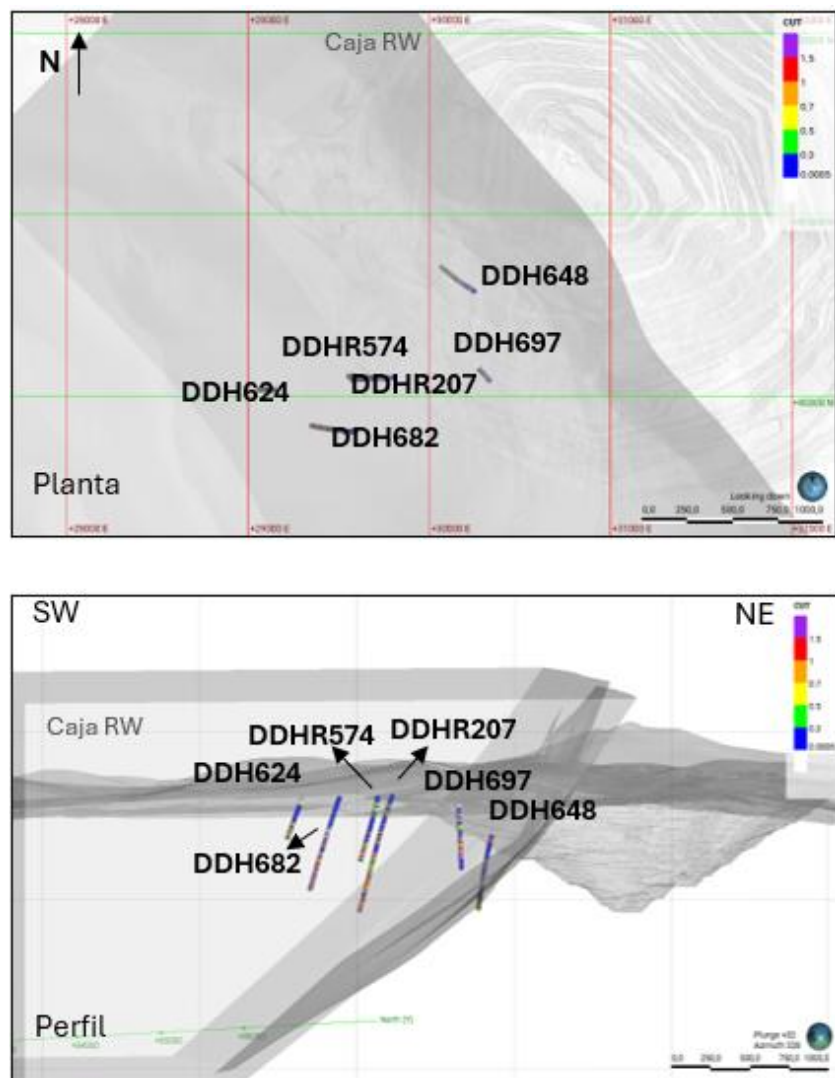


Figura 36. Distribución espacial de los siete sondajes revisados. En la imagen superior se muestra la vista en planta, mientras que en la imagen inferior se presenta la vista lateral.

Tabla 6. Sondajes seleccionados para identificar hallazgos mineralógicos en zonas de enriquecimiento de RW mediante comparación entre análisis químicos y mapeo geológico.

Hole ID	Desde	Hasta	Metros Tot	BD
DDH648	0	500	500	PtXt / QEMSCAN
DDH624	25	280	255	PtXt
DDH682	400	630	230	Histórico
DDHR207	200	740	540	Histórico
DDH697	190	333	143	QEMSCAN
DDH795	150	328	178	Nuevo
DDHR574	218	400	182	PtXt/Qemscan
Total			2,028 m	

Se identificaron hallazgos relevantes en cinco de los siete sondajes revisados. En estos sondajes, se observaron tramos dentro de la zona mineral denominada SEC, donde se detectó mineralogía no identificada en el mapeo histórico. En particular, se reconocieron sulfuros primarios que no habían sido descritos previamente en las cartillas de mapeo geológico.

Las Figura 37 presentan fotografías representativas de la mineralogía no identificada previamente para cada sondaje:



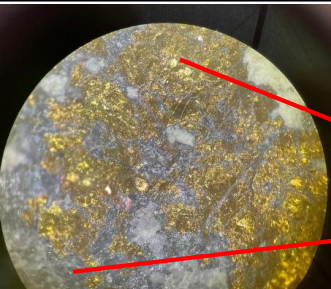
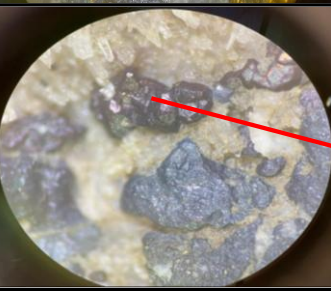

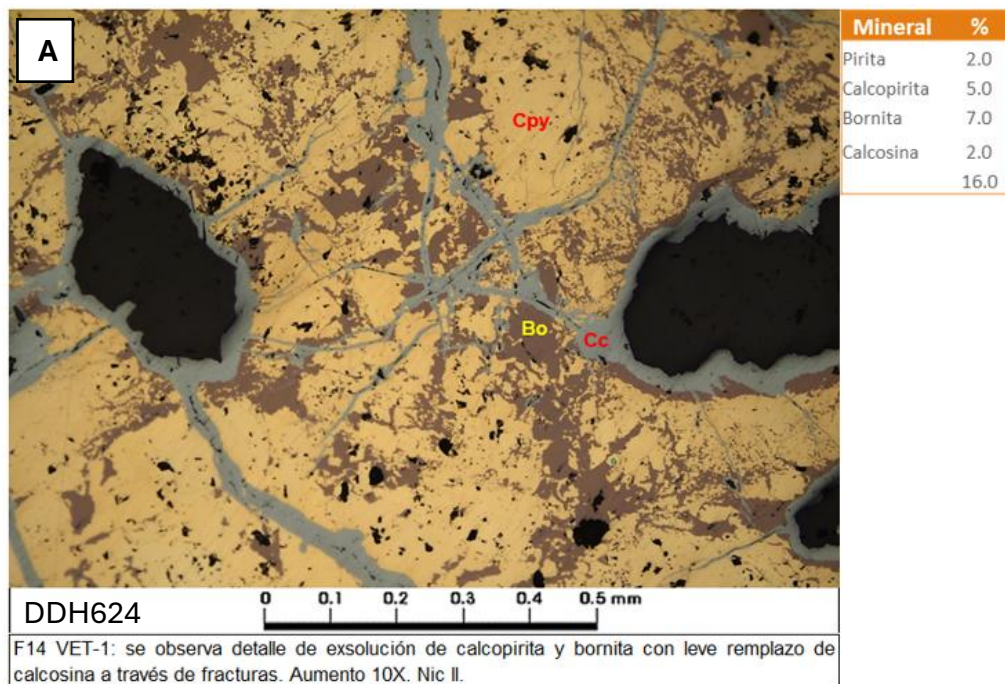
Sondaje	Foto	Mineral(es) nuevos
DDHR207		Mineral sulfuro primario Bornita
DDH648		Mineral sulfuro primario Calcopirita
DDH624		Mineral sulfuro primario Calcopirita y Bornita
DDH697		Mineral sulfuro primario Bornita
DDHR574		Mineral sulfuro primario Bornita

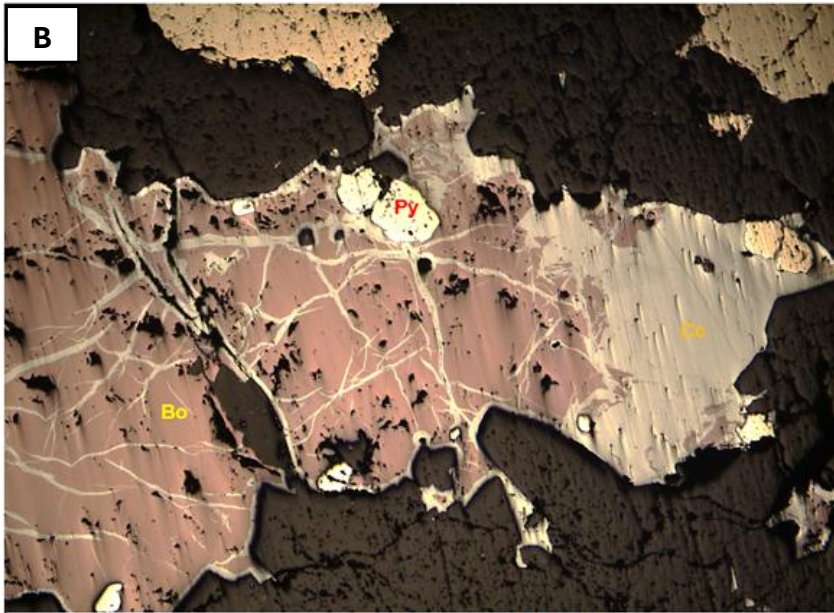
Figura 37. Fotografías de mineralogía de sulfuros primarios no reconocida durante el mapeo de los sondajes.

En los dos sondajes restantes donde no se identificaron nuevas mineralogías (DDH682 y DDH795), los resultados fueron descartados visualmente. Sin embargo, se reconoce que esta limitación puede estar asociada a la sensibilidad del ojo humano y a las restricciones inherentes del uso de lupa en campo. Esto abre la posibilidad de que los minerales no identificados puedan encontrarse en trazas o como relictos, lo cual será analizado en detalle en el próximo apartado.

5.2.3 Resultados de validación de hallazgos mineralógicos en resultados calcográficos de laboratorio

El análisis de los resultados calcográficos obtenidos del muestreo permitió identificar la presencia de sulfuros secundarios y primarios en zonas clasificadas por el mapeo como áreas de enriquecimiento secundario (SEC). Estas observaciones, como se ilustra en la Figura 38, subrayan la necesidad de diferenciar con mayor precisión las zonas primarias de las zonas secundarias en Rosario Oeste. Esta diferenciación es clave para optimizar la recuperación de cobre en la planta, dada la naturaleza compleja y única de este depósito epitermal de alta sulfuración en Collahuasi.



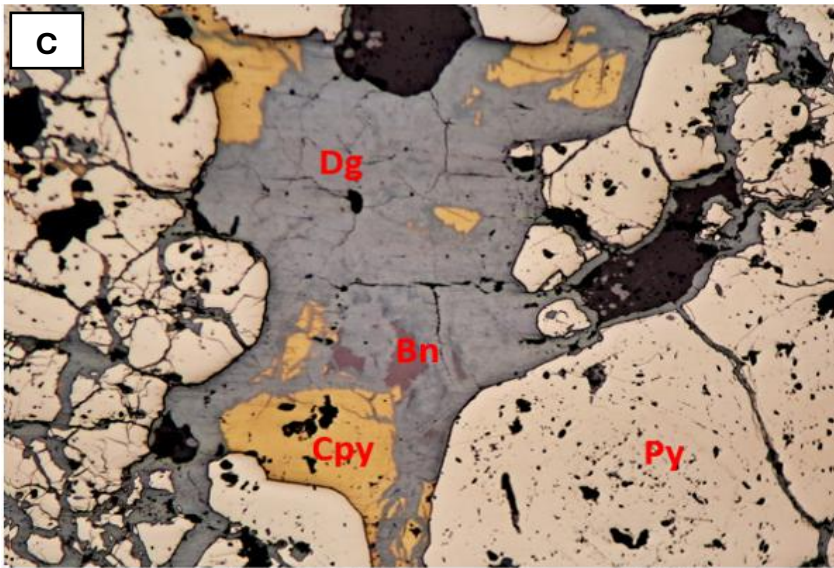


Mineral	%
Pirita	45.0
Bornita	5.0
Calcosina	2.0
Calcopirita	tr
	52.0

DDH697

0 0.25 0.5 1.0 mm

F14 VET-2: se observan probables cristales relictos de pirita, producto de remplazo fuerte de bornita y posterior remplazo moderado de calcosina. Aumento 4X. Nic II.



Mineral	%
Pirita(Py)	80
Calcopirita (Cpy)	4
Digenita (Dg)	8
Bornita (Bn)	0.2

DDH795

0 100 200 300 μm

Sector de veta con agregados de cristales de pirita(Py) microfracturada con reemplazo por digenita (Dg) desde sus bordes y planos de fractura, relictos de calcopirita(Cpy) y bornita (Bn). Aumento 200x. Nic II.

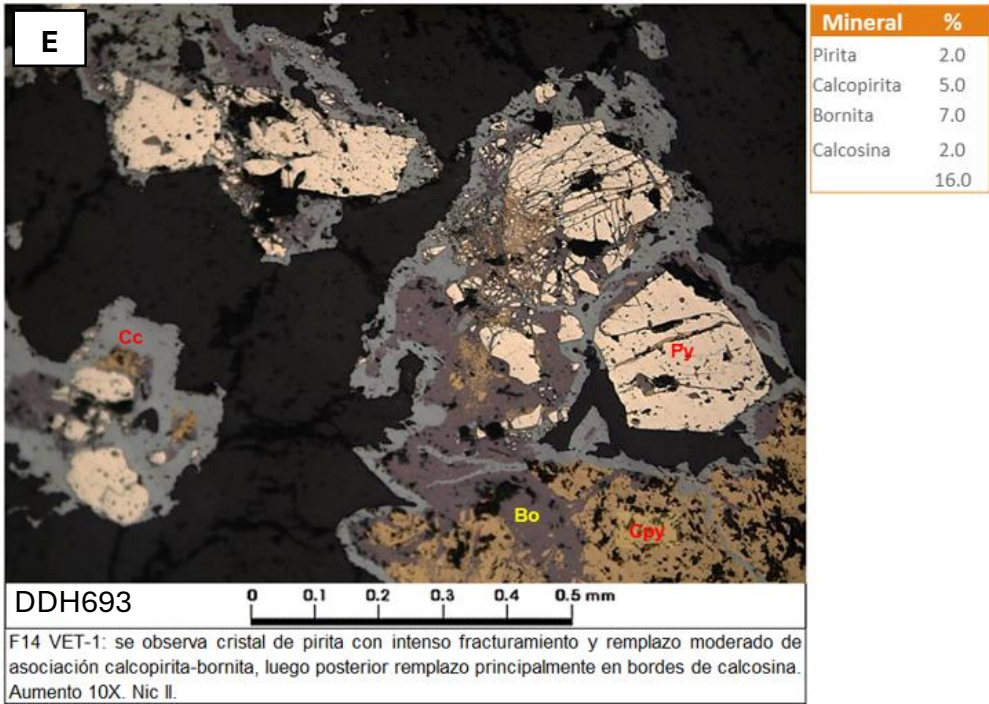
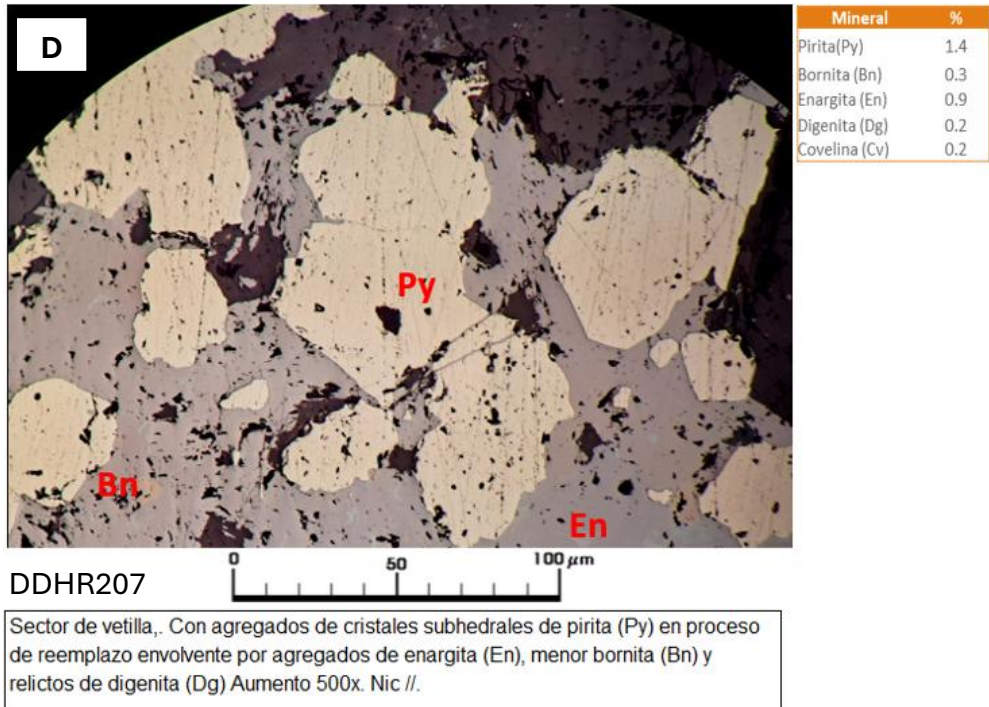


Figura 38. Descripciones calcográficas de 6 sondajes con sulfuros primarios y secundarios coexistiendo en RW. **A** Veta en sondaje DDH624a aumento 10x, con sulfuros primarios (Cpy-Bo) con leve patina de sulfuro secundario (Cc). **B** Veta en sondaje DDH697 a aumento 4x, Bo con remplazo moderado de Cc. **C** Veta en sondaje DDH795 a aumento 200x, con gran remplazo de Dg y relictos de Cpy y Bo. **D** Veta en sondaje DDHR207a aumento 500x, Py siendo reemplazada por En y Bo. **E** Veta de DDH693 a aumento 10x, remplazo de Bo-Cpy con patina de Cc.

Los hallazgos calcográficos mostraron que, en algunas zonas SEC, los sulfuros primarios como la Cpy y la Bn aparecen como minerales principales en porcentajes significativos. Sin embargo, en otros cortes, estos mismos minerales se encuentran de forma relictas, en bajas proporciones o como trazas, lo que evidencia una distribución mineralógica heterogénea. Por otro lado, también se identificaron zonas donde predominan únicamente los sulfuros secundarios, como la Cc y la Cv, sin rastros de sulfuros primarios. Esto refleja una gran variabilidad en la ocurrencia mineralógica, tanto en composición como en distribución, lo que incrementa la complejidad del modelado del depósito.

Estos resultados respaldan la importancia de integrar métodos visuales, como el mapeo geológico, con análisis químicos (QEMSCAN y PtXt) y calcográficos, con el objetivo de lograr una caracterización más precisa del depósito. Una aproximación unificada permitirá reducir la incertidumbre en la definición de zonas de alta ley dentro del enriquecimiento secundario, optimizar la recuperación de cobre al diferenciar adecuadamente las zonas con predominancia de sulfuros secundarios de aquellas con presencia significativa de sulfuros primarios y mejorar el modelado mineralógico. La integración de estos enfoques ayudará a conceptualizar mejor el depósito, disminuir la incertidumbre en los planes de explotación y garantizar una planificación más confiable para Rosario Oeste.

La identificación de sulfuros primarios en áreas clasificadas históricamente como SEC plantea nuevas líneas de investigación, como evaluar la ocurrencia de estos minerales en otras zonas del depósito y considerar su impacto en las estrategias de procesamiento. Asimismo, se recomienda profundizar en el análisis de las trazas mineralógicas y los relictos, ya que su identificación contribuirá a una mayor comprensión del sistema mineralógico y su evolución geoquímica, ayudando a enfrentar los desafíos asociados con la complejidad de este depósito.

5.2.4 Resultados de los hallazgos estructurales en el análisis de datos televiewers históricos de Rosario Oeste

Como parte de la redefinición de las zonas mineralizadas en Rosario Oeste (RW), se llevó a cabo un análisis detallado del control estructural de la mineralización en esta área, con el fin de comprender mejor su orientación. Para ello, se utilizaron los datos obtenidos de los informes históricos de televiewers (TVW) correspondientes a RW. Tras filtrar los datos para incluir únicamente los tramos de la zona mineralizada, se obtuvo un total de 17,000 tramos para su análisis (ver Tabla 7 y Figura 39).

Tabla 7. Datos de los informes de Televiewers (TVW) para RW y la Zona Mineralizada SEC.

BD TVW RW		BD TVW SEC RW	
Nº sondajes	91	Nº sondajes	44
Total (tramos)	103,897	Total (tramos)	16,936

Los datos fueron analizados mediante pruebas en el software DIPS, lo que permitió identificar dos dominios estructurales claramente diferenciados, debido a un cambio significativo en la orientación a medida que nos alejamos del pit Rosario. Se reconocen (Figura 39):

Dominio 1: "Comportamiento Rosario"

Este dominio, denominado así por su similitud con el control estructural de la zona de Rosario, se extiende desde el inicio de RW hasta la falla La Última, situada aproximadamente un kilómetro hacia el suroeste. Las características principales de este dominio son:

- Azimut: 323°
- Dip direction: 58°
- Dip: 55°

Dominio 2: "Rosario Oeste"

Este dominio refleja el ambiente estructural específico de Rosario Oeste, que ha sido reconocido hasta la fecha. La orientación principal de este dominio es compatible con la mineralización de orientación norte-sur (NS) y subvertical, tal como se describe en la literatura sobre el depósito. Las características del Dominio 2 son:

- Azimut: 346°
- Dip direction: 76°
- Dip: 79°

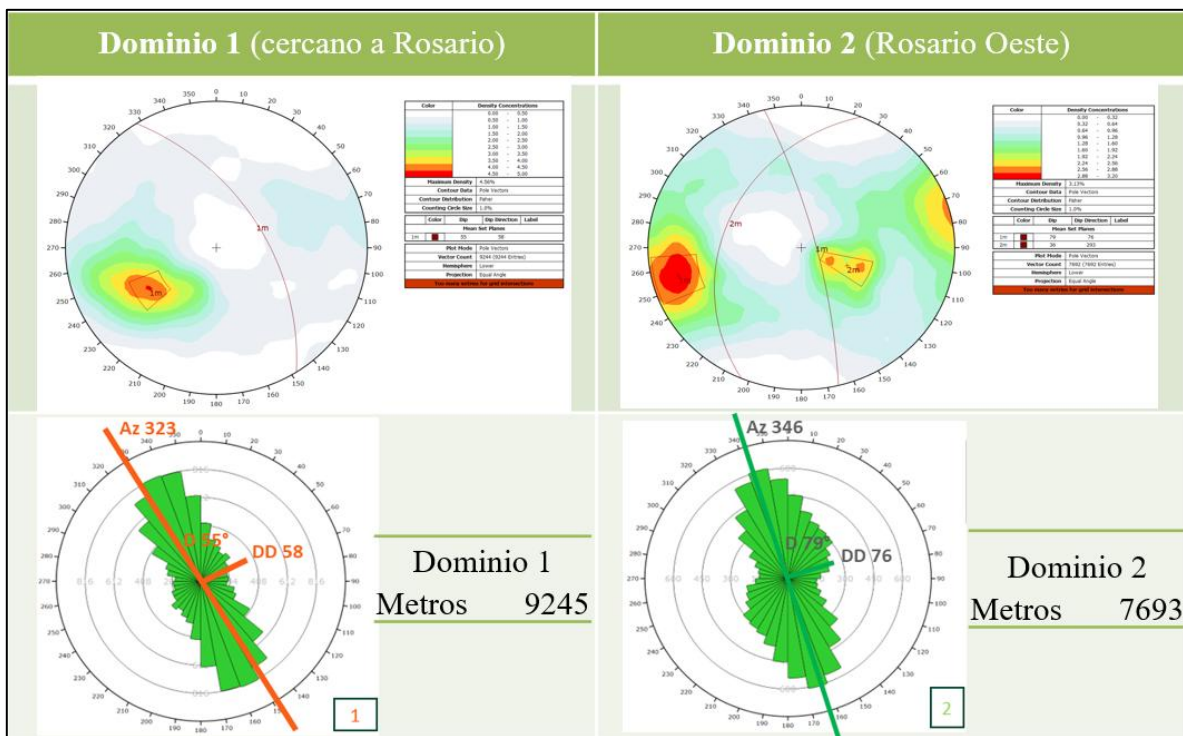


Figura 39. Orientaciones principales para el dominio 1 y dominio 2 reconocidos para el depósito de Rosario Oeste.

La actualización de los trends estructurales de Rosario Oeste, dividiendo el área en dos dominios, proporciona una representación más precisa de las vetas mineralizadas y permite modelar los estadios transicionales de la mineralización en el depósito. Esta mejora en la representación estructural es esencial, ya que desde 2017 no se habían realizado actualizaciones significativas en los modelos estructurales de los depósitos, lo que había dejado las estructuras históricas desactualizadas.

La nueva distribución espacial de los dominios estructurales, visible en la Figura 40, permitirá la reformulación de los modelos estructurales de RW, aportando información valiosa para la exploración y planificación futura de la zona. Este enfoque actualizado contribuye a una comprensión más detallada de la geometría del depósito y su mineralización, optimizando las estrategias de exploración y desarrollo.

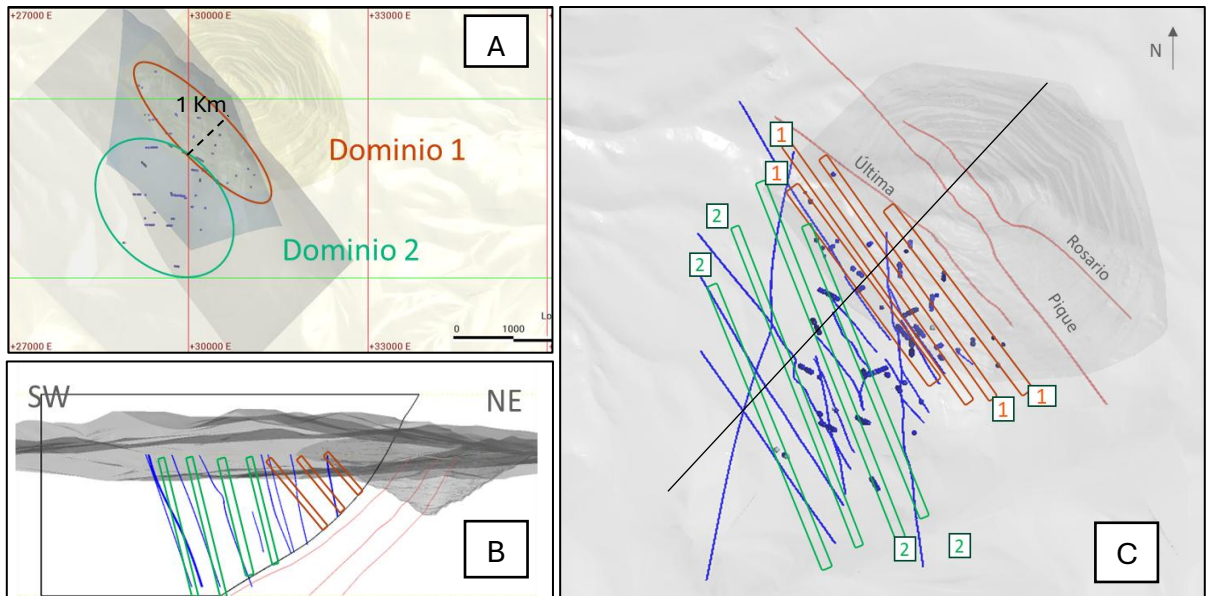


Figura 40. Distribución espacial de los dominios estructurales identificados en Rosario Oeste (RW). El Dominio 1 ("Comportamiento Rosario") presenta una orientación predominante de azimuth 323° , mientras que el Dominio 2 ("Rosario Oeste") muestra una orientación N.

5.3 Resultados de la redefinición de unidades de modelamiento en la zona de enriquecimiento de Rosario Oeste

En esta etapa se integraron los datos históricos, análisis mineralógicos y hallazgos recientes para redefinir las unidades de modelamiento en la zona de enriquecimiento de Rosario Oeste (RW). Este proceso permitió desarrollar una clasificación más precisa de las asociaciones mineralógicas, sustentada en métodos modernos y robustos de análisis.

Se identificó el método de PtXt como el más factible para su aplicación, debido a que su relación costo-beneficio lo hace viable en el contexto actual. Este método permite abordar las inconsistencias mineralógicas entre los datos determinados visualmente y los obtenidos en laboratorio, facilitando así la generación de un plan de unificación. Para validar los resultados de PtXt, se empleó el método QEMSCAN, que ofrece alta precisión en la determinación mineralógica. Este método permitió verificar las asociaciones mineralógicas identificadas, aunque su costo elevado lo hace inviable como herramienta exclusiva a largo plazo.

El análisis de la base de datos de PtXt determinó que no era posible aplicar la mineralogía normativa para identificar directamente la composición mineral de las muestras, ya que esta metodología es adecuada únicamente para sistemas ternarios. En el caso de Collahuasi, esto no es aplicable debido a la coexistencia de cinco sulfuros de cobre en el depósito epitermal de alta sulfuración de Rosario Oeste.

La información proporcionada por los informes de PtXt incluyó los valores de CNCu y FSCu, los cuales fueron analizados mediante los radios de PtXt CNCu/CuT y FSCu/CuT, descritos en el punto 5.1.3. Este análisis permitió determinar que ciertos valores de estos radios se asociaban con composiciones mineralógicas específicas. Estas asociaciones fueron identificadas visualmente en un triángulo normativo construido a partir de los valores estandarizados de PtXt para cada mineral, tal como se detalla en la Figura 20.

Para determinar las unidades de modelamiento, se utilizó la base de datos de PtXt empleada en los análisis previos descritos en este documento. Inicialmente, se filtraron las muestras que contaban con análisis tanto de PtXt como de QEMSCAN. Este procedimiento permitió

identificar la mineralogía asociada, reconocer asociaciones mineralógicas tipo bajo los valores analizados y contrastarlos, además de validarlos, con los resultados de QEMSCAN de las mismas muestras.

Este primer análisis se llevó a cabo sobre los tramos de sondajes con ambos tipos de análisis disponibles. Como resultado, se determinaron rangos específicos para:

- Cinco asociaciones mineralógicas correspondientes a la mineralización secundaria.
- Dos asociaciones mineralógicas correspondientes a la mineralización primaria.

Estas asociaciones permitieron separar mineralógicamente las zonas de mineralización secundaria y primaria dentro de las unidades de modelamiento. Actualmente, y debido a las reglas de negocio vigentes, Rosario Oeste es modelado con una única envolvente para la mineralización secundaria.

Con base en los datos históricos de PtXt, se definieron estas siete asociaciones mineralógicas, las cuales fueron validadas mediante la mineralogía obtenida en los análisis QEMSCAN. Posteriormente, se buscó extrapolar estas unidades a toda la base de datos de PtXt, fortaleciendo así la representación de las unidades determinadas y proporcionando una base más robusta para el modelamiento.

En la Tabla 8 se presentan los valores de $CNCu/CuT$ y $FSCu/CuT$ establecidos para cada unidad. Ambos valores deben cumplirse de manera simultánea para que una muestra sea clasificada dentro de la zona correspondiente.

Tabla 8. Redefinición de Unidades de Modelamiento: Zonificación Mineralógica Basada en Resultados del Método de PtXt.

Zona mineral	OXI	MIX	SEC					PRI	
			SECF	SECD					
Zonificación	OXI	MIX	Dom Cc	Dom Cc-Bn-Cpy	Dom Cc-Cpy	Dom Cc-Bn	Dom Bn-Cc	Dom Bn	Dom Bn-Cpy
CNCu/CuT	0.03-0.07	0.02-0.63	0.79-0.89	0.80-0.89	0.65-0.79	0.9-0.99	0.88-1	0.8-1	0.7-0.74
FSCu/CuT	0.1-0.23	0.1-0.78	0.43-0.98	0.35-0.43	0.31-0.54	0.38-0.46	0.3-0.38	0.02-0.3	0.18-0.21
Descripción	Falta más data de extracción parcial para precisar estas zonas.		Más del 80% de Cc	No existe predominancia de ningún mineral.	Predomina a Cc-Cpy	Predomina Cc-Bo	Predomina Bo-Cc	Más del 80% de Bo	Existen mineralogía Bo y Cpy

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN

Este estudio tuvo como objetivo actualizar el modelo geológico de zona mineral del depósito de Rosario Oeste. Si bien no se logró concretar la actualización completa del modelo, se avanzó significativamente en la redefinición de las unidades geológicas correspondientes a la zona de enriquecimiento secundario (SEC), diferenciándolas de la zona primaria (PRI) en el depósito RW. Este avance contribuye a reducir la variabilidad en el modelamiento geológico y constituye una base sólida para futuras actualizaciones del modelo, orientadas a optimizar la eficiencia operativa en las actividades mineras del distrito de Collahuasi.

Para alcanzar este resultado, se consideró la información mineralógica histórica disponible del depósito RW, y se analizaron tres métodos principales: datos obtenidos del mapeo geológico, análisis mediante QEMSCAN y resultados de extracción parcial (PtXt).

Al analizar cada uno de los resultados obtenidos a partir de estos métodos de manera independiente, se evidenciaron varias limitaciones. El mapeo geológico es el método con la mayor cantidad de datos, en el cual se reconocen dos conceptos en la práctica: secundario fuerte (SECF) y secundario débil (SECD), cada uno con diferentes asociaciones mineralógicas. Estas conceptualizaciones se utilizan para discriminar la zona secundaria de RW, pero están basadas en definiciones de carácter mineralógico determinadas a partir del mapeo. Este método era el principal candidato para redefinir las unidades geológicas, pero presenta dos limitaciones importantes. La primera, asociada a que del 100% de los datos del SEC de RW, solo el 50% está clasificado entre SECF y SECD, debido a que esta clasificación se implementó recién en 2016. La segunda limitación está relacionada a las asociaciones mineralógicas. Sólo el 13% de los datos del SEC están diferenciados según estas asociaciones, debido a que dicha diferenciación fue implementada en 2020.

Cabe destacar que en la actualidad es esta información la que se utiliza para generar el modelamiento de zona mineral para RW. Este modelo se realiza con la información no discretizada debido a la poca densidad de datos de los conceptos posteriormente diferenciados. Además, el modelado por reglas de negocio, debido a la falta de datos de la zona primaria en el depósito, convierte el material primario en secundario mediante un *script*

específico, lo que impide la inclusión de la categoría PRI en el modelo de RW. Esta aproximación ha sido justificada debido a la visión histórica del depósito como un sistema epitermal de alta sulfuración, pero actualmente es necesario enfrentar el desafío de mitigar la variabilidad mineralógica del depósito, dado el avance en el plan minero hacia Rosario Oeste.

Por lo tanto, se vuelve necesario explorar otras alternativas para obtener información mineralógica que sea aplicable y sustentable a lo largo del tiempo. En este contexto, se revisó la base de datos de los métodos obtenidos a través de laboratorio, como QEMSCAN y PtXt, de manera independiente. La información histórica obtenida mediante QEMSCAN es de gran utilidad, ya que se considera uno de los métodos más precisos para identificar la mineralogía de una muestra. Esta alta precisión, sin embargo, implica que es un método de alto valor en el mercado, lo que restringe su disponibilidad y hace que no sea posible representar todo el depósito basándose únicamente en este método. En el presente estudio se utilizaron 1,200 metros de análisis provenientes de 57 sondajes de Rosario Oeste, los cuales, al ser analizados, ayudaron a resolver dudas existentes sobre la baja presencia de covelina en el depósito. Además, se intentó identificar las zonas de SECF y SECD. Sin embargo, los resultados presentados en esta investigación demostraron que, a nivel de laboratorio, el SECF no se reconoce de acuerdo con su definición de mineralogía secundaria, ya que no muestra una presencia superior al 80%. Este hallazgo plantea una interrogante importante: ¿por qué se sigue utilizando esta discretización en estos dos conceptos si no cuentan con un respaldo químico sólido? Si en el futuro se emplean estas definiciones para clasificar la zona secundaria en el modelado de RW, podría arrastrarse un error que afectaría la calidad del modelo. Este aspecto hace que la presente investigación sea aún más relevante, ya que evidencia estos hallazgos y sugiere que las definiciones actuales deben ajustarse para ser más precisas y, en consecuencia, ser aplicadas con mayor eficacia en el futuro.

Como parte de la revisión histórica mineralógica de Rosario Oeste, se analizaron los resultados obtenidos mediante el método de PtXt, el cual actualmente se utiliza en diversos depósitos epitermales de alta sulfuración. Sin embargo, este método presenta limitaciones cuando se aplica a Rosario Oeste, ya que utiliza una mineralogía normativa diseñada para calcular los porcentajes de composición mineral de muestras en depósitos con sistemas ternarios de sulfuros de cobre (es decir, tres minerales). Esto difiere significativamente de la

realidad de Rosario Oeste, donde coexisten cinco minerales distintos: calcosina, calcopirita, covelina, bornita y enargita. Por lo tanto, los porcentajes de composición mineral obtenidos no son representativos del depósito. No obstante, el método de PtXt sigue siendo útil al proporcionar valores netos de CNCu, FSCu y CuT, que se entregan directamente en los informes. A través de los radios de PtXt, es posible representar la composición mineralógica de una muestra utilizando un triángulo que, a partir de datos estandarizados específicos para cada mineral, permite identificar las asociaciones minerales presentes en la muestra, como se mostró en el ítem 5.1.3.

Debido al análisis histórico de las bases de datos mineralógicas existentes para el depósito y entendiendo que cada una presenta diferentes limitaciones, se buscó comparar los tres métodos para identificar asociaciones tipo que permitieran agrupar y definir unidades geológicas representativas. En este proceso, se realizó el hallazgo más relevante de esta investigación. A diferencia de los análisis generalizados previos, en esta ocasión se analizaron tramos de sondajes que contenían información de los tres métodos. Es normal y esperado que al comparar métodos obtenidos visualmente surjan discrepancias con aquellos basados en resultados químicos. Con esta consideración, se analizaron los datos, lo que evidenció la gran variabilidad mineralógica de Rosario Oeste. Se observó que no existía una relación que permitiera unificar los tres métodos, ya que, en algunos tramos de sondajes, los resultados del mapeo y el análisis QEMSCAN se ajustaban mejor, mientras que, en otros tramos, incluso dentro del mismo sondaje, se presentaban concentraciones mineralógicas claramente diferentes. Estas conclusiones e incógnitas surgieron al comparar los porcentajes mineralógicos, excluyendo los obtenidos por PtXt. Como se explicó anteriormente, este método no permite comparaciones directas debido a su capacidad para identificar sólo tres minerales, lo que impide su uso para determinar este hallazgo relevante.

Este hallazgo resultó ser de gran relevancia, dado que se trataba de información histórica crucial del depósito. Por ello, se realizaron visitas al terreno y se llevaron a cabo análisis químicos para verificar los tramos en cuestión, confirmando las conclusiones obtenidas a partir del análisis de la base de datos. Sin embargo, este proceso de corroboración también presentó algunas limitaciones. Por ejemplo, algunos sondajes no contaban con testigos disponibles en las bandejas debido a posteriores muestreos geometalúrgicos, y otros sondajes

muy antiguos mostraron dificultades debido al tiempo transcurrido y al estado de conservación de las muestras. A pesar de estas limitaciones, en las bandejas que sí se pudieron analizar, se observó la misma variabilidad mineralógica. En ciertos sectores, los resultados del mapeo coincidían adecuadamente, mientras que en otros tramos, al ser revisados, se identificaron mineralogías que no se reconocían en las cartillas de mapeo. Como parte de este proceso, se tomaron muestras para comparar lo encontrado en terreno, con el fin de verificar si existían sulfuros primarios no reconocidos históricamente. Los resultados mostraron claramente que tanto sulfuros primarios como secundarios coexisten en Rosario Oeste, lo que subraya la importancia de ajustar las definiciones y métodos actuales para un mejor entendimiento del depósito.

Estos resultados son fundamentales en esta investigación, ya que evidencian el desafío de redefinir las unidades geológicas con el fin de aportar a un modelado más específico de la zona mineral en Rosario Oeste. Es innegable la necesidad de contar con un modelado preciso, ya que, tal como se ha expuesto, la ausencia de este modelo provocará una alta incertidumbre y variabilidad en el procesamiento del depósito, lo que impactará directamente en la planta. Esta incertidumbre puede comprometer el futuro del negocio minero, ya que los modelos actuales podrían no reflejar con precisión la realidad del depósito. Tal situación afectaría no solo la parte operativa, sino también el proceso de recuperación mineral, especialmente en lo que respecta a los sulfuros primarios y secundarios. Este reto no solo involucra al área de recursos, sino que se extiende a toda la compañía, ya que cualquier desviación de la producción comprometida afectaría la planificación y los resultados a largo plazo.

Con el objetivo de establecer cimientos sólidos y valiosos para el futuro modelado de la zona mineral de Rosario Oeste, se analizaron los datos históricos de *televectors* correspondientes a la mineralización secundaria en el depósito. Este análisis se centró en identificar la dirección preferencial del mineral secundario, dado que el modelo actual de la zona mineral de este depósito utiliza una dirección general para la mineralización, la cual se determinó a partir de todos los datos de Rosario Oeste sin distinguir entre zonas mineralizadas y no mineralizadas. Este enfoque presenta limitaciones, ya que la mineralización comparte la misma orientación que las zonas no mineralizadas, un punto crucial cuando se trata de la

importancia estructural que influye en la mineralización en un depósito epitermal de alta sulfuración.

El análisis de los datos reveló una orientación diferente a la previamente conocida, identificando y reconociendo dos dominios estructurales dentro de Rosario Oeste. El primer dominio, denominado Dominio 1, muestra un comportamiento cercano al pit Rosario, abarcando desde la falla La Última hacia el suroeste, con valores de azimut de 323° y un manteo de 55° . En contraste, el Dominio 2, correspondiente al comportamiento neto de Rosario Oeste, presenta valores cercanos a los que actualmente se generalizan para el depósito, con un azimut de 346° y un manteo de 79° . Este hallazgo representa un avance significativo, ya que mejora la conceptualización estructural del depósito, un aspecto clave debido a la estrecha relación entre lo estructural y la distribución de la mineralización. En particular, en un depósito con una mineralización vetiforme dominante, estos ajustes permitirán enfrentar de mejor manera las complejidades que presenta la extracción a gran escala. La incorporación de esta nueva zonificación mineralógica, junto con los dominios estructurales definidos, facilitará el desarrollo de un modelo con menor variabilidad, permitiendo una representación más precisa de las zonas de alta ley y, en consecuencia, a una planificación minera más efectiva.

A partir de los hallazgos y avances presentados en este trabajo, se plantea la redefinición de las unidades geológicas y mineralógicas para el modelado de Rosario Oeste. Esta redefinición se logra implementando una nueva metodología que permitiría unificar los parámetros visuales obtenidos del mapeo geológico con los resultados obtenidos en el laboratorio a través de datos de PtXt. Como parte de esta metodología, se propone una tabla basada en los parámetros geometalúrgicos CNCu, FSCu y CuT, que utiliza rangos específicos de las razones CNCu/CuT y FSCu/CuT. Esta clasificación permite identificar con mayor precisión la mineralogía predominante en cada zona, lo que facilita la definición de asociaciones mineralógicas tipo, adaptadas a las particularidades de RW.

La nueva zonificación mineralógica propuesta contempla cinco subzonas dentro del dominio de enriquecimiento secundario, entre las cuales destaca una dominada por calcosina (Cc), redefinida como SECF o zona de alto enriquecimiento. Para las asociaciones de sulfuros primarios y secundarios, clasificadas como SECD o zonas de mediano enriquecimiento, se

identifican cuatro zonas: Cc-Cpy-Bo, Cc-Cpy, Cc-Bo y Bo-Cc. Esta última se considera zona transicional, ya que presenta mayor proporción de Bo respecto a Cc, aunque aún insuficiente para ser clasificada como zona PRI. Esta zonificación permite, por primera vez, aislar y modelar la zona PRI, la cual se subdivide en dos dominios: uno dominado por Bo y otro por Cpy - Bo.

Además de permitir la separación del mineral secundario, esta metodología facilita la identificación y discretización del mineral primario. Este enfoque no solo es viable, sino también sustentable en el tiempo, ya que los análisis asociados a esta metodología no presentan un costo elevado, lo que lo hace aplicable a los sondeos sin representar un gasto significativo en la industria. Su implementación en el flujo de trabajo se considera durante el mapeo de sondeos en la muestrera, lo cual responde a la necesidad de unificar la información histórica de los métodos mineralógicos.

El objetivo es generar una doble validación entre el método visual y los resultados de laboratorio, llegando a un consenso sobre la asociación tipo presente en un tramo específico de sondeo. De esta manera, se homogeniza la información sin necesidad de intervenirla mediante *scripts* para unificarla. Esto asegura que el input de información para generar el modelo mineralógico, realizado por los geólogos modeladores, sea directo, sin pérdida de datos y, por ende, mejore la representatividad del depósito desde la fase de recopilación de datos en muestrera.

Para asociar la metodología de mapeo de sondeos con esta nueva metodología, es necesario en primer lugar capacitar a los geólogos, mostrando los hallazgos tanto de forma visual como numérica para ejemplificar los problemas existentes en la actualidad. En segundo lugar, se debe instruir en el nuevo protocolo de identificación de zona mineral y asociación tipo, el cual incluye la identificación porcentual mineralógica a lupa, seguida de su identificación mediante los parámetros de PtXt. Finalmente, se debe consensuar la zona mineral y la asociación tipo dentro de la tabla propuesta en esta investigación.

Este método complementa la validación del mapeo, que actualmente depende exclusivamente del geólogo senior en la muestrera. Al integrar la validación química, se mejora la certeza de la información, fusionando el análisis visual con el químico en el mismo

proceso de mapeo del sondaje. No cabe duda de que, para implementar esta redefinición de zonas, es fundamental comenzar con la comprobación y ajuste de los rangos de CNCu/CuT y FSCu/CuT, utilizando el sondaje como referencia directa. Con este ajuste, la metodología podría aplicarse con precisión y sin arrastrar errores como los expuestos en este estudio.

Proponer la implementación de esta nueva metodología sin un plan de mitigación respecto a la información histórica, que presenta una gran variabilidad, no sería adecuado. Por ello, siguiendo la metodología de re mapeo de sondajes que la compañía aplica actualmente, se sugiere implementar campañas específicas para homogenizar la información histórica de mapeo. Esto podría lograrse mediante la realización de lotes para análisis de PtXt en Rosario Oeste, utilizando las muestras de rechazo que han sido guardadas históricamente. Esta estrategia evitaría afectar la extracción de partes del sondaje original, lo cual podría generar problemas a futuro, como se evidenció cuando se intentó revisar los sondajes en terreno y se encontró que algunos testigos habían sufrido disminución de información.

Si bien la actualización de las unidades permitió mejorar la caracterización geológica y ajustar la orientación preferencial del enriquecimiento secundario, no fue posible alcanzar un modelo geológico sólido de zona mineral que permita estimar recursos con confianza. Por lo tanto, aún no se genera un aporte concreto a la planificación minera ni a la proyección de recuperación en planta. Sin embargo, este trabajo representa un avance fundamental que sienta las bases para futuras iteraciones del modelo, entregando un marco técnico más robusto para profundizar en el entendimiento del depósito.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos confirman que la zona de enriquecimiento supérgeno de Rosario Oeste presenta heterogeneidades mineralógicas que pueden ser discretizadas en unidades geológicas. Sin embargo, no fue posible generar un modelo actualizado en esta etapa debido a inconsistencias entre los métodos mineralógicos evaluados, tanto de forma individual como integrada. Para validar estas discrepancias, se analizaron sondajes representativos mediante re mapeo y análisis calcográficos, corroborando las diferencias visualmente y por microscopía. Ante estas limitaciones, se propuso una metodología alternativa basada en radios de extracción parcial usando parámetros geometalúrgicos (cobre férrico, cianurable y total), que permitió discriminar la zona secundaria en dominios mineralógicos de alto, bajo y enriquecimiento transicional, diferenciándola de las unidades primarias. Además, se identificaron dos dominios estructurales específicos que aportan control y precisión al modelo, acorde con las características del depósito epitermal de alta sulfuración.

Esta investigación sienta las bases para la actualización del modelo de zona mineral de Rosario Oeste, mediante la definición de envolventes específicas para cada zonificación mineral. La incorporación de parámetros basados en datos PtXt permite integrar y fortalecer la información histórica, además de ofrecer una metodología replicable para el análisis sistemático de sondajes. Esto facilita una caracterización mineralógica más precisa, con beneficios directos para el área de geometalurgia, al optimizar la recuperación de cobre y reducir la incertidumbre en los procesos mineros en Collahuasi.

Las zonas definidas pueden implementarse en el mapeo geológico para revisar y ajustar las asociaciones minerales estándar, abordando la falta de coherencia con los datos químicos. Es fundamental unificar los métodos visuales y de laboratorio, minimizando la variabilidad y mejorando la interpretación. Se recomienda capacitar al equipo de muestrera en estos nuevos criterios y adoptar la metodología en el flujo de trabajo habitual. Asimismo, se sugiere aplicar esta metodología tras el mapeo de sondajes, para identificar tramos y zonas a partir de datos PtXt, y validar esta información mediante comparación visual con testigos de sondaje, favoreciendo un consenso sobre la mineralogía asignada. El establecimiento de asociaciones minerales tipo fortalecerá la comprensión geológica y permitirá un modelamiento y

estimación de recursos más precisos, contribuyendo a cumplir con los objetivos operacionales y los compromisos con los accionistas. Este enfoque beneficia tanto el área de recursos minerales como la operación minera, especialmente en la planificación y los procesos geometalúrgicos de planta. Se espera que esta metodología evolucione incorporando parámetros adicionales (geometalúrgicos, geomecánicos, hidrogeológicos) para optimizar la gestión del depósito y enfrentar futuros desafíos extractivos en Collahuasi.

Finalmente, dado que las limitaciones encontradas impidieron definir un modelo actualizado completo, no fue posible avanzar en la actualización formal de la estimación de recursos ni en la evaluación del impacto en los procesos de extracción y recuperación. Estos objetivos quedan pendientes para etapas futuras, las cuales podrán aprovechar los avances metodológicos y resultados de esta investigación para mejorar la planificación y eficiencia minera en Rosario Oeste.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ardill, J., Flint, S., Chong, G., y Wilke, H.-G. (1998). Sequence stratigraphy of the Mesozoic Domeyko Basin, northern Chile. *Journal of the Geological Society*, 155, 71-88. [https://doi.org/\[incluir si aplica\]](https://doi.org/[incluir si aplica])

Aurum. (2009). *Estudio geológico-metalogénico distrito Collahuasi, informe final etapa II. Levantamiento geológico y metalogénesis a escala 1:50.000 y 1:25.000* (Informe inédito). Santiago, Chile: Aurum, pp. 475.

Ávalos, N. (2019). *Documento sobre inclusiones fluidas V: exploración para depósitos pórfido cuprífero basada en petrografía de inclusiones fluidas en el distrito minero Collahuasi, Chile*. Tesis para optar al grado de Geólogo, Universidad de Chile. Santiago, Chile, pp. 178.

Baker, R., Rehkämper, M., Ihlenfeld, C., Oates, C., y Coggon, R. (2010). Thallium isotope variations in an ore-bearing continental igneous setting: Collahuasi Formation, northern Chile. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(15), 4405-4416.

Bissó, C. B., Durán, M., y González, A. (1998). Geology of the Ujina and Rosario copper porphyry deposits, Collahuasi district, Chile. In M. T. Porter (Ed.), *Porphyry and hydrothermal copper and gold deposits: A global perspective* (pp. 217-232). Conference proceedings, Perth, Australia.

Bogdanic, T. (1990). Kontinentale Sedimentation der Kreide und des Alttertiärs im Umfeld des subduktionsbedingten Magmatismus in der chilenischen Präkordillere (21°-23°). *Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen (A)*, 123, 1-117.

Briones, M. (2002). Producción caprina de carne. Conferencia presentada en el *XII Congreso Chileno de Medicina Veterinaria*.

Camus, F. (2003). *Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile, pp. 267.

Charrier, R. (1979). El Triásico en Chile y regiones adyacentes de Argentina. *Comunicaciones del Departamento de Geología, Universidad de Chile*, 26, 1-37.

Charrier, R., Pinto, L., y Rodríguez, M. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. In T. Moreno & W. Gibbons (Eds.), *The geology of Chile* (pp. 21-114). Geological Society, London.

Charrier, R., Farías, M., y Maksaev, V. (2009). Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el Cenozoico en los Andes de Chile norte y central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(1), 5-35.

Clark, A. H., Archibald, D. A., Lee, A. W., Farrar, E., y Hodgson, J. (1997). Laser-probe $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of early and late-stage alteration assemblages, Rosario porphyry copper-molybdenum deposit, Collahuasi District, I Región, Chile. *Economic Geology*, 93, 326-337.

CMDIC (2014). *Modelo de recursos minerales 2014*. Informe inédito. Iquique, Chile: CMDIC, pp. 76.

Cornejo, P. (2005). *Estudio petrográfico y calcográfico proyecto La Grande*. Informe interno, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

Dick, L., Chávez, W., González, A., y Bisso, C. (1994). Geologic setting and mineralogy of the Cu–Ag–(As) Rosario vein system, Collahuasi district, Chile. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 19, 6-11.

Dilles, J., Tomlinson, A., Martin, M., y Blanco, N. (1997). El Abra and Fortuna complexes: A porphyry copper batholith sinistrally displaced by the Falla Oeste. *VIII Congreso Geológico Chileno*, Antofagasta, 3, 1883-1887.

Fuenzalida, H. (1965). Clima, en CORFO: Geografía Económica de Chile. Editorial Universitaria. Santiago de Chile. 228-267.

Garay, J (2021). modelamiento estructural de la ocurrencia y distribución del arsénico en el yacimiento rosario, distrito collahuasi, región de Tarapacá, Chile. Universidad Andrés Bello, Departamento de Ciencias de la Ingeniería (Inédito): 213 pp. Iquique.

García, F. (1967). Geología del Norte Grande de Chile. Sociedad Geológica de Chile, Symposium sobre el Geosinclinal Andino, Santiago, 138 pp.

Ireland, T. (2010). Geological Framework of the Mineral Deposits of the Collahuasi district, Region de Tarapacá. Tesis para optar a grado de Doctor. Tasmania, Australia, University of Tasmania: pp. 440.

Janssen, C.; Hoffmann-Rothe, A.; Tauber, S. y Wilke, H.-G. (2002). Internal structure of the Precordilleran fault system (Chile) – insights from structural and geophysical informations. *Journal Structural Geology*, 24, 123-143.

Lee, A. (1994). Evolution of the Rosario copper-molybdenum porphyry deposit and associated copper-silver vein system, Collahuasi district, I Region, northern Chile: Inedita MA. Thesis, Kingston, Ontario, Canada, Queens University, pp.75.

Maksaev, V., Munizaga, F., Mathur, R., Barra, F., Fanning, M., McWilliams, M., Ruiz, J. y Sanhueza, A.6. (2009). Geochronology of the Collahuasi porphyry Cu-Mo district, north chilean Andes. XII Congreso Geológico Chileno. Santiago.

Masterman, G. (2003). Structural and geochemical evolution of the Rosario Cu-Mo porphyry deposit and related Cu-Ag veins, Collahuasi district, northern Chile: Unpublished Ph.D. thesis, Tasmania, Australia, University of Tasmania: pp. 253.

Masterman, G., Cooke D., Berry R., Clark A., Archibald, D., Mathur, R.; Walshe, J. y Durán, M. (2004). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Re-Os Geochronology of Porphyry Copper-Molybdenum Deposits and Related Copper-Silver Veins in the Collahuasi District, Northern Chile. *Economic Geology* 99: pp. 673–690.

Masterman, G., Cooke D., Berry R., Clark A., Archibald, D., Mathur, R.; Walshe, J. y Durán, M. (2004). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Re-Os Geochronology of Porphyry Copper-Molybdenum Deposits and Related Copper-Silver Veins in the Collahuasi District, Northern Chile. *Economic Geology* 99: pp. 673–690.

Masterman, G. Cooke, D., Berry, R., Walshe, J., Lee, A., y Clark, A. (2005). Fluid chemistry, structural setting, and emplacement history of the Rosario Cu-Mo porphyry and Cu-Ag-Au epithermal veins, Collahuasi district, northern Chile. *Economic Geology*, 100(5): pp. 835-862.

Fuenzalida, H. (1965). Clima. En CORFO (*Geografía Económica de Chile*, pp. 228-267). Editorial Universitaria, Santiago de Chile.

Garay, J. (2021). *Modelamiento estructural de la ocurrencia y distribución del arsénico en el yacimiento Rosario, distrito Collahuasi, Región de Tarapacá, Chile*. Tesis inédita, Universidad Andrés Bello, Departamento de Ciencias de la Ingeniería, Iquique, Chile, pp. 213.

García, F. (1967). *Geología del Norte Grande de Chile*. Sociedad Geológica de Chile, Symposium sobre el Geosinclinal Andino, Santiago, Chile, pp. 138.

Ireland, T. (2010). *Geological framework of the mineral deposits of the Collahuasi district, Región de Tarapacá*. Tesis doctoral inédita, University of Tasmania, Australia, pp. 440.

Janssen, C., Hoffmann-Rothe, A., Tauber, S., y Wilke, H.-G. (2002). Internal structure of the Precordilleran fault system (Chile): Insights from structural and geophysical information. *Journal of Structural Geology*, 24, 123-143.

Lee, A. (1994). *Evolution of the Rosario copper-molybdenum porphyry deposit and associated copper-silver vein system, Collahuasi district, I Región, northern Chile*. Tesis de maestría inédita, Queen's University, Kingston, Ontario, Canadá, pp. 75.

Maksaev, V., Munizaga, F., Mathur, R., Barra, F., Fanning, M., McWilliams, M., Ruiz, J., y Sanhueza, A. (2009). Geochronology of the Collahuasi porphyry Cu-Mo district, north Chilean Andes. En *XII Congreso Geológico Chileno*, Santiago, Chile.

Masterman, G. (2003). *Structural and geochemical evolution of the Rosario Cu-Mo porphyry deposit and related Cu-Ag veins, Collahuasi district, northern Chile*. Tesis doctoral inédita, University of Tasmania, Australia, pp. 253.

Masterman, G., Cooke, D., Berry, R., Clark, A., Archibald, D., Mathur, R., Walshe, J., y Durán, M. (2004). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Re-Os geochronology of porphyry copper-molybdenum deposits and related copper-silver veins in the Collahuasi district, northern Chile. *Economic Geology*, 99, 673–690.

Masterman, G., Cooke, D., Berry, R., Walshe, J., Lee, A., y Clark, A. (2005). Fluid chemistry, structural setting, and emplacement history of the Rosario Cu-Mo porphyry and

Cu-Ag-Au epithermal veins, Collahuasi district, northern Chile. *Economic Geology*, 100(5), 835-862.

Moore, R. L., y Masterman, G. L. (2002). The corporate discovery and geology of the Collahuasi district porphyry copper deposits, Chile. En D. R. Cooke & J. Pongrantz (Eds.), *Giant ore deposits: Characteristics, genesis and exploration* (pp. 23-50). CODES Special Publication 4, Australia.

Mpodozis, C., y Ramos, V. (2008). Tectónica Jurásica en Argentina y Chile: Extensión, subducción oblicua, rifting, deriva y colisiones. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63(4), 481-497.

Münchmeyer, C., Hunt, J., y Ware, H. (1984). Geología del distrito de Collahuasi y del pórfido cuprífero Rosario. Informe interno, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, Santiago, Chile, pp. 84.

Munizaga, F. (1995). *Edades 40Ar/39Ar, distrito minero Collahuasi*. Reporte interno, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, pp. 100.

Munizaga, F., Maksaev, V., Fanning, C., Giglio, S., Gregory, M., y Colombo, C. (2008). Late Paleozoic - Early Triassic magmatism on the western margin of Gondwana: Collahuasi area, northern Chile. *Gondwana Research*, 3(3), 407-427.

Muñoz, J., Troncoso, R., Duhart, P., Crignola, P., Farmer, G., y Stern, C. (2000). The relation of the mid-Tertiary coastal magmatic belt in south-central Chile to the late Oligocene increase in plate convergence rate. *Revista Geológica de Chile*, 27(2), 177-203.

Muñoz, C. (2009). *Caracterización petrográfica y petrológica de Rosario Oeste y su relación con la mineralización, distrito minero Doña Inés de Collahuasi, Primera Región, Chile*. Tesis para optar al grado de Geólogo, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile, pp. 118.

Oyarzún, G. (2010). *Caracterización estructural del yacimiento Rosario Oeste, distrito Collahuasi, I Región de Tarapacá, Chile*. Tesis inédita, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, pp. 148.

Quiroga, J. (2019). *Caracterización y modelamiento de vetillas en Rosario, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi S.C.M, Región de Tarapacá, Chile*. Memoria para optar al título de Geóloga, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile, pp. 61.

Ramos, V. A., Jordan, T. E., Allmendiger, R. W., Mpodozis, C., Kay, S. M., Cortes, J. M., y Palma, M. A. (1986). Paleozoic terranes of the Central Argentine–Chilean Andes. *Tectonics*, 5, 855-880.

Ramos, V. A., y Kay, S. M. (1991). Triassic rifting and associated basalts in the Cuyo Basin, central Argentina. En R. S. Harmon & C. W. Rapela (Eds.), *Andean magmatism and its tectonic setting* (pp. 79-91). Geological Society of America, Special Paper 265.

Ramos, V. A. (2010). The tectonic regime along the Andes: Present-day and Mesozoic regimes. *Geological Journal*, 45, 2–25.

Sanhueza, A., Alarcón, B., y Giglio, S. (2006). Proyecto Rosario Oeste. Informe campaña exploraciones fase II: 2005–2006. Informe Gerencia de Exploraciones, CMDIC.

Sobarzo, A. (2010). Geología y distribución de Au y Ag en Rosario Oeste, Distrito Collahuasi. (Tesis de pregrado, Universidad de Concepción, Chile).

Stoertz, G., y Ericksen, G. (1974). Geology of salars in Northern Chile. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 811, 1–65.

Teillier, S. (1998). Flora y vegetación alto-andina del área de Collahuasi - Salar de Coposa, Andes del norte de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 71, 313–329.

Tomlinson, A., y Blanco, N. (1997). Structural evolution and displacement history of the west fault system, Precordillera, Chile. *VIII Congreso Geológico Chileno*, Antofagasta, Chile, 3, 1873–1882.

Tomlinson, A., Martin, M., & Blanco, N. (2001). U-Pb and K-Ar geochronology from the Cerro Empexa Formation, 1a and 2a Regions, Precordillera, northern Chile. En *South American Symposium on Isotope Geology*, Actas 1, 169.

Vergara, H. (1978). Carta Geológica de Chile N°33, Escala 1:50.000. Cuadrángulo Ujina. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile.

Vergara, H., y Thomas, A. (1984). Hoja N° 59 Collacagua, Región de Tarapacá. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, Santiago, Chile.

Vivanco, L. (2019). Informe de modelamiento: Modelo geológico de la ocurrencia y distribución espacial del molibdeno en el yacimiento Rosario, Región de Tarapacá, Chile. Informe interno, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.