



ESCUELA DE
GEOLOGÍA

**CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE COBALTO EN PIRITAS
DEL DEPÓSITO MINERAL IOCG LA ESTRELLA, REGIÓN DE
ATACAMA, CHILE**

Memoria entregada a la Universidad Mayor en cumplimiento de los requisitos para
optar al Título de Geólogo

JAVIER IGNACIO QUEVEDO MACKAY

PROFESORA GUÍA

ROMKE KUYVENHOVEN

Miembros de la Comisión Evaluadora de Examen

XIMENA PRIETO

PAULA LARRONDO

Este trabajo ha sido financiado por SMI-ICE-Chile

SANTIAGO DE CHILE

Marzo, 2020

RESUMEN

El depósito mineral La Estrella, tipo IOCG (*Iron Oxide Copper Gold*) está ubicado en la Cordillera de la Costa de la III Región de Atacama, a 20 km al suroeste de la ciudad de Vallenar. Este depósito tiene como commodities principal el cobre, el cual ha sido explotado de forma artesanal y en menor medida el hierro, sin embargo, también posee una firma geoquímica distintiva con valores anómalos de Co, Ni, P y REE (*Rare Earth Elements*).

Estudios anteriores realizados en el depósito mineral La Estrella evidenciaron la ausencia de minerales de cobalto (i.e. cobaltita, asbolana, eritrina, etc), sin embargo, una caracterización química mediante absorción atómica en muestras de concentrados piritosos entregó valores de hasta 1000 ppm de cobalto. Esto demuestra que efectivamente, la pirita es un sulfuro capaz de albergar variados elementos de interés económico y entre estos está el cobalto.

En la presente investigación se identificaron cinco tipos de piritas, cada una de ellas asociadas a cinco diferentes eventos de mineralización y alteración y, mediante análisis ICP-MS-LA, se pudo identificar cuál de estas piritas posee mayores concentraciones de cobalto y de qué manera este elemento está distribuido en este sulfuro, de forma homogénea o heterogénea, diseminado o concentrado en los bordes o en el centro del cristal. Sobre la base de esta información, se puede identificar en un futuro plan minero, cuáles son los sectores del depósito con mayor contenido de cobalto en sus piritas, para así poder maximizar la ley de cobalto en un concentrado piritoso cobaltífero. Además, el conocer la distribución de cobalto en la pirita facilita la identificación del método de solubilización para procesar este concentrado piritoso.

Finalmente, luego de identificar alternativas para estos procesos metalúrgicos en base a los resultados obtenidos, se realizó una evaluación económica preliminar para una posible explotación a futuro de cobalto como subproducto del cobre y hierro en este depósito.

ABSTRACT

La Estrella mineral deposit, type IOCG (Iron Oxide Copper Gold) is located in the Cordillera de la Costa of the III Region of Atacama, 20 km southwest of the city of Vallenar. This deposit has copper as main product, which has been exploited in an artisanal way and, to a lesser extent, iron, however, also has a distinctive geochemical signature with anomalous values of P, REE (Rare earth elements), Ni and Co.

Currently, the interest in cobalt due to its use in electromobility, and studies conducted in the La Estrella mineral deposit evidenced the absence of cobalt minerals (i.e., cobaltite, asbolane, erythrite, etc) However, a chemical characterization by ICP-AA in samples of pyrite concentrates, delivered values of up to 1000 ppm of cobalt. Indeed, pyrite is a sulfide capable of hosting various elements of economic interest and among these is cobalt.

In the present researching, five different types of pyrites were identified and, by ICP-MS-LA analysis, it was possible to identify which of these pyrites has the highest cobalt concentrations and how this element is distributed in this sulphide, even, in the center, on the edges, in zoning, etc ... Based on this information, it is intended to identify which types of pyrites should be concentrated to maximize the cobalt law in the concentrate. In addition, knowing the distribution of cobalt in pyrite facilitates the identification of the solubilization methods for processing this pyrite concentrate.

Finally, after identifying alternatives for these metallurgical processes based on the results obtained, a preliminary economic evaluation was carried out for a possible future exploitation of cobalt as a byproduct of copper in this deposit.

SOLO USO ACADÉMICO

*Conocí a constancia al poco tiempo,
me atrajo su fragancia y desde aquel
momento la fui conociendo,
su autoestima y disciplina me dijeron,
no abandones,
tendrás un sitio en la cima con los
mejores*

(Ellas, Nach)

Agradecimientos

Me han enseñado que siempre es importante agradecer a las personas que te han apoyado, aconsejado, guiado y enseñado y es por esto, que llego el momento de agradecer a todas las personas que han sido fundamental en este proceso y en este trabajo de investigación.

En primer lugar, quiero agradecer al Sr. Luis Fritis y a su familia, quienes nos permitieron acceder a la mina La Estrella y nos recibieron increíble en su casa.

Agradezco a SMI-ICE-Chile y a todo el equipo, quienes financiaron este trabajo y además fueron fundamental en esta investigación. En especial a David Mulligan y a mi jefa, Romke Kuyvenhoven, quien ha sido una excelente persona, confió en mí y me dio una oportunidad para hacer mi memoria en el centro. Además, agradezco al equipo de Productividad, Anita, Solange y Jose, que siempre estuvieron dispuestos a ayudarme y sin ellos este trabajo no habría sido posible, y por supuesto dar las gracias a las demás personas que incorporan SMI-ICE-Chile, y SMI-ICE en Australia como Anita Parbhakar-Fox y Rick Valenta.

Quiero agradecer a Santiago, mi hijo, mi compañero de vida, con quien nos conocimos mientras estaba a mitad de camino en la universidad y que me ha enseñado que no debo rendirme nunca, que el esfuerzo y el trabajo son la base del éxito, y que, aunque las cosas estén complicadas, siempre podemos sonreír juntos con tu mamá, los tres, sabiendo y como siempre te hemos dicho, ¡que todo va a estar bien!

También quiero dar las gracias a mi familia, a mi mamá Joanna, a Eduardo y a mi mamá Fernanda, quienes estuvieron siempre apoyándome en los mejores y peores (pésimos) momentos, y saben que son los más importantes para mí junto al San. Los amo con mi alma.

De igual forma gracias a todos los Quevedo, especialmente a mis hermanos Jorge y Rodrigo, ¡los amo!

A la familia Zambrano León les doy las gracias, al igual que al tata Fernando y a la nona, quienes abrieron las puertas de su casa para mí y mi familia en La Serena y han sido parte muy importante de todo este proceso.

Agradecer a los cabros, los cuales cualquier persona que me conoce sabe que son parte importantísima de mi familia y que han estado muy involucrados en este proceso, apañando como se puede, ¡pero siempre estando ahí! De igual forma, para los chiquillos de la U en especial al pelao, joaco, santi, diego, pia, flo, coní, vale, parreitor, parrita, pablo, coco; ¡gracias por todos estos años juntos, quien nos viera y quien nos ve!

Gracias a las profesoras Ximena Prieto y Paula Larrondo, fueron muy importantes durante la universidad y en esta memoria, siempre me dieron la posibilidad de conversar con ustedes sea cual sea el caso, dándome una mano o aconsejándome, incluso en temas no relacionados a la geología. Lo mismo para la Dani Maturana, la mejor, y al Profe Ignacio Molina, quien confió en mí incluso sin tener que hacerlo y dándome una oportunidad.

Finalmente, agradecer a Álvaro Puig y Natalia Astudillo, increíbles geólogos que me brindaron su ayuda durante esta memoria aclarando mi mente en momentos de muchas dudas.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	i
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Contexto general	1
1.2 Planteamiento del problema	1
1.3 Hipótesis.....	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
1.5 Metodología.....	5
1.5.1 Etapa 1 Pre terreno: Recopilación y revisión bibliográfica.....	5
1.5.2 Etapa 2 Terreno: Levantamiento de información geológica y obtención de muestras.....	6
1.5.3 Etapa 3: Post terreno:.....	6
1.6 Área de estudio y vías de acceso	10
CAPÍTULO 2: MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	11
2.1 Introducción.....	11
2.2 Marco tectónico regional	11
2.3 Yacimientos Minerales Franja Ferrífera	14
2.4 Geología Distrital.....	17
2.4.1 Rocas estratificadas.....	17
2.4.1.1 Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior-Hauteriviano superior) (Segerstrom y Ruiz, 1962).....	17
2.4.1.2 Formación Nantoco (Hauteriviano superior) (Biese-Nickel en Hoffstetter et al., 1957)	18
2.4.1.3 Gravas de Domeyko (Mioceno Medio).....	18
2.4.1.4 Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos (Mioceno Superior-Plioceno) ...	18
2.4.1.5 Depósitos Aluviales (Pleistoceno-Holoceno)	18
2.4.2 Rocas intrusivas.....	19
2.4.2.1 Complejo Plutónico La Higuera (124-122 Ma) (Arévalo y Welkner, 2008) .	19
2.4.2.2 Granodiorita Florida (ca. 101 Ma) (Arévalo et al., 2009)	19
2.4.2.3 Complejo Plutónico Camarones (96-91 Ma) (Arévalo et al., 2009)	20
CAPÍTULO 3: GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO	22
3.1 Proyecto Productora.....	22
3.2 Depósito La Estrella	26

CAPÍTULO 4: MARCO GEOMETALÚRGICO	28
4.1 Concentración de cobalto	28
4.2 Tratamiento de los concentrados de cobalto en piritas	29
4.3 Producto intermedio o final de cobalto	31
4.4 Caracterización geometalúrgica realizada en La Estrella	31
CAPÍTULO 5: RESULTADOS	34
5.1 Introducción	34
5.2 Descripciones macroscópicas en terreno	36
5.3 Descripciones petrográficas-calcográficas	40
5.3.1 Otras alteraciones de desarrollo puntual	53
5.4 Descripción de piritas	57
5.5 Análisis SEM-QEMSCAN	63
5.6 Análisis ICP-MS-LA de cobalto	75
CAPÍTULO 6: FACTIBILIDAD ECONÓMICA PRELIMINAR	86
6.1 Bases de evaluación	86
6.2 Estimación de costos y beneficio	87
6.2.1 Capital Expenditure (CAPEX)	87
6.2.2 Operational Expenditure (OPEX)	87
6.2.3 Niveles de producción	88
6.2.4 Precio del cobalto	89
6.3 Análisis de sensibilidad	89
CAPÍTULO 7: DISCUSIONES	93
7.1 Mineralización y alteraciones hidrotermales	93
7.2 Caracterización química	95
7.2.1 Concentración de cobalto en ppm	96
7.2.2 Distribución de cobalto en los cristales de pirita	97
7.2.3 Contenido de Co, Ni y Fe en las piritas	98
7.3 Caracterización geometalúrgica	99
7.4 Evaluación económica preliminar	101
CAPÍTULO 8: CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	103
REFERENCIAS	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Distribución de los depósitos IOCG e IOA y la Zona de Fallas de Atacama desarrollada en el arco magmático del Jurásico-Cretácico Inferior (Modificado de Mathur et al., 2002).....	3
Figura 2: Ubicación y vías de acceso del depósito mineral La Estrella. Coordenadas UTM DATUM WGS84 huso 19S.....	10
Figura 3: a) Subducción tipo Chilena con un menor ángulo de la placa subductante, régimen compresivo; b) Subducción tipo Mariana con un mayor ángulo de la placa subductante, régimen extensional (Modificado de Yoshida, 2017).....	13
Figura 4: Modelo esquemático de los principales elementos geológicos durante el Jurásico-Cretácico Inferior (modificado de Morales, 2017).	14
Figura 5: Principales depósitos tipo IOCG e IOA en la Franja Ferrífera Chilena (Modificado de Reich et al., 2015).....	15
Figura 6: Principales distritos de cobalto explotados en Chile durante el siglo XIX y XX. Coordenadas UTM DATUM WGS84 huso 19S (datos extraídos de D'Aubarede, 1969)..	16
Figura 7: Geología del Distrito El Zapallo y Mina La Estrella. Información proveniente de la carta geológica de Vallenar-Domeyko, escala 1:100.000 (Arévalo et al., 2009). Coordenadas UTM DATUM WGS84 huso 19S.....	21
Figura 8: Geología del yacimiento Productora y La Estrella (Modificado de Jane, 2016). 23	
Figura 9: Geología, mineralización y alteración del yacimiento Productora y La Estrella, en la Cordillera de la Costa (Modificado de Jane, 2016).	25
Figura 10: Flowsheet para extraer cobalto desde piritas en La Estrella (Kuyvenhoven, 2019).	32
Figura 11: Mapa esquemático de la mina La Estrella con ubicación de los puntos en donde se obtuvieron muestras representativas, utilizadas en este trabajo.....	34
Figura 12: Marinas ubicadas a la salida del depósito mineral La Estrella.....	35
Figura 13: Izquierda: Entrada al depósito mineral La Estrella. Derecha: Zona de interior mina de donde se recolectaron algunas muestras.	35
Figura 14: Mineralización de pirita y calcopirita en bolsones. La línea roja indica el área donde se realizó la sección pulida para describir microscópicamente.....	37
Figura 15: Evento de alteración sódico-cálcico y potásico con la presencia de feldespato potásico y probablemente biotita secundaria.	37
Figura 16: Alteración tardía de sericita y arcillas.	38
Figura 17: Actinolita en parches alterada por clorita, y mineralización de pirita.	38

Figura 18: Vetillas rectas de cuarzo euhedral con piritas euhedrales cúbicas.	39
Figura 19: A) cavidades (ves) redondeadas de la roca caja, B) cavidades (ves) redondeadas rodeadas por mineralización de magnetita (mgt), luz reflejada. C) y D) hornblendas primarias de la roca caja alteradas por actinolita (act) en nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente, luz transmitida (muestra CHLE-PY4A).....	40
Figura 20: A) y B) muestran magnetita (mgt) masiva en asociación con pirita (py) y calcopirita (cpy) diseminadas (muestra CHLE-PY3A).	41
Figura 21: A) cristales de apatito asociadas a la alteración Na-Ca. B) fenocristales de albita (alb) subhedrales con bordes de reacción, rodeados por una masa microcristalina de feldespato potásico (feld K) y cuarzo (qz). C) y D) fenocristales subhedrales de albita en cúmulos con una textura coronítica de actinolita (act) y rodeados por la masa microcristalina de feldespato potásico y cuarzo. E) y F) actinolita subhedral con epidota (ep) anhedral y magnetita (mgt) (muestra CHLE-PY4A).	43
Figura 22: Mineralización de pirita y calcopirita en bolsones centimétricos del depósito La Estrella. Fotografía del frente de explotación.	44
Figura 23: A) y B) pirita (py) y calcopirita (cpy) de grano muy grueso en paragénesis. C) y D) relleno en espacios abiertos de cuarzo (qz) microcristalino granular y con textura en mosaico, en cristales de pirita de grano muy grueso. E) y F) vetillas de calcita (calc) (muestra CHLE-PY1A).....	46
Figura 24: A) apatito (apat) del Evento I diseminado rodeado por una masa microcristalina de cuarzo (qz) y feldespato potásico (feld k). B) biotita (bt) secundaria anhedral microcristalina C) y D) feldespato potásico alterado por arcillas en asociación con cuarzo microcristalino (muestra CHLE-PY2A).	48
Figura 25: A) y B) mineralización de pirita (py) subhedral en parches cloríticos que alteran a actinolita (act) del evento potásico, en luz transmitida y luz reflejada, respectivamente. C) Actinolita alterada por clorita (chl). D) muestra de roca con sericita (ser) en parches que posiblemente altera a feldespatos. E) y F) alteración de sericita y clorita a nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente. G) muestra de roca con clorita en parches en asociación con calcita (calc) euhedral de grano medio. H) Cristal de calcita con clivaje en 120 y 60° (muestra CHLE-PY2A).....	50
Figura 26: A) y B) cuarzo (qz) euhedral en luz transmitida a nicoles paralelos y cruzados, respectivamente. C) y D) mineralización de pirita (py) euhedral asociada a la vetilla de cuarzo euhedral (muestra CHLE-PY5A).	51
Figura 27: A) alteración supérgena con limonitas (lim) en luz transmitida (muestra CHLE-PY4A). B) vetilla de hematita (hem) con carbonatos (calc) y limonitas en piritas (py) de grano grueso (muestra CHLE-PY1A). C) y D) calcosina (cc) reemplazando a calcopirita (cpy) desde los bordes (muestra CHLE-PY5A para C) y muestra CHLE-PY4A para D)).	52
Figura 28: A) mushketovita (mush) asociada a vetillas de magnetita (mgt) con sulfuros de pirita (py) y calcopirita (cpy). B) mushketovita en asociación con la alteración sódica-cálcica (muestra CHLE-PY4A).....	53

Figura 29: A) y B) muestras de roca con vetillas de epidota sin halo de alteración. C) y D) vetillas de epidota en luz transmitida (muestra CHLE-PY3A).....	54
Figura 30: A) muestra de roca con vetillas de actinolita (act) y halo de magnetita (mgt). B) vetilla de actinolita en luz transmitida (muestra CHLE-PY4A).	55
Figura 31: Evento I de piritas diseminadas en magnetita masiva. La línea roja muestra el área en donde se realizó la sección transparente-pulido.	57
Figura 32: Evento II de piritas diseminadas en alteración Na-Ca. La línea roja muestra el área en donde se realizó la sección transparente-pulido.	58
Figura 33: Evento III de mineralización de piritas en bolsones. La línea roja muestra el área en donde se realizó la sección transparente-pulido.	59
Figura 34: Evento IV de piritas diseminadas en alteración K. La línea roja muestra el área en donde se realizó la sección transparente-pulido.....	60
Figura 35: Evento VI de piritas en vetillas epidermales de cuarzo. La línea roja muestra el área en donde se realizó la sección transparente-pulido.	61
Figura 36: Gráfico Wt% (weight percent) vs mineralogía presente, obtenido mediante SEM-QEMSCAN para la muestra de piritas diseminadas (muestra CHLE-PY3A).	64
Figura 37: Imágenes BSE del análisis SEM-QEMSCAN para la muestra CHLE-PY3A, correspondiente al evento de mineralización masiva de magnetita (evento I).....	65
Figura 38: Gráfico Wt% (weight percent) vs mineralogía presente, obtenido mediante SEM-QEMSCAN para la muestra de piritas en alteración sódica-cálcica (muestra CHLE-PY4A).	66
Figura 39: Imágenes BSE del análisis SEM-QEMSCAN para la muestra CHLE-PY4A, correspondiente al evento de alteración sódica-cálcica (evento II).....	67
Figura 40: Gráfico Wt% (weight percent) vs mineralogía presente, obtenido mediante SEM-QEMSCAN para la muestra de piritas en bolsones (muestra CHLE-PY1A).	68
Figura 41: Imágenes BSE del análisis SEM-QEMSCAN para la muestra CHLE-PY1A, correspondiente al evento de mineralización en bolsones (evento III).	69
Figura 42: Gráfico Wt% (weight percent) vs mineralogía presente, obtenido mediante SEM-QEMSCAN para la muestra de piritas en alteración potásica (muestra CHLE-PY2A).	70
Figura 43: Imágenes BSE del análisis SEM-QEMSCAN para la muestra CHLE-PY2A, correspondiente al evento de alteración potásica (evento IV).	71
Figura 44: Gráfico Wt% (weight percent) vs mineralogía presente, obtenido mediante SEM-QEMSCAN para la muestra de piritas en vetillas de cuarzo (muestra CHLE-PY5A).	72

Figura 45: Imágenes BSE del análisis SEM-QEMSCAN para la muestra CHLE-PY5A, correspondiente al evento de vetillas de cuarzo euhedral (evento VI).....	73
Figura 46: Análisis ICP-MS-LA para las piritas diseminadas (CHLE-PY3Aiii). El gráfico superior muestra los análisis puntuales, mientras que la imagen inferior muestra el mapa de distribución general de cobalto en la pirita.	76
Figura 47: Análisis ICP-MS-LA para las piritas en alteración Na-Ca (CHLE-PY4Aiii). El gráfico superior muestra los análisis puntuales, mientras que la imagen inferior muestra el mapa de distribución general de cobalto en la pirita.....	77
Figura 48: Análisis ICP-MS-LA para las piritas en bolsones (CHLE-PY1Aiii). El gráfico superior muestra los análisis puntuales, mientras que la imagen inferior muestra el mapa de distribución general de cobalto en la pirita.	78
Figura 49: Análisis ICP-MS-LA para las piritas en alteración K (CHLE-PY2Aiii). El gráfico superior muestra los análisis puntuales, mientras que la imagen inferior muestra el mapa de distribución general de cobalto en la pirita.	79
Figura 50: Análisis ICP-MS-LA para las piritas en vetillas epidermales de cuarzo (CHLE-PY5Aii). El gráfico superior muestra los análisis puntuales, mientras que la imagen inferior muestra el mapa de distribución general de cobalto en la pirita.	80
Figura 51: Boxplot para Fe de las muestras de pirita analizadas por ICP-MS-LA.	82
Figura 52: Gráfica de dispersión entre Co y Fe para las cinco muestras analizadas por ICP-MS-LA.	83
Figura 53: Boxplot para el Co y Ni de las muestras de pirita analizadas por ICP-MS-LA.	84
Figura 54: Gráfica de dispersión entre Co y Ni para las cinco muestras de pirita analizadas por ICP-MS-LA.	85
Figura 55: Precios del cobalto (US\$/Ton) para el año 2018 y 2019. Datos extraídos desde LME, 2019: https://www.lme.com/Metals/Minor-metals/Cobalt	89
Figura 56: Payback del proyecto de cobalto como subproducto en La Estrella. El proyecto obtiene un VAN positivo desde el año 5,4.....	90
Figura 57: Variables que sensibilizan el proyecto según el VAN.....	91
Figura 58: Variables que sensibilizan el proyecto según el “payback”.....	92
Figura 59: Mapa conceptual de alternativas metalúrgicas para recuperar cobalto desde las muestras de pirita del depósito mineral La Estrella.	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación según el tamaño de los cristales.....	6
Tabla 2: Características del modelo SEM FEI MLA650.....	8
Tabla 3: Secuencia paragenética del yacimiento Productora (Modificado de Fox, 2000)..	24
Tabla 4: Balance geometalurgico global para los tres compósitos obtenidos desde el depósito La Estrella (Kuyvenhoven, 2019).....	33
Tabla 5: Secuencia paragenética del depósito mineral La Estrella.....	56
Tabla 6: Cuadro resumen de los diferentes tipos de piritas del depósito mineral La Estrella.	62
Tabla 7: Cuadro resumen para los resultados obtenidos mediante SEM-QEMSCAN para las muestras de pirita.....	74
Tabla 8: Cuadro resumen para los resultados obtenidos mediante SEM-QEMSCAN para las muestras de pirita.....	81
Tabla 9: CAPEX desarrollado para una evaluación económica preliminar en el caso de extraer Co como subproducto en el depósito mineral La Estrella.	87
Tabla 10: OPEX desarrollado para una evaluación económica preliminar en el caso de extraer Co como subproducto en el depósito mineral La Estrella.	88
Tabla 11: Beneficio obtenido en la evaluación económica preliminar para el depósito La Estrella.	88

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto general

El cobalto es un metal de color gris plateado que durante el siglo XIX y XX fue utilizado para la fabricación de armas de guerra y superaleaciones de altas temperaturas, sin embargo, actualmente el cobalto es un elemento estratégico que se usa para la tecnología de las baterías eléctricas (electromovilidad), superaleaciones, en medicina como fuentes de radiación para tratamientos oncológicos, en la energía nuclear como fuente de radiación gamma para la irradiación de alimentos, en la generación de pigmentos, etc... (Slack et al., 2017).

Mundialmente, la República Democrática del Congo ha sido el líder en producción de cobalto (90 kton en el año 2018), aportando con más del 60% de la producción y reserva minera de cobalto. Los principales depósitos de cobalto son depósitos magmáticos de sulfuros y óxidos de Ni-Cu(-Co-PGE) (Rusia, Australia, China y Canadá), lateritas de Ni-Co (Cuba y Australia) y depósitos estratiformes sedimentarios de Cu-Co (Congo y Zambia) (Shedd, 2019).

En la actualidad, Chile no tiene yacimientos de cobalto que estén siendo explotados, sin embargo, durante el siglo XIX y XX en la Región de Atacama y Coquimbo, se explotaba este elemento desde yacimientos cobaltíferos. Un registro acerca de la explotación de cobalto, entre 1939 a 1945, menciona un total de 6.500 toneladas con leyes de 6% a 15% de Co, extraídas principalmente desde cobaltita (D' Aubarede, 1969).

1.2 Planteamiento del problema

En la Cordillera de la Costa del norte de Chile se ubica la provincia metalogénica denominada Franja Ferrífera Chilena (FFC) de edad Jurásico Superior-Cretácico Inferior, la cual tiene una extensión de 600 kilómetros de largo, y se distribuye entre los 25°30' y 31° LS. Esta franja alberga a los yacimientos de hierro del tipo *Iron Oxide Copper Gold* (IOCG) como Candelaria y Mantoverde, e *Iron Oxide Apatite* (IOA) como Los Colorados y Cerro Negro Norte, entre otros (**Figura 1**), cuyas génesis están asociadas a la evolución del arco magmático de edad Jurásico-Cretácico Inferior y a la Zona de Fallas de Atacama (ZFA), de rumbo sinistral y de edad Cretácico Inferior (Vivallo et al., 2008). Los depósitos tipo IOCG tienen una firma geoquímica distintiva de Fe, Cu, Au, REE, P, Ag, U y Co, asociado a

mineralización de magnetita y/o hematita que suele presentarse en forma de vetas, brechas hidrotermales o mantos mineralizados, controlados estructural o estratigráficamente. y asociados espacial y temporalmente a un intenso metasomatismo de Na, Ca y K (Williams et al., 2005, Barton, 2014).

El depósito mineral de Mina La Estrella corresponde a un depósito tipo IOCG (Kuyvenhoven 2019, comunicación verbal) el cual se ubica en la Franja Ferrífera Chilena de la Región de Atacama, unos 2 km al sur del depósito de Productora (IOCG) (**Figura 1**). El depósito La Estrella, está compuesto principalmente por magnetita, pirita y calcopirita y, subordinadamente calcosina, covelina, hematita y pirrotina, asociada a abundante actinolita, apatito, cuarzo y, en menor proporción, albita, feldespato potásico, clorita, biotita, sericita, arcillas, carbonatos, entre otros (Kuyvenhoven, 2019). Este depósito carece de estudios geológicos con respecto al modelo de depósito, recursos y reservas, geometalurgia, entre otros. No obstante, desde hace varios años, La Estrella explota los sulfuros de cobre de forma artesanal vendiéndolo a la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) los que son procesados en la planta concentradora de ENAMI ubicada en Vallenar (Fritis 2019, comunicación verbal).

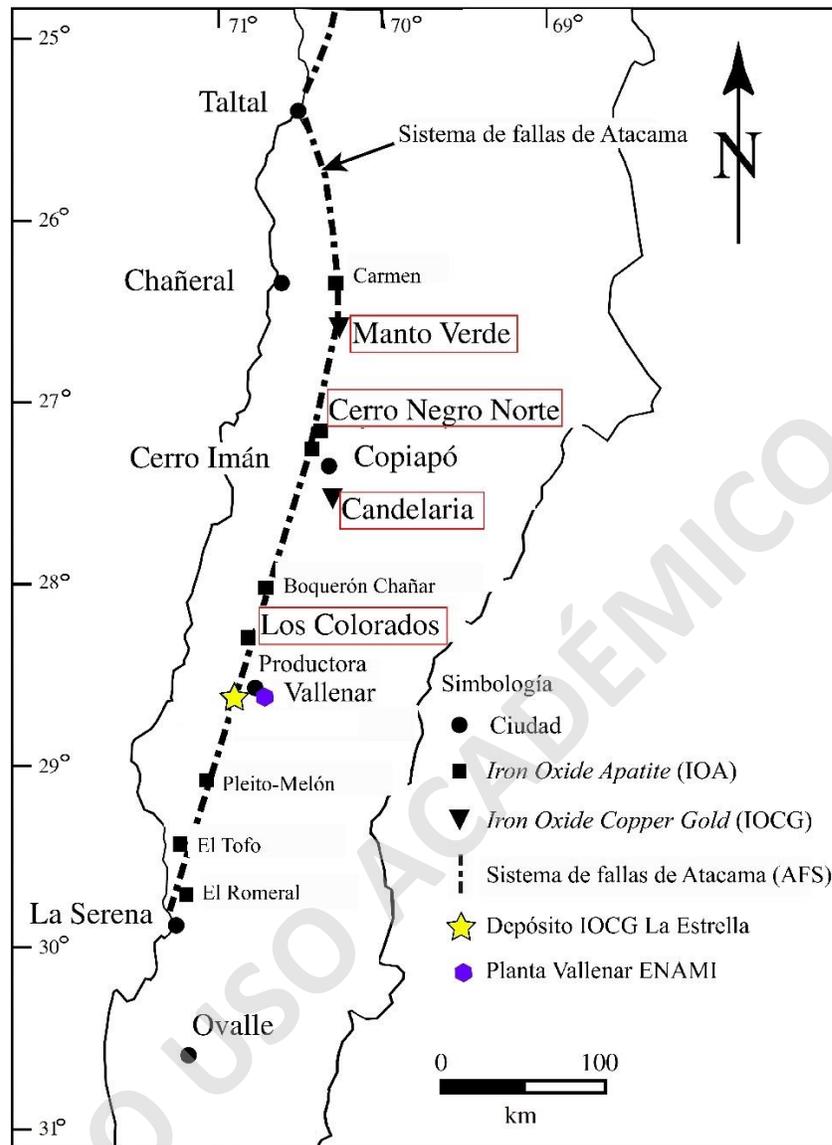


Figura 1: Distribución de los depósitos IOCG e IOA y la Zona de Fallas de Atacama desarrollada en el arco magmático del Jurásico-Cretácico Inferior (Modificado de Mathur et al., 2002).

Kuyvenhoven (2019) realizó estudios químicos-mineralógicos y metalúrgicos en 15 muestras de fragmentos de roca de 3 kg aproximadamente, provenientes de marinas del depósito mineral La Estrella. En particular efectuó análisis ICP-MS, absorción atómica, ensayos a fuego para determinar el contenido de Au, calcografía-petrografía y difracción de rayos X. Los análisis químicos entregaron valores de Fe (hasta 50%), Cu (0,1 a 1%), Au (0,03 a 0,54 g/t) y, además, altas concentraciones de Co (hasta 1.529 ppm) y Ni (hasta 2.815 ppm) indicando que estos últimos elementos podrían ser eventuales subproductos en un proceso productivo a nivel industrial con el Cu y Fe como productos principales.

Kuyvenhoven (2019) no identificó fases minerales cristalinas de Co en los análisis mineralógicos, sin embargo, observó contenidos de hasta 4.000 ppm de Co en el concentrado piritoso, consistente con la teoría que el cobalto estaba incorporado en las piritas del depósito mineral en solución sólida. Algunos minerales como la pirita pueden incorporar en su estructura química, por sustitución química o intersticial, variados metales de importancia económica como Au, Ag, As, Bi, Co, Cu, Hg, Ni, Mo, Pb, Sb, Se, Te, Tl, V, W, Zn, entre otros (Reich et al., 2005), en donde el Co y el Ni pueden ocurrir como sustituciones estequiométricas del Fe (Huston et al., 1995).

Mediante análisis de mineralogía automatizada TESCAN *Integrated Mineral Analyzer* (TIMA) a un concentrado piritoso, Kuyvenhoven (2019) determinó que el Co estaba incorporado en las piritas, sin embargo, estaba fuera del alcance de esa investigación conocer cuál o cuáles eventos mineralógicos específicos de piritas aportaban las mayores concentraciones de Co en este depósito mineral, ni como varía la distribución de cobalto dependiendo del tipo de pirita que se está analizando.

En el contexto anterior, identificar concentraciones de cobalto económicamente atractivas en piritas asociadas a eventos de mineralización y alteración, es de interés para entender cuál o cuáles eventos mineralógicos aportan el cobalto en el depósito mineral La Estrella. Además, conocer cómo se distribuye este elemento en la pirita permitiría proponer posibles procesos metalúrgicos para recuperarlo desde un concentrado piritoso, como, por ejemplo, biolixiviación en caso de que el cobalto se concentra en los bordes de la pirita, y lixiviación a presión en caso de que el cobalto está presente de forma diseminada u homogénea, entre otros.

1.3 Hipótesis

En el depósito La Estrella el cobalto está asociado al mineral de pirita y las concentraciones y distribución de este elemento varían según el evento mineralógico al cual están relacionadas las piritas. La variación en la concentración y distribución de cobalto en piritas impacta en el modelo metalúrgico y la posible recuperación de cobalto y, por ende, afecta directamente el eventual atractivo económico de la recuperación de cobalto en este depósito mineral.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar cuáles son los eventos de mineralización con formación de pirita a las cuales se asocian las mayores concentraciones de cobalto, y como este elemento está distribuido en los cristales de las piritas de distintos eventos, para, preliminarmente, evaluar la factibilidad económica de recuperar cobalto como subproducto.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Determinar la secuencia paragenética del depósito La Estrella, y reconocer los distintos tipos de pirita presentes en cada evento, en base a forma y tamaño de los cristales, asociación mineral, distribución y abundancia.
2. Determinar la concentración y distribución de cobalto en las piritas representativas de cada evento de mineralización.
3. Sugerir, según la distribución de cobalto en las piritas, un proceso de solubilización viable que permite recuperar cobalto como subproducto en el depósito La Estrella.
4. Evaluar, en base a supuestos metalúrgicos y las concentraciones de cobalto obtenidas en los distintos tipos de piritas, la factibilidad económica preliminar de cobalto como subproducto de la extracción de cobre.

1.5 Metodología

La metodología para el presente trabajo se subdivide en una etapa inicial de pre terreno, una etapa de terreno, y finalmente una etapa de post terreno, las cuales se presentan a continuación:

1.5.1 Etapa 1 Pre terreno: Recopilación y revisión bibliográfica

Se revisó información bibliográfica geológica de depósitos minerales del tipo IOCG en Chile y de clase mundial, y de la geometalurgia asociada al cobalto. De igual forma, también se revisaron antecedentes del contexto geológico del depósito mineral de la Mina La Estrella y de otros depósitos de cobalto en Chile.

1.5.2 Etapa 2 Terreno: Levantamiento de información geológica y obtención de muestras

Se realizó una visita de un día de duración a mina La Estrella (10-04-2019) con el objetivo de reconocer eventos de mineralización y obtener muestras representativas del depósito mineral. Para esto fue necesario identificar de donde provendrían las marinas analizadas previamente por Kuyvenhoven (2019) y realizar un reconocimiento geológico de los túneles del interior de la mina. En la visita participaron Ximena Prieto y Javier Quevedo, ambos de la Universidad Mayor, y Romke Kuyvenhoven, de SMI-ICE-Chile.

1.5.3 Etapa 3: Post terreno:

Con relación al objetivo específico 1, de determinar la secuencia paragenética del depósito La Estrella y reconocer los distintos tipos de piritas presentes en cada evento, se realizó las siguientes actividades:

- **Descripción macroscópica y microscópica de muestras**

Se describieron macroscópicamente las muestras obtenidas durante la etapa de terreno provenientes del depósito La Estrella y, posteriormente, en muestras representativas, se confeccionaron catorce (14) secciones transparentes-pulidas para describir petrografía y calcografía con un microscopio de luz polarizada, en el Laboratorio de Microscopía de la Escuela de Geología en la Universidad Mayor. Las piritas de cada evento de mineralización fueron caracterizadas en base a: forma, tamaño de los cristales (**Tabla 1**), asociación mineral, distribución y abundancia.

Clasificación según tamaño de cristal	
Fino	< 1 mm
Medio	1-5 mm
Grueso	5-30 mm
Muy grueso	>30 mm

Tabla 1: Clasificación según el tamaño de los cristales.

- **Confección secuencia paragenética**

En base a los resultados obtenidos de las descripciones macroscópicas y microscópicas, se determinó la secuencia paragenética del depósito mineral La Estrella agrupando las asociaciones mineralógicas en eventos de mineralización y alteración y la temporalidad en que estos ocurrieron.

- **Análisis SEM-QEMSCAN (*Scanning Electron Microscope - Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy*)**

Se realizó análisis SEM-QEMSCAN en la *University of Tasmania* (instrumento modelo FEI MLA650), mediante microscopía electrónica de barrido que permite una caracterización mineralógica de la muestra en base a una evaluación cuantitativa de los minerales presentes. Es un método instrumental no destructivo, de carácter semi-cuantitativo que se basa en la identificación de minerales a través de la combinación de imágenes de electrones retro-dispersados (*Back Scatter Electron - BSE*) y de espectros de energía dispersiva de rayos X (*Energy Dispersive X-ray - EDS*) captados sobre una muestra mineral. Las características del modelo SEM FEI MLA650 se presenta en la **Tabla 2**.

Este análisis se realizó en cinco muestras representativas de cada evento de mineralización con pirita, que fueron previamente definidos en la secuencia paragenética. En cada una de estas muestras de roca se analizaron tres (3) cristales de piritas y su zona aledaña, con el objetivo de complementar la información de los eventos mineralógicos definidos en base a descripciones macro y microscópicas.

Instrumento SEM modelo	FEI MLA650
Sistema EDS	Bruker Quantax Esprit 2.1 con dos detectores XFlash 5030
Software mineralógico	Bruker AMICS 3.0
Tipo de muestra	Roca
Modo de medición	Partícula
Tamaño del campo de escaneo (por fotograma)	1500 μm
Resolución de cuadro, píxeles	1024 x 1024
Resolución (tamaño de píxel)	1.46 μm
Tiempo de permanencia por píxel	16 μs
Marco superpuesto	2%
Factor de nivel de gris de segmentación	95
Factor de área de segmentación	70
Tamaño mínimo del segmento	3 μm
Tiempo de adquisición de rayos X por espectro	5 ms
Umbral de clasificación	50

Tabla 2: Características del modelo SEM FEI MLA650.

Con relación al objetivo específico 2, de determinar la concentración y distribución de cobalto en piritas representativas de cada evento de mineralización, se realizó la siguiente actividad:

- **Análisis ICP–MS–LA (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Laser Ablation*)**

Para realizar este análisis han sido seleccionadas cinco (5) piritas, una por muestra de roca, previamente estudiadas con SEM-QEMSCAN. El análisis con ICP-MS-LA fue realizado en la *University of Tasmania* con el objetivo de determinar la concentración y distribución de cobalto en piritas de los distintos eventos. Este análisis, ICP-MS-LA, es un método destructivo que permite conocer la composición química (elemental) y su variabilidad dentro de cristales seleccionados, en este caso, la pirita.

En cada cristal de pirita fueron realizadas 30 lecturas mediante un sistema de ablación S-155 de Resolución ASI con un láser *Coherent Compex Pro 110 Ar-F*, operando a longitud de onda de 193 nm con pulso de 20 nanosegundos. Este sistema láser se acopló a un ICP-MS cuadrupolo Agilent 7700, y las piritas se analizaron usando un tamaño de haz del láser de 20 micrones, disparando a 5 Hz con una densidad de energía del haz del láser de 3,5 J/cm² y 2,7 J/cm².

El mapa de color en ppm y las lecturas puntuales en el cristal de pirita se generan de dos formas distintas y dependen de la incidencia del rayo láser en el cristal. Las lecturas puntuales se basan en la suma de los recuentos obtenidos durante 60 segundos por la incidencia del láser en un mismo punto, penetrando a una mayor profundidad en la pirita. Por otra parte, para formar el mapa de color hay un tiempo menor de segundos/milisegundos, incidiendo a una menor profundidad y siendo, en consecuencia, menos preciso que la lectura en un punto. De todas formas, el mapa es excelente para mostrar distribuciones generales y puntos de análisis elementales.

Con relación al objetivo específico 3, de sugerir, según la distribución de cobalto en piritas, un proceso de solubilización viable para la recuperación de cobalto como subproducto, se realizó la siguiente actividad:

- **Alternativas de solubilización**

En base a la distribución del cobalto en los distintos tipos de piritas (en los bordes, en el centro, uniforme, etc...), se propusieron distintos métodos de solubilización del cobalto, con miras a la extracción de este elemento como subproducto del cobre y hierro en el depósito mineral La Estrella. Para esto se consideró que todos los sulfuros primarios, incluyendo las piritas, ya habrían pasado por procesos de chancado, molienda y concentración por flotación previamente, que permite obtener como resultado un concentrado piritoso cobaltífero.

Con relación al objetivo específico 4, de evaluar la factibilidad económica preliminar de cobalto como subproducto de la extracción de cobre, se realizó la siguiente actividad

- **Evaluación de factibilidad económica**

Se realizó una evaluación preliminar del potencial económico que podría existir en recuperar cobalto desde piritas provenientes del depósito La Estrella, según las concentraciones de cobalto obtenidas en los análisis ICP-MS-LA y las posibles alternativas de solubilización determinadas en base a la distribución de este elemento en los cristales de pirita. En este caso, la evaluación económica es realizada en base a supuestos y valores referenciales confidenciales de: ley, precio de Co, costos OPEX y CAPEX, y recuperación metalúrgica.

1.6 Área de estudio y vías de acceso

El depósito mineral La Estrella está ubicado en el Distrito El Zapallo, el cual se encuentra en la III Región de Atacama en Chile, en la zona occidental de la Cordillera de la Costa y a 20 km al suroeste de la ciudad de Vallenar. La principal vía de acceso al sector de estudio es la Ruta 5 Norte y, posteriormente, un camino secundario ripiado (C-902) permite acceder directamente a la mina desde el norte (**Figura 2**).

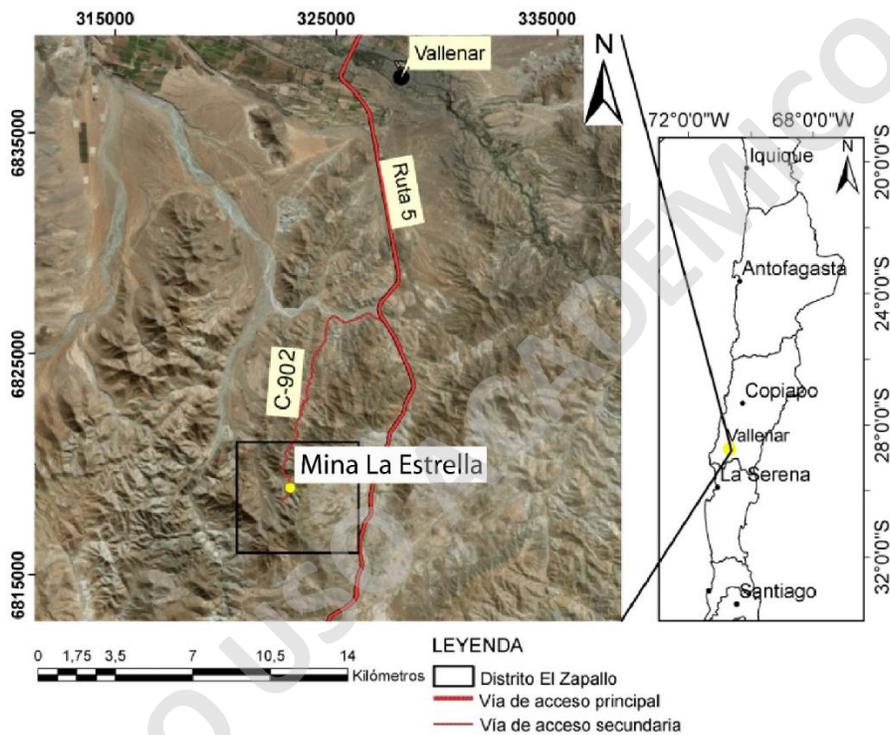


Figura 2: Ubicación y vías de acceso del depósito mineral La Estrella. Coordenadas UTM DATUM WGS84 huso 19S.

CAPÍTULO 2: MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 Introducción

En la Cordillera de la Costa del norte de Chile se ubica la provincia metalogénica denominada Franja Ferrífera Chilena (FFC) de edad Jurásico Superior-Cretácico Inferior, la cual se distribuye entre los 25°30' y 31° LS.

Esta franja metalogénica alberga a yacimientos de hierro del tipo Iron Oxide Copper Gold (IOCG), Iron Oxide Apatite (IOA), estaroligados Cu-(Ag), y subordinadamente pórfidos de Cu como Andacollo, entre otros (Vivallo et al., 2008), cuyas génesis están asociadas a la evolución del arco magmático de edad Jurásico-Cretácico Inferior y a la Zona de Fallas de Atacama (ZFA), de rumbo sinistral y de edad Jurásico Superior-Cretácico Inferior (Vivallo et al., 2008).

El depósito mineral La Estrella corresponde a un depósito tipo IOCG (Kuyvenhoven, 2019) el cual se ubica en la Franja Ferrífera Chilena de la Región de Atacama, unos 2 km al sur del yacimiento tipo IOCG Productora. Este depósito mineral está asociado al segmento sur de la Zona de Fallas de Atacama denominado El Salado, el cual presenta una orientación preferencial NS, es paralelo al margen de subducción chileno y tiene una cinemática de rumbo sinistral transtensional (Vivallo et al., 2008).

La Estrella se emplaza en volcanitas andesíticas de la Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior) intruidas por dioritas y granodioritas del Cretácico Inferior a Superior.

2.2 Marco tectónico regional

La evolución geológica del norte de Chile durante el Ciclo Andino (Jurásico-presente) ha sido dividida en tres etapas; (1) Jurásico Inferior-Cretácico Inferior tardío; (2) Cretácico Superior-Eoceno medio; (3) Paleógeno tardío-Presente (Charrier et al., 2007).

En la primera etapa, Jurásico Inferior tardío–Cretácico Inferior tardío, al norte de los 39°S, se desarrolló un arco magmático orientado norte-sur a lo largo de lo que hoy constituye la Cordillera de la Costa, y una cuenca de trasarco al este del arco mencionado, en respuesta a la subducción hacia el este de la placa oceánica Aluk bajo la placa continental Sudamericana (Vivallo et al., 2008). En esta etapa, la subducción era de tipo Mariana (**Figura 3**), dominando de esta forma un régimen extensional en el margen

continental, con intensa actividad magmática a lo largo del arco y abundante sedimentación en la cuenca de trasarco, y que además generó la formación de la Zona de Fallas de Atacama (Creixell et al., 2015).

La Zona de Fallas de Atacama, se formó a lo largo de la actual Cordillera de la Costa, durante el Jurásico Superior-Cretácico Inferior, en respuesta a la subducción oblicua, con una distribución con rumbo norte-sur, noreste y noroeste (Vivallo et al., 2008), y una cinemática transtensional sinistral en primera instancia, la cual varió hacia el final del Cretácico Inferior a vertical compresiva asociada a fallas de rumbo norte-sur, noreste y noroeste. Esta zona de fallas es el principal control estructural primario del emplazamiento de los depósitos tipo IOCG en Chile (Arévalo y Creixell, 2009; Morales, 2017).

Esta primera etapa del Ciclo Andino es dividida en dos subetapas, la primera de estas, Jurásico Inferior tardío al Kimmeridgiano, está caracterizada por una intensa actividad magmática en el arco, y por el desarrollo de un ciclo marino transgresivo-regresivo en la cuenca de trasarco (Tassara, 2013). Los esfuerzos extensionales durante esta etapa favorecieron esta actividad magmática, la abundante sedimentación en la cuenca de trasarco paralela al arco y, contemporáneo al volcanismo, batolitos gigantes fueron emplazadas en estas sucesiones volcánicas (Formación La Negra; Formación Punta del Cobre) (Charrier et al., 2007).

La segunda subetapa, Kimmeridgiano-Titoniano al Aptiano-Albiano (Jurásico Superior tardío-Cretácico Inferior tardío), está caracterizada por una disminución en la actividad magmática del arco, la cual migró paulatinamente hacia el este, aunque aún concentrada en la Cordillera de la Costa, y por un segundo ciclo de transgresión-regresión marina en la cuenca de trasarco, el cual es evidenciado por el Grupo Chañarcillo (Seegerstrom y Parker, 1959). El final de esta subetapa produce una intensa deformación compresiva (Fase Peruana-Cretácico Superior) donde se desarrolla la emersión del margen continental y se invierte la cuenca de trasarco formada durante el Jurásico Inferior (Charrier et al., 2007). Este proceso compresivo está asociado a la disminución del ángulo de subducción de la placa, pasando de una subducción tipo Mariana a una subducción tipo Chilena (**Figura 3**) producto de la separación progresiva de Sudamérica y África (Tassara, 2013).

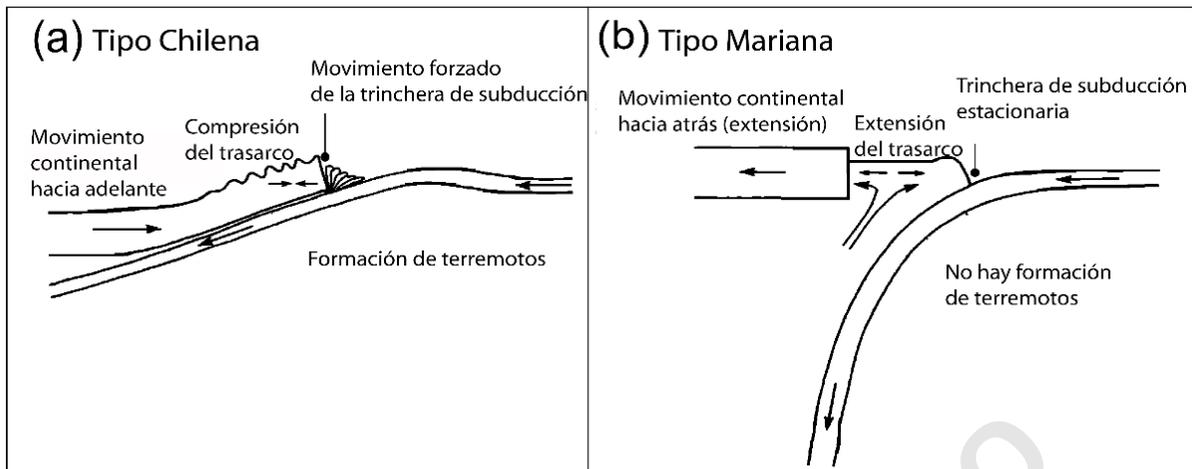


Figura 3: a) Subducción tipo Chilena con un menor ángulo de la placa subductante, régimen compresivo; b) Subducción tipo Mariana con un mayor ángulo de la placa subductante, régimen extensional (Modificado de Yoshida, 2017).

En la primera subetapa, Jurásico Inferior tardío al Kimmeridgiano, se desarrolló la Franja metalogénica Ferrífera Chilena, genéticamente relacionada a la evolución del arco magmático, la cuenca de trasarco y de la Zona de Fallas de Atacama, generándose yacimientos Iron Oxide Copper Gold, Iron Oxide Apatite, pórfidos de Cu, así como mesotermales de Cu-Au, mesotermales de Au, epimesotermales de Ag, volcanogénicos de Mn, volcánicos exhalativos de Fe y Ag-Pb, entre otros (Vivallo et al., 2008). Asociados a la segunda subetapa se emplazan los principales yacimientos tipo IOA son Los Colorados, Carmen, Cerro Negro Norte y El Algarrobo, mientras que los principales yacimientos tipo IOCG son Candelaria y Manto Verde (Vivallo et al., 2008), de edad Cretácico Inferior. Los pórfidos cupríferos, ubicados entre los 22° y 36°S en el flanco oriental de esta franja son Andacollo, Domeyko, Antucoya, entre otros (Tassara, 2013).

Durante el Jurásico temprano (hace 170-150 Ma), en un ambiente predominantemente extensional, se desarrollaron pequeños yacimientos tipo IOCG como Tocopilla, Las Animas y Guanillos, sin embargo, fue durante un ambiente compresivo-extensional, del Cretácico Inferior (130-110 Ma), donde se formaron los principales yacimientos tipo IOCG, tales como Candelaria y Manto Verde (Jane, 2016).

Sillitoe (2003) explica que hay una conexión genética entre los depósitos tipo IOCG y los plutones gabrodioríticos a dioríticos asociados al arco, y señala que gran parte de estos depósitos se originaron por el ingreso de fluidos mineralizadores provenientes de estos plutones, en secuencias volcano-sedimentarias relativamente permeables. Es de esta

forma, como gran parte de los yacimientos *Iron Oxide Copper Gold* están asociados a rocas volcánicas de la Formación La Negra del Jurásico y Formación Punta del Cobre, del Jurásico y Cretácico Inferior (Sillitoe, 2003; Morales, 2017) (**Figura 4**).

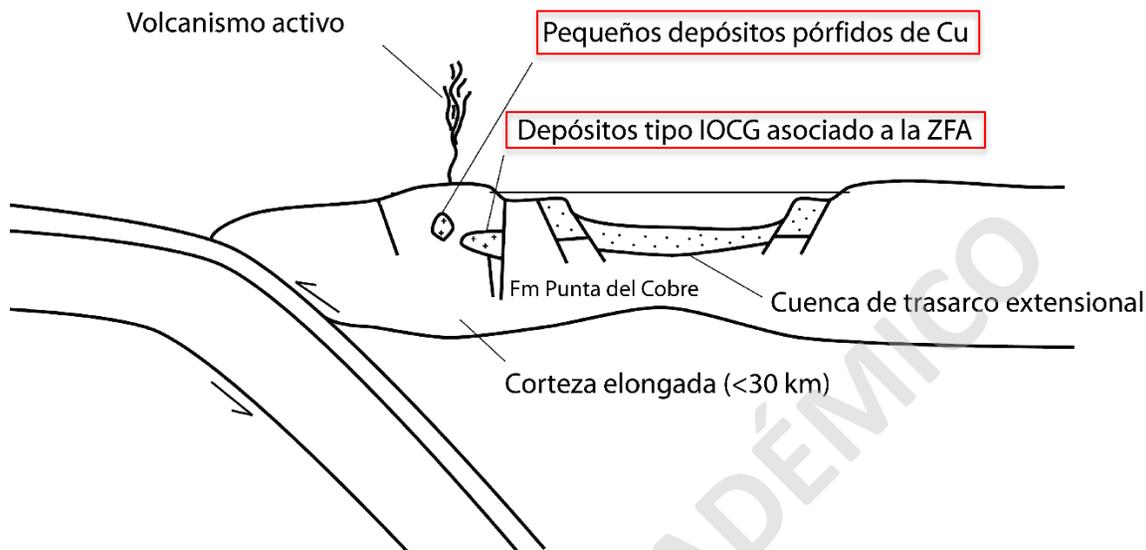


Figura 4: Modelo esquemático de los principales elementos geológicos durante el Jurásico-Cretácico Inferior (modificado de Morales, 2017).

2.3 Yacimientos Minerales Franja Ferrífera

Los yacimientos tipo IOA o Kiruna y los IOCG, en la Franja Ferrífera Chilena, se distribuyen principalmente en dirección norte-sur debido a una estrecha relación genética con la ZFA (Espinoza, 1990) (**Figura 5**).

La mineralización de los yacimientos IOA está constituida, generalmente, por cuerpos macizos de magnetita de forma tabular, irregular o estratiforme, y sulfuros en concentraciones bajas, compuestos principalmente por pirita y calcopirita diseminados en la mena de Fe o en vetillas. La magnetita está normalmente asociada a minerales de actinolita y apatito (Vivallo et al., 2008).

La mineralización de los yacimientos IOCG corresponden a vetas, cuerpos tabulares e irregulares asociados, o no, a brechas hidrotermales y depósitos vetiformes con menas Fe de abundante magnetita y specularita, subordinada pirita, y calcopirita como mena de Cu, además, puede tener importantes concentraciones de Au. Localmente puede haber pirrotina, esfalerita, marcasita, calcosina y covelina supérgena, y crisocola, malaquita,

brocantita y atacamita en zonas oxidadas, e incluso, sulfo-arseniuros de cobalto como cobaltita y danaita. La mineralogía de ganga en este tipo de yacimientos está compuesta por cuarzo, calcita, anhidrita, entre otros (Vivallo et al., 2008).

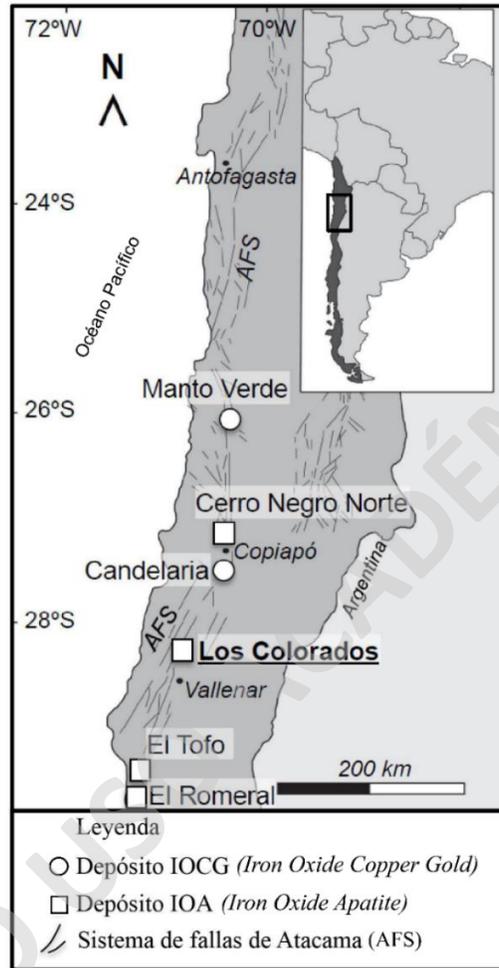


Figura 5: Principales depósitos tipo IOCG e IOA en la Franja Ferrífera Chilena (Modificado de Reich et al., 2015).

Los depósitos IOCG e IOA pueden poseer concentraciones de cobalto de interés económico ya que este elemento tiene una buena relación genética con el hierro (Townley et al., 2017b), y estos tipos de yacimientos son los principales formadores de menas de Fe en Chile. Vivallo et al (2008) señala que existen depósitos de cobalto en la FFC (**Figura 6**), asociados a las rocas del Grupo Chañarcillo, y los que muestran una estrecha relación espacial con depósitos de hierro. Además, pueden existir enriquecimientos secundarios en óxidos de Co aumentando las leyes de cobalto hasta 6-8%, predominando los minerales de asbolana y eritrina (Cruzat, 1968).

En Chile no se han reconocido grandes yacimientos de cobalto, sin embargo, a partir de 1865, se explotaron vetas y mantos mineralizados de cobre, oro y cobalto ubicadas en el Distrito San Juan y cercanos a la ciudad de Copiapó, en la Región de Atacama, al igual que en el Distrito Tambillos desde mantos, vetas y brechas de cobre, oro y cobalto, en la Región de Coquimbo. Esta explotación de cobalto se mantuvo hasta el año 1944, cuando ocurre el cierre de La Cobaltera ubicado en Freirina, Región de Atacama (Townley et al., 2017a) (**Figura 6**).

Bibliográficamente no se especifica los tipos de yacimientos de donde se explotó el cobalto durante el siglo XIX y XX, sin embargo, estos podrían corresponder a modelos de depósitos tipo IOCG, Skarn y/o vetas de Cu-Au-Co (Townley, 2017).

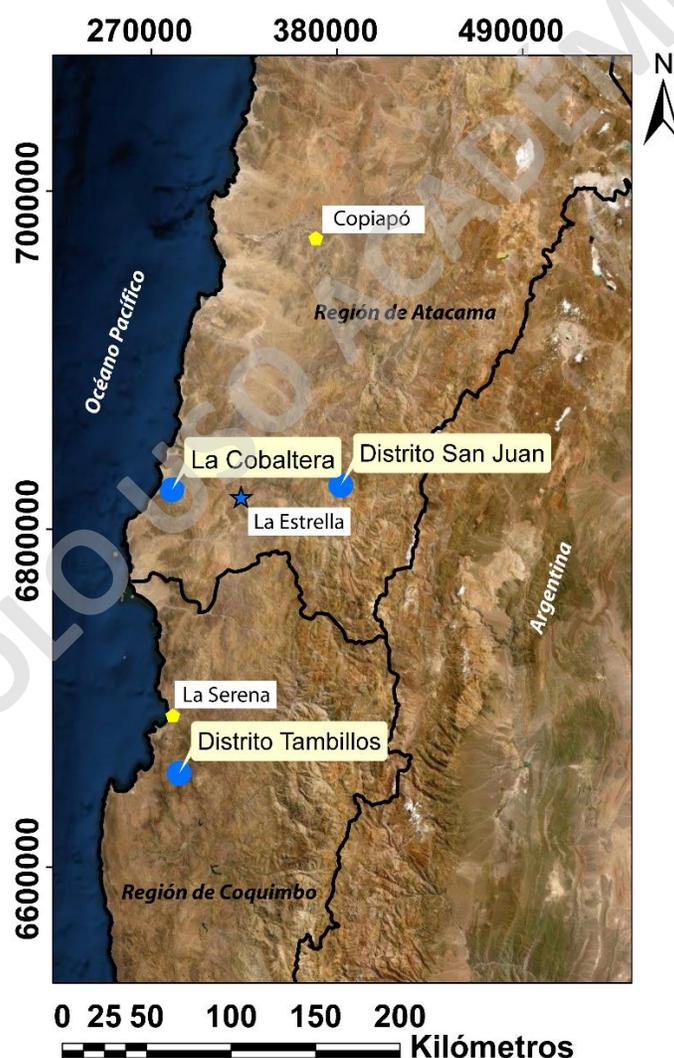


Figura 6: Principales distritos de cobalto explotados en Chile durante el siglo XIX y XX. Coordenadas UTM DATUM WGS84 huso 19S (datos extraídos de D'Aubarede, 1969).

2.4 Geología Distrital

La geología del distrito El Zapallo, en donde se encuentra el depósito mineral La Estrella está compuesta por unidades estratificadas de origen volcano-sedimentarias, depositadas en ambiente marino y continental de edad Jurásico Superior-Cretácico Inferior, depósitos sedimentarios semi-consolidados de ambientes aluvial y coluvial de edad Mioceno hasta Pleistoceno-Holoceno, y por unidades intrusivas de composición diorítica a granodiorítica que abarcan un rango de edad entre el Cretácico Inferior a Superior. A continuación, se describen las unidades del distrito según su edad, desde base a techo, utilizando como referencia la Carta Geológica realizada por Arévalo et al (2009) (**Figura 7**).

2.4.1 Rocas estratificadas

2.4.1.1 Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior-Hauteriviano superior) (Segerstrom y Ruiz, 1962)

Según Arévalo et al (2009) la Formación Punta del Cobre se caracteriza por la presencia de secuencias volcano-sedimentarias heterogéneas que afloran en franjas de orientación NNE-SSO. Esta formación subyace concordante a la Formación Nantoco y sobreyace a la Formación La Negra, sin embargo, este contacto no está claramente expuesto en el área. En el Distrito El Zapallo esta formación está compuesta por: complejos de domos dacíticos, volcanitas andesíticas de piroxeno y brechas verdosas andesíticas con buena estratificación.

El complejo de domos corresponde a cuerpos lenticulares de 0,2 a 2 km² de exposición, con bandeamiento de flujo y brechización superficial. Se componen de dacitas ricas en plagioclasa y líticos de la misma composición, con minerales de biotita y anfíbola como los máficos principales. Estas rocas están afectadas por una alteración argílica-sericítica. Por otra parte, las volcanitas andesíticas poseen texturas porfídicas y afaníticas con piroxeno y anfíbola como fenocristales principales y están afectadas por una alteración actinolita-clorita-albita de media a muy fuerte intensidad (Arévalo et al., 2009).

A esta formación se le asigna una edad Hauteriviana superior por la presencia de amonites del género *Crioceratites sp* (Arévalo et al., 2009). Otros autores, como Welkner et al (2006) correlacionan calizas similares de la Fm Punta del Cobre con calizas de la Fm La Negra, adjudicando un rango de edad entre el Jurásico Superior y el Hauteriviano superior.

2.4.1.2 Formación Nantoco (Hauteriviano superior) (Biese-Nickel en Hoffstetter et al., 1957)

Esta formación aflora en una franja de dirección NO en la cual se reconocen dos miembros, siendo el miembro inferior el que está presente en el área de estudio. Este miembro está compuesto por una sucesión de calcarenitas líticas y bioclásticas, en bancos de estratificación media a gruesa junto con calcilitas amarillas con estratificación media y frecuentes intercalaciones de brechas volcánicas de grano fino. Se encuentra en contacto tectónico con la Fm Punta del Cobre mediante una falla normal de orientación noroeste, en el Cordón La Escondida al suroeste del distrito (**Figura 7**) (Arévalo et al., 2009).

Debido al contenido de amonites pertenecientes a los géneros *Sabaudiella* y *Paraspiticerias*, los cuales se evidencian en el trabajo de Arévalo et al., 2009, se asigna una edad Hauteriviano superior a la Fm Nantoco (Mourgues, 2007; Arévalo et al., 2009).

2.4.1.3 Gravas de Domeyko (Mioceno Medio)

Corresponde a depósitos aterrazados de gravas y arenas con intercalaciones de limolitas carbonatadas blanquecinas, los que se presentan rellenando quebradas. Las gravas son macizas, matriz soportada, con estructuras de gradación normal e inversa, continuos lateralmente y con espesores entre 2 y 5 metros. Hay intercalaciones de limolitas blanquecinas carbonatadas (Arévalo et al., 2009).

2.4.1.4 Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos (Mioceno Superior-Plioceno)

Corresponde a gravas y ripios polimícticos, mal a moderadamente seleccionados, y sedimentos tamaño arena que constituyen depósitos de aluviones y coluvios. Al este de La Estrella, estos depósitos se encuentran en contacto erosivo sobreyaciendo a las Gravas de Atacama y a las Gravas de Domeyko de edad Mioceno. En zonas proximales a la fuente se presentan sedimentos tamaño ripio y gravas mal consolidadas, mientras que en las zonas distales los sedimentos son de tamaño arena (Arévalo et al., 2009).

2.4.1.5 Depósitos Aluviales (Pleistoceno-Holoceno)

Corresponde a sedimentos no consolidados a moderadamente consolidados compuestos por fragmentos de rocas tamaño grava, arena, limo, ripio y bloque, que están depositadas en zonas de baja pendiente y/o rellenando quebradas. Tienen un contacto por discordancia angular con las formaciones e intrusivos que subyacen a esta unidad. Estos

depósitos se dividen en activos y no-activos, según morfología y relaciones de contacto (Arévalo et al., 2009).

2.4.2 Rocas intrusivas

2.4.2.1 Complejo Plutónico La Higuera (124-122 Ma) (Arévalo y Welkner, 2008)

Este complejo plutónico tiene una superficie de exposición de 8 km de ancho y 45 km de largo y presenta una composición granodiorítica-diorítica en dos subunidades: una subunidad granodiorítica en la base, y una subunidad diorítica en el techo. La subunidad inferior, está conformada por granodioritas y tonalitas de anfíbola, biotita y piroxeno de grano medio, mientras que la subunidad superior presenta dioritas y dioritas cuarcíferas de piroxeno y anfíbola, de grano fino a medio. Brechas hidrotermales con alteración cuarzo-sericita y actinolita afloran en el sector oeste de la subunidad granodiorítica. Este complejo plutónico intruye a las volcanitas andesíticas de la Formación Punta del Cobre, precisamente en donde se encuentra el depósito mineral de mina La Estrella.

Dataciones Ar/Ar indicaron una edad de 122,3 \pm 1,3 Ma en biotita, 124,3 \pm 1,9 Ma, 123,3 \pm 1,9 Ma y 122,7 \pm 1,5 Ma en anfíbolos (Arévalo et al., 2009). Esto es consistente con una datación K-Ar de edad 123 \pm 3 Ma en biotitas realizado en la subunidad granodiorítica (Arévalo et al., 2009).

2.4.2.2 Granodiorita Florida (ca. 101 Ma) (Arévalo et al., 2009)

El cuerpo plutónico más importante tiene una superficie de exposición de 4 km², es de color gris claro y de composición granodiorítica. Su litología es principalmente granodiorita, sin embargo, es posible distinguir variaciones composicionales con dioritas cuarcíferas, monzodioritas cuarcíferas, tonalitas y monzogranitos. En estos cuerpos plutónicos las biotitas están fuertemente cloritizadas, las plagioclasas están sericitizadas, y las anfíbolos están intercrecidas con biotita y actinolita. Está en contacto por intrusión con andesitas de la Fm Punta del Cobre (Arévalo et al., 2009).

Mediante dataciones ⁴⁰Ar/³⁹Ar en biotitas de la granodiorita, se ha obtenido una edad de 101,4 \pm 0,5 Ma en el cuerpo central, correspondiente al Albiano en el Cretácico Inferior (Arévalo et al., 2009). De igual forma, se registró edades ⁴⁰Ar/³⁹Ar de 104 \pm 8 Ma en anfíbola y K-Ar de 104 \pm 3 Ma en biotita (Arévalo et al., 2009).

2.4.2.3 Complejo Plutónico Camarones (96-91 Ma) (Arévalo et al., 2009)

Este complejo plutónico posee una superficie expuesta de 8 km² y está compuesto por plutones granodioríticos subordinadamente dioríticos, que afloran en el sector oriental del distrito El Zapallo. Están compuestas por biotita y anfíbola como minerales ferromagnesianos principales los cuales están cloritizados y deformados, mientras que la titanita es el mineral accesorio más común. Este complejo está en contacto por intrusión con la Fm Punta del Cobre (Arévalo et al., 2009).

Las granodioritas presentan una edad Cenomaniano que ha sido determinada con distintas dataciones por Gipson et al (2003), donde se ha indicado una edad $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ de $93,5\pm 0,4$ Ma en biotita; $93,0\pm 0,9$ Ma en anfíbola; $96,1\pm 0,8$ Ma y $91,3\pm 0,8$ Ma en biotita.

SOLO USO ACADÉMICO

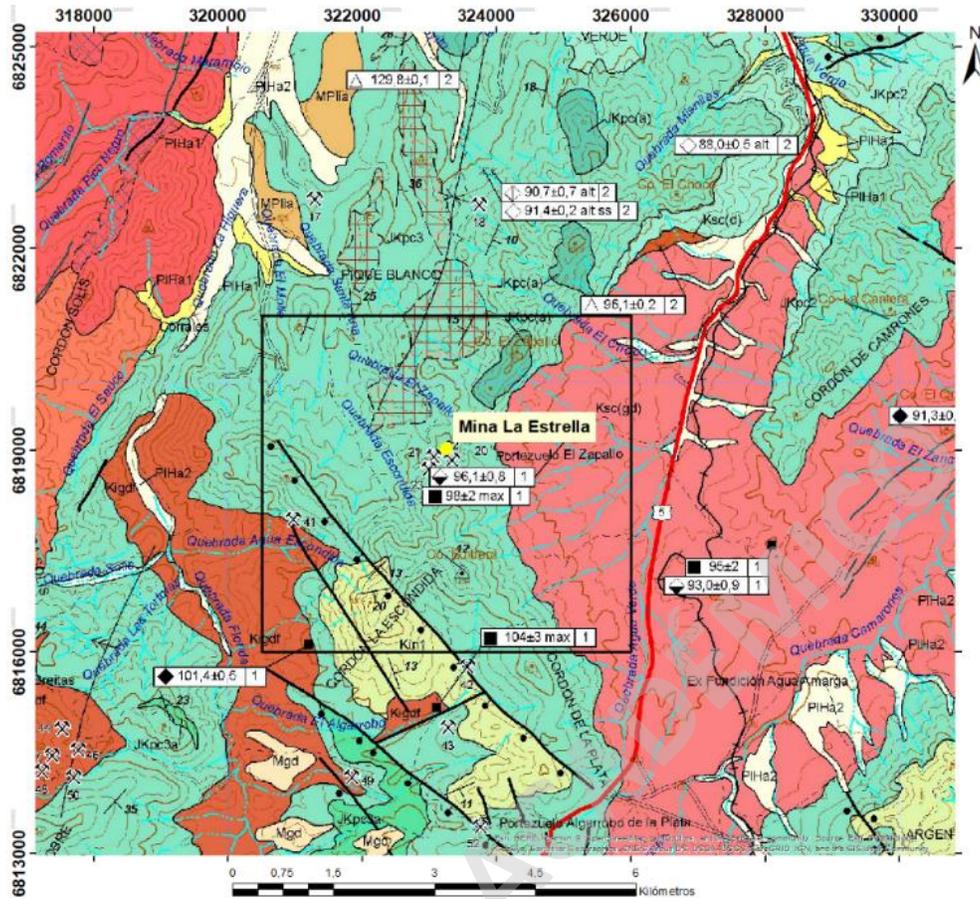


Figura 7: Geología del Distrito El Zapallo y Mina La Estrella. Información proveniente de la carta geológica de Vallenar-Domeyko, escala 1:100.000 (Arévalo et al., 2009). Coordenadas UTM DATUM WGS84 huso 19S.

CAPÍTULO 3: GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

En el área de estudio se han realizado muy pocos estudios geológicos a escala local, la mayoría han sido efectuados en el proyecto Productora, ubicado directamente al norte del depósito La Estrella, por Fox (2000), Ray y Dick (2002) y Jane (2016) y solo uno en el depósito La Estrella (Kuyvenhoven, 2019).

3.1 Proyecto Productora

No se han realizado estudios geológicos de mineralización y alteración en el depósito IOCG La Estrella, sin embargo, el yacimiento Productora de la empresa Hot Chili Ltda ubicado aproximadamente 2 km al norte de La Estrella, es un depósito IOCG de edad Cretácico Inferior, con reservas de 236,6 Mt con 0,48% Cu, 0,10 g/t Au y 135 ppm Mo (Jane, 2016) y en donde se han realizado estudios geológicos a escala local los cuales abarcan el área del depósito La Estrella. En este contexto, la geología que se presenta a continuación (**Figura 8**) está basada en estudios geológicos del yacimiento Productora realizados por Fox (2000), Ray y Dick (2002) y Jane (2016).

En el área de estudio se exponen rocas volcánicas, sedimentarias e intrusivos. Estratigráficamente, depósitos de flujos de tobas, rocas sedimentarias volcanoclasticas, y brechas volcánicas, subyacen a flujos volcánicos de composición basáltica y basáltica-andesítica (Fox, 2000).

Las rocas sedimentarias presentan alteración de cuarzo, hematita, clorita, epidota y turmalina con mineralización de magnetita, mientras que los flujos volcánicos basálticos-andesíticos presentan alteración de esmectita, clorita, actinolita, serpentinita, talco y cuarzo (Fox, 2000).

Intruyendo a las secuencias descritas se expone el intrusivo Ruta 5 y el stock Cachiyuyito. Este último es un cuerpo elongado en dirección NNE, de composición tonalítica a diorítica con augita como principal mineral máfico, y que se emplaza al norte del depósito La Estrella en contacto por intrusión con los flujos volcánicos basálticos y basálticos-andesíticos. La edad de este cuerpo intrusivo es de 129,8 \pm 0,1 Ma y fue datada mediante el método U/Pb en zircones (Fox, 2000).

El intrusivo Ruta 5 es de composición granodiorítica a cuarzo monzodiorita con hornblenda como principal mineral máfico, y se ubica al noreste del depósito La Estrella, al lado de la carretera Ruta 5. La edad de este cuerpo intrusivo es de 96,1 +/- 0,2 Ma y fue datada mediante el método U/Pb en zircones (Fox, 2000).

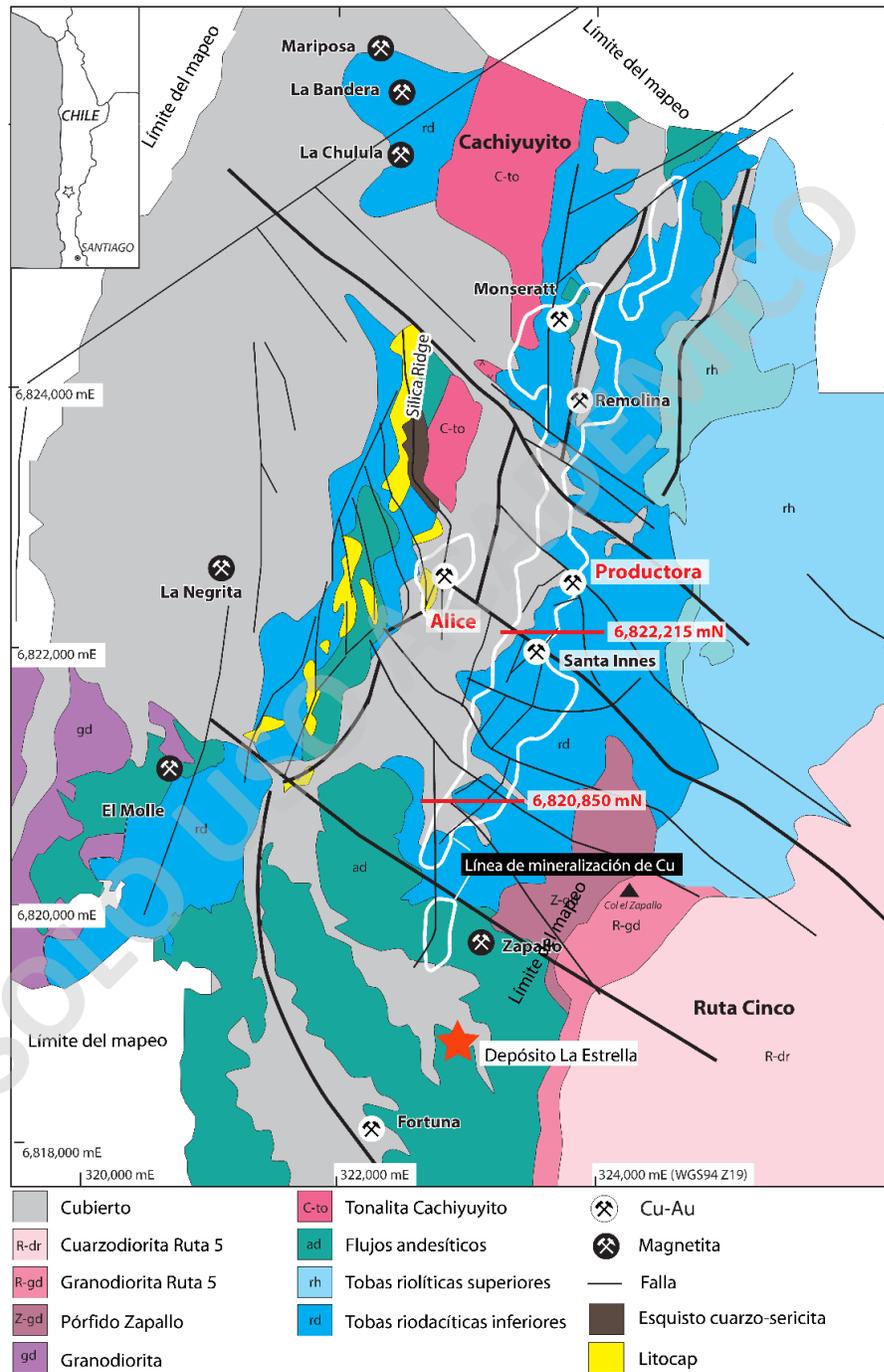


Figura 8: Geología del yacimiento Productora y La Estrella (Modificado de Jane, 2016).

En el yacimiento Productora, Fox (2000) reconoció alteración sódica, sódica-cálcica, silicificación, potásica, propilítica, y una alteración tardía supérgena, las cuales están expuestas en tres zonas de alteración hidrotermal: Cachiyuyito, Productora y el sistema hidrotermal Ruta 5 (**Tabla 3 y Figura 9**).

El sistema de Cachiyuyito presenta alteración sódica con predominancia de albita y una mineralización de magnetita con apatito. Por otra parte, el sistema hidrotermal Productora presenta una fase de silicificación temprana con abundancia de cuarzo, piritita, especularita y sericita, y otra fase de alteración potásica con presencia de clorita, feldespato potásico y magnetita. Posterior a todas estas fases de alteración y mineralización, una alteración supérgena cubre estos eventos mineralógicos con presencia de óxidos de cobre, óxidos de hierro, carbonatos y sulfuros supérgenos (**Tabla 3**).

	Sistema Cachiyuyito	Sistema Productora		Sistema Ruta 5	Supérgeno
		Silicificación	Potásica		
Albita	—		—		
Actinolita	—		—	—	
Magnetita	—		—	—	
Apatito	—				
Epidota	—		—	—	
Clorita	—		—	—	
Cuarzo		—		—	—
Especularita		—			
Sericita			—	—	—
Muscovita			—		
Hematita			—	—	—
Biotita			—		
Feld K			—		
Turmalina					
Caolinita					—
Pirita		—	—	—	—
Calcopirita			—		
Alunita					—
Dumortierita					—
Digenita				
Calcosina				
Covelina				
Goethita					—
Óxidos de cobre					—
Calcita					—

Tabla 3: Secuencia paragenética del yacimiento Productora (Modificado de Fox, 2000).

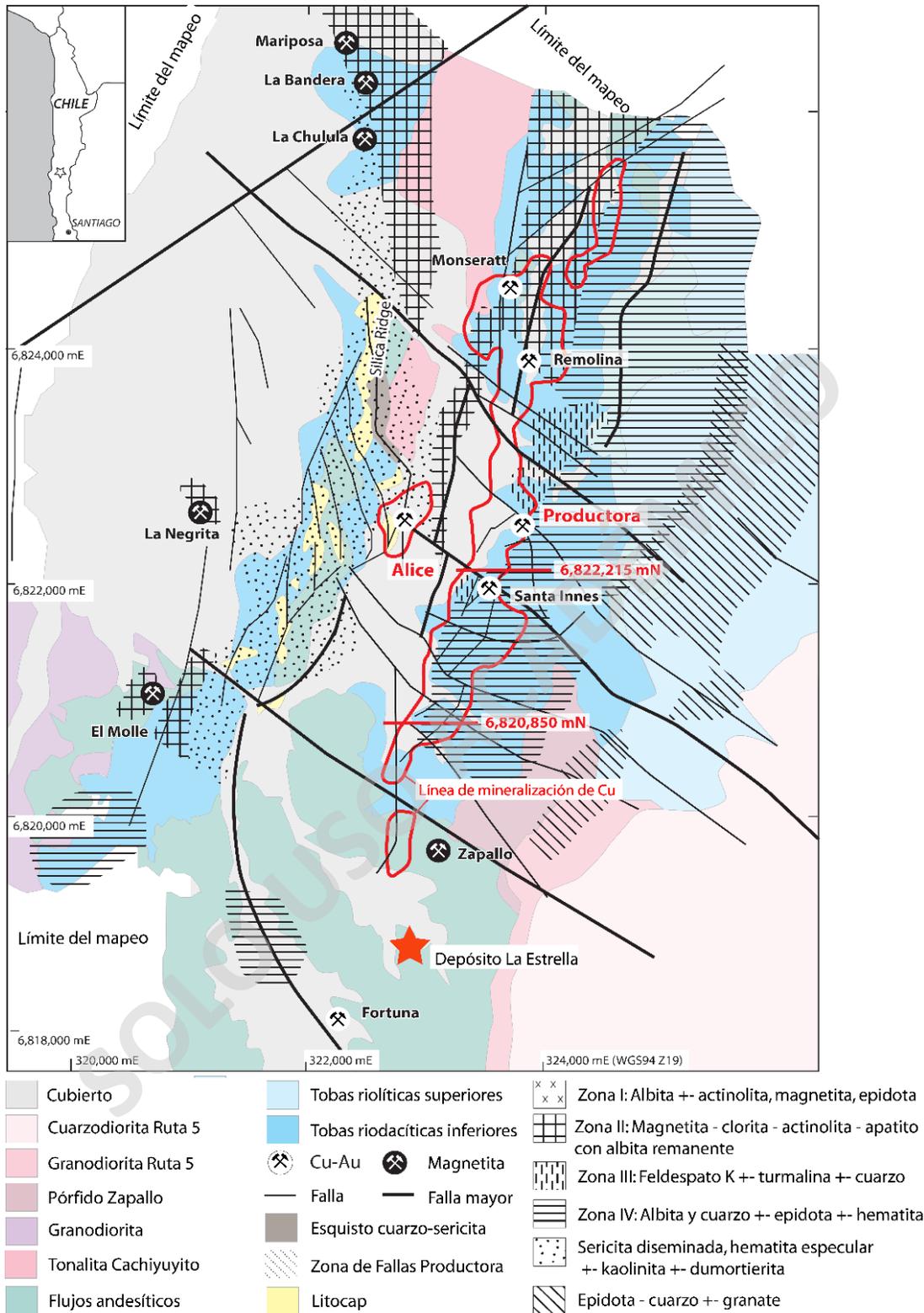


Figura 9: Geología, mineralización y alteración del yacimiento Productora y La Estrella, en la Cordillera de la Costa (Modificado de Jane, 2016).

3.2 Depósito La Estrella

El depósito mineral La Estrella, de propiedad del Sr. Luis Fritis, no ha sido estudiado y solo hay un trabajo el cual fue realizado por Kuyvenhoven (2019) de SMI-ICE-Chile. En este trabajo se obtuvieron 15 muestras provenientes de marinas y las que se caracterizaron mediante análisis químico-mineralógico, ensayos de moliendabilidad y ensayos de concentración.

En la caracterización química-mineralógica se realizaron diversos análisis incluyendo ICP-M, Absorción Atómica, y ensayo a fuego. Es importante destacar que posterior al análisis ICP y según el contenido de Cu que presentaban las 15 muestras analizadas, se decidió formar tres compósitos de alta, mediana y baja ley de Cu. Es por esto, que los resultados de los métodos analíticos posteriores (Ensayo a Fuego para Au; Absorción Atómica), así como la Calcografía-Petrografía y Difracción Rayos X, son realizados a cada uno de los tres compósitos.

En cuanto a la caracterización metalúrgica, se realizaron ensayos de moliendabilidad Bond Bolas y ensayos de concentración en donde se estudió la Concentración Magnética, Flotación de Calcopirita, Flotación de Pirita, Flotación de Apatito y un Balance Metalúrgico Global.

Los resultados químicos obtenidos en las 15 muestras provenientes del depósito La Estrella reportaron interesantes concentraciones de Cu, Fe, Au, Co, Ni, P y REE (Kuyvenhoven, 2019). Para el análisis ICP-M las muestras fueron previamente atacadas con agua regia y 4-ácidos obteniendo concentraciones de Fe superior al 15%, sobre un 1% de Cu, hasta 0,2% de Ni y V, y hasta 0,15% de Co. El análisis a fuego para Au muestra que las concentraciones de oro en el depósito mineral son moderadas, y el valor máximo en las 15 muestras fue 0,54 g/t. Las muestras analizadas por absorción atómica que presentaron hasta 1.000 ppm de Co están asociadas a las muestras con alta ley de Cu, la cual alcanza hasta 0,788% de Cu (Kuyvenhoven, 2019).

Las muestras obtenidas por Kuyvenhoven (2019) también fueron sometidas a estudios petrográficos, calcográficos y difracción de rayos X, identificando abundante magnetita, actinolita, apatito, cuarzo y pirita, al igual que minerales menos abundantes tales como biotita, feldespato potásico, sericita, clorita, arcillas, entre otros. Estos resultados no indican la presencia de fases minerales cristalinas de cobalto a pesar del hecho que el

compósito más rico en cobalto (el llamado “alta ley de cobre”) contiene sobre 1.000 ppm de Co.

Por otra parte, análisis TIMA realizado por Kuyvenhoven (2019) en concentrados piritosos, indicaron la presencia de cobalto y níquel en la estructura química de las piritas al igual que fases cristalinas de níquel, como pentlandita, violarita, millerita y gersdorfitas.

SOLO USO ACADÉMICO

CAPÍTULO 4: MARCO GEOMETALÚRGICO

4.1 Concentración de cobalto

Los procesos comúnmente aplicados para la concentración de cobalto son los de concentración gravitacional, separación magnética y flotación, usando estos de acuerdo con las propiedades particulares de los minerales de un yacimiento determinado. Estas propiedades se refieren principalmente a su densidad (concentración gravitacional), susceptibilidad magnética (concentración magnética) y características químicas-superficiales (flotación).

La **concentración gravitacional** puede ser viable para minerales con mayor densidad específica como cobaltita, safflorita, skutterudita y esmaltina, al igual que para las tierras raras. Este método dependerá de las características del mineral como el alto peso específico, y la diferencia de densidad entre mena y ganga (Townley et al., 2017b). En el caso de los arseniuros de cobalto, estos tienen una alta densidad específica lo que los hace aptos para ser separados gravitacionalmente.

La **concentración magnética** está comúnmente asociada a magnetita (en el caso de que se encuentre en el yacimiento) y el mineral de cobalto con una alta susceptibilidad magnética que es la eritrina (Smith et al., 1976). Este proceso de separación se utiliza también para separar la pirita, con cobalto en su estructura química, de minerales magnéticos tales como la martita, pirrotina y magnetita.

Lo más común es el proceso de **concentración por flotación**, que corresponde a un proceso donde se mezcla la pulpa de mineral con aire, en una celda con agitador mecánico o en una celda con aire a presión. Esto permite separar especies sulfuradas (la mena en este caso) de las especies no sulfuradas (la ganga), debido a la preferencia de las partículas sulfuradas por adherirse a las burbujas de aire (hidrofobicidad), contrario a lo que pasa con las partículas no sulfuradas que no se adhieren a las burbujas de aire (hidrofilicidad). El producto de este proceso es un concentrado de sulfuros. Generalmente se flota colectivamente todos los sulfuros en una etapa llamada rougher, en donde está la pirita con cobalto incluido, y luego se concentra la calcopirita primero en un concentrado calcopirítico, para luego los relaves de esa flotación calcopirítica, usarlos para concentrar pirita (con cobalto) o cobaltita (Smith et al., 1976). La cobaltita y la pirita tienen un comportamiento similar durante la flotación lo que complica la separación entre sí (Bartlett,

1995). La flotación de pirita se realiza comúnmente con un pH alrededor de 7, mientras que la cobaltita requiere de un pH más bajo, en el rango 4-4,5 para concentrarse bien (Smith et al., 1976).

4.2 Tratamiento de los concentrados de cobalto en piritas

A continuación, se presentan los distintos procesos hidrometalúrgicos que permiten la disolución del elemento de interés, en este caso, el cobalto en cristales de pirita. Estos métodos han sido recopilados de un trabajo realizado por Bartlett (1995):

- **Lixiviación ácida**

Esta lixiviación con sulfato de oxígeno férrico es bastante lenta a condiciones ambientales con un alto potencial de oxidación, esto genera como consecuencia que el proceso no tenga tasas de lixiviación aceptables y no sea comercializable para la lixiviación de pirita (para la industria del cobre este método se usa mucho). Es un proceso de cinética lento y de bajo costo con recuperaciones modestas.

- **Lixiviación a presión en autoclave**

Con este método se obtiene una rápida disolución de cobalto en piritas debido a la destrucción completa del cristal de pirita y el cambio físico que sufre el cristal pasando de estado sólido a líquido. La solución rica que sale del autoclave es tratada para recuperar cualquier elemento valioso y posteriormente es neutralizada para depositar de forma segura y sustentable los residuos sin valor económico.

Este método sería factible utilizarlo en una explotación de cobalto desde piritas y con una distribución de cobalto en el centro de los cristales. Sin embargo, Chile no tiene gran desarrollo en este proceso, y existe una resistencia cultural dentro de la industria minera por la utilización de autoclave por las altas temperaturas y presiones a las que trabaja este proceso de solubilización.

- **Lixiviación oxígeno-cloruro**

En este tipo de lixiviación, los lixiviantes clorurados permiten mayores potenciales de oxidación que los sistemas sulfatados, generando tasas de lixiviación aceptables a bajas

temperaturas. El ácido utilizado corresponde a un cloruro férrico. Es importante destacar que este proceso es la reacción inversa del transporte de elementos como Cu y Au mediante ligantes clorurados en la corteza terrestre.

- **Biolixiviación**

La biolixiviación ha sido una buena opción para la lixiviación en pilas para sulfuros (Fisher, 2011). Las bacterias pueden ser mesófilas (25-35°C) y/o termófilas (35-55°C), y los organismos que predominan este proceso son las bacterias *leptospirillum*, *acidithiobacillus* y *sulfobacillus* (Morin et al., 2010).

La biolixiviación posee un rendimiento metalúrgico modesto (recuperación de 50-70%), de cinética lenta y de bajo costo. La recuperación en gran medida depende de la actividad bacteriana a la cual se logra llegar, que a su vez dependerá de otros factores tal como la concentración del ion férrico (Fe^{+3}), temperatura, potencial y pH.

De modo de referencia: Un trabajo realizado en Uganda, Morin y d'Hugues (2007) analizan la problemática de tener cobalto dentro de la estructura química de las piritas y lograron determinar las condiciones óptimas para un proceso de biolixiviación de pirita, estas son:

1. Temperatura de crecimiento óptima: 35°C
2. Tamaño de partícula: menor que 63 nm
3. pH en los tanques de biolixiviación: 1,3-2,0

Para la recuperación de cobalto como solución sólida en la pirita, tal como es el caso de La Estrella, sería beneficioso usar este método en caso de tener una mayor concentración de cobalto en los bordes de las piritas.

- **Tostación**

Es posible realizar un proceso de tostación para producir óxidos de cobalto a temperaturas menores a 899°C, y esto al hacerlo en un tiempo relativamente corto, logra la separación de manera preferencial entre cobalto y cobre. Por otra parte, si se tienen óxidos

de hierro acompañando al cobalto, es necesario temperaturas por sobre los 900°C para la reducción termodinámica del hierro (Rainford, 2013). Posterior a la tostación, el óxido de cobalto podrá ser recuperado a través de una lixiviación ácida que solubiliza el cobalto.

4.3 Producto intermedio o final de cobalto

Posterior a estos procesos de solubilización de pirita, se pueden realizar procesos de **electroobtención** para obtener un cátodo de cobalto de alta calidad (99,3% a 99,8% de Co) luego de una etapa en donde se retiran las impurezas, tales como intercambio molecular MRT (útil para remover Fe, Ni, Cu, Cd, Pb y Zn), o intercambio iónico (IX). De otra forma, se puede generar un **precipitado intermedio de cobalto**, el cual para muchos es el producto final elegido. Este producto intermedio puede ser un sulfato, carbonato u hidróxido de cobalto (Fisher, 2011).

4.4 Caracterización geometalúrgica realizada en La Estrella

En el trabajo realizado por Kuyvenhoven (2019) la caracterización geometalúrgica fue basada en un completo análisis químico y mineralógico y, posteriormente, trabajos metalúrgicos con miras a conocer el consumo energético de mineral en la etapa de molienda y la recuperación en etapa de concentración. Los resultados de moliendabilidad Bond Bolas evidencia que la muestra es bastante blanda, lo que presumiblemente se debe a su alto contenido de sulfuros. Como referencia, se considera un rango de 10-15 kWh/st como dureza mediana, sobre 15 kWh/st la muestra es “dura”, y bajo 10 kWh/st la muestra se denomina “blanda” (Kuyvenhoven, 2019). Respecto a los ensayos de concentración, Kuyvenhoven (2019) sometió los tres compósitos a un proceso metalúrgico completo, el cual se observa en el flowsheet de la **Figura 10**.

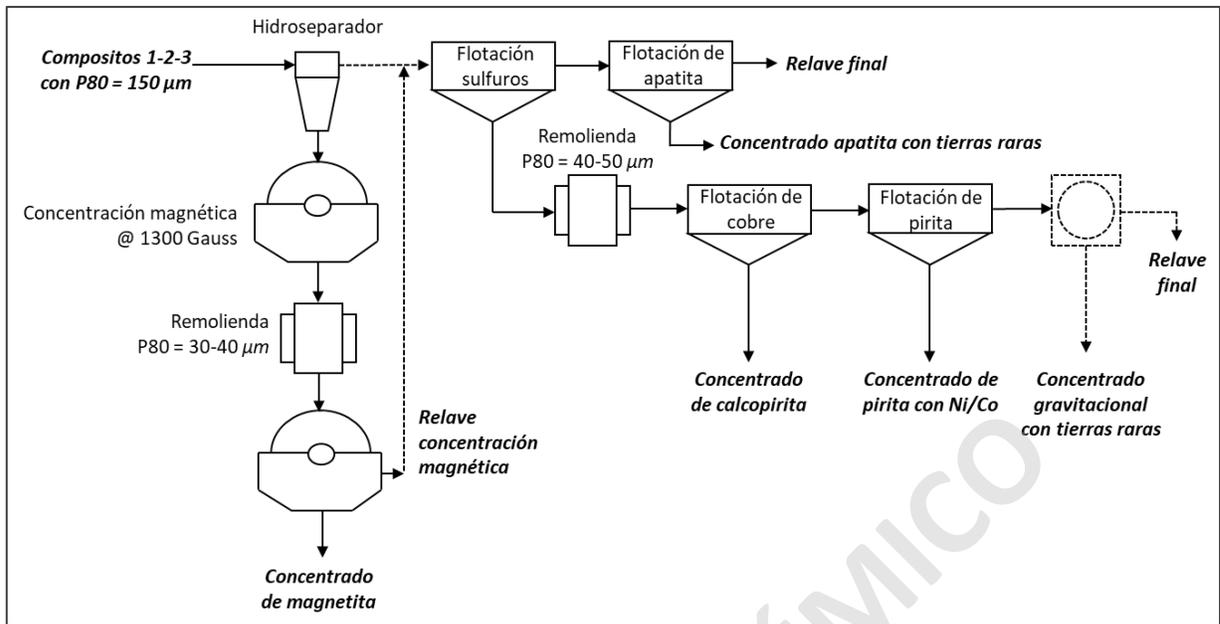


Figura 10: Flowsheet para extraer cobalto desde piritas en La Estrella (Kuyvenhoven, 2019).

En el flowsheet, se separa la magnetita del resto de los minerales mediante concentración magnética, y los relaves de esta concentración alimentan al circuito de flotación de sulfuros.

En este trabajo, el objetivo de la flotación de sulfuros era producir un concentrado de sulfuros en una etapa rougher, posteriormente, el concentrado de esta etapa va a remolienda y se flota en una etapa cleaner para producir, en primer lugar, un concentrado de calcopirita a pH alcalino y, en segundo lugar, un concentrado piritoso a pH neutro (Kuyvenhoven, 2019). Para esto, en la etapa rougher se flota la pirita a un pH superior a 9 para maximizar la flotación de todos los sulfuros. Posteriormente, en la etapa cleaner, se agrega cal en la remolienda para subir el pH a 11,5 y flotar selectivamente la calcopirita.

Los reactivos usados en la etapa rougher son 300 g/T de silicato de sodio, 30 g/T del colector 3477, 50 g/T de espumante Flomin y 10 g/T del espumante MIBC. Cabe mencionar que las pruebas de flotación fueron realizadas con un p80 de 150 micrones para la etapa rougher y un tiempo de remolienda de 25 minutos en la etapa cleaner. El tiempo de flotación en la etapa rougher y cleaner fue 8 y 4 minutos, respectivamente.

Posteriormente, se flotó pirita desde el relave de la flotación cleaner de la calcopirita, para obtener un concentrado piritoso con cobalto y níquel. Para esto, Kuyvenhoven (2019)

agregó 30 g/T de colector 3477 y Flomin, y bajó el pH a un rango de 6,5-7,5, con un tiempo de flotación de 10 minutos.

Los relaves obtenidos desde la flotación rougher de sulfuros alimentan a una etapa de flotación de apatita con el objetivo de recuperar fósforo. Esta etapa también tuvo como objetivo el preconcentrar REE, que posteriormente podrían concentrarse gravitacionalmente debido a su peso específico (Kuyvenhoven, 2019).

El balance metalúrgico global se presenta en la **Tabla 4**.

Ley/recuperación por elemento	Compósito -1		Compósito -2		Compósito -3	
	Ley	Rec.	Ley	Rec.	Ley	Rec.
Cobre	24.9% Cu	71%	25.0% Cu	69%	15.5% Cu	59%
Cobre (caso mejorado)	24.9% Cu	84%	25.0% Cu	83%	15.5% Cu	77%
Hierro	69.8% Fe	57%	70.7% Fe	78%	69.8% Fe	90%
Cobalto	0.390% Co	86%	0.323% Co	77%	0.386% Co	44%
Níquel	0.326% Ni	53%	0.214% Ni	33%	0.142% Ni	12%
Tierras raras	1194 ppm		1013 ppm		850 ppm	

Tabla 4: Balance geometalúrgico global para los tres compósitos obtenidos desde el depósito La Estrella (Kuyvenhoven, 2019).

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

5.1 Introducción

El reconocimiento en terreno del depósito La Estrella tuvo un día de duración y permitió identificar las principales alteraciones y mineralizaciones, proponer preliminarmente una secuencia paragenética, y obtener muestras representativas de cada uno de los eventos reconocidos (**Figura 11**). Las muestras provienen de acumulaciones en forma de pilas de rocas fragmentadas de los frentes de explotación (marinas), acopiadas en canchas ubicadas en la entrada de la mina (**Figura 12**), y de distintos frentes de explotación del interior de la mina (**Figura 13**).

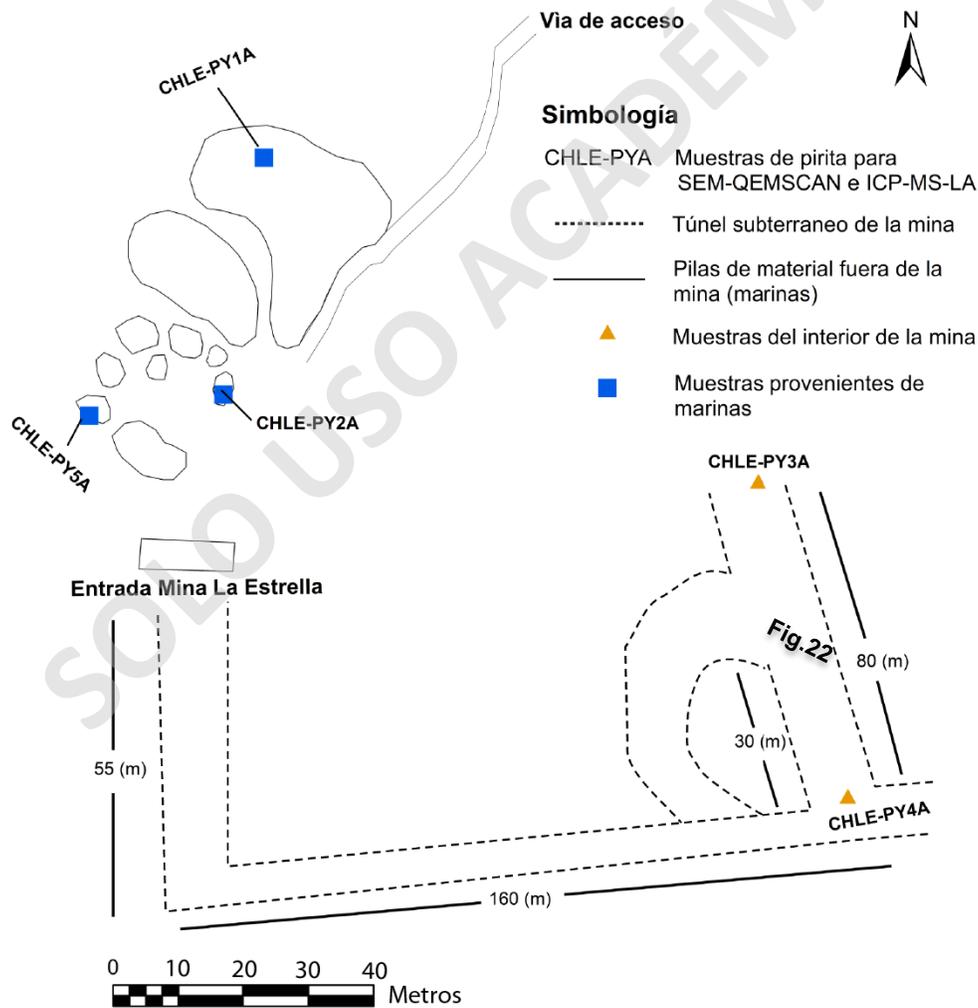


Figura 11: Mapa esquemático de la mina La Estrella con ubicación de los puntos en donde se obtuvieron muestras representativas, utilizadas en este trabajo.



Figura 12: Marinas ubicadas a la salida del depósito mineral La Estrella.



Figura 13: Izquierda: Entrada al depósito mineral La Estrella. Derecha: Zona de interior mina de donde se recolectaron algunas muestras.

Durante el trabajo en terreno se seleccionaron 40 muestras con el objetivo de identificar los eventos de mineralización y alteración en el depósito La Estrella. Estas muestras fueron caracterizadas macroscópicamente y, además, se escogieron catorce muestras representativas en las cuales se confeccionaron catorce secciones transparentes-pulidas. De manera preliminar, se pudieron identificar cinco tipos de piratas distintos en todos los eventos de mineralización y alteración del depósito mineral La Estrella.

Con el objetivo de identificar con mayor precisión la mineralogía asociada a estos cinco tipos de piratas, se realizó una caracterización mineralógica SEM-QEMSCAN. Además, para determinar la concentración y distribución de cobalto y otros elementos químicos en piratas de estas muestras, se realizó una caracterización química mediante ICP-MS-LA en la *University of Tasmania* (UTAS).

5.2 Descripciones macroscópicas en terreno

El trabajo realizado en terreno permitió identificar las principales alteraciones y mineralizaciones del depósito mineral La Estrella, en el contexto del modelo IOCG del depósito. Estas corresponden a alteraciones sódica-cálcica, potásica, clorítica y supérgena, al igual que abundante mineralización de magnetita con subordinada mineralización de calcopirita y pirita. Estos eventos de alteración y mineralización observados en terreno se presentan en la siguiente secuencialidad:

Alteración sódica-cálcica con albita y actinolita asociado a un evento de mineralización de magnetita, pirita y calcopirita en vetillas, que corta a un evento de mineralización previa de magnetita masiva con sulfuros diseminados de pirita y calcopirita. Cabe destacar, que hay un evento de anfibolitización con vetillas de actinolita que no tiene relaciones de corte claras para agruparlo a alguna alteración hidrotermal.

El evento de mineralización de sulfuros más importante corresponde a una mineralización en bolsones de al menos 15 centímetros de largo, donde predomina la pirita y, en menor abundancia, la calcopirita, el cual corta a las alteraciones y mineralización de los eventos anteriores (**Figura 14**).

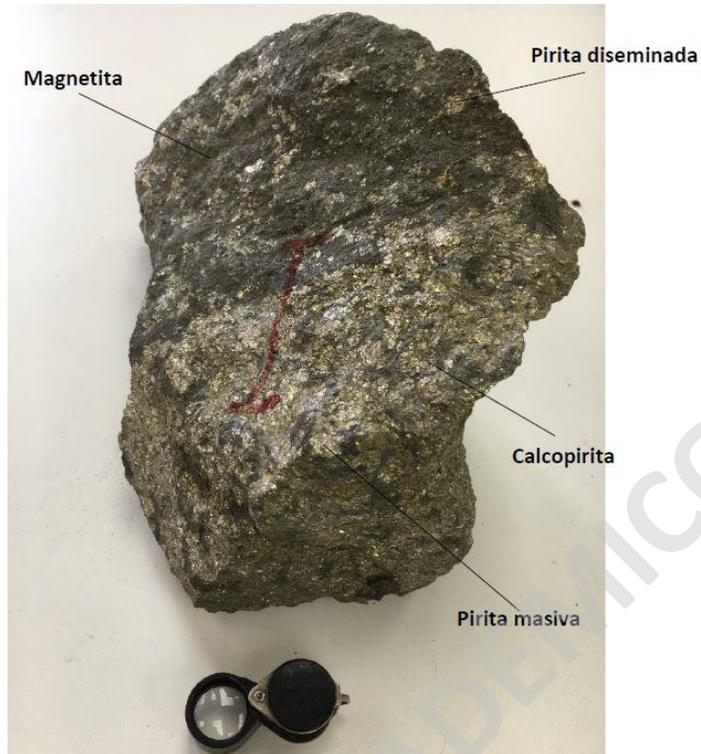


Figura 14: Mineralización de pirita y calcopirita en bolsones. La línea roja indica el área donde se realizó la sección pulida para describir microscópicamente.

Alteración potásica con feldespato potásico, cuarzo, actinolita, posibles biotitas secundarias y mineralización de pirita y calcopirita diseminada asociada principalmente a las zonas con actinolita y biotita secundaria (**Figura 15**).

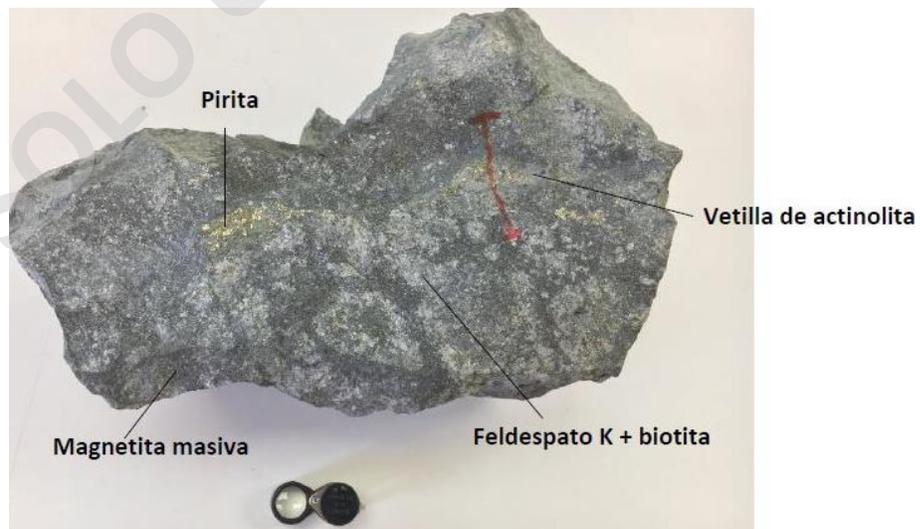


Figura 15: Evento de alteración sódico-cálcico y potásico con la presencia de feldespato potásico y probablemente biotita secundaria.

Finalmente, se identificaron eventos de alteración y mineralización tardíos como (1) actinolita en parches del evento potásico previo alterada por clorita; (2) parches localizados de alteración serícitca y arcillas que alteran en forma selectiva a los feldespatos; (3) vetillas rectas de hasta cinco centímetros de cuarzo euedral con pirita y calcopirita; (4) carbonatos y óxidos de hierro como hematita y goethita diseminados y rellenando fracturas, pertenecientes a una alteración supérgena posterior a todos los eventos mencionados (Figura 16, 17 y 18).



Figura 16: Alteración tardía de sericita y arcillas.



Figura 17: Actinolita en parches alterada por clorita, y mineralización de pirita.



Figura 18: Vetillas rectas de cuarzo euhedral con piritas euhedrales cúbicas.

SOLO USO ACADÉMICO

5.3 Descripciones petrográficas-calcográficas

Si bien, la mineralogía y las texturas primarias de las muestras analizadas no son identificables debido a las alteraciones hidrotermales que afectan a las rocas del depósito, aún es posible observar cavidades redondeadas de hasta 1 cm y una textura porfírica preservada con albitas reemplazando a los fenocristales previos, además de mineralogía primaria de anfíbolos de hornblenda (2%) de 0,3 hasta 1,5 mm, que están siendo alteradas selectivamente por actinolita y clorita. En base a esta información y la bibliografía regional del área de estudio, la roca caja correspondería a una volcanita andesítica de hornblenda (**Figura 19**).

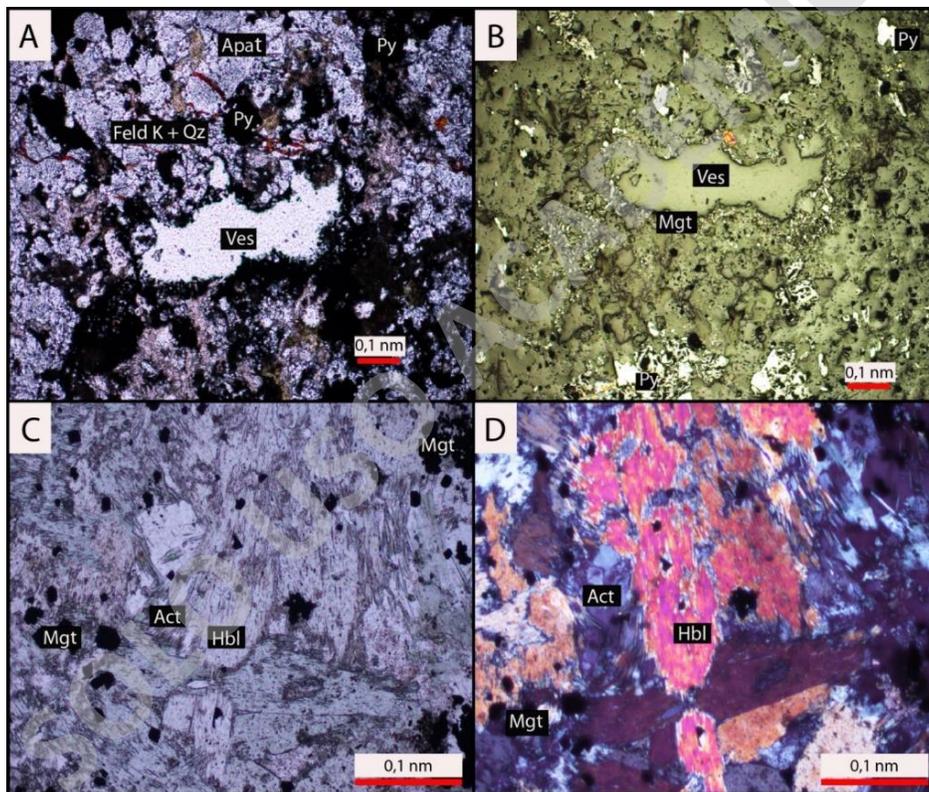


Figura 19: A) cavidades (ves) redondeadas de la roca caja, B) cavidades (ves) redondeadas rodeadas por mineralización de magnetita (mgt), luz reflejada. C) y D) hornblendas primarias de la roca caja alteradas por actinolita (act) en nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente, luz transmitida (muestra CHLE-PY4A).

Las descripciones petrográficas y calcográficas han permitido identificar, al menos, 7 eventos diferentes, en donde es posible identificar alteraciones y mineralizaciones características de los depósitos tipo IOCG, las cuales serán descritas a continuación (**Tabla 5**).

- **Evento I: Mineralización temprana**

Corresponde a la mineralización de magnetita masiva (75%) con pirita (20%) y trazas de calcopirita (5%), ambas diseminadas. Los cristales de magnetita son anhedrales, se presentan de forma masiva, y sin un hábito distinguible. La pirita y calcopirita son anhedrales y de grano fino, la primera con tamaños que varían entre 0,5 hasta 3 mm y la segunda entre 0,1 hasta 1 mm (**Figura 20**). No se reconoció una alteración hidrotermal directamente relacionada a este evento de mineralización.

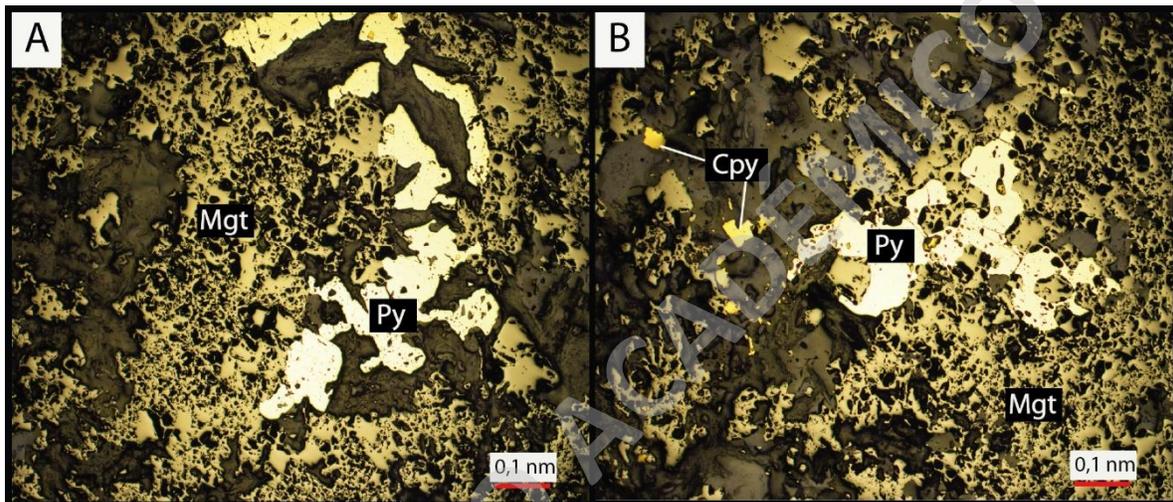


Figura 20: A) y B) muestran magnetita (mgt) masiva en asociación con pirita (py) y calcopirita (cpy) diseminadas (muestra CHLE-PY3A).

- **Evento II: Alteración sódico-cálcico (Na-Ca)**

Alteración hidrotermal con desarrollo de minerales de albita, actinolita, apatito, epidota y cuarzo asociada a mineralización de magnetita en vetillas y sulfuros de pirita y calcopirita diseminados.

La albita (15-20%), de tamaño entre 0,8 mm hasta 2,5 mm, tiene una forma alargada subhedral a euhedral, se presenta diseminada y en cúmulos granulares. Es posible observar una textura porfírica preservada en donde la albita se presenta reemplazando fenocristales con bordes de reacción, rodeados por una masa microcristalina de cuarzo y feldespato potásico, este último asociado al evento potásico (Evento IV), y en otros casos rodeada por actinolita. Los cristales de albita se encuentran parcialmente alterados a illita.

La actinolita (15-40%), de tamaños entre 0,01 hasta 0,8 mm, posee formas fibrosas de hábito acicular, subhedral, y se presenta diseminada, relleno de espacios entre la magnetita masiva, o alterando a hornblendas primarias. La actinolita presenta una textura coronítica al estar rodeando a la albita, lo que indica que la actinolita sería posterior a la albita, por ende, el evento de alteración cálcico es posterior al evento de alteración sódico (**Figura 21-D**).

Es posible observar cúmulos de apatito (3-5%) de 0,3 hasta 0,6 mm, constituidos por cristales subhedrales de forma tabular y granular. El cuarzo (hasta 5%) en esta alteración tiene una forma anhedral, granular y de grano fino entre 0,1 a 0,5 mm. La epidota (8-15%), anhedral y de 0,05 hasta 0,3 mm de largo, se observa en asociación con la actinolita y predomina en zonas de la muestra donde también predomina la actinolita, ambas de forma diseminada (**Figura 21**).

Asociado a este evento de alteración se desarrolló mineralización de magnetita (25%) en vetillas sinuosas, de 1 a 5 mm y sin halo de alteración, la cual está acompañada por pirita (25%) y calcopirita (5%). Los sulfuros también están diseminados en la roca. La pirita y calcopirita se presentan en cristales anhedrales a subhedrales y de tamaños de hasta 2 mm y 1 mm, respectivamente.

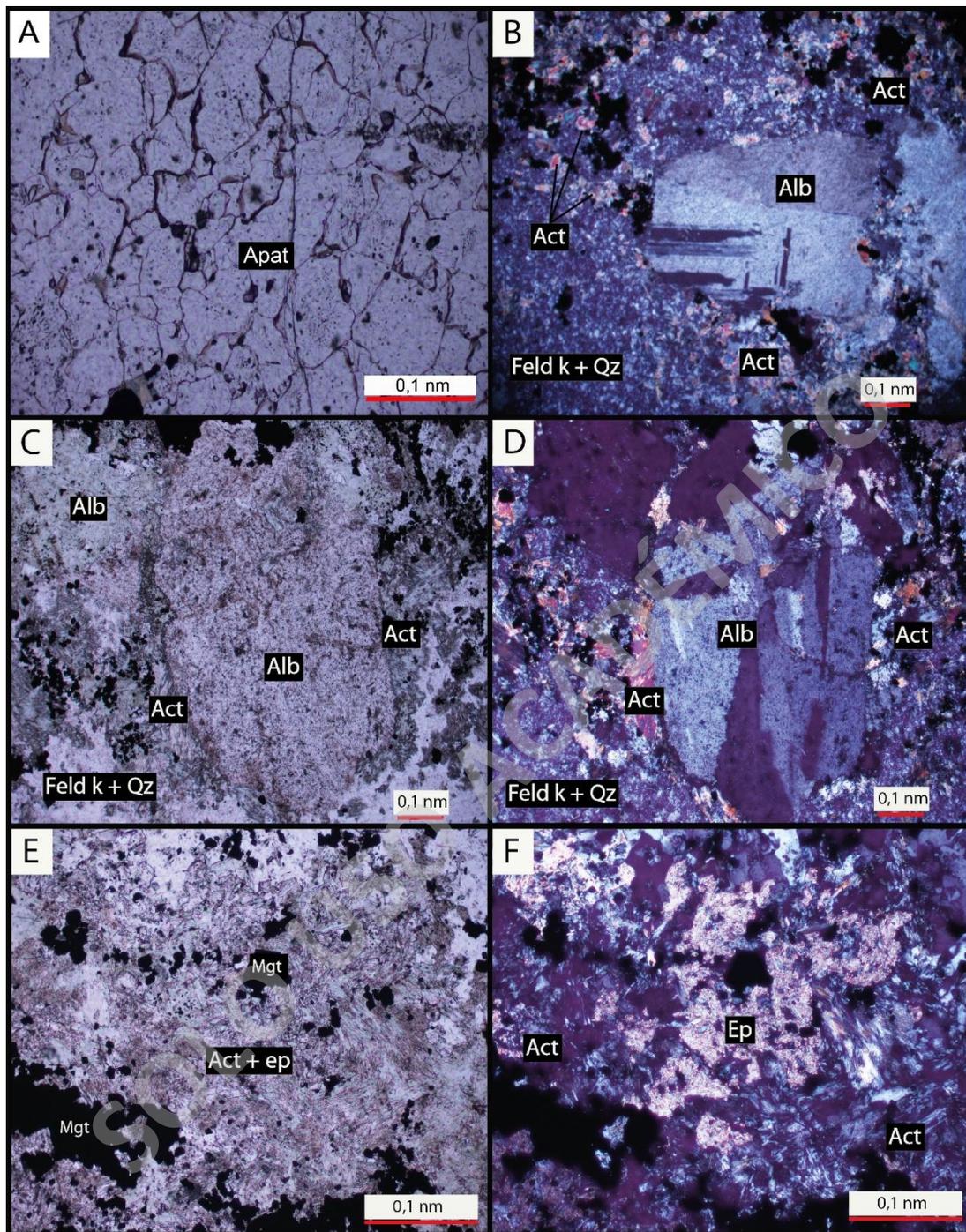


Figura 21: A) cristales de apatito asociadas a la alteración Na-Ca. B) fenocristales de albita (alb) subhedrales con bordes de reacción, rodeados por una masa microcristalina de feldespato potásico (feld K) y cuarzo (qz). C) y D) fenocristales subhedrales de albita en cúmulos con una textura coronítica de actinolita (act) y rodeados por la masa microcristalina de feldespato potásico y cuarzo. E) y F) actinolita subhedral con epidota (ep) anhedral y magnetita (mgt) (muestra CHLE-PY4A).

- **Evento III: Mineralización en bolsones**

Dentro del cuerpo de magnetita masiva (Evento I), se observan bolsones de mineralización de pirita, calcopirita y en muy baja proporción, bornita (**Figura 22**). Estos bolsones tienen formas redondeadas a elongadas, de dimensiones de al menos 15 centímetros de largo. Este evento de mineralización no tiene una alteración hidrotermal reconocida.



Figura 22: Mineralización de pirita y calcopirita en bolsones centimétricos del depósito La Estrella. Fotografía del frente de explotación.

En estos bolsones, la pirita (70%) es de grano medio a muy grueso, de 0,5 hasta 3,5 centímetros, subhedral, y con un hábito cúbico medianamente definido. Por otra parte, la calcopirita (15%) tiene tamaños 0,3 hasta 1 centímetro, está temporal y espacialmente asociada con la pirita, y se presenta en cristales anhedral de forma aplanada, y en baja abundancia se presenta bornita (>1%) de forma granular y de tamaño menor a 0,5 mm (**Figura 23**). También es posible observar cristales de pirita y calcopirita de grano fino y medio, donde los cristales de pirita de grano medio “encierran” a cristales de calcopirita de

menor tamaño al momento de cristalizar. Esta asociación es interpretada como remanentes de mineralizaciones previas.

El 15% restante en estos bolsones corresponden a carbonatos y cuarzo de eventos posteriores que están rellenando espacios abiertos entre estos sulfuros. En particular se observa que los cristales de pirita están fuertemente fracturados con vetillas de carbonato rellenando estas fracturas, y también cuarzo con textura granular en mosaico rellenando zonas triangulares. Cabe destacar que el cuarzo en mosaico es del Evento V asociado a la alteración clorita-sericita y probablemente, la calcita en vetillas está asociado al último evento de alteración hidrotermal supérgena.

SOLO USO ACADÉMICO

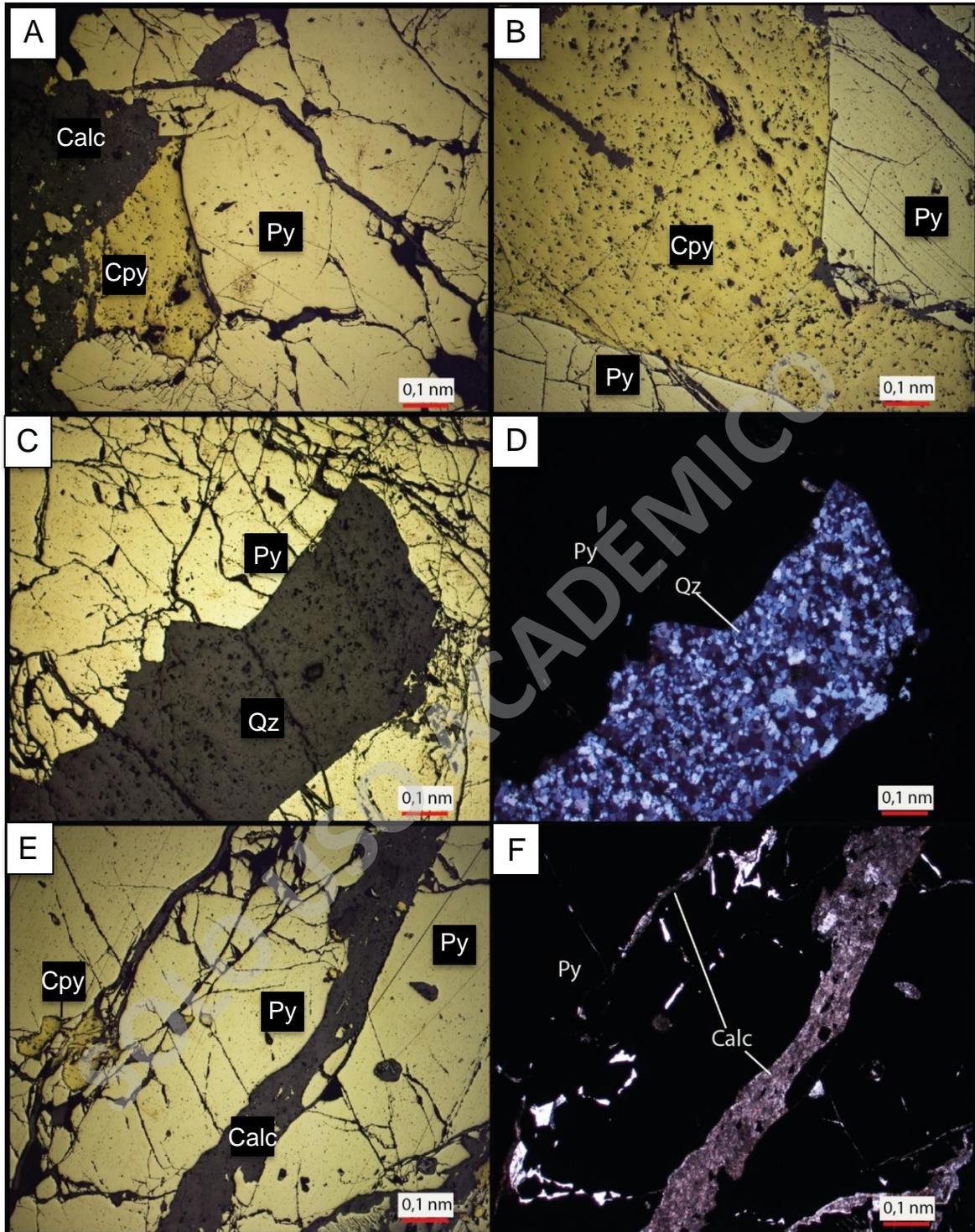


Figura 23: A) y B) pirita (py) y calcopirita (cpy) de grano muy grueso en paragénesis. C) y D) relleno en espacios abiertos de cuarzo (qz) microcristalino granular y con textura en mosaico, en cristales de pirita de grano muy grueso. E) y F) vetillas de calcita (calc) (muestra CHLE-PY1A).

- **Evento IV: Alteración potásica (K)**

Alteración hidrotermal constituida por minerales de biotita, feldespato potásico, cuarzo, actinolita y mineralización diseminada de pirita, calcopirita, y escasa bornita.

La biotita (hasta 10%), de tamaños entre 0,1 hasta 0,5 mm, es anhedral, con texturas de bordes de reacción y alteradas a clorita. El feldespato potásico (15-20%) constituye una masa cristalina junto al cuarzo (10-15%), en donde ambos son subhedrales (a excepción de ciertos cristales de feldespato potásico que son euhedrales, alargados y tabulares) y con tamaños entre el rango de 0,01 hasta 0,3 mm. La actinolita (hasta 15%) de tamaños entre 0,1 hasta 0,4 mm, con hábito acicular, está siendo alterada por clorita la cual se manifiesta en los bordes de la actinolita (**Figura 24**).

A este evento se encuentra asociado mineralización de pirita, y trazas de calcopirita y bornita diseminados en las rocas alteradas. La pirita (15-20%) presenta tamaños desde 0,8 hasta 3 mm, y es subhedral con bordes moderadamente definidos. La calcopirita (5-8%) es de tamaños entre 0,01 hasta 0,1 mm, anhedral a subhedral y, finalmente, la bornita (<1%) es microcristalina, de tamaños entre 0,01 hasta 0,05 mm y de forma anhedral.

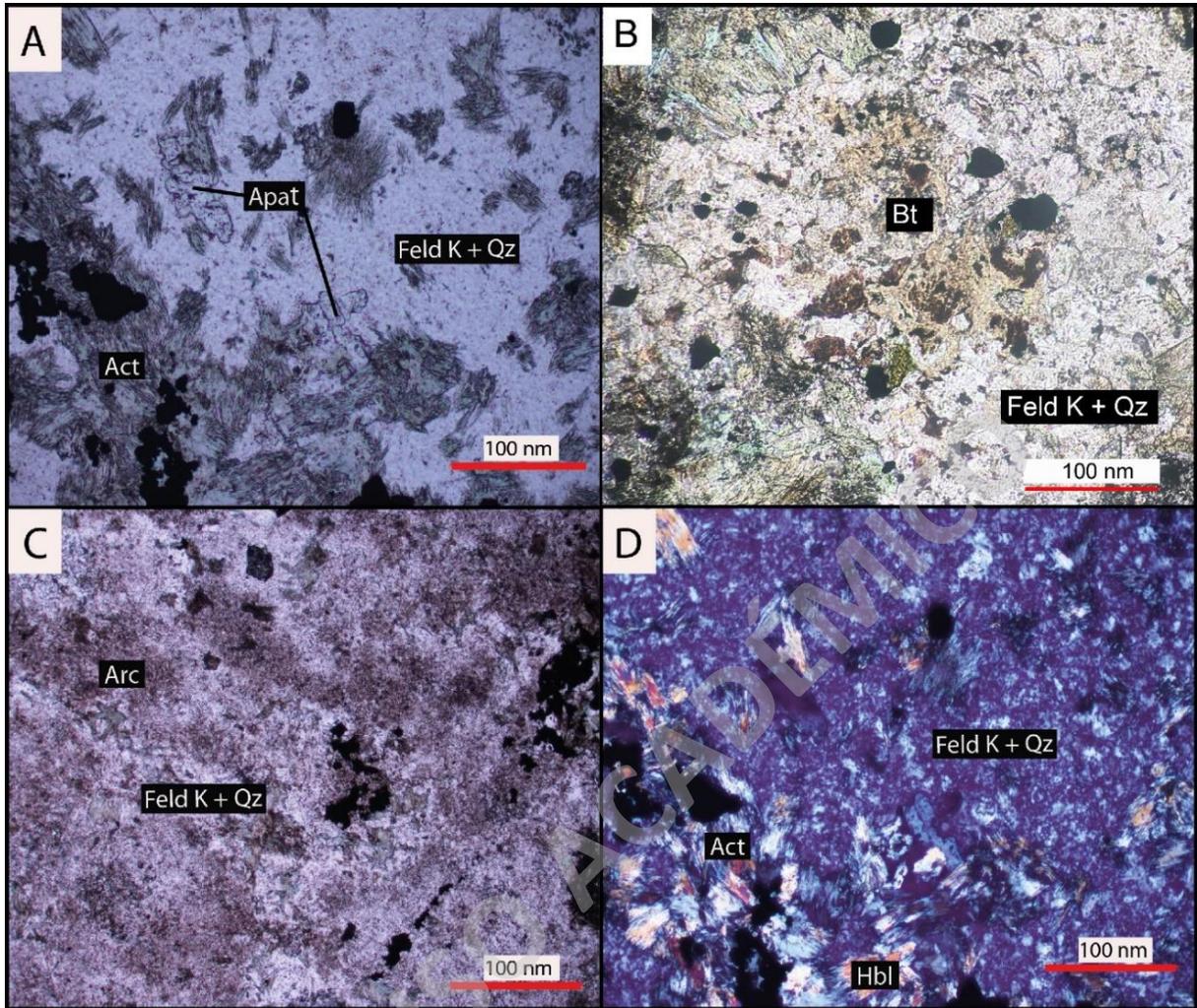


Figura 24: A) apatito (apat) del Evento I diseminado rodeado por una masa microcristalina de cuarzo (qz) y feldespato potásico (feld k). B) biotita (bt) secundaria anhidral microcristalina C) y D) feldespato potásico alterado por arcillas en asociación con cuarzo microcristalino (muestra CHLE-PY2A).

- **Evento V: Alteración clorita-sericita**

Alteración tardía con desarrollo de minerales de clorita, sericita, arcillas, cuarzo y calcita. La clorita se presenta reemplazando selectivamente a las actinolitas del Evento II de alteración potásica, aprovechando el clivaje de la actinolita.

Asociado principalmente a los sectores donde predomina la clorita en parches (**Figura 25-H**), se presenta calcita de forma euhedral con hábito romboédrico, rellenando espacios abiertos y en cristales de 0,02 hasta 0,3 mm.

La sericita (15%) se presenta como finas micas de 0,01 hasta 0,1 mm, y altera selectivamente de forma homogénea a albita y feldespato potásico. Por otra parte, las arcillas, principalmente illita (5-10%), se presentan en asociación espacial con la sericita, en microcristales menores a 0,01 mm, alterando a cristales de albita y feldespato potásico (**Figura 25**).

El cuarzo (15%) se observa en cristales de 0,1 a 0,5 mm, asociado a esta alteración hidrotermal aprovechando bordes triangulares para cristalizar, de forma euhedral a subhedral con un hábito prismático y bordes bien definidos. Se puede observar también con una textura granular en mosaico rellenando espacios abiertos remanentes entre la mineralización de magnetita y sulfuros de pirita y calcopirita.

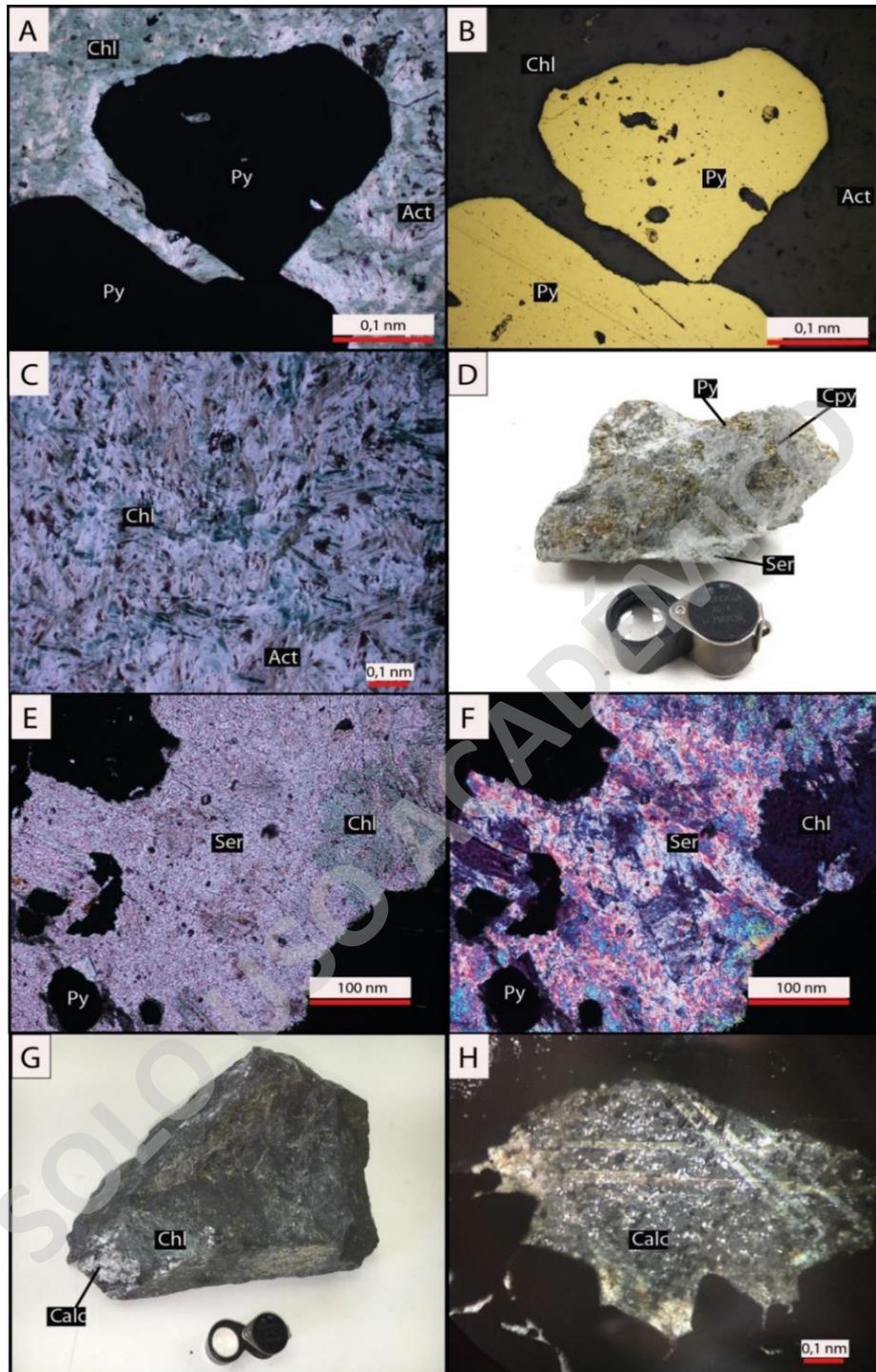


Figura 25: A) y B) mineralización de pirita (py) subhedral en parches cloríticos que alteran a actinolita (act) del evento potásico, en luz transmitida y luz reflejada, respectivamente. C) Actinolita alterada por clorita (chl). D) muestra de roca con sericita (ser) en parches que posiblemente altera a feldespatos. E) y F) alteración de sericita y clorita a nicolas paralelos y nicolas cruzados, respectivamente. G) muestra de roca con clorita en parches en asociación con calcita (calc) euhedral de grano medio. H) Cristal de calcita con clivaje en 120 y 60° (muestra CHLE-PY2A).

- **Evento VI: Vetillas epidermales de cuarzo euhedral**

Vetillas rectas, de cuatro a cinco centímetros aproximadamente, compuestas por cuarzo, pirita y trazas de calcopirita, sin una alteración hidrotermal asociada. Los cristales de cuarzo (75%) de tamaños entre 0,1 mm hasta 1 centímetro, son euhedrales con un hábito prismático bien desarrollado y están rellenoando espacios abiertos. La pirita (20%), posee tamaños en un rango de 1 mm hasta 1,5 centímetros, son euhedrales, con un hábito cúbico bien desarrollado, y también están aprovechando espacios en la vetilla para precipitar. De igual forma, hay calcopirita (<5%) asociada a la mineralización de pirita, la cual es de un tamaño entre 0,01 y 0,04 mm, y se presentan rellenoando espacios abiertos en la vetilla (**Figura 26**).

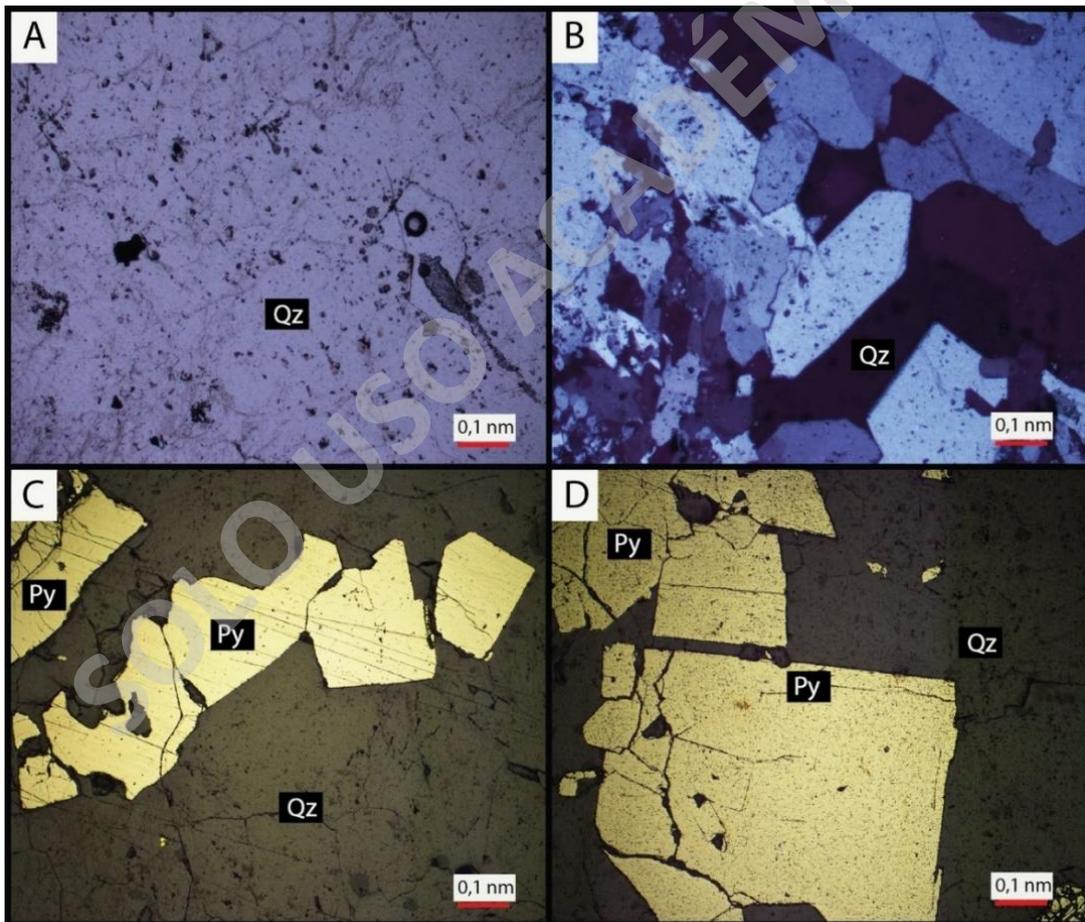


Figura 26: A) y B) cuarzo (qz) euhedral en luz transmitida a nicolas paralelos y cruzados, respectivamente. C) y D) mineralización de pirita (py) euhedral asociada a la vetilla de cuarzo euhedral (muestra CHLE-PY5A).

- **Evento VII: Alteración supérgena**

Alteración supérgena con presencia de limonitas y carbonatos en vetillas principalmente, y enriquecimiento secundario de calcosina y covelina reemplazando a calcopirita.

La calcosina y covelina (<5%) se presenta reemplazando en asociación selectiva a la calcopirita de grano fino a grano medio, en donde el reemplazo ocurre desde los bordes hacia el centro. Por otra parte, en las limonitas destaca la hematita (1-5%), de grano fino y que está asociada a la oxidación de magnetita, y en vetillas que cortan sulfuros de pirita y calcopirita. De igual forma, los carbonatos, con presencia de calcita (<5%) principalmente, cortan a la mineralización de pirita y calcopirita de eventos previos, y se asocian a las zonas del depósito donde también aparecen limonitas (**Figura 27**).

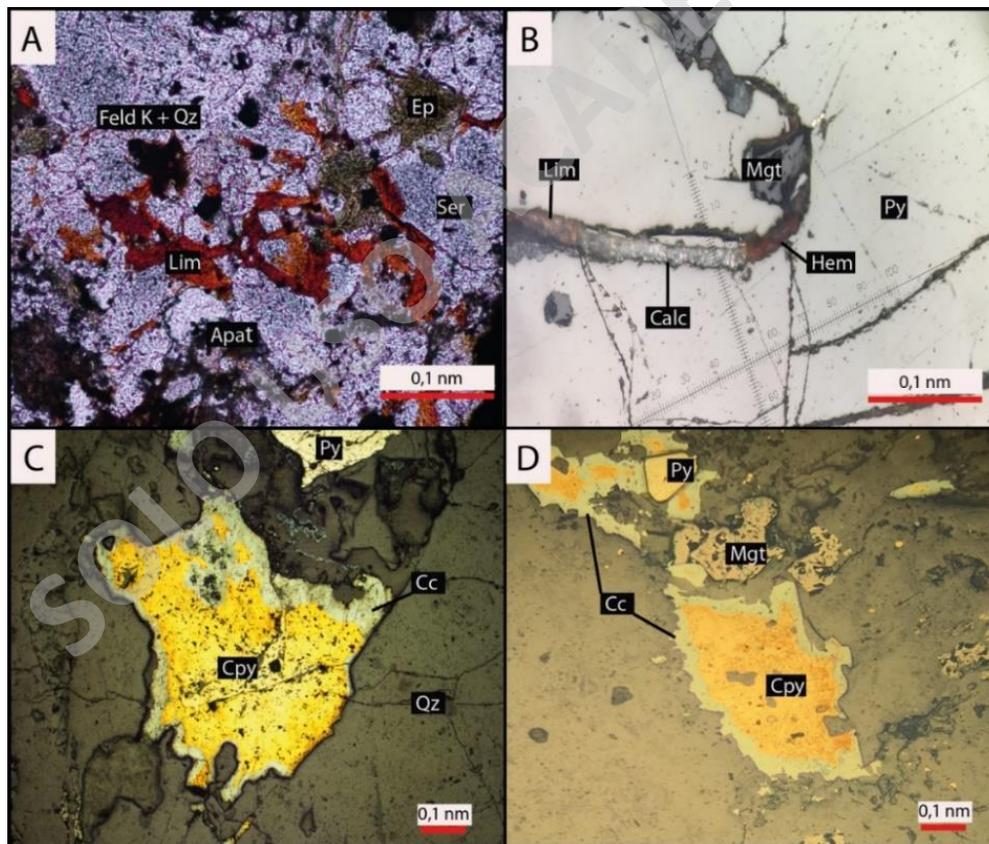


Figura 27: A) alteración supérgena con limonitas (lim) en luz transmitida (muestra CHLE-PY4A). B) vetilla de hematita (hem) con carbonatos (calc) y limonitas en piritas (py) de grano grueso (muestra CHLE-PY1A). C) y D) calcosina (cc) reemplazando a calcopirita (cpy) desde los bordes (muestra CHLE-PY5A para C) y muestra CHLE-PY4A para D)).

5.3.1 Otras alteraciones de desarrollo puntual

- **Mushketovitzación**

Se expresa como un proceso de formación de mushketovita debido a la reducción de hematita especular a magnetita, es de esta forma también como se puede identificar macroscópicamente, ya que se observa especularita con magnetismo. Por otra parte, microscópicamente se puede identificar al observar finas fibras de especularita, pero con colores y texturas distintivas de la magnetita. Esos cristales de mushketovita poseen una forma fibrosa, elongados, de hasta 1 mm de largo, y este evento de alteración hidrotermal podría estar asociado al evento II de alteración sódica cálcica al estar en la misma muestra de roca, sin embargo, no hay relaciones de corte entre minerales que permitan corroborarlo (Figura 28).

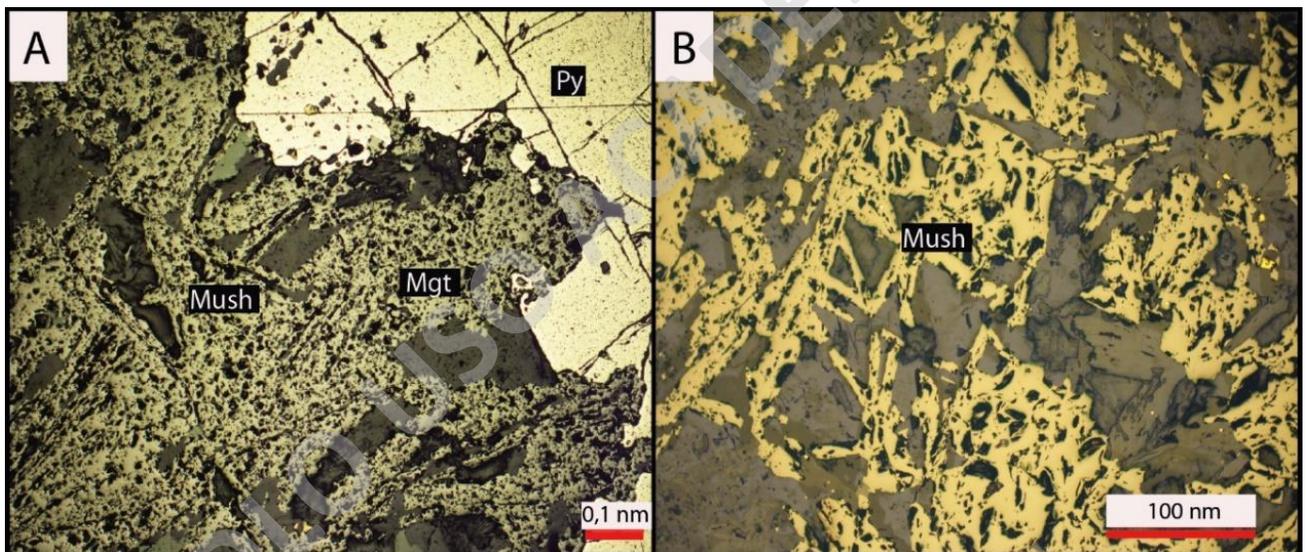


Figura 28: A) mushketovita (mush) asociada a vetillas de magnetita (mgt) con sulfuros de pirita (py) y calcopirita (cpy). B) mushketovita en asociación con la alteración sódica-cálcica (muestra CHLE-PY4A).

- **Epidotización**

Se expresa en vetillas rectas de epidota de 4 centímetros aproximadamente, con delgado halo de alteración y que parecieran cortar a la mineralización masiva de magnetita con sulfuros diseminados de piritita y calcopirita. Sin embargo, la abundancia de estas vetillas de epidota es baja y no se observan principios de relación de corte claros con los demás eventos de mineralización y alteración (**Figura 29**).

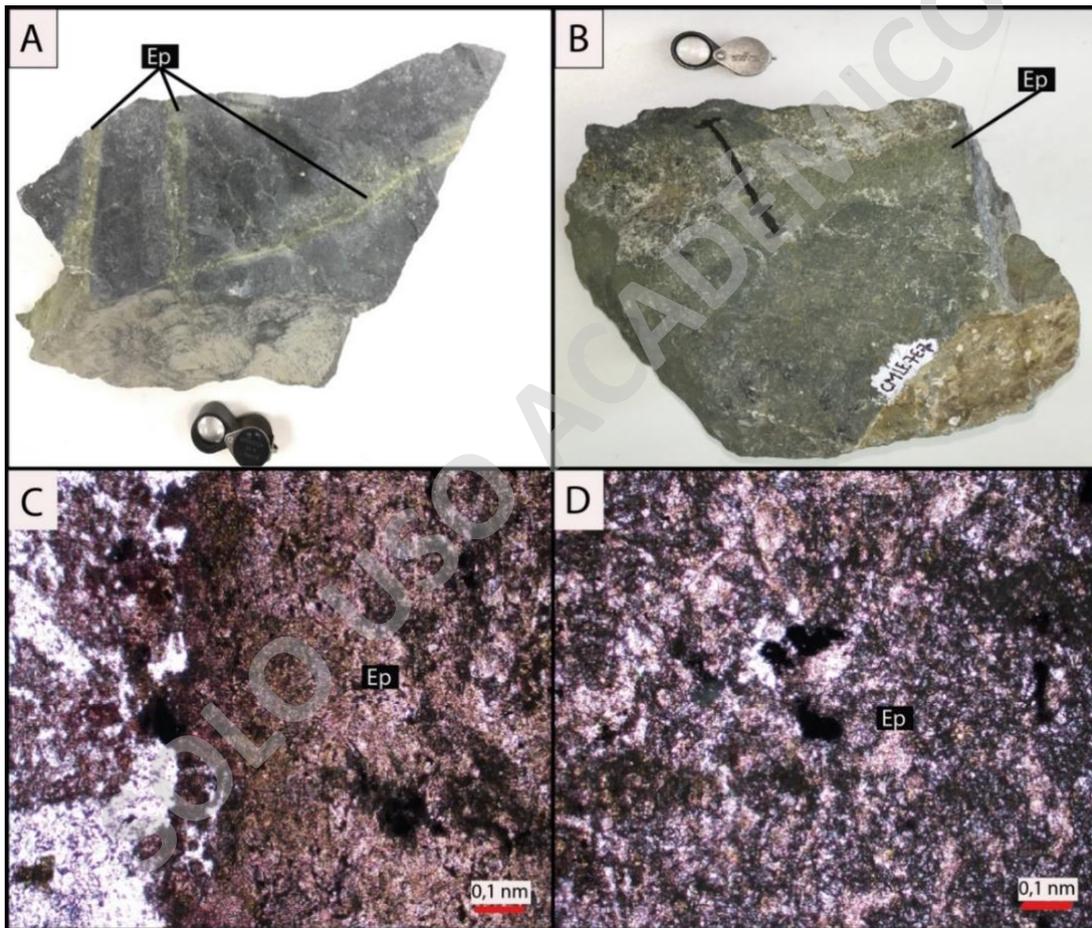


Figura 29: A) y B) muestras de roca con vetillas de epidota sin halo de alteración. C) y D) vetillas de epidota en luz transmitida (muestra CHLE-PY3A).

- **Anfibolitización**

Se expresa como vetillas de actinolita con un halo de magnetita, las cuales parecieran cortar al Evento I y II. Las vetillas son de tres centímetros aproximadamente, y la actinolita que rellena este espacio abierto es euhedral, con un hábito acicular en forma de fibras muy bien desarrollado. El halo de alteración compuesto por magnetita es de 0,5 mm hasta 1 centímetro (**Figura 30**).

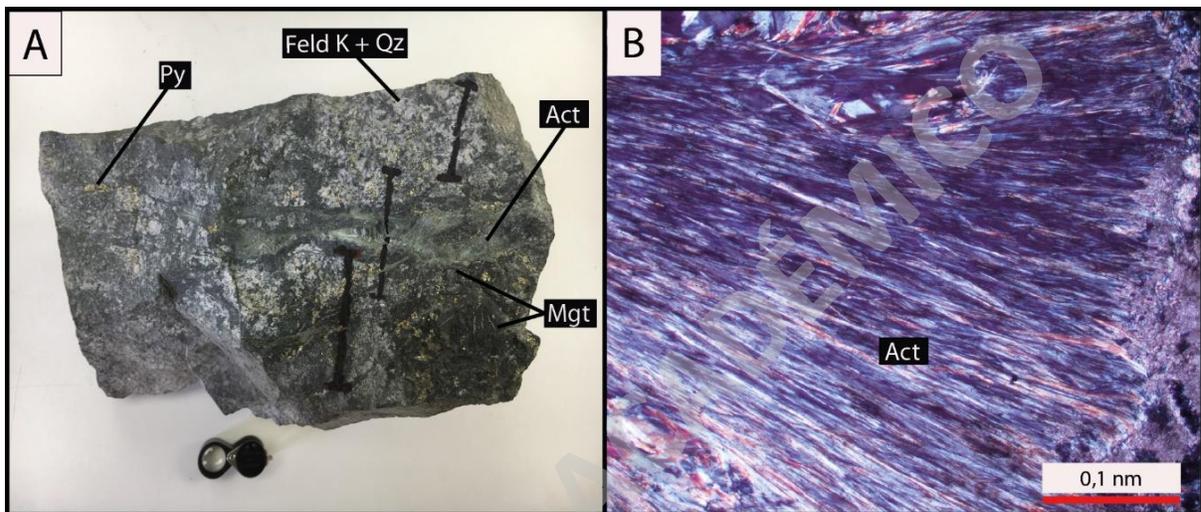


Figura 30: A) muestra de roca con vetillas de actinolita (act) y halo de magnetita (mgt). B) vetilla de actinolita en luz transmitida (muestra CHLE-PY4A).

En base a los resultados de las descripciones macro y microscópicas, se determinó que los primeros eventos de mineralización y alteración corresponden a una mineralización temprana de magnetita con subordinados sulfuros de pirita y calcopirita, asociados a una alteración sódica-cálcica y potásica de altas temperaturas. En los eventos posteriores, las asociaciones mineralógicas varían a minerales de menor temperatura tales como cuarzo, sericita, clorita y alteraciones supérgenas que reemplazan a minerales de alteraciones previas. Además, hay tres eventos de alteración que no han sido posible identificar su secuencialidad en el depósito La Estrella (**Tabla 5**).

Ocurrencia	Minerales	Evento I y II: Mineralización temprana y alteración Na-Ca	Evento III: Mineralización en bolsones	Evento IV: Alteración K	Evento V: Alteración clorita-sericita	Evento VI: Vetillas epitermales	Evento VII: Alteración supérgena
Masiva	Magnetita	————					
Diseminado	Pirita	————					
Diseminado	Calcopirita	————					
Diseminado-cúmulos	Albita	————					
Vetillas	Especularita	————					
Vetillas	Mushketovita	————					
Diseminado	Actinolita	————					
Diseminado	Apatito	————					
Diseminado	Epidota	-----					
Granular Diseminado	Cuarzo	————					
Diseminado-vetillas	Magnetita II	————					
Diseminado-vetillas	Pirita II	————					
Diseminado-vetillas	Calcopirita II	-----					
Bolsones	Pirita IV		————				
Bolsones	Calcopirita IV		————				
Bolsones	Bornita		-----				
Granular	Biotita			————			
Masiva	Actinolita II			————			
Diseminado	Feldespatos K			-----			
Diseminado	Cuarzo II			-----			
Diseminado	Pirita III			-----			
Diseminado	Bornita			-----			
Diseminado	Calcopirita III			-----			
Alterando actinolita	Clorita				————		
Diseminada	Sericita				————		
Granular en mosaico en espacios abiertos	Cuarzo III				-----		
Alterando feldespatos	Arcillas (illita princip)				-----		
Euhedral en espacios abiertos	Calcita				-----		
Vetillas	Cuarzo IV					————	
Euhedral en vetillas	Pirita V					————	
Rellenando en vetillas	Calcopirita V					-----	
Vetillas	Limonitas						————
Reemplazo de calcopirita	Calcosina						————
Reemplazo de calcopirita	Covelina						-----
Vetillas	Carbonatos						-----

Tabla 5: Secuencia paragenética del depósito mineral La Estrella.

5.4 Descripción de piritas

Se han identificado cinco eventos mineralógicos (Evento I, II, III, IV, VI) que contienen mineralización de pirita con características distintivas (**Tabla 6**). Estas piritas han sido caracterizadas macro y microscópicamente de acuerdo con los siguientes criterios: forma dominante (euhedral, subhedral o anhedral), tamaño del cristal dominante, asociación mineral, distribución y abundancia en el depósito La Estrella. Los diferentes tipos de piritas se describen a continuación:

- **Piritas diseminadas (Evento I-Mineralización temprana)**

Piritas (20%) diseminadas en la mena de magnetita masiva, asociada al evento temprano de mineralización. Estos cristales son anhedrales, de grano fino de 0,5 hasta 3 mm, con bordes no definidos e irregulares y ocasionales bordes de reacción entre pirita y magnetita, además, hay entrecrecimiento con minerales de calcopirita (**Figura 31**).

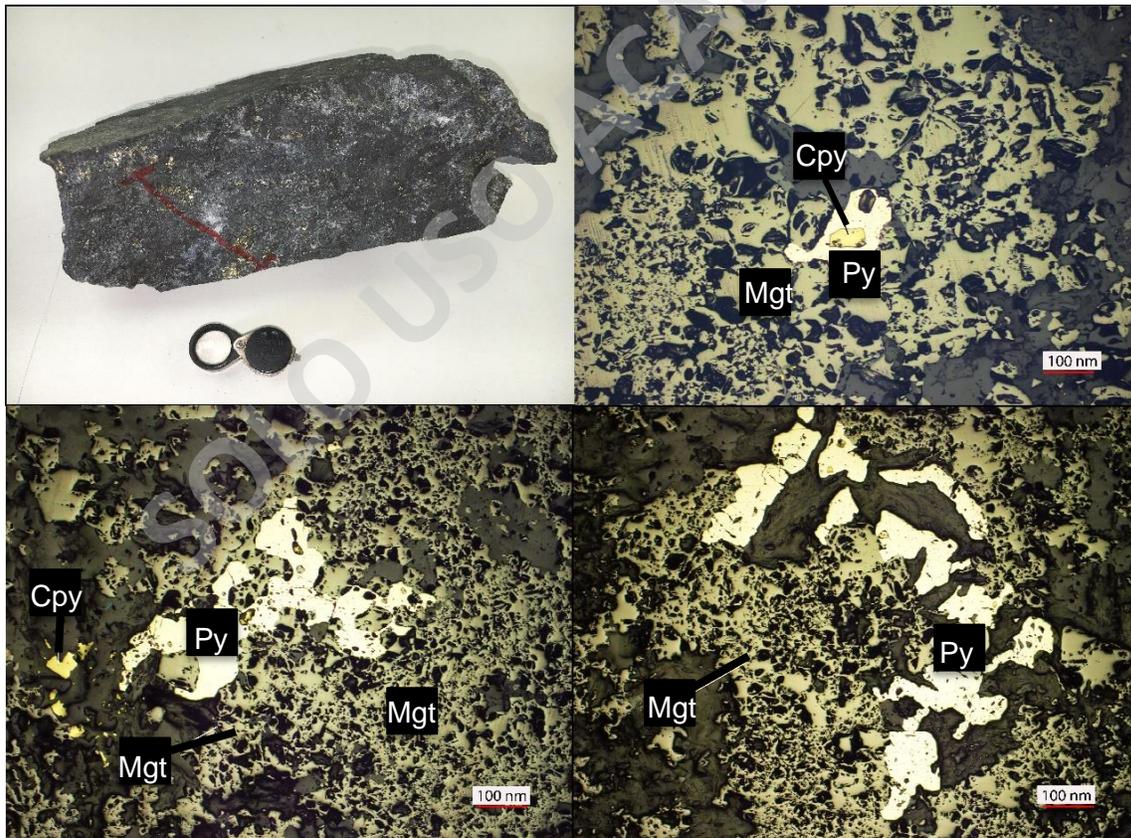


Figura 31: Evento I de piritas diseminadas en magnetita masiva. La línea roja muestra el área en donde se realizó la sección transparente-pulido.

- **Piratas diseminadas en alteración Na-Ca (Evento II-Alteración Na-Ca)**

Piratas (25%) asociadas a un evento sódico-cálcico, en vetillas de magnetita y diseminadas. Las piratas son anhedrales y con una forma distinguiblemente alargada, de grano fino a medio entre 0,5 hasta 2 mm y asociadas espacialmente a la magnetita en vetillas y, de forma diseminada, a cristales de albita. (**Figura 32**).

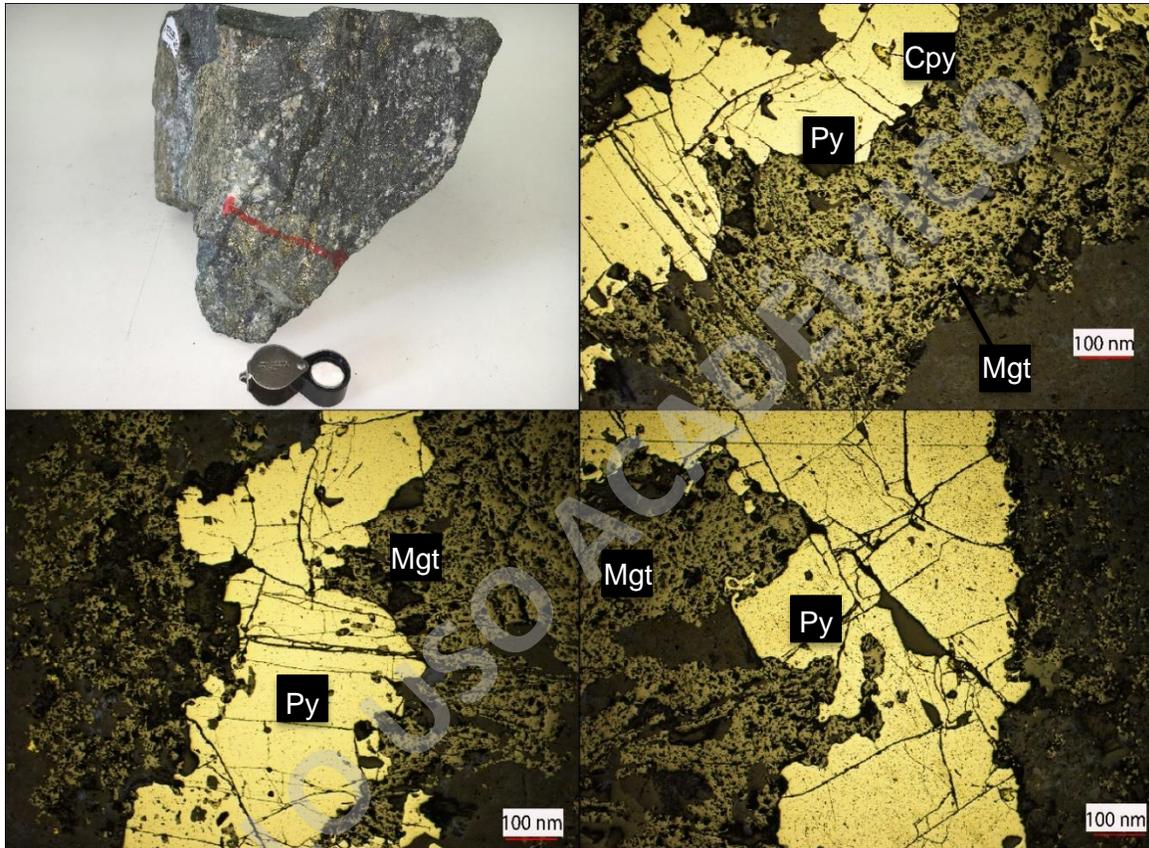


Figura 32: Evento II de piratas diseminadas en alteración Na-Ca. La línea roja muestra el área en donde se realizó la sección transparente-pulido.

- **Piritas en bolsones (Evento III-Mineralización en bolsones)**

Piritas en “bolsones” y vetillas sinuosas de hasta cinco centímetros de ancho que se sobrepone al evento principal de mineralización de magnetita. Estas piritas son, en gran parte, subhedrales (a excepción de algunos cristales euhedrales), y se diferencian principalmente por el tamaño muy grueso de los cristales, incluso, la alta abundancia de la pirita en estos bolsones también es diferenciable de las piritas de los Eventos I y II (**Figura 33**).

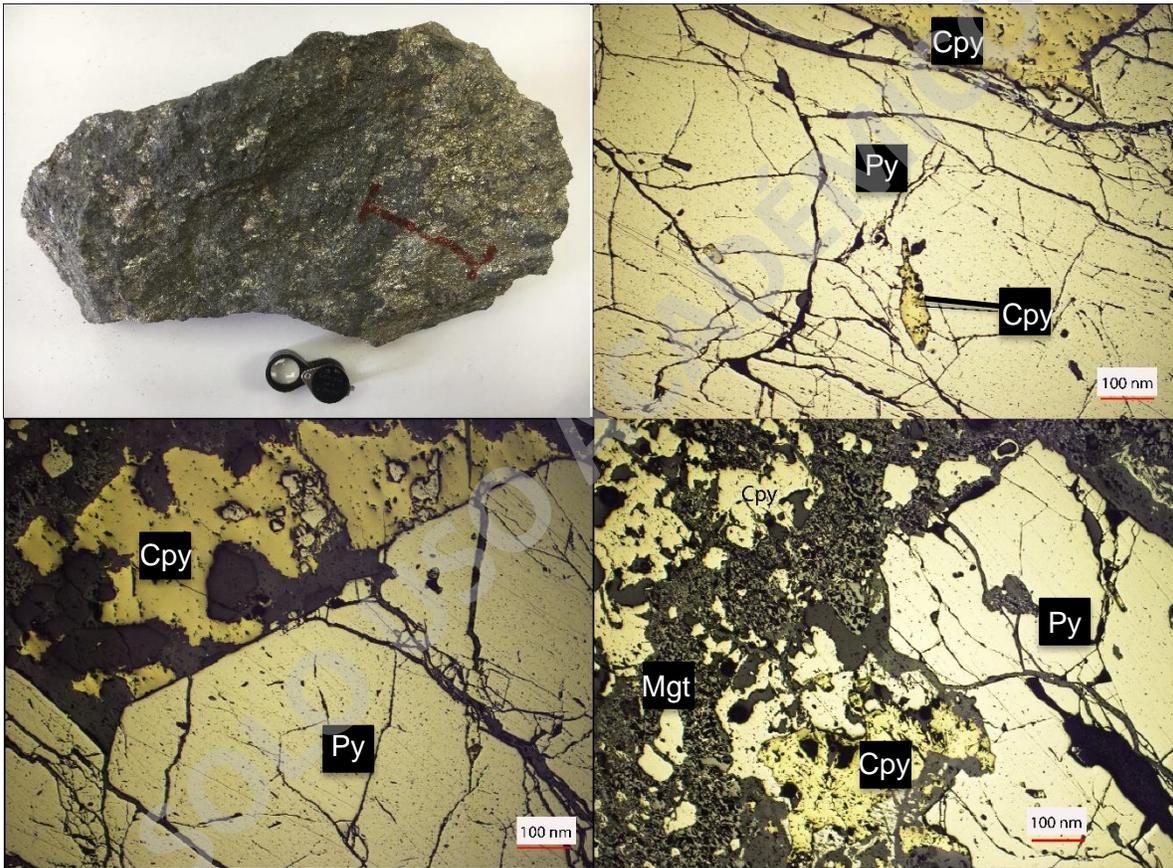


Figura 33: Evento III de mineralización de piritas en bolsones. La línea roja muestra el área en donde se realizó la sección transparente-pulido.

- **Piratas diseminadas en alteración K (Evento IV-Alteración K)**

Piratas (15-20%) subhedrales, con algunos bordes y vértices del cristal bien desarrollados, de grano medio principalmente y asociadas a un evento de alteración potásica donde predomina la presencia de biotita, actinolita y en menor abundancia, feldespatos potásico y cuarzo (**Figura 34**).

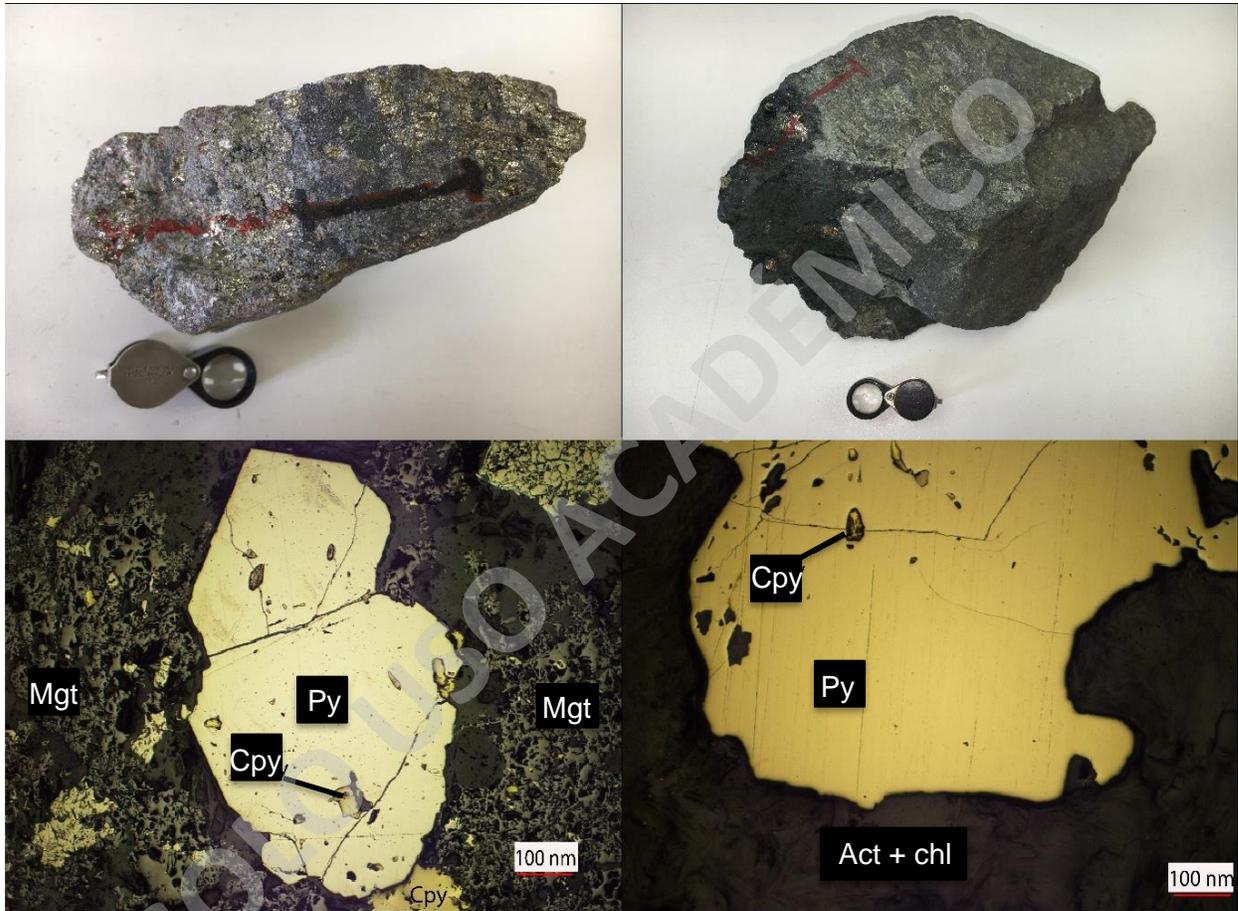


Figura 34: Evento IV de piratas diseminadas en alteración K. La línea roja muestra el área en donde se realizó la sección transparente-pulido.

- **Piratas en vetillas de cuarzo (Evento VI-Vetillas epitermales)**

Piratas (20%) rellenando espacios abiertos en vetillas tardías de cuarzo euهدral. Estos cristales de piratas son euهدrales, de grano medio de 1 mm hasta 1,5 centímetros, y se diferencian por su hábito cubico bien desarrollado, además de la asociación mineralógica compuesta por cuarzo euهدral que acompaña a esta mineralización (**Figura 35**).

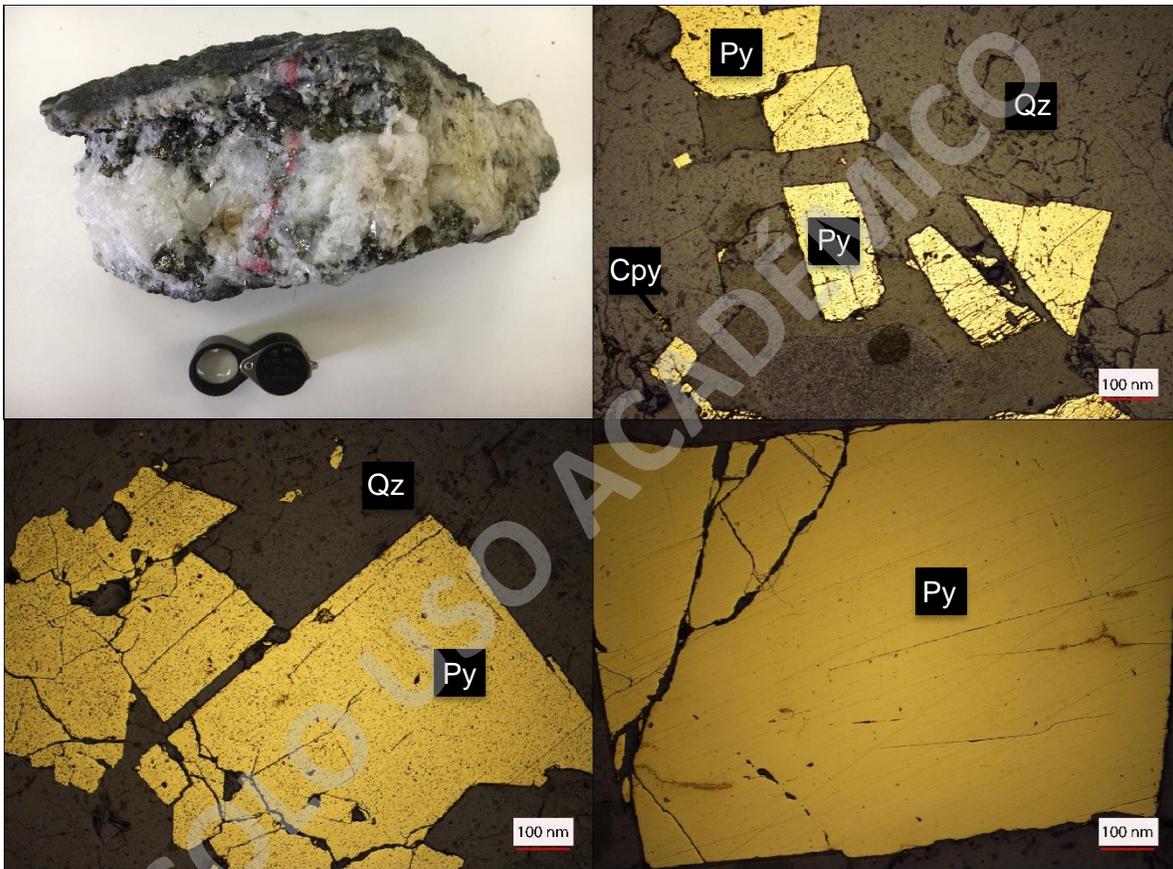


Figura 35: Evento VI de piratas en vetillas epitermales de cuarzo. La línea roja muestra el área en donde se realizó la sección transparente-pulido.

A continuación, se presenta un cuadro resumen de los diferentes tipos de piritas en el depósito La Estrella (**Tabla 6**), en el cual se presentan los criterios utilizados en la descripción de estas piritas. En general, las piritas de los primeros eventos de alteración y mineralización presentan una forma anhedral a subhedral, mientras que en el evento III y VI tienen una forma subhedral a euhedral con las caras del cristal bien desarrolladas, incluso las piritas del evento VI son euhedrales con sus caras perfectamente desarrolladas. El tamaño de los cristales y la abundancia de pirita varía dependiendo de cada evento mineralógico, siendo las piritas en bolsones del evento III, las que poseen el mayor tamaño de cristal (>30 mm) y la mayor abundancia de pirita (70%).

Código muestra	Tipo de pirita	Evento mineralógico	Forma	Tamaño	Abundancia de pirita (%)	Asociación mineralógica
CHLE-PY3A	Piritas diseminadas en magnetita	Evento I	Anhedral	Fino	20%	Magnetita y calcopirita
CHLE-PY4A	Piritas diseminadas evento Na-Ca	Evento II	Anhedral	Fino-medio	25%	Magnetita, calcopirita, apatito, cuarzo, albita
CHLE-PY1A	Piritas en bolsones	Evento III	Subhedral-euhedral	Muy grueso	70%	Calcopirita +-bornita
CHLE-PY2A	Piritas diseminadas evento K	Evento IV	Subhedral	Medio-grueso	15%	Biotita, feldespato K, cuarzo, actinolita
CHLE-PY5A	Piritas en vetillas de cuarzo	Evento VI	Euhedral	Grueso	20%	Cuarzo

Tabla 6: Cuadro resumen de los diferentes tipos de piritas del depósito mineral La Estrella.

5.5 Análisis SEM-QEMSCAN

En cada uno de los cinco eventos portadores de mineralización con pirita, se obtuvo una muestra representativa que fue utilizada para realizar una caracterización mineralógica SEM-QEMSCAN (*Scanning Electron Microscope - Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscop*), obteniendo una combinación entre imágenes EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) e imágenes de electrones retro-dispersados (*Back Scatter Electron - BSE*) a una resolución de 1,46 μm . En cada una de las cinco muestras, se analizaron tres cristales de pirita, es decir 15 piritas en total. Este análisis tiene como objetivo identificar la mineralogía asociada a las piritas representativas de cada evento, y complementar la información macro y microscópica obtenida previamente de los eventos de alteración y mineralización presentes en cada muestra.

En las figuras siguientes se presentan, para cada muestra, tres imágenes del análisis SEM-QEMSCAN, obtenidas en zonas con piritas, señaladas con un círculo rojo en la imagen (letras i, ii y iii). Los criterios utilizados para seleccionar estas tres áreas fueron: que el cristal de pirita fuera representativo del evento de alteración y mineralización respectivo, que no presentara alteración u oxidación, y que estos tres cristales debían tener un diámetro de hasta 2,5 centímetros para la preparación de la muestra. Los colores en las distintas imágenes EDS son interpretados en términos mineralógicos, de acuerdo con la leyenda que se adjunta.

- **Evento I: Piritas diseminadas en mineralización temprana (muestra CHLE-PY3A)**

Corresponde al Evento I de mineralización temprana con magnetita masiva y sulfuros de pirita y calcopirita diseminados. En esta muestra se analizaron tres piritas diseminadas con el objetivo de identificar la mineralización y/o alteración asociada a las piritas (**Figura 36 y 37**).

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- En CHLE-PY3Ai, CHLE-PY3Aii y CHLE-PY3Aiii hay piritas diseminadas con calcopirita de grano fino en una masa masiva de magnetita (48 a 74 Wt%), acompañada también, subordinadamente, por clorita (8 a 15 Wt%), actinolita (<10 Wt%) y cuarzo (<10 Wt%). La antofilita (<10 Wt%) está alterada por actinolita y hay una asociación entre actinolita, albita y apatito, en baja abundancia (<10 Wt%), lo que corresponde al posterior Evento II-Alteración Na-Ca.

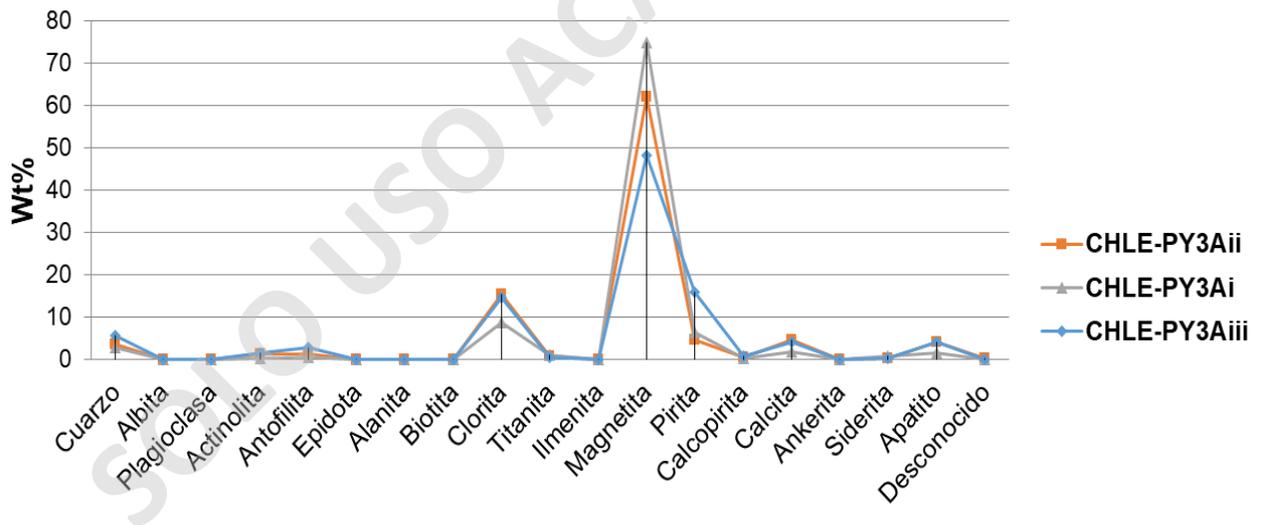
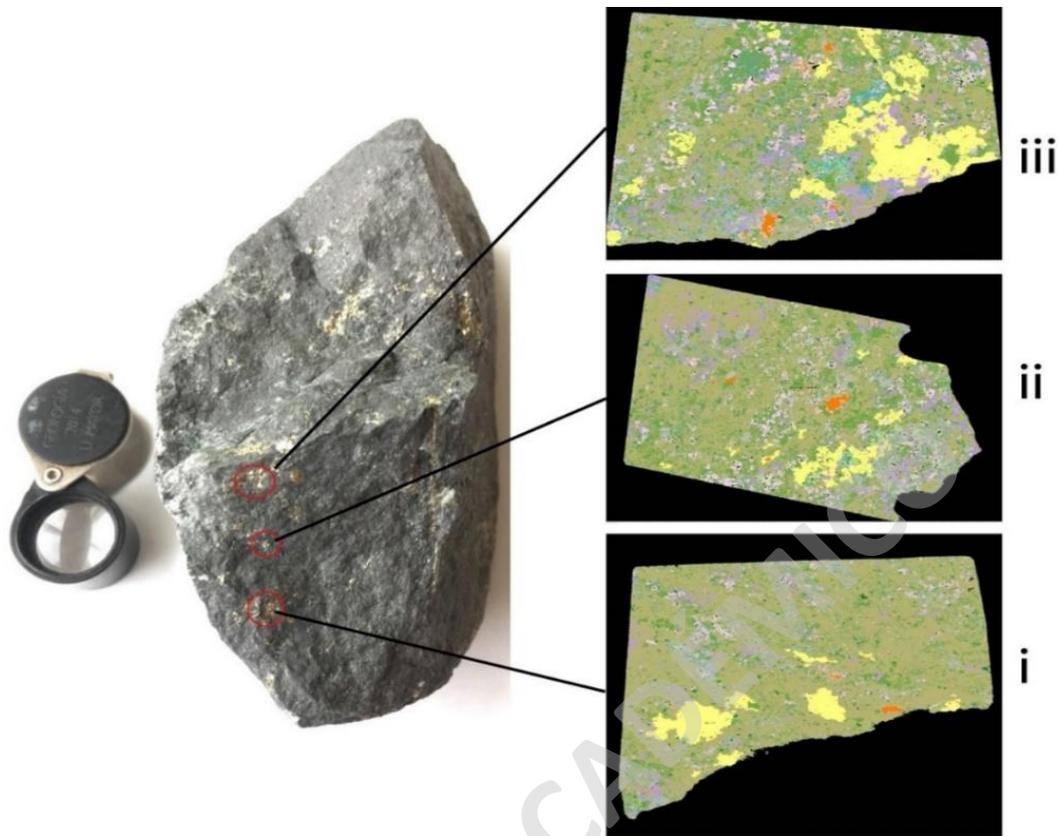


Figura 36: Gráfico Wt% (weight percent) vs mineralogía presente, obtenido mediante SEM-QEMSCAN para la muestra de piritas diseminadas (muestra CHLE-PY3A).



Cuarzo	Albita	Plagioclasa	Feld K	Actinolita	Antofilita	Epidota	Alanita	Biotita	Clorita
Titanita	Ilmenita	Magnetita	Pirita	Calcopirita	Siderita	Anhidrita	Monazita	Apatito	Desconocido
Calcita	Ankerita								

Figura 37: Imágenes BSE del análisis SEM-QEMSCAN para la muestra CHLE-PY3A, correspondiente al evento de mineralización masiva de magnetita (evento I).

- **Evento II: Piritas diseminadas en alteración Na-Ca (muestra CHLE-PY4A)**

Corresponde al evento II de alteración sódica-cálcica con minerales de albita, actinolita, apatito, epidota, cuarzo, vetillas de magnetita y pirita, y diseminados de pirita y calcopirita. En esta muestra se analizaron tres cristales de pirita, uno en la vetilla de magnetita (CHLE-PY4Aiii), y los otros dos en piritas diseminadas (CHLE-PY4Aii; CHLE-PY4Ai) (**Figura 38 y 39**).

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- En CHLE-PY4Ai se observan piritas diseminadas asociadas principalmente a actinolita (54 Wt%) y albita (17 Wt%).
- En CHLE-PY4Aii la albita y actinolita están asociadas a la pirita, sin embargo, la albita predomina alcanzando hasta 30 Wt%. El cristal de pirita se encuentra en contacto con la albita diseminada.
- En CHLE-PY4Aiii predomina la magnetita (70 Wt%) en la vetilla, sin embargo, también hay presencia de albita y actinolita (ambos <10 Wt%), al igual que en los casos anteriores, y clorita y calcita (ambos <10 Wt%) proveniente de eventos posteriores.

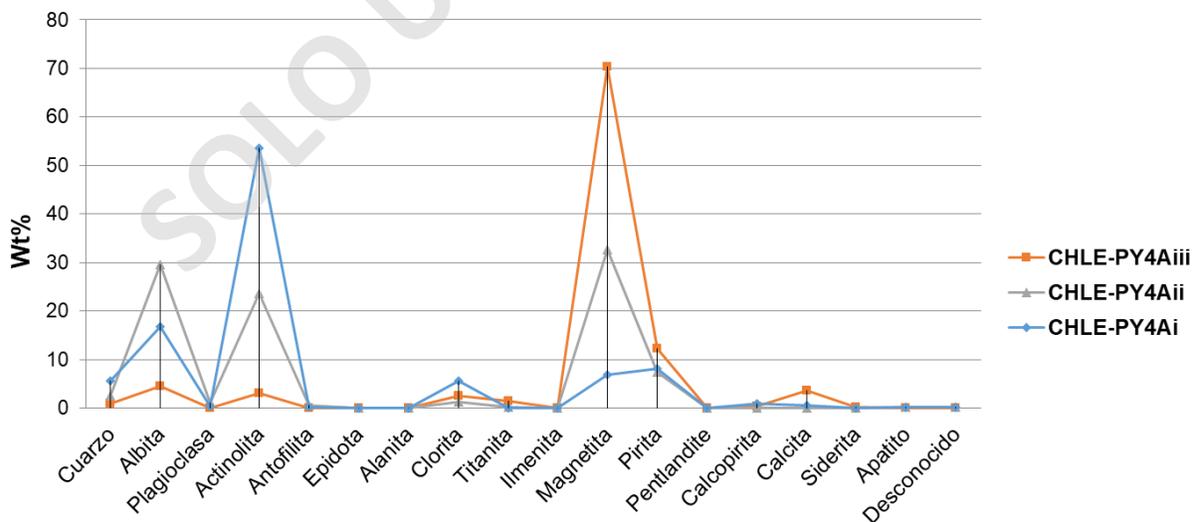
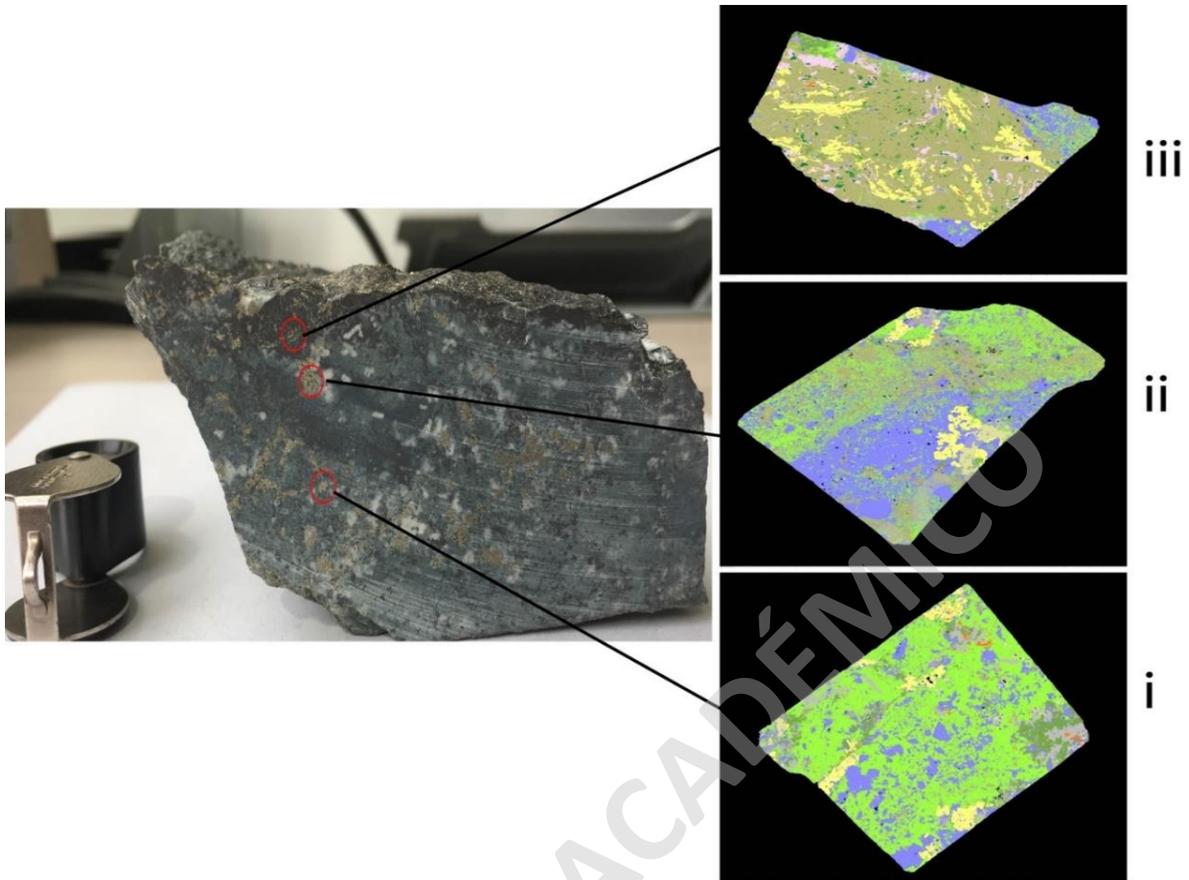


Figura 38: Gráfico Wt% (weight percent) vs mineralogía presente, obtenido mediante SEM-QEMSCAN para la muestra de piritas en alteración sódica-cálcica (muestra CHLE-PY4A).



Cuarzo	Albita	Plagioclasa	Feld K	Actinolita	Antofilita	Epidota	Alanita	Biotita	Clorita
Titanita	Ilmenita	Magnetita	Pirita	Calcopirita	Siderita	Anhidrita	Monazita	Apatito	Desconocido

Figura 39: Imágenes BSE del análisis SEM-QEMSCAN para la muestra CHLE-PY4A, correspondiente al evento de alteración sódica-cálcica (evento II).

- **Evento III: Piritas en mineralización en bolsones (muestra CHLE-PY1A)**

Corresponde al evento III de mineralización de pirita, calcopirita y bornita en bolsones. En esta muestra se analizaron tres cristales de pirita en donde un cristal está externo al bolsón mineralizado (CHLE-PY1Ai), otro cristal está en el límite del bolsón (CHLE-PY1Aii), y el tercer cristal de pirita está dentro del bolsón (CHLE-PY1Aiii) (**Figura 40 y 41**).

En base a los resultados obtenidos, se puede identificar por muestra que:

- En CHLE-PY1Ai, externo al bolsón, predomina la pirita (47 Wt%) y magnetita (34 Wt%). También hay apatito (<10 Wt%) de un evento previo asociada a la alteración Na-Ca.
- En CHLE-PY1Aii y CHLE-PY1Aiii, en el límite y dentro del bolsón, predomina la pirita (60 a 84 Wt%) por sobre mineralización de magnetita (<10 Wt%), calcopirita, bornita y minerales de alteración como clorita, calcita, cuarzo, entre otros. También se observa un 20% de apatito con cristales de pirita rodeando a los cristales de apatito.

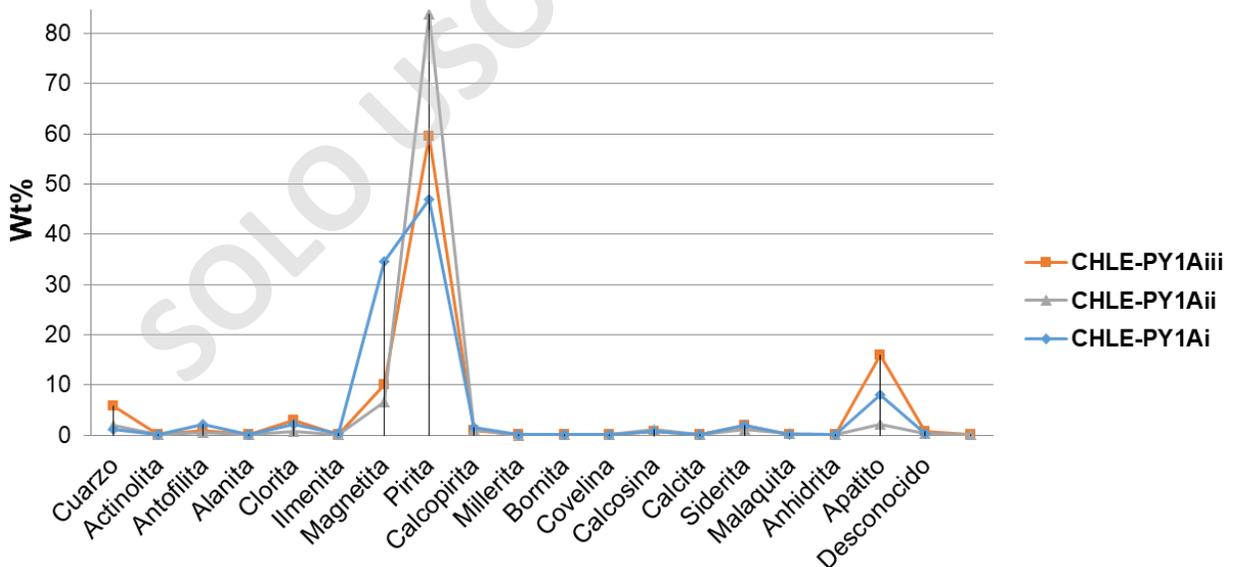
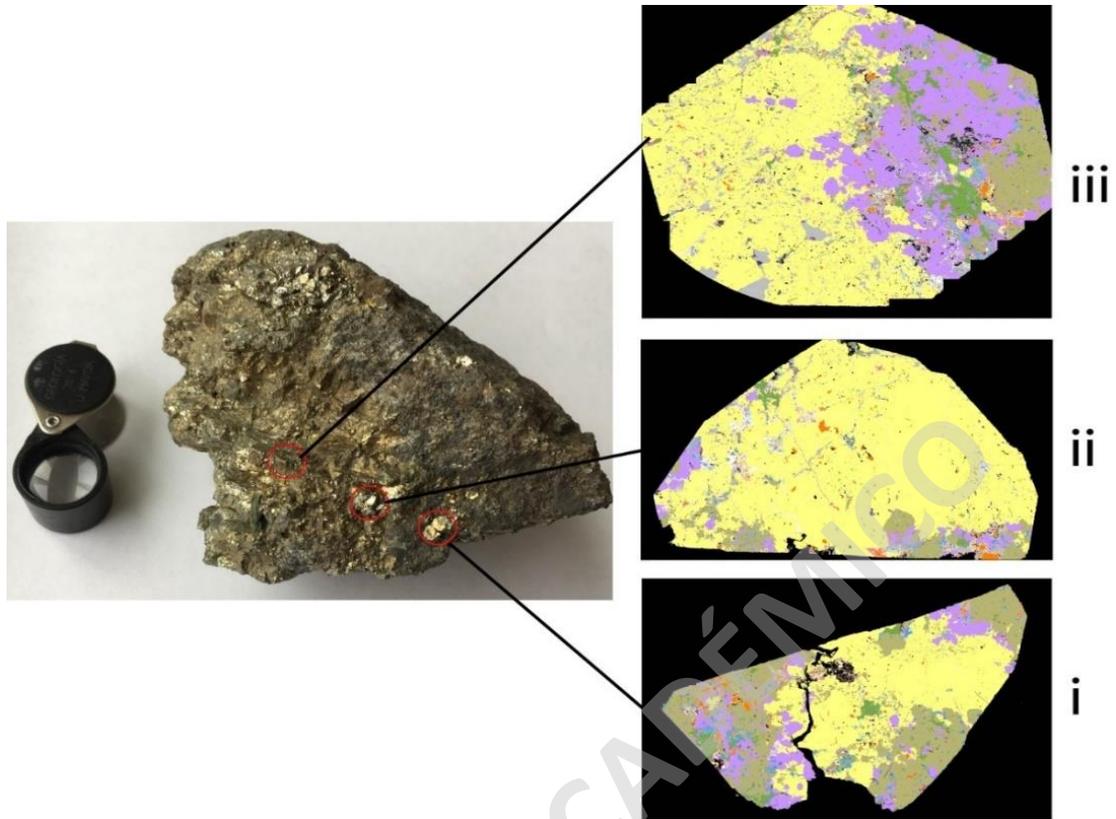


Figura 40: Gráfico Wt% (weight percent) vs mineralogía presente, obtenido mediante SEM-QEMSCAN para la muestra de piritas en bolsones (muestra CHLE-PY1A).



Actinolita	Anthofilita	Allanita	Clorita	Ilmenita	Magnetita	Pyrita	Calcopirita
Bornita	Covellina	Calcosina	Calcita	Siderita	Malaquita	Anhidrita	Apatito
Desconocido	Poros						

Figura 41: Imágenes BSE del análisis SEM-QEMSCAN para la muestra CHLE-PY1A, correspondiente al evento de mineralización en bolsones (evento III).

- **Evento IV: Piritas diseminadas en alteración K (muestra CHLE-PY2A)**

Corresponde al evento IV de alteración potásica donde los principales minerales observados en los análisis son magnetita, pirita, actinolita y biotita. En esta muestra se analizaron dos cristales de piritas diseminadas en una zona de abundante actinolita y clorita (CHLE-PY2Aii; CHLE-PY2Aiii), y un cristal de pirita externo a la zona de abundante actinolita (CHLE-PY2Ai) (**Figura 42 y 43**).

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- I. En CHLE-PY2Ai el cristal de pirita está asociado principalmente a biotita secundaria (21% Wt). En este caso, la actinolita se presenta en bajo porcentaje (<10 Wt%).
- II. En CHLE-PY2Aii y CHLE-PY2Aiii las piritas diseminadas están asociadas principalmente a magnetita (50 hasta 72 Wt%) y actinolita (12 a 15 Wt%), donde la magnetita proviene de eventos de mineralización previos (Evento I y II). En estos casos se observa como la relación entre la biotita secundaria y la actinolita es inversa con respecto a CHLE-PY2Ai, en las muestras donde hay más biotita secundaria, menos actinolita está presente, y viceversa.

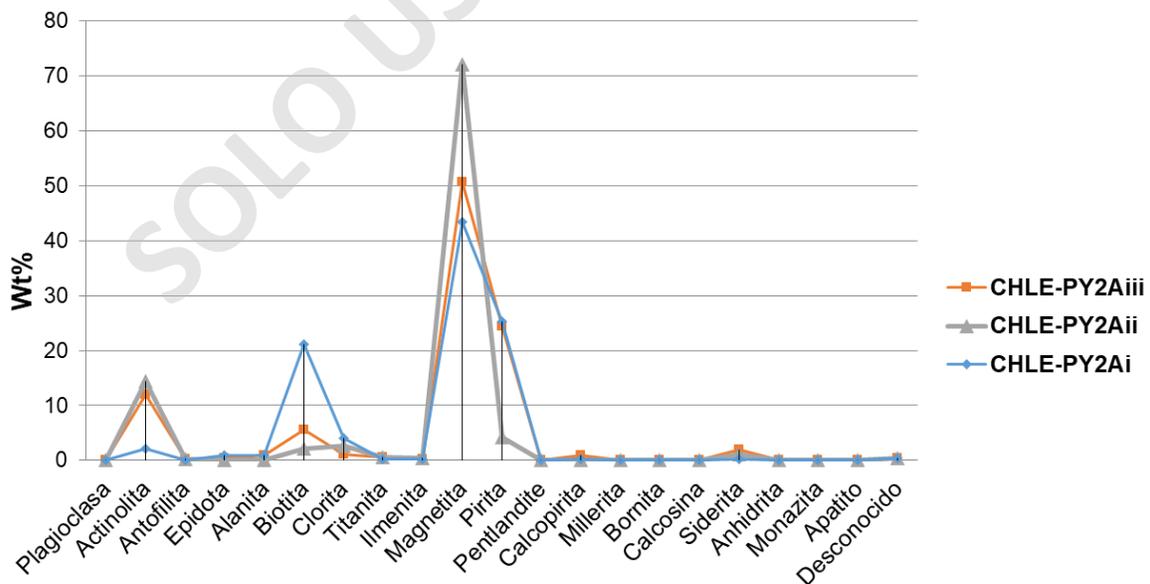
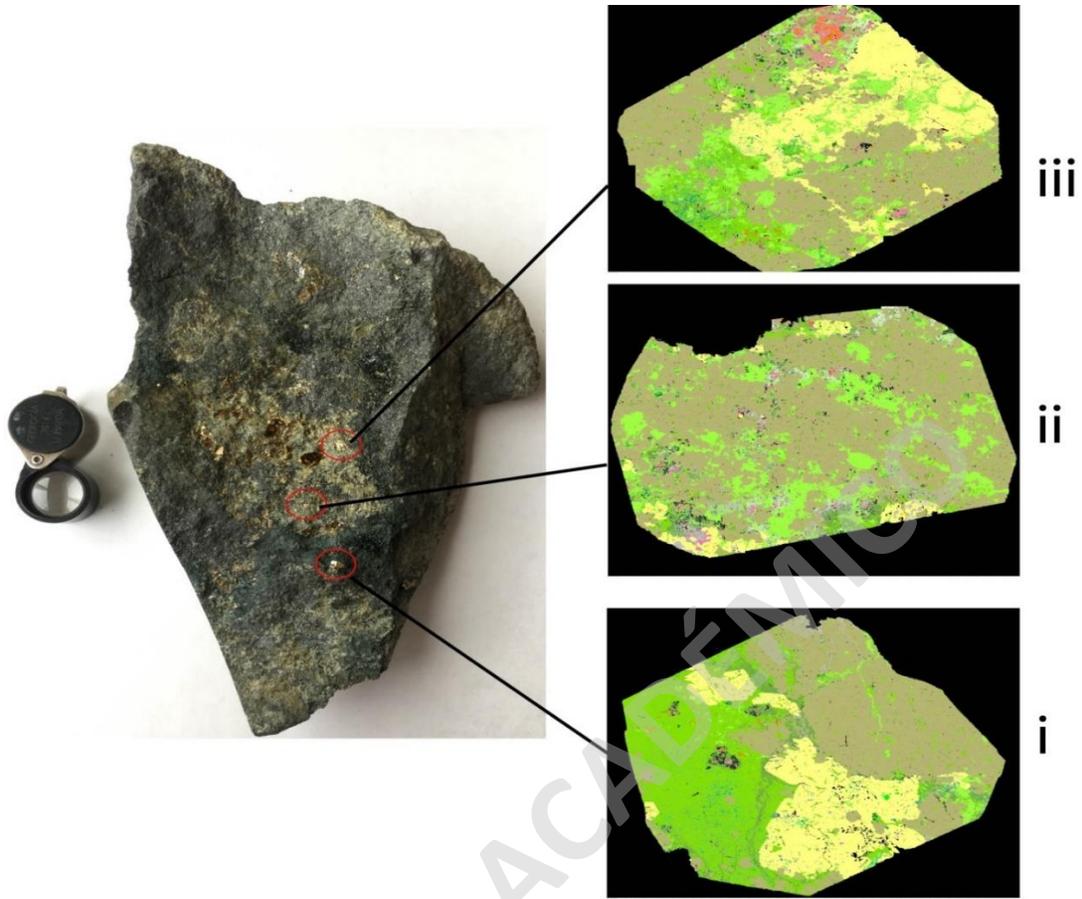


Figura 42: Gráfico Wt% (weight percent) vs mineralogía presente, obtenido mediante SEM-QEMSCAN para la muestra de piritas en alteración potásica (muestra CHLE-PY2A).



Cuarzo	Albita	Plagioclasa	Feld K	Actinolita	Antofilita	Epidota	Alanita	Biotita	Clorita
Titanita	Ilmenita	Magnetita	Pirita	Calcopirita	Siderita	Anhidrita	Monazita	Apatito	Desconocido

Figura 43: Imágenes BSE del análisis SEM-QEMSCAN para la muestra CHLE-PY2A, correspondiente al evento de alteración potásica (evento IV).

- **Evento VI: Piritas en vetillas de cuarzo (muestra CHLE-PY5A)**

Corresponde al evento VI de vetillas de cuarzo con piritas euédrales cúbicas. En esta muestra se analizaron tres cristales de pirita ubicados en el borde de la vetilla epitermal de cuarzo (CHLE-PY5Ai; CHLE-PY5Aii; CHLE-PY5Aiii) (**Figura 44 y 45**).

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- En CHLE-PY5Ai predomina pirita (55 Wt%) y cuarzo (44 Wt%) en la vetilla por sobre la demás mineralogía.
- En CHLE-PY5Aii y CHLE-PY5Aiii predomina pirita (hasta 65 Wt%) y cuarzo (hasta 65 Wt%) en la vetilla y, en muy bajo porcentaje, se distingue clorita (<10 Wt%).

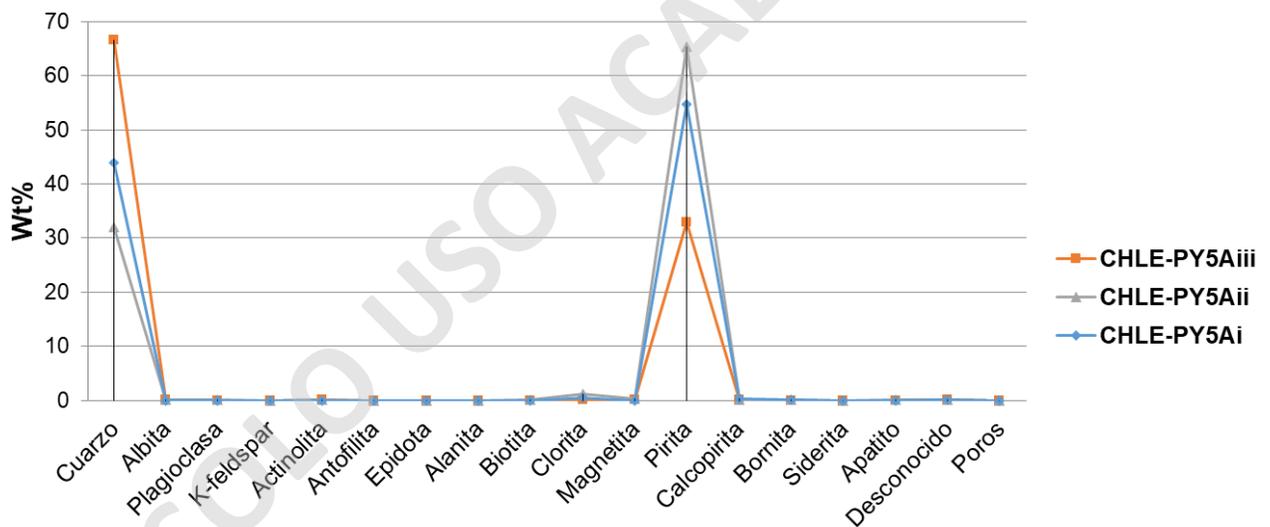
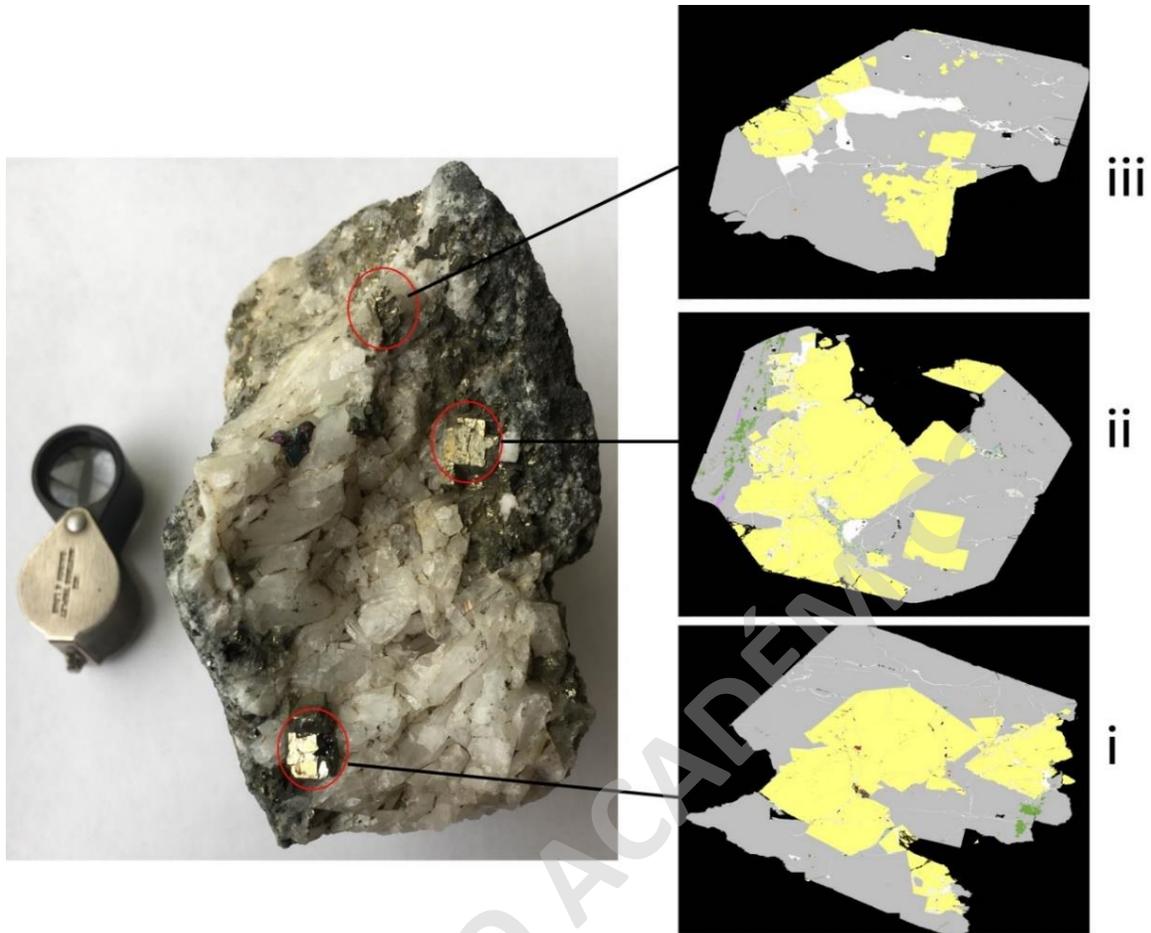


Figura 44: Gráfico Wt% (weight percent) vs mineralogía presente, obtenido mediante SEM-QEMSCAN para la muestra de piritas en vetillas de cuarzo (muestra CHLE-PY5A).



Cuarzo	Albita	Plagioclasa	Feld K	Actinolita	Antofilita	Epidota	Biotita	Clorita
Titanita	Ilmenita	Magnetita	Pirita	Calcopirita	Siderita	Anhidrita	Apatito	Desconocido

Figura 45: Imágenes BSE del análisis SEM-QEMSCAN para la muestra CHLE-PY5A, correspondiente al evento de vetillas de cuarzo euhedral (evento VI).

A continuación, se presenta un cuadro resumen de los resultados de SEM-QEMSCAN para los cinco tipos de piritas en el depósito La Estrella (**Tabla 7**), el cual resume la mineralogía principal a la cual están asociadas estas cinco piritas. En el caso del evento I de piritas diseminadas en magnetita, la magnetita masiva alcanza hasta un 70% Wt (*weight percent*) y se puede observar minerales de la roca caja como antofilita siendo alterados por actinolita del evento II. En el evento II destaca la presencia de albita diseminada en asociación con la pirita diseminada, mientras que en el evento III la pirita alcanza hasta un 70% Wt y está asociada a mineralización de calcopirita y trazas de bornita, además, la pirita está encerrando a cristales de apatito del evento II de alteración sódica-cálcica. Para el evento IV, de alteración hidrotermal potásica, se observa hasta 20% Wt de biotita secundaria asociada a la mineralización de pirita diseminada y que predomina por sobre el feldespato potásico. Finalmente, en el evento VI de vetillas epitermales de cuarzo, la pirita esta netamente relacionada con el cuarzo y si bien, se observa clorita, carbonatos y un enriquecimiento secundario de calcosina y covelina, sus porcentajes son inferiores a 5% Wt.

Código muestra	Tipo de pirita	Evento mineralógico	Mineralogía principal	Observaciones
CHLE-PY3A	Piritas diseminadas en magnetita	Evento I	Pirita, magnetita y calcopirita	Pirita y calcopirita asociadas a magnetita masiva. Hay antofilita (anfíbol) de la roca caja siendo alterada por actinolita.
CHLE-PY4A	Piritas diseminadas evento Na-Ca	Evento II	Pirita, albita, actinolita y magnetita	Piritas diseminadas asociadas a magnetita en vetillas y a albita diseminada
CHLE-PY1A	Piritas en bolsones	Evento III	Pirita, calcopirita y bornita	Predomina completamente la pirita en el bolsón mineralizado. Hay textura de entrecrecimiento entre pirita y apatito, en donde el apatito es encerrado por cristales de pirita.
CHLE-PY2A	Piritas diseminadas evento K	Evento IV	Pirita, biotita y actinolita	La pirita está asociada principalmente a la biotita secundaria.
CHLE-PY5A	Piritas en vetillas de cuarzo	Evento VI	Cuarzo y pirita	Predomina cuarzo y pirita por sobre la demás mineralogía.

Tabla 7: Cuadro resumen para los resultados obtenidos mediante SEM-QEMSCAN para las muestras de pirita.

5.6 Análisis ICP-MS-LA de cobalto

Con el objetivo de conocer la concentración y distribución de cobalto en los distintos tipos de piritas identificados para cada evento de mineralización del depósito La Estrella, se realizó una caracterización química ICP-MS-LA (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Laser Ablation*) en la *University of Tasmania* (UTAS) que entrega análisis puntuales e imágenes de distribución de Co y otros elementos químicos.

Para tal efecto, en las muestras que se realizó SEM-QEMSCAN se seleccionó un cristal de pirita representativo de cada evento de mineralización, en base a forma y tamaño de los cristales, asociación mineral, distribución y abundancia. En cada cristal se realizaron 30 puntos de lecturas, obteniéndose un total aproximado de 150 lecturas de los siguientes isótopos de elementos con concentraciones expresadas en ppm: 23Na, 24Mg, 27Al, 29Si, 39K, 43Ca, 49Ti, 51V, 53Cr, 55Mn, 57Fe, **59Co**, 60Ni, 65Cu, 66Zn, 75As, 77Se, 90Zr, 93Nb, 95Mo, 107Ag, 109Ag, 111Cd, 118Sn, 121Sb, 125Te, 157Gd, 178Hf, 181Ta, 182W, 195Pt, 197Au, 205Tl, 206Pb, 207Pb, 208Pb, 209Bi, 232Th y 238U.

Las imágenes que se presentan a continuación para cada tipo de pirita han sido realizadas con los mismos instrumentos utilizados para los análisis puntuales, y que son descrito en detalle en el capítulo 1, específicamente en 1.5.3. Estas imágenes corresponden a mapas de color basado en la concentración de cobalto en ppm, y que se forman en consecuencia de la incidencia del rayo láser a una menor profundidad y menor tiempo (milisegundos) con respecto a los análisis puntuales. El mapa de color es excelente para mostrar distribuciones generales y puntos de análisis elementales, en este caso, cobalto.

- **Evento I: Piritas diseminadas en mineralización temprana (muestra CHLE-PY3Aiii)**

En esta pirita diseminada las lecturas puntuales (gráfico de la **Figura 46**) indican una alta variabilidad en las concentraciones de cobalto, alcanzando un máximo de 16.424 ppm (1,64% Co) y un valor mínimo de 156 ppm (0,015% Co), obteniendo un valor promedio de 5.614 ppm de cobalto (0,56% Co). Respecto a la distribución del cobalto en la pirita (imagen de la **Figura 46**), se puede observar que los valores por sobre los 1.000 ppm están asociados a zonas céntricas del cristal (color gris y rojo), mientras que los bordes del cristal abordan un rango entre 100 y 1.000 ppm (color amarillo). Sin embargo, hay cristales de tamaños inferiores a 1,5 mm que presentan una gradación en el contenido de Co aumentando desde el centro hacia los bordes.

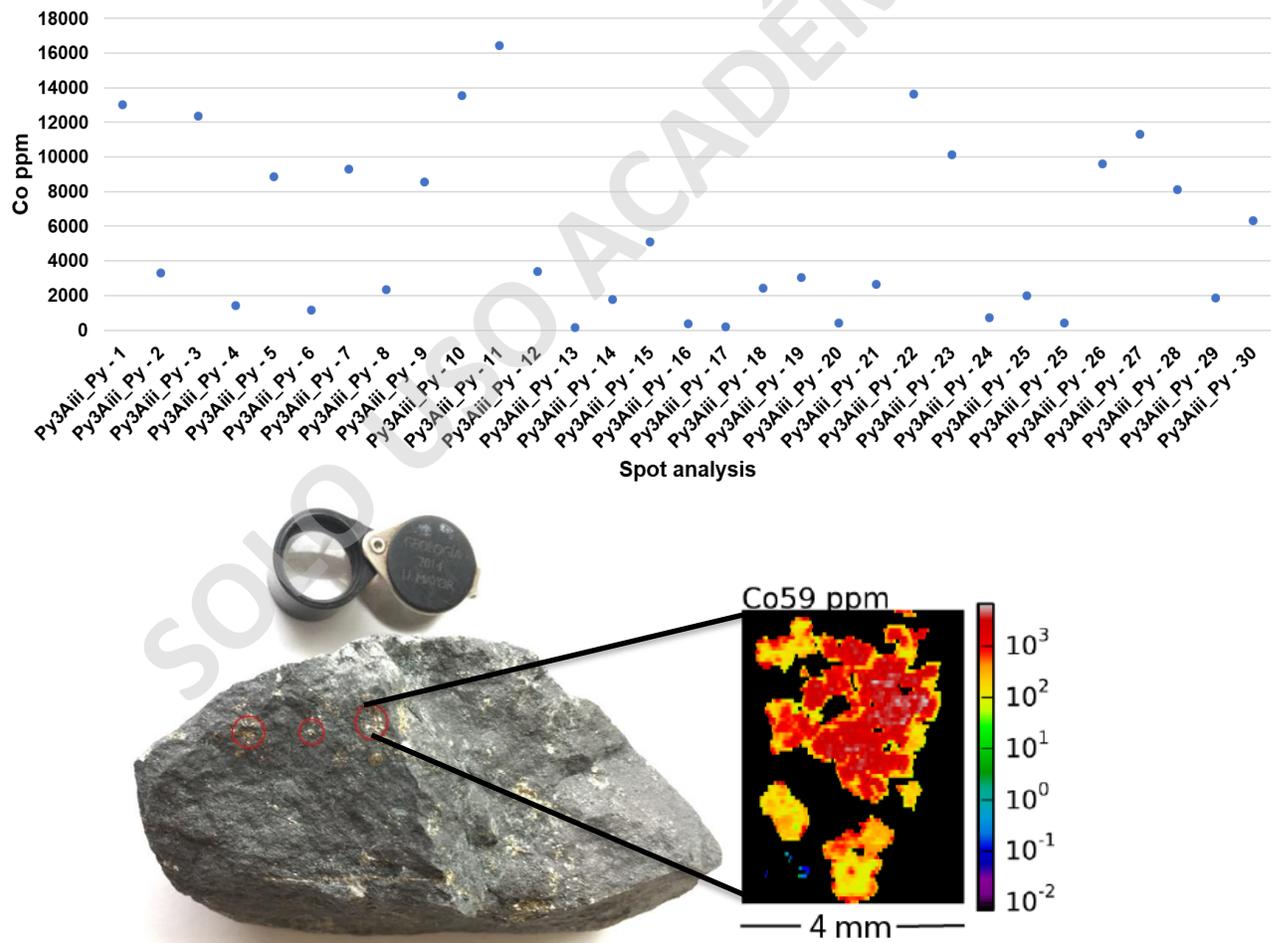


Figura 46: Análisis ICP-MS-LA para las piritas diseminadas (CHLE-PY3Aiii). El gráfico superior muestra los análisis puntuales, mientras que la imagen inferior muestra el mapa de distribución general de cobalto en la pirita.

- **Evento II: Piritas en alteración Na-Ca (muestra CHLE-PY4Aiii)**

En esta pirita del evento sódico-cálcico (Na-Ca) se observa una moderada variabilidad en cuanto a las concentraciones de cobalto, alcanzando un máximo de 12.485 ppm (1,24% Co) y un valor mínimo de 152 ppm (0,015% Co), obteniendo un valor promedio de 2.226 ppm de cobalto (0,2% Co). En la imagen las concentraciones de cobalto por sobre los 10.000 y 1.000 ppm (color gris y rojo **Figura 47**, respectivamente) están homogéneamente distribuidos a través del cristal de pirita, sin embargo, piritas menores a 1 mm presentan concentraciones menores a 1.000 ppm de cobalto (color amarillo **Figura 47**).

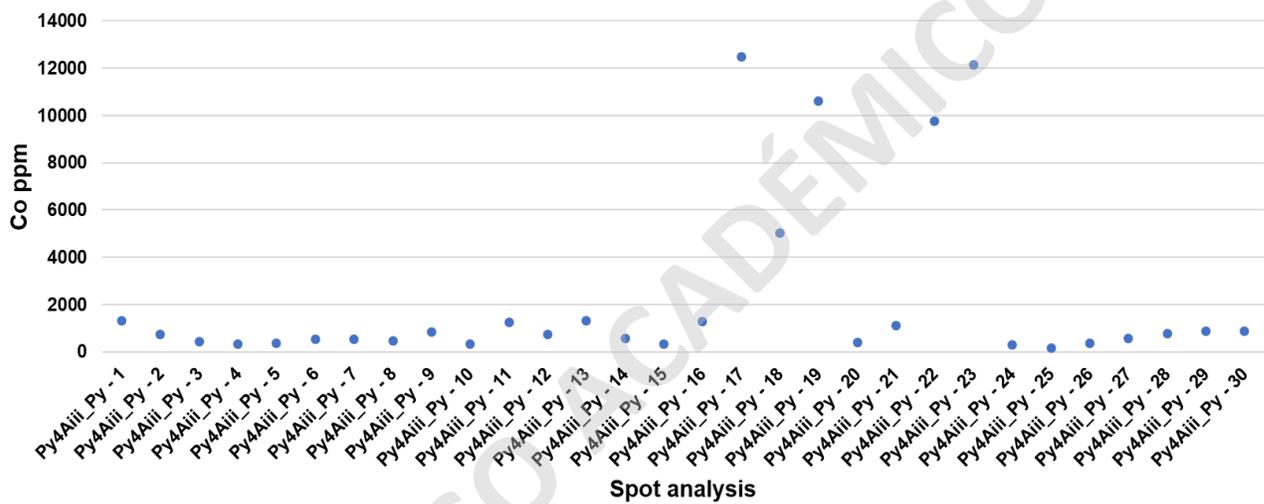


Figura 47: Análisis ICP-MS-LA para las piritas en alteración Na-Ca (CHLE-PY4Aiii). El gráfico superior muestra los análisis puntuales, mientras que la imagen inferior muestra el mapa de distribución general de cobalto en la pirita.

- **Evento III: Piritas en mineralización en bolsones (muestra CHLE-PY1Aiii)**

En esta pirita en bolsones se observa una alta variabilidad en las concentraciones de cobalto, alcanzando un máximo de 11.690 ppm (1,16% Co) y un valor mínimo de 366 ppm (0,036% Co), obteniendo un valor promedio de 4.849 ppm de cobalto (0,48% Co). En la imagen las concentraciones superiores a 1.000 ppm de Co se observan en la totalidad del cristal de pirita de mayor tamaño (>2,5 mm) (color rojo **Figura 48**) a excepción de zonas de la pirita en donde hay “parches” de concentraciones entre 100 y 999 ppm de Co (color amarillo **Figura 48**). Los cristales de menor tamaño (<1,5 mm) presentan un contenido de cobalto que varía entre 100 y 10.000 ppm. En la parte inferior de la imagen se observan concentraciones por sobre 10.000 ppm de Co (color gris **Figura 48**).

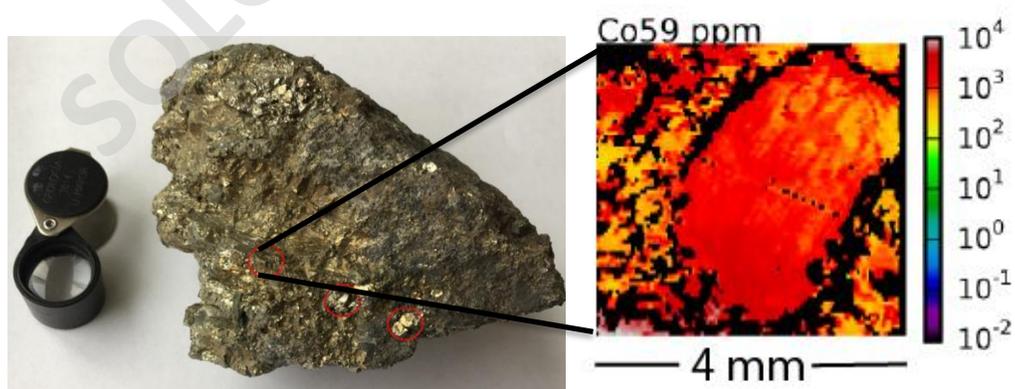
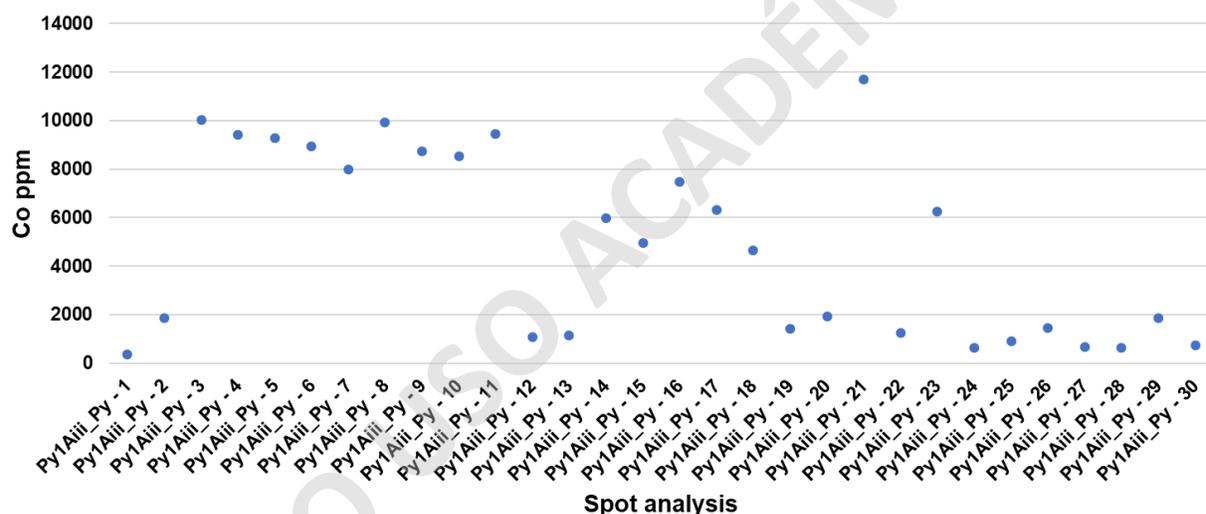


Figura 48: Análisis ICP-MS-LA para las piritas en bolsones (CHLE-PY1Aiii). El gráfico superior muestra los análisis puntuales, mientras que la imagen inferior muestra el mapa de distribución general de cobalto en la pirita.

- **Evento IV: Piritas en alteración K (muestra CHLE-PY2Aiii)**

En esta pirita del evento potásico (K) se observa una alta variabilidad con un máximo de 3.744 ppm (0,37% Co) y un valor mínimo de 234 ppm (0,023% Co), obteniendo un valor promedio de 1.005 ppm de cobalto (0,1% Co). En la imagen las más altas concentraciones de cobalto (>1.000 ppm) están distribuidas, en el mapa de cobalto (color gris y rojo **Figura 49**), hacia el extremo izquierdo del cristal de pirita, zona donde hay abundancia de biotita secundaria según los análisis SEM-QEMSCAN, mientras que las concentraciones más bajas de cobalto (100-999 ppm) están distribuidas a la derecha de la imagen donde disminuye la abundancia de biotita secundaria (color amarillo-naranja **Figura 49**).

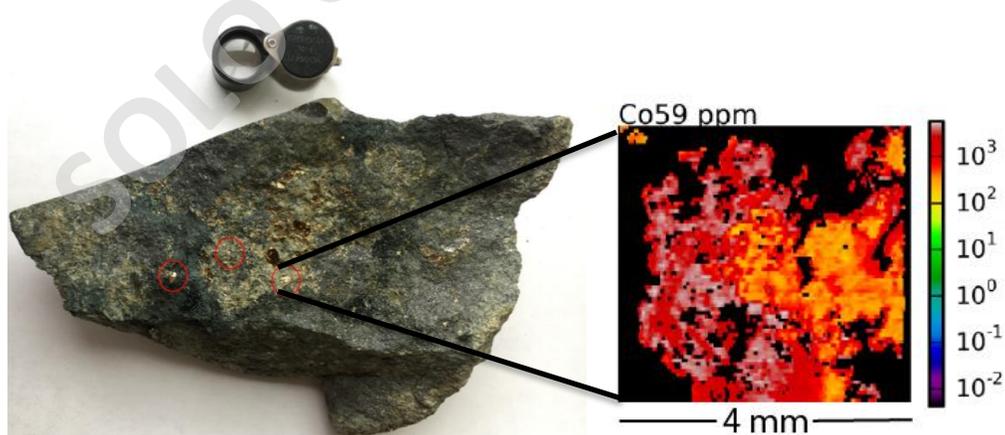
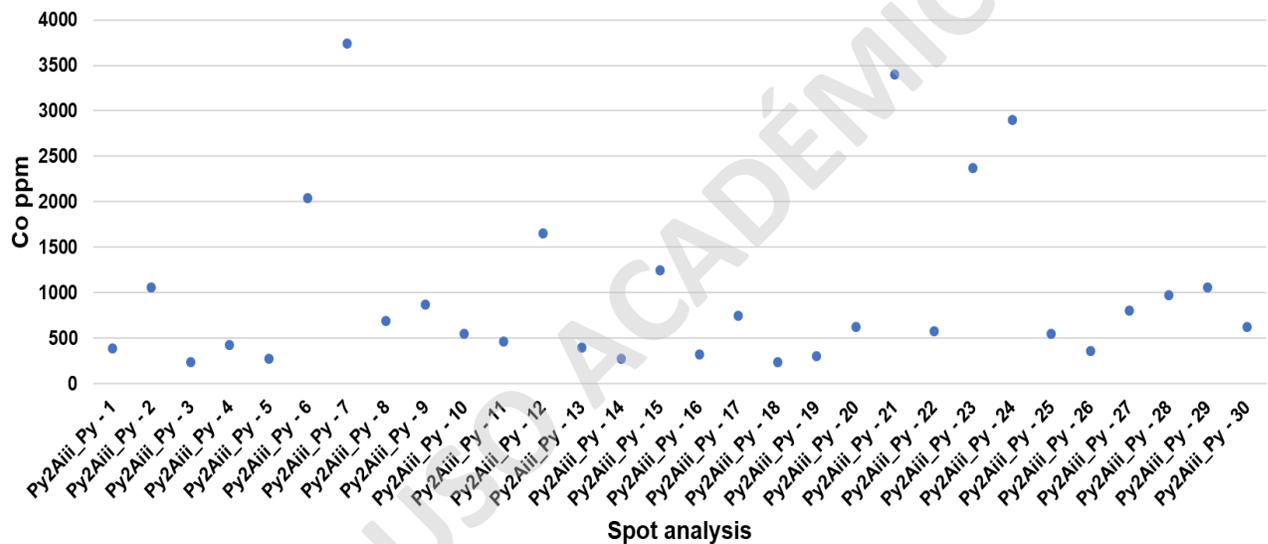


Figura 49: Análisis ICP-MS-LA para las piritas en alteración K (CHLE-PY2Aiii). El gráfico superior muestra los análisis puntuales, mientras que la imagen inferior muestra el mapa de distribución general de cobalto en la pirita.

- **Evento VI: Piritas en vetillas epidermales de cuarzo (muestra CHLE-PY5Aii)**

En esta pirita euhedral de vetillas de cuarzo se observa una baja variabilidad y tiene las menores concentraciones de cobalto con respecto a todos los eventos piritosos previos, alcanzando un máximo de 5.566 ppm (0,55% Co) y un valor mínimo de 0,5 ppm (0,00005% Co), obteniendo un valor promedio de sólo 391 ppm de cobalto (0,039% Co). Respecto a la distribución de cobalto en la pirita, se puede observar cómo, a diferencia de los otros tipos de piritas, las concentraciones más bajas (<100 ppm) (color verde y amarillo **Figura 50**) están en el centro de la pirita y estas aumentan hacia los bordes alcanzando, incluso, concentraciones por sobre los 1.000 ppm de cobalto (color rojo **Figura 50**). Sumado a esto, las “altas” concentraciones de cobalto, además se observan en las fracturas del cristal de pirita.

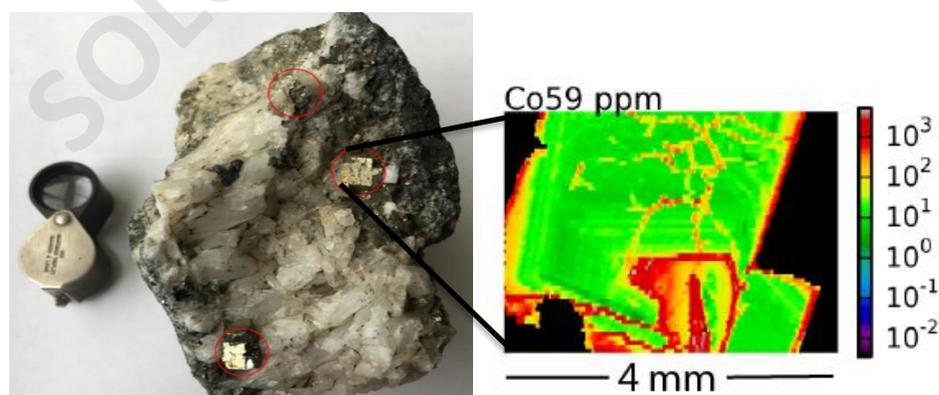
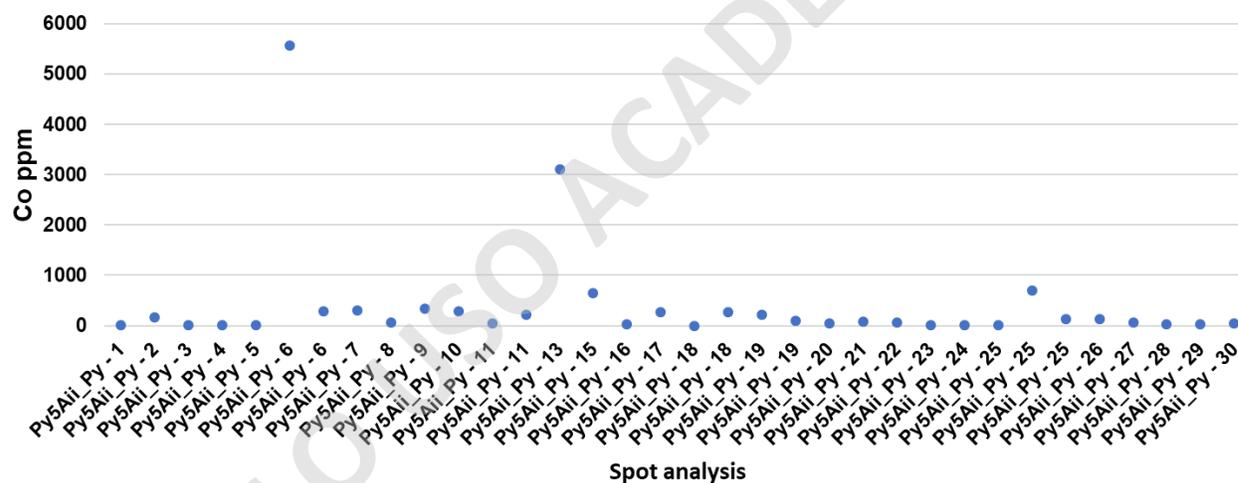


Figura 50: Análisis ICP-MS-LA para las piritas en vetillas epidermales de cuarzo (CHLE-PY5Aii). El gráfico superior muestra los análisis puntuales, mientras que la imagen inferior muestra el mapa de distribución general de cobalto en la pirita.

A continuación, se presenta un cuadro resumen de los resultados de ICP-MS-LA para los cinco tipos de piritas en el depósito La Estrella (**Tabla 8**). Según la concentración de cobalto y su distribución se puede determinar una tendencia general para las muestras de los eventos I, II, III y IV, en donde hay altas concentraciones de cobalto distribuido principalmente al centro del cristal y que decrece gradualmente hacia los bordes.

La pirita diseminada del evento I tiene altas concentraciones de cobalto distribuidas en el centro del cristal las cuales disminuyen gradualmente hacia los bordes. Las piritas del evento II y del evento III, de alteración Na-Ca y mineralización en bolsones respectivamente, tienen altas concentraciones de cobalto con una distribución variable, siendo los cristales de mayor tamaño los que albergan concentraciones superiores a 1.000 ppm de cobalto en el centro del cristal. En el caso de la pirita del evento IV de la alteración potásica, y en conjunto con los resultados del análisis mineralógico SEM-QEMSCAN, se puede identificar que las mayores concentraciones de cobalto están asociadas a zonas de abundante biotita secundaria. Por otra parte, y de manera opuesta a los eventos de mineralización anteriores, la pirita de vetillas epidermales de cuarzo (Evento VI) presenta bajas concentraciones de cobalto, en donde las menores concentraciones de cobalto están en el centro del cristal (<100 ppm) y aumentan en zonación hacia los bordes alcanzando concentraciones superiores a 1.000 ppm.

Código muestra	Tipo de pirita	Evento	Rango ppm Co	Descripción
CHLE-PY3Aiii	Piritas diseminadas en magnetita	Evento I	155-16.424	Altos valores de Co distribuidos en el centro (>1.000 ppm) y que decrecen hacia los bordes. En cristales inferiores a 1,5 mm la relación es inversa.
CHLE-PY4Aiii	Piritas diseminadas evento Na-Ca	Evento II	151-12.485	Altos valores de Co (>1.000 ppm) distribuidos inhomogeneamente de centro a borde. En cristales inferiores a 1 mm las concentraciones son <1.000 ppm de Co.
CHLE-PY1Aiii	Piritas en bolsones	Evento III	366-11.689	Altas concentraciones de Co relativamente homogéneas en el cristal a excepción de "parches" de menor concentración de cobalto (<1.000 ppm).
CHLE-PY2Aiii	Piritas diseminadas evento K	Evento IV	293-3.743	Altos valores de Co (>1.000 ppm) en la zona de contacto con abundante biotita secundaria.
CHLE-PY5Aii	Piritas en vetillas de cuarzo	Evento VI	0,5-5.566	Diferente a todas las otras muestras, las más altas concentraciones de Co están en fracturas y bordes las cuales decrecen hacia el centro del cristal.

Tabla 8: Cuadro resumen para los resultados obtenidos mediante SEM-QEMSCAN para las muestras de pirita.

- **Relación entre Co, Ni y Fe en piritas del depósito La Estrella**

Reich et al (2005), han mencionado que el Co y el Ni realizan un proceso similar de solución sólida en la pirita, sustituyendo químicamente al hierro.

En el caso del Fe, las medianas varían según el tipo de pirita y hay una similitud en el contenido de Fe entre las piritas del evento II de alteración sódica-cálcica (PY4A), las piritas del evento IV de alteración potásica (PY2A) y las piritas del evento VI de vetillas de cuarzo (PY5A), en donde casi la totalidad de los valores está por sobre el 46% de Fe. Por otra parte, la mediana más alta (464.817 ppm) corresponde a la pirita del evento VI de vetillas epitermales de cuarzo (PY5A), mientras que la mediana más baja (456.297 ppm) corresponde a las piritas diseminadas del evento I de piritas diseminadas (PY3A) (**Figura 51**).

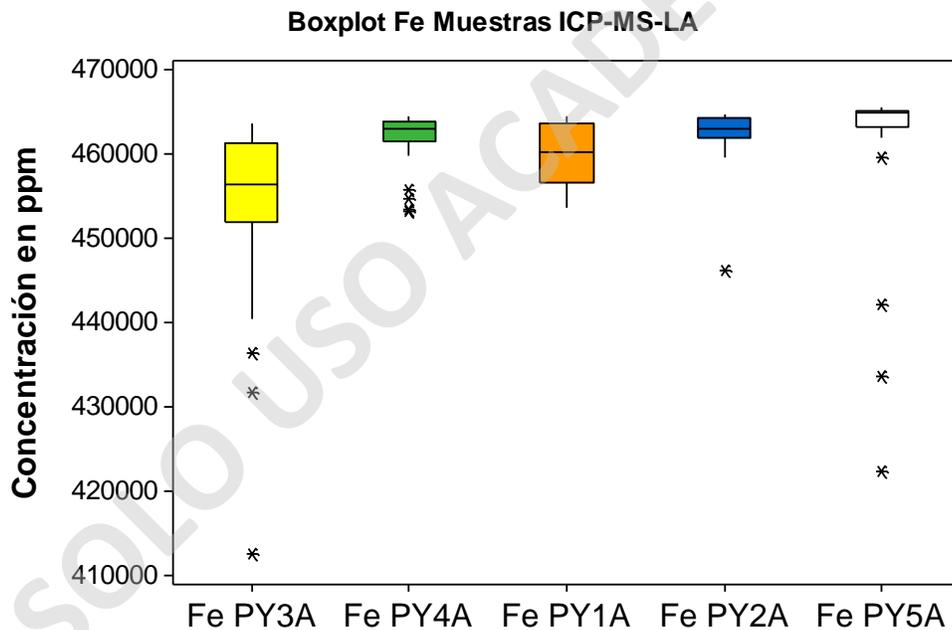


Figura 51: Boxplot para Fe de las muestras de pirita analizadas por ICP-MS-LA.

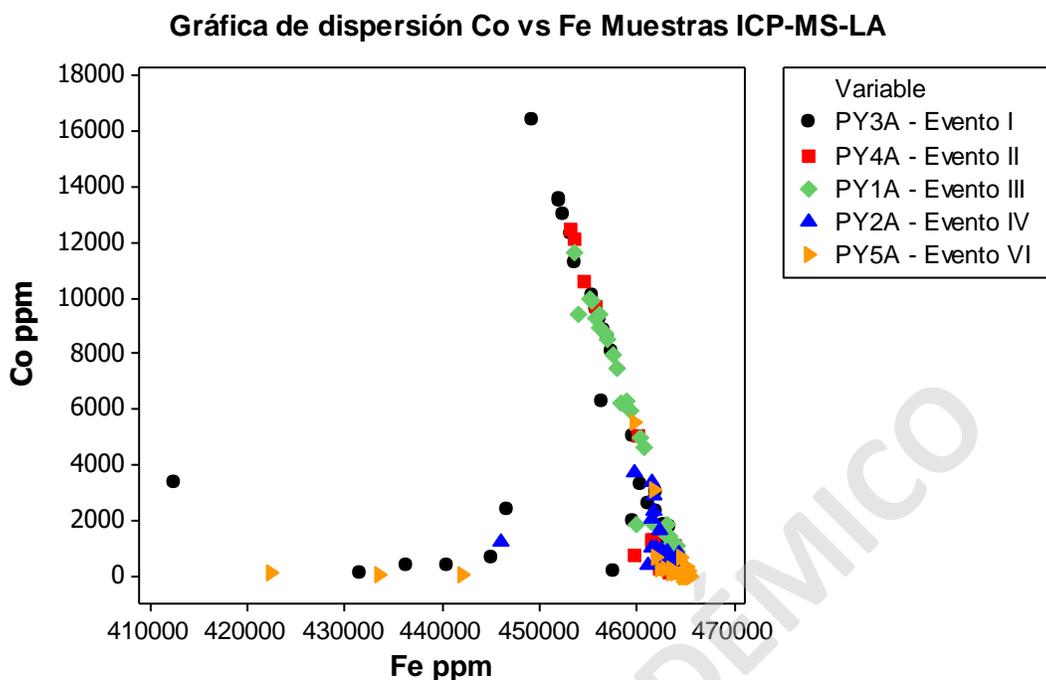


Figura 52: Gráfica de dispersión entre Co y Fe para las cinco muestras analizadas por ICP-MS-LA.

Como se observa en la **Figura 51**, las muestras PY3A de piratas diseminadas en magnetita masiva (Evento I), y PY1A de piratas en bolsones (Evento III), poseen las menores concentraciones de hierro con respecto a los cinco tipos de piratas, sin embargo, son las muestras que tienen las medianas más altas de cobalto, por sobre los 3.000 ppm. El gráfico de dispersión entre Co vs Fe indica una tendencia general inversamente proporcional, en donde un mayor contenido de Fe está asociado a un menor contenido de Co, y viceversa. Las muestras de pirata del evento I de piratas diseminadas y del evento VI de vetillas epitermales de cuarzo, poseen datos que se alejan de la tendencia general e indican bajas concentraciones de cobalto y bajas concentraciones de hierro (**Figura 52**).

Además, hay una similitud entre los valores de las piratas del Evento I y Evento III, ya que ambas presentan la mayor cantidad de datos por sobre 2.000 ppm de cobalto y poseen su tercer cuartil, el 25% de sus datos, por sobre 9.000 ppm de cobalto (**Figura 53**).

Para el Ni, las medianas más altas corresponden a las muestras de pirata del evento II de alteración sódica-cálcica (PY4A) y del evento IV de alteración potásica (PY2A), a diferencia con el cobalto donde las medianas más altas corresponden a los eventos I y III,

de piritas diseminadas (PY3A) y piritas en bolsones (PY1A) respectivamente, evidenciando una aparente relación inversa entre Ni y Co (**Figura 53**).

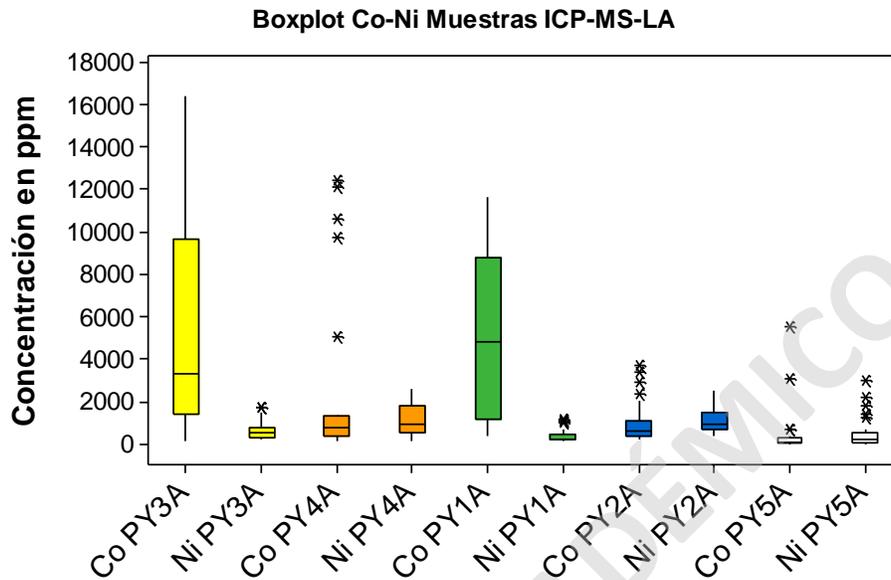


Figura 53: Boxplot para el Co y Ni de las muestras de pirita analizadas por ICP-MS-LA.

Al igual que en la **Figura 52**, el gráfico de dispersión entre Co y Ni (**Figura 54**) indica una tendencia general inversamente proporcional de estos elementos en las muestras de pirita, en donde un mayor contenido de cobalto está relacionado a un menor contenido de níquel. Las muestras de piritas del evento I de piritas diseminadas, y del evento VI de vetillas epitermales de cuarzo, presentan la mayor dispersión entre sus datos.

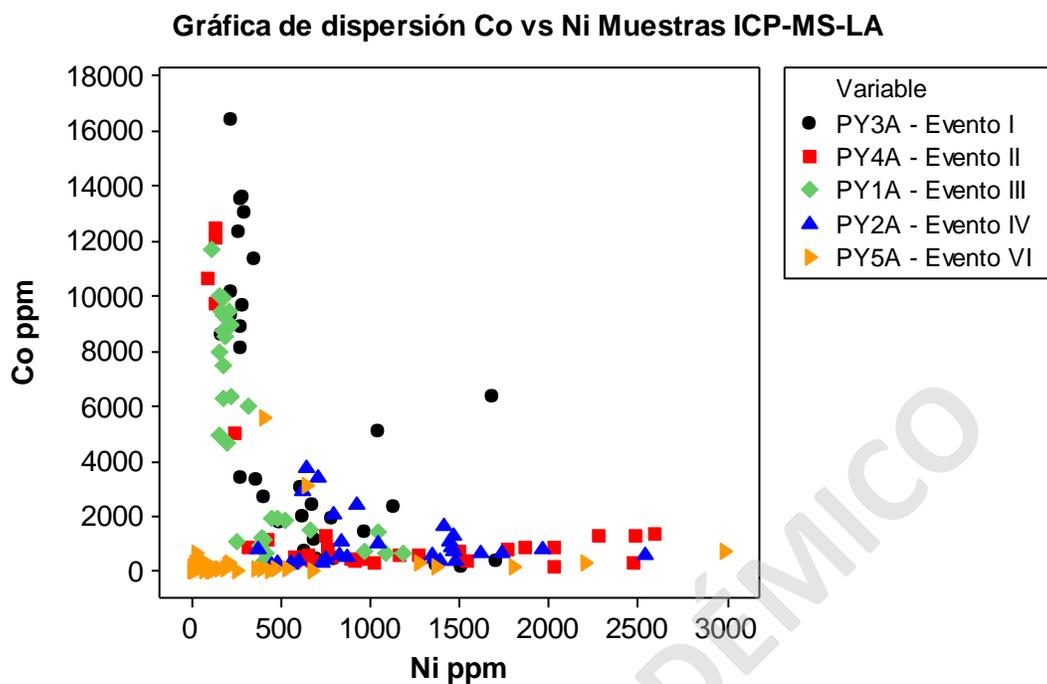


Figura 54: Gráfica de dispersión entre Co y Ni para las cinco muestras de pirita analizadas por ICP-MS-LA.

CAPÍTULO 6: FACTIBILIDAD ECONÓMICA PRELIMINAR

El siguiente capítulo presenta los criterios y supuestos utilizados para evaluar económicamente la explotación de cobalto como subproducto del cobre y hierro. Como se ha mencionado antes, actualmente el depósito mineral está en una etapa temprana del ciclo minero y solo se explota artesanalmente por parte del dueño, quien vende material con cobre y hierro a ENAMI.

6.1 Bases de evaluación

Los criterios de evaluación para explotar el cobalto como subproducto del cobre y hierro en este depósito mineral son los siguientes:

1. Concentración de cobalto mediante una producción de un concentrado piritoso cobaltífero.
2. Solubilización del cobalto desde el concentrado piritoso mediante lixiviación a presión en autoclave, debido a la concentración del cobalto principalmente al centro del cristal de pirita, lo cual se observa para cuatro de cinco tipos de pirita estudiados.
3. El costo asociado a la molienda y flotación de la calcopirita, y la recuperación previa de la magnetita como concentrado magnético, esta fuera del alcance de esta evaluación, ya que se considera que el Cu como CuFeS_2 y Fe como Fe_3O_4 deben sustentar ese CAPEX y OPEX para tener un proyecto económicamente viable.
4. Se considera un proceso de flotación de pirita con los relaves de la etapa cleaner-scavenger del circuito de cobre, lixiviación a presión, electro-obtención y extracción por solvente del cobalto.
5. La evaluación económica respecto a cobalto para el depósito mineral La Estrella se hace para un período de 10 años (2020-2030).
6. Información de costos de capital (CAPEX) y costos operacionales (OPEX) han sido estimados en base a casos industriales, algunos públicos y otros confidenciales. Cada uno de estos casos industriales tienen cierta similitud con el caso de La Estrella, sea por mineralogía, ubicación geográfica o nivel de producción.

6.2 Estimación de costos y beneficio

6.2.1 Capital Expenditure (CAPEX)

Para calcular el CAPEX de la explotación de cobalto como subproducto en el depósito mineral La Estrella, es necesario evaluar diversos supuestos debido a la falta de información, tal como estimación de recursos y reservas, leyes y tonelaje. En ausencia de información más precisa, se decide calcular el CAPEX de La Estrella asumiendo una cierta recuperación, ley y un nivel de producción para el Co. Cabe mencionar que se evalúa el proyecto con 5.000 toneladas de mineral por día ya que corresponde al límite permitido para no realizar un Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

El CAPEX se estima considerando un proceso de solubilización mediante lixiviación a presión en autoclave, en donde se solubilizan las piritas diseminadas (evento I), piritas de la alteración sódica-cálcica (evento II), piritas en bolsones (evento III) y piritas de la alteración potásica (evento IV). Se eligen estos cuatro tipos de piritas para solubilizar con este método debido a la presencia de altas concentraciones de cobalto en las zonas céntricas del cristal.

En base a esta información, el flujo de caja es evaluado con un costo CAPEX de 112.805.857 USD, el cual está sujeto a cambios (**Tabla 9**).

CAPEX Co La Estrella	
Tonelada metrica por año	1.587.750
Ley de Co	0,10%
Recuperación Co en autoclave	90%
Tonelada mineral por día	5000
CAPEX referencia US\$/ton	71
CAPEX USD planta Co referencia	373.000.000
CAPEX planta Co La Estrella Flot POX SXEW (USD)	112.805.857

Tabla 9: CAPEX desarrollado para una evaluación económica preliminar en el caso de extraer Co como subproducto en el depósito mineral La Estrella.

6.2.2 Operational Expenditure (OPEX)

Respecto al costo OPEX en caso de extraer Co como subproducto desde el depósito mineral La Estrella, al igual que el costo CAPEX, depende de supuestos costos debido al estado preliminar en el cual está la mina La Estrella y la falta de información.

Se asume un costo operacional en extracción de Cu y también de Co, los cuales también se comparan con otros costos OPEX desde depósitos minerales equivalentes a La Estrella. Es necesario asumir una posible recuperación de cobalto desde un proceso extractivo asociado al cobre, esto ya que el cobalto debe ajustarse a la línea productiva del producto principal, que, en este caso, para el depósito La Estrella es el cobre.

En base a esto, el costo OPEX para una posible explotación de cobalto como subproducto del cobre, es de 12.601.468 USD/año (**Tabla 10**).

OPEX La Estrella	
Costo operacional planta Cu (USD/lb Cu)	1,5
Costo operacional planta Co (USD/lb Co)	4
1 lb (Tm)	0,00045359
Costo OPEX Co (USD/Ton)	8819
OPEX anual (USD/año)	12.601.468

Tabla 10: OPEX desarrollado para una evaluación económica preliminar en el caso de extraer Co como subproducto en el depósito mineral La Estrella.

6.2.3 Niveles de producción

En el caso de explotar el cobalto como subproducto del cobre en el depósito mineral La Estrella, se estima, para la evaluación económica, una producción anual de 5 toneladas de Co fino.

Las leyes de Co se estiman con 1.000 ppm (0,1%) en la mineralogía y al tener un concentrado piritoso, se supone un aumento hasta 4.000 ppm (0,4%) de cobalto. En base a esta información, el beneficio sería de 42.869.250 USD/año (**Tabla 11**).

Beneficio	
Ley cabeza de Co en mineral de Cu (%-ppm)	0,1%
	1000
Ley de Co en el concentrado FeS₂ (ppm)	4000
Recuperación global	90%
Precio cobalto como catodo (USD/ton)	30000
Produccion de Co fino (tpd)	5
BENEFICIO (USD/año)	42.869.250

Tabla 11: Beneficio obtenido en la evaluación económica preliminar para el depósito La Estrella.

6.2.4 Precio del cobalto

La explotación de un subproducto como cobalto, desde piritas en el depósito La Estrella, y los ingresos, se calculan utilizando como precio del cobalto los siguientes valores, según la Bolsa de Metales de Londres (*London Metal Exchange*) (**Figura 55**). En base a estos datos, se considera un precio de cobalto de 30.000 US\$/Ton, ya que es un valor aproximado al nivel medio del año 2019.



Figura 55: Precios del cobalto (US\$/Ton) para el año 2018 y 2019. Datos extraídos desde LME, 2019: <https://www.lme.com/Metals/Minor-metals/Cobalt>.

6.3 Análisis de sensibilidad

Al realizar la evaluación financiera del proyecto, se decide estudiar en mayor grado el impacto de cinco variables en cuanto a su impacto al CAPEX y, por ende, al período de retorno a la inversión (“payback”). Estas variables son: ley de cobalto, recuperación global, costos de inversión (CAPEX), costo operacional (OPEX) y precio del cobalto.

El caso base se calcula con una ley de cobalto de 1.000 ppm, una recuperación global de 90%, un costo de inversión CAPEX de 112.805.857 USD, un costo operacional OPEX de 12.601.468 USD, y un precio de cobalto de 30.000 USD/lb. La siguiente figura muestra el flujo de caja base anual, y permite identificar cual es el payback para la inversión, el cual, para este caso base, es de 5,4 años (**Figura 56**).

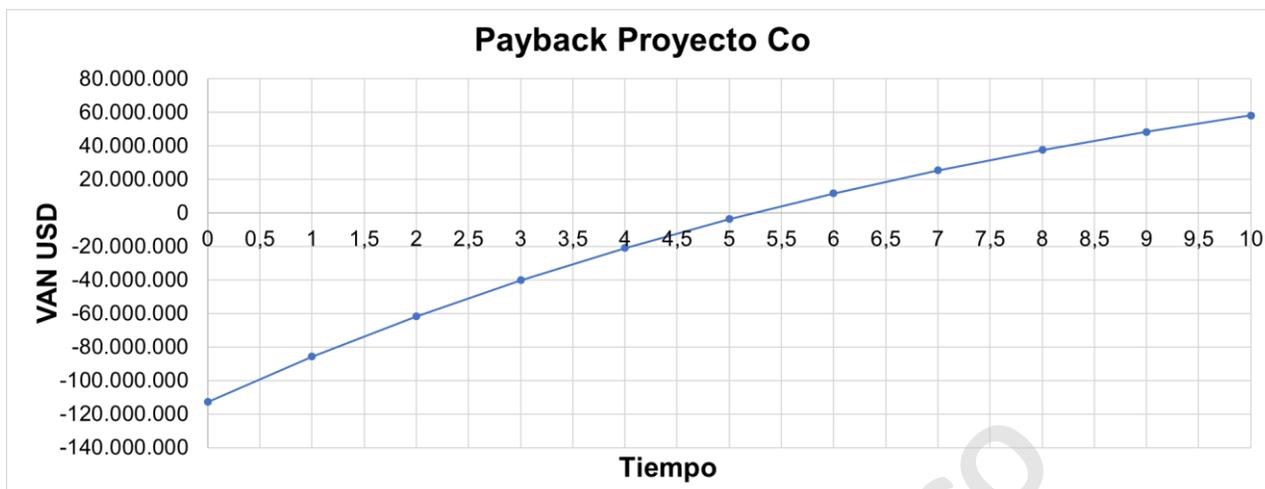


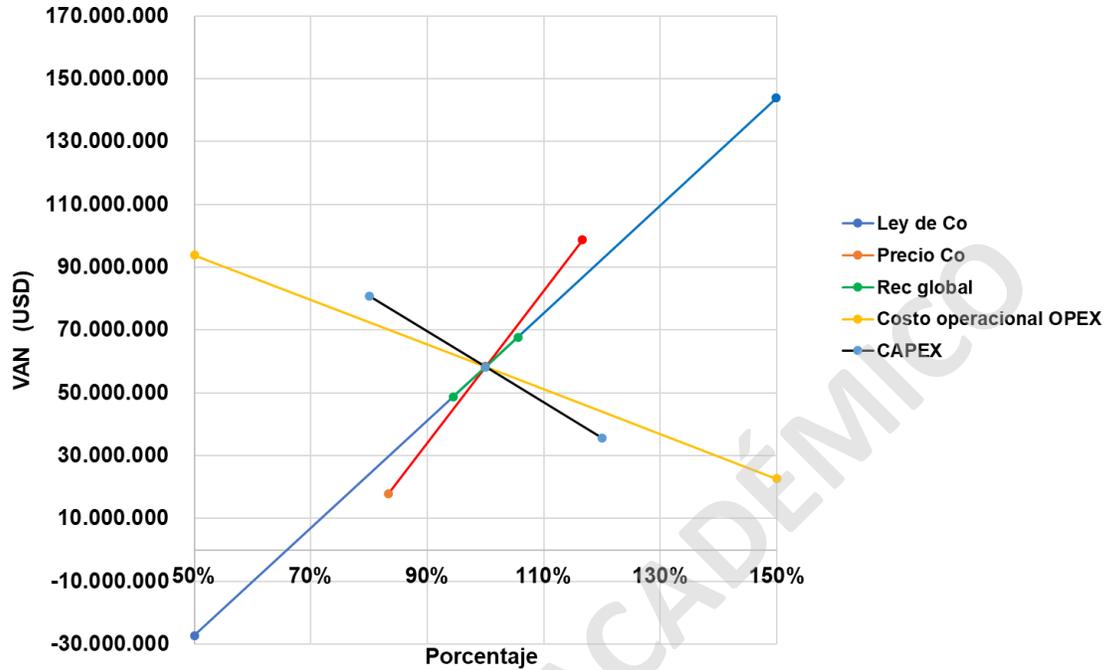
Figura 56: Payback del proyecto de cobalto como subproducto en La Estrella. El proyecto obtiene un VAN positivo desde el año 5,4.

El análisis de sensibilidad con respecto al VAN permite identificar la ley de cobalto como la variable más determinante en este proyecto y la recuperación global como la variable que afecta en menor medida (**Figura 57**). Si bien, el depósito mineral presenta cuatro tipos de piritas con un promedio superior a 1.000 ppm de Co, la ley de Co ha sido asignada en 1.000 ppm (0,1% de Co) para el caso base y luego evaluada con 500 y 1.500 ppm. Al evaluar el proyecto con una ley de 500 ppm, el VAN es negativo (-27.295.999 USD), sin embargo, al evaluar 1.500 ppm como ley de cobalto, se obtiene un VAN hasta casi tres veces más (143.723.719 USD) que con 1.000 ppm.

Por otra parte, variables como los costos CAPEX y OPEX presentan VAN positivo para los tres casos evaluados. Cabe destacar, que en el caso del costo operacional (USD/libra de Co) se usa el caso de 4 USD/libra de Co, aunque en un caso de referencia asociado netamente a la extracción de cobalto como producto principal (información confidencial) se utiliza un costo operacional de 12 USD/libra de Co. En el depósito mineral La Estrella es necesario aclarar que el cobalto es un subproducto del cobre y hierro, por lo que estos costos están asociados a la línea productiva del cobre principalmente, suponiendo un costo más bajo, el cual para este caso base es de 4 USD/libra de cobalto.

Finalmente, el precio de cobalto utilizado para obtener el VAN positivo de 58.213.860 USD fue de 30.000 USD/tonelada (cátodo de cobalto). Es importante la variación en el VAN que ocurre al aumentar o disminuir el precio del cátodo de cobalto. Al

disminuir el precio a 25.000 USD/ton, el VAN disminuye a 17.843.723 USD, mientras que al aumentar el precio a 35.000 USD/ton, el VAN aumenta hasta 98.583.997 USD.



Ley de Co		VAN FINAL USD	
500	50%	-27.295.999	
1.000	100%	58.213.860	
1.500	150%	143.723.719	

Recuperación global		VAN FINAL USD	
85%	94%	48.712.765	
90%	100%	58.213.860	
95%	106%	67.714.956	

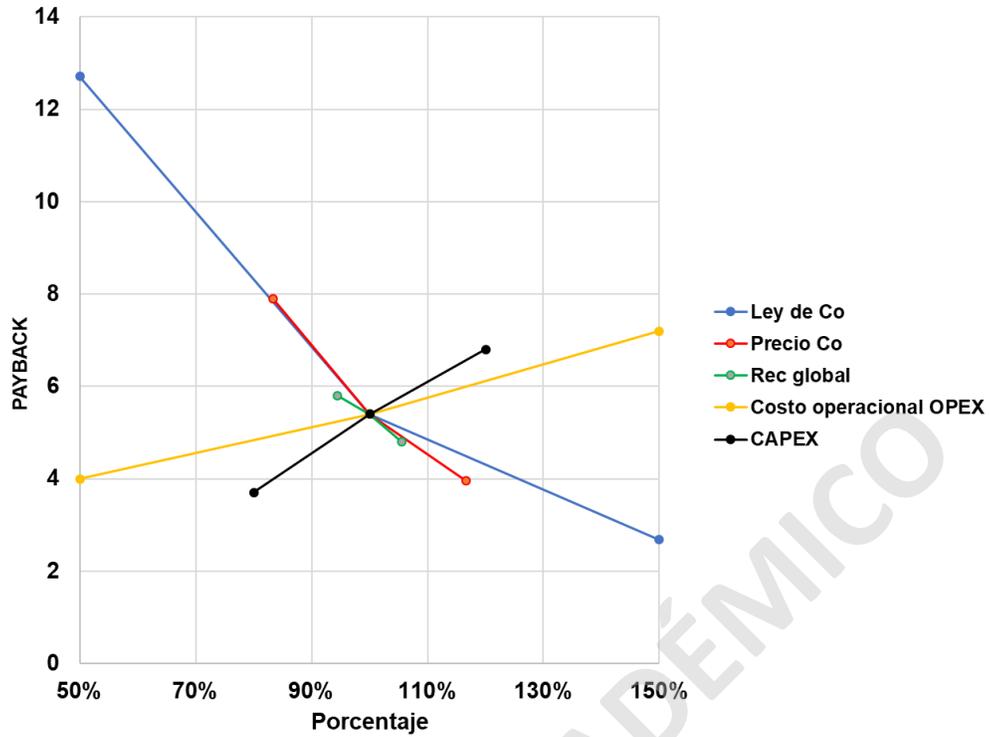
CAPEX		VAN FINAL USD	
90.244.686	80%	80.775.032	
112.805.857	100%	58.213.860	
135.367.029	120%	35.652.689	

Costo operacional OPEX		VAN FINAL USD	
2	50%	93.814.413	
4	100%	58.213.860	
6	150%	22.613.307	

Precio Co		VAN FINAL USD	
25.000	83%	17.843.723	
30.000	100%	58.213.860	
35.000	117%	98.583.997	

Figura 57: Variables que sensibilizan el proyecto según el VAN.

En segundo lugar, el análisis de sensibilidad con respecto al payback del proyecto (Figura 58), permite identificar que la ley de cobalto es la variable más determinante para este caso de estudio en el depósito La Estrella. Esta evaluación financiera para el caso base fue realizada con una ley de cobalto de 1.000 ppm de Co, pero si aumentamos la ley a 1.500 ppm de Co se obtiene un payback de 2,7 años, por el contrario, al disminuir la ley de cobalto a 500 ppm se tiene un payback de casi 13 años, siendo inviable el proyecto.



Ley de Co		Años PAYBACK	
500	50%	12,7	
1.000	100%	5,4	
1.500	150%	2,7	

Recuperación global		Años PAYBACK	
85%	94%	5,8	
90%	100%	5,4	
95%	106%	4,8	

CAPEX		Años PAYBACK	
90.244.686	80%	3,7	
112.805.857	100%	5,4	
135.367.029	120%	6,8	

Costo operacional OPEX		Años PAYBACK	
2	50%	4	
4	100%	5,4	
6	150%	7,2	

Precio Co		Años PAYBACK	
25.000	83%	7,9	
30.000	100%	5,4	
35.000	117%	3,95	

Figura 58: Variables que sensibilizan el proyecto según el "payback".

CAPÍTULO 7: DISCUSIONES

7.1 Mineralización y alteraciones hidrotermales

A partir de los resultados de los análisis macroscópicos, petrográficos-calcográficos y SEM-QEMSCAN realizados en el presente estudio, se identificó que en el depósito mineral La Estrella ocurrieron al menos siete eventos de mineralización y alteración hidrotermal desarrollados sobre volcanitas andesíticas de hornblenda, roca caja que fue identificada debido a la presencia de texturas porfíricas con fenocristales de antofilita siendo alterados por actinolita, y cavidades alargadas y redondeadas las cuales posiblemente pueden corresponder a vesículas de origen volcánico. Por otra parte, Arévalo et al 2009, Fox (2000) y Jane (2016), también mencionan en sus trabajos que en el área donde se ubica el depósito La Estrella se exponen flujos andesíticos de la Formación Punta del Cobre.

Respecto a los eventos de alteración y mineralización (**Tabla 5**), el Evento I corresponde a una mineralización temprana de magnetita masiva con subordinada pirita I y calcopirita diseminada. Mediante los resultados de SEM-QEMSCAN para la muestra de pirita del Evento I, se pudo corroborar la predominancia de magnetita (hasta 75 Wt%) por sobre otros minerales, como actinolita, albita, plagioclasa, epidota, entre otros, por lo que este evento mineralógico del depósito mineral se considera enriquecido en magnetita (Barton et al., 2014). Este evento de mineralización estaría asociado a fluidos magmático-hidrotermales de altas temperaturas (~550°C) (Barton et al., 2014), rico en Fe y Co, permitiendo así formar abundante magnetita masiva y, según los resultados ICP-MS-LA de la muestra CHLE-PY3Aiii, formar piritas con una media de 5.615 ppm de cobalto.

En el Evento II de alteración hidrotermal sódica-cálcica, mediante descripciones microscópicas y SEM-QEMSCAN, se pudo observar albita diseminada y actinolita, donde este último mineral alteró selectivamente a antofilita primaria de la roca caja. Además, se observó bordes de reabsorción en cristales de albita, y una textura coronítica donde la actinolita rodeó a la albita, permitiendo interpretar una alteración hidrotermal sódica previo a la alteración cálcica. La alteración hidrotermal Na-Ca posiblemente se originó en una zona profunda a altas temperaturas, en donde una alteración sódica forma inicialmente albita, que reemplazó a feldespatos primarios y, posteriormente, una alteración cálcica donde la actinolita reemplazó a los minerales máficos de la roca (Barton et al., 2014). Este evento de alteración hidrotermal y mineralización también se observa asociado a eventos

mineralógicos tempranos de alta temperatura en el yacimiento Productora (Fox, 2000; Ray y Dick, 2002; Jane, 2016). Según los resultados de SEM-QEMSCAN realizados en la muestra CHLE-PY4A, representativa de este evento mineralógico, la mineralización de pirita (II) y, en menor medida, calcopirita diseminada, está espacialmente relacionada con una mineralización de magnetita en vetillas y albita diseminada, lo que es común en depósitos tipo IOCG ya que generalmente la alteración sódica-cálcica está asociada a un enriquecimiento de magnetita y a bajo porcentaje de cobre (Barton et al., 2014). Mediante análisis ICP-MS-LA en piritas de este evento mineralógico, se evidenció que el fluido magmático-hidrotermal continua con concentraciones de cobalto superiores a 2.000 ppm, inferiores al evento I de piritas diseminadas en magnetita masiva.

La presencia puntual de mushketovita en La Estrella es común en los depósitos tipo IOCG y se ha observado en depósitos como Candelaria y Mantoverde (Marschik y Fontboté, 2001; Rieger et al., 2010). Las razones más aceptables para la formación de este mineral son una disminución en el estado redox del sistema o un aumento en la temperatura del fluido (Loyola, 2016).

El Evento III corresponde a la mineralización de sulfuros en bolsones con presencia de pirita (III), calcopirita y bornita subordinada. Si bien, en un trabajo de Del Real et al (2018), se menciona que en los depósitos tipo IOCG de la Formación Punta del Cobre puede existir mineralización de pirita y calcopirita en parches, esta mineralización está asociada a alteración potásica de actinolita, biotita, cuarzo y feldespato potásico, sin embargo, en el depósito IOCG La Estrella, estos bolsones mineralizados son un evento posterior a las alteraciones sódica-cálcica y potásica, debido a que hay relaciones de corte con estas, así como tampoco ha sido observada biotita secundaria asociada a esta mineralización, incluso, hay texturas donde la pirita encierra a cristales de apatito correspondiente al evento II de alteración sódica-cálcica. La mineralización en bolsones presenta otros minerales como cuarzo, calcita, óxidos de hierro, rellenando espacios abiertos los que están asociados a eventos de alteraciones hidrotermales posteriores (evento V, VI y VII).

Según los análisis SEM-QEMSCAN de la muestra CHLE-PY2A, representativa del evento IV de alteración hidrotermal potásica, se puede apreciar una predominancia (puntualmente en la muestra analizada) de la biotita secundaria por sobre el feldespato potásico (21% y 1%, respectivamente), lo que se podría asociar a un fluido, que, si bien

parece haber disminuido su temperatura con respecto al primer evento de mineralización, mantenía altas temperaturas (~400°C) (Fredes, 2017) para formar biotitas secundarias, además, esta fase mineralógica puede ser calco-potásica (Barton et al., 2014; Sillitoe, 2003) que permite la formación de biotita secundaria con parches de abundante actinolita (II). Lo mismo ocurre en el yacimiento IOCG Productora, unos km al norte de La Estrella, donde la biotita secundaria predomina inicialmente en la alteración potásica (Fox, 2000). En la muestra CHLE-PY2A, la pirita (IV) de este evento de alteración y mineralización está diseminada y asociada principalmente a actinolita y biotita secundaria, y concentraciones superiores a 1.000 ppm de cobalto tienden a estar en las zonas donde la pirita está en contacto con este último mineral.

Luego, ocurre una alteración clorita-sericita (evento V) sin mineralización reconocida asociada, donde la clorita altera selectivamente a la actinolita en parches de la alteración potásica y también podría estar alterando pervasivamente a otros minerales ferromagnesianos o a biotitas secundarias (Loyola, 2016), mientras que la sericita y arcillas alteraron selectivamente a los feldespatos (Del Real et al., 2018). Barton et al (2014) menciona que esta alteración ocurre debido a una disminución de temperatura en el sistema (~200-300°C).

Finalmente, ocurre un evento de mineralización y alteración tardío con vetillas centimétricas rectas de cuarzo euhedral y mineralización de pirita (V), en donde el fluido tenía bajas temperaturas (<200°C) y la pirita presenta las menores concentraciones de cobalto (<1.000 ppm). Con posterioridad, ocurre un evento de alteración supérgena, en donde predominan las limonitas en vetillas y rellenando otros espacios abiertos, sumado a mineralización secundaria de calcosina y covelina (hasta 1%), que reemplazan selectivamente y desde los bordes a cristales de calcopirita.

7.2 Caracterización química

Con respecto a la caracterización química y según los resultados obtenidos, se presentan las discusiones por concentración de Co, distribución de Co, y relación de este elemento con Ni y Fe.

7.2.1 Concentración de cobalto en ppm

Las mayores concentraciones de cobalto (mediana 3.315 ppm de Co) se encuentran asociadas al primer evento de mineralización de pirita, correspondiente a la pirita diseminada en magnetita masiva (CHLE-PY3Aiii), el cual resulta posiblemente, desde una combinación de altas concentraciones de cobalto en fluidos hidrotermales y un incremento en la incorporación del cobalto en reemplazo del hierro en pirita debido a las altas temperaturas (Huston et al., 1995).

El evento III de mineralización de pirita en bolsones, posee una mediana significativa de 4.804 ppm de cobalto, sin embargo, presenta valores de Co inferiores a los de las piritas diseminadas del Evento I, en el cual el 50% de los datos está por sobre los 5.000 ppm de cobalto. De igual forma, este evento posee valores máximos muy similares al evento I de piritas diseminadas en magnetita masiva, por lo que posiblemente, el fluido hidrotermal que originó este evento de mineralización presentó condiciones de temperatura y concentración de Co en el fluido similares a CHLE-PY3Aiii.

Por otra parte, la concentración de cobalto para la pirita diseminada en alteración potásica del Evento IV (CHLE-PY2Aiii), disminuye hasta una mediana de 742 ppm de Co en la muestra analizada, evidenciando que, al disminuir la temperatura del sistema, la incorporación de cobalto en reemplazo del hierro en pirita es menor. Cabe destacar, que es poca la información disponible sobre enriquecimientos generales de cobalto en cristales de pirita para depósitos tipo IOCG, sin embargo, Barton et al (2014) menciona en su investigación que durante muchos años, el suministro de altas concentraciones de cobalto en EE.UU provenía de depósitos tipo Co-Cu-Fe-Au, de la Franja de Cobalto en Idaho (Nash y Hahn, 1989), con mineralización principal de magnetita, sulfuros y biotita, lo que podría explicar la asociación que se observa para este tipo de pirita en este depósito mineral, donde las mayores concentraciones de cobalto (>1.000 ppm) están asociadas a las zonas de la muestra con predominancia de biotita secundaria.

El último evento de mineralización de pirita, que corresponde a las vetillas de cuarzo con piritas euhedrales (evento VI), varía significativamente en torno a las demás muestras de piritas analizadas. La mediana en este caso es de 69 ppm de Co y la frecuencia de los datos, casi en su totalidad, está en el rango de 0 a 1.000 ppm. Hay valores atípicos que alcanzan hasta 5.600 ppm, sin embargo, son valores que se escapan del conjunto de datos

y no reflejan la tendencia general. Esto permite entender que las etapas de mineralización tardía poseen piratas que probablemente precipitaron desde un fluido hidrotermal con bajas concentraciones de cobalto y a bajas temperaturas.

En base a esta información, los eventos de mineralización de pirita relacionados a altas temperaturas mayores a 300°C (De Haller y Fontboté, 2009) y que están asociados a minerales como magnetita, calcopirita, albita, biotita secundaria y actinolita, parecieran ser los eventos de mineralización responsables de albergar las mayores concentraciones de cobalto dentro de pirita (>1.000 ppm de Co), sin embargo, los eventos de mineralización tardía de pirita, en este caso asociado a cuarzo principalmente, no aportan cantidades relativamente significativas de cobalto al depósito de mineral (<400 ppm de Co).

7.2.2 Distribución de cobalto en los cristales de pirita

Los eventos de mineralización temprana tales como el evento I de piritas diseminadas, evento II de alteración sódica-cálcica, evento III de mineralización en bolsones y evento IV de alteración potásica, presentan sus mayores concentraciones de cobalto dentro de todo el cristal de pirita, principalmente en el centro.

En el caso de la pirita diseminada del evento I de mineralización, el mayor contenido de cobalto está en el centro del cristal (>1.000 ppm) y disminuye la concentración hacia los bordes, sin embargo, en los bordes sigue teniendo altas concentraciones (hasta 999 ppm Co). Los cristales menores a 1,5 mm que se observan en la imagen de cobalto para este evento de mineralización poseen una gradación en el contenido de cobalto aumentando hacia los bordes (>1.000 ppm Co), por lo que, al menos en esta muestra de pirita (CHLE-PY3Aiii), el tamaño del cristal influye en la distribución de cobalto. Al igual que en el evento I de piritas diseminadas, en el caso de las piritas de la alteración sódica-cálcica, los cristales de menor tamaño (<1,5 mm) poseen concentraciones menores de cobalto (<1.000 ppm), sin embargo, no están distribuidas zonalmente. En el caso de la pirita del evento IV de alteración potásica, las zonas de la pirita que presentan mayores concentraciones de cobalto (>1.000 ppm) están en contacto con zonas donde abunda biotita secundaria, por lo que, en este evento de mineralización y alteración, la asociación mineralógica puede ser una condicionante en la distribución de cobalto dentro de piritas.

La muestra CHLE-PY5Aii del evento VI y correspondiente a un evento de mineralización tardía de vetillas epitermales de cuarzo, presenta una variación significativa

en la distribución de cobalto, en comparación con los otros cuatro eventos de mineralización de pirita. En este evento VI, el centro del cristal de pirita tiene las concentraciones más bajas y estas aumentan gradualmente hacia los bordes, incluso, se podría relacionar la presencia de cobalto en los bordes a un proceso de adsorción, en donde el cobalto se adhiere a la superficie del cristal o a fracturas. De esta forma, podemos identificar que, en el último evento de mineralización de pirita del depósito mineral La Estrella, la ocurrencia de cobalto es diferente a los eventos de mineralización temprana, variando significativamente tanto en concentración como en su distribución.

7.2.3 Contenido de Co, Ni y Fe en las piritas

Es posible identificar una relación inversa en los contenidos de Co y Ni en las muestras de piritas, esto ya que las piritas diseminadas del evento I y las piritas en bolsones del evento III, presentan importantes concentraciones de cobalto con medias por sobre 4.000 ppm, pero bajas concentraciones de níquel. Por otra parte, las piritas de alteración sódica-cálcica del evento II y las piritas de alteración potásica del evento IV, presentan las medias más altas de níquel, pero las más bajas de cobalto (sin considerar las piritas en vetillas de cuarzo).

Por otra parte, las mayores concentraciones de hierro están asociadas a las piritas del evento II de alteración sódica-cálcica y evento IV de alteración potásica, las cuales tienen también las más altas concentraciones de níquel, por lo que el níquel podría estar directamente relacionado a las más altas concentraciones de hierro. Por otra parte, que las muestras de piritas del evento I, de piritas diseminadas, y del evento III, de piritas en bolsones, tengan las concentraciones más bajas de hierro puede estar asociado al reemplazo directo entre el cobalto y el hierro como solución sólida.

Se observa una variación entre las piritas de eventos de mineralización temprana y mineralización tardía. En el caso de los primeros eventos de mineralización de pirita (evento I, II, III y IV), se presenta una relación inversamente proporcional entre Co vs Ni, es decir, a medida que hay mayores concentraciones de cobalto hay menores concentraciones de níquel, y viceversa. De igual forma, el Co vs Fe presenta una relación inversamente proporcional en donde mayores concentraciones de cobalto significan una disminución en la concentración de hierro, y viceversa. Incluso, en el caso del Co vs Fe, esta relación inversa evidencia un proceso de solución sólida por sustitución iónica entre estos

elementos, lo que permite aumentar la concentración de cobalto y disminuir la concentración de hierro. En este caso, el cobalto podría ingresar como impureza a la estructura química de la pirita, sustituyendo Co^{+2} con Fe^{+2} . En base a los resultados obtenidos, los eventos de mineralización temprana tienen una mayor capacidad de incorporar Co por Fe en la estructura química de la pirita que el evento de mineralización temprana. Esto también concuerda con los gráficos de dispersión de la **Figura 52 y 54**, en donde los primeros eventos de mineralización de pirita (evento I, II y III) poseen las más altas concentraciones de cobalto y estas disminuyen hacia los eventos de mineralización posteriores.

Por otra parte, el evento VI de piritas en vetillas epitermales de cuarzo, con respecto al Co vs Ni, varía en comparación a las otras muestras de pirita (evento I, II, III y IV). Tanto el cobalto como el níquel tienen bajas concentraciones, con medianas inferiores a 200 ppm, distinto a las muestras de pirita de los eventos I, II, III y IV, que corresponden a alteración y mineralización temprana. Esto podría ser debido a que este evento estaría relacionado a: un fluido empobrecido en cobalto el cual favoreció la formación de estas piritas en vetillas epitermales de cuarzo; distinta fuente de origen del fluido formador de esta pirita, a diferencia de las piritas de eventos de mineralización temprana; las condiciones físico-químicas en donde se formaron estas vetillas epitermales de cuarzo pueden no ser aptas para la precipitación de cobalto en los cristales de pirita; entre otros. Hay evidencias para explicar que las alteraciones y mineralizaciones de pirita, formadas por fluidos hidrotermales de menor temperatura y presión, pueden tener las concentraciones de cobalto y níquel más bajas del depósito mineral La Estrella.

Finalmente, el evento VI de vetillas epitermales de cuarzo, tiene un alto contenido de Fe en comparación a las otras cuatro muestras de pirita, es decir que el evento de mineralización de pirita que tiene menor concentración de cobalto tiene la mayor concentración de Fe, probablemente porque el cobalto no está realizando solución sólida por sustitución iónica con el Fe cuando cristaliza la pirita.

7.3 Caracterización geometalúrgica

Para el caso del depósito mineral La Estrella, en el cual el cobalto se encuentra como solución sólida en las piritas, hay distintas alternativas en cuanto a posibles procesos metalúrgicos para recuperar el cobalto.

Al tener como producto principal el cobre y el cobalto como subproducto, hay que adaptar la recuperación de Co a la línea primaria del cobre. En este caso, posterior a un proceso de chancado y molienda, se realiza un proceso de flotación colectiva para sulfuros en el yacimiento. Posteriormente, se flota selectivamente la calcopirita para concentrar el cobre y obtener relaves con alto contenido de pirita, para luego realizar un nuevo proceso de flotación selectiva de pirita y obtener un concentrado piritoso cobaltífero (Kuyvenhoven, 2019). El proceso de solubilización de cobalto desde este concentrado piritoso va a depender del tipo de pirita que se haya concentrado por flotación. Así lo podemos ver en los resultados de distribución de cobalto obtenidos mediante ICP-MS-LA en las distintas muestras de pirita.

En el caso de las muestras de piritas CHLE-PY3A, CHLE-PY4A, CHLE-PY1A y CHLE-PY2A (evento I, II, III y IV), en donde la pirita posee las más altas concentraciones de cobalto distribuidas en el centro del cristal, se puede usar un proceso de lixiviación a presión en autoclave, con condiciones de alta temperatura y presión (Bartlett, 1995), para destruir completamente la estructura química de la pirita y alcanzar las concentraciones de cobalto que están en el centro de este mineral.

Por otra parte, para la muestra CHLE-PY5A (evento VI), en donde las más altas concentraciones de cobalto están distribuidas en los bordes del cristal, se puede utilizar un proceso de biolixiviación, el cual, mediante microorganismos, permite solubilizar a condiciones ambientales (Morin y d'Hugues, 2007) las capas externas de la pirita, permitiendo alcanzar las concentraciones de cobalto económicamente rentables.

Al lixiviar estos concentrados y obtener una solución rica en Co, es necesario purificar la concentración de cobalto para eliminar impurezas que puedan acompañar a este elemento. Finalmente, se puede precipitar este elemento como un cátodo de cobalto mediante electro-obtención, con un alto grado de pureza (99,3% hasta 99,8% Co), o se puede obtener un precipitado como sulfato (mínimo 20,5% Co), carbonato (45-46% Co) o hidróxido de cobalto (60% aproximado) (**Figura 59**).

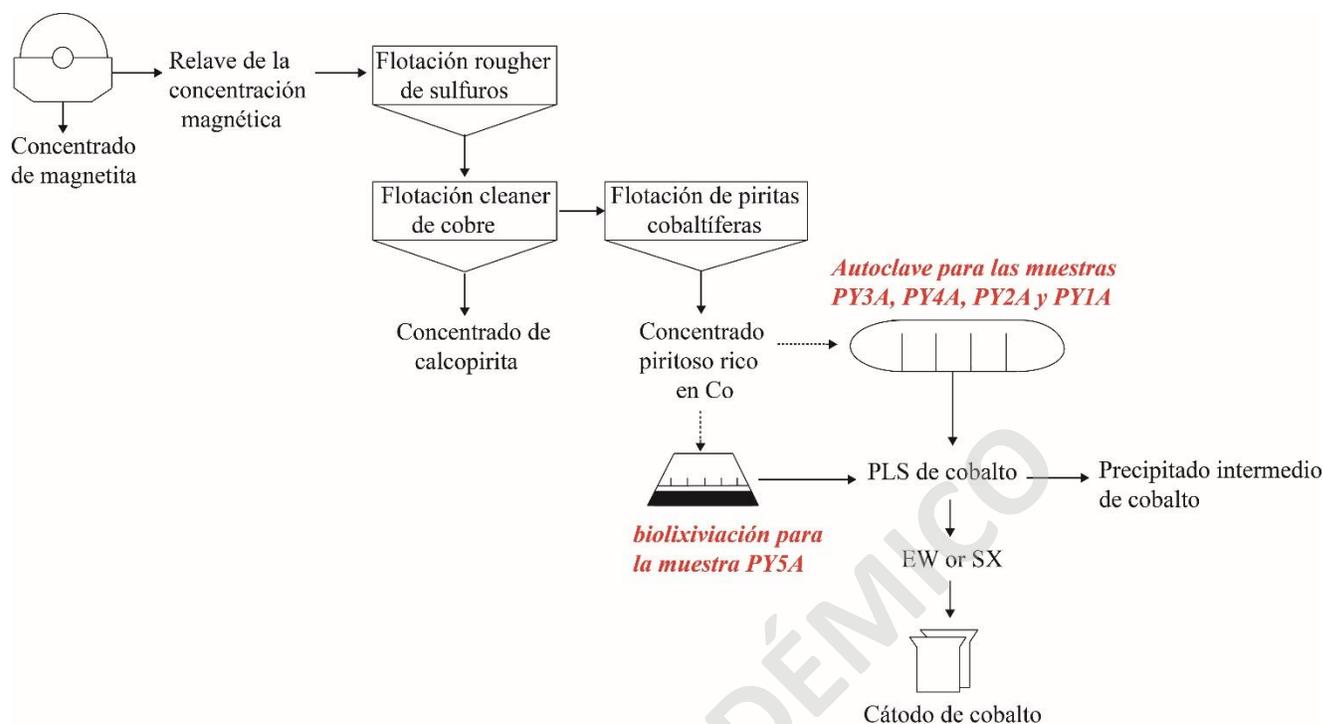


Figura 59: Mapa conceptual de alternativas metalúrgicas para recuperar cobalto desde las muestras de pirita del depósito mineral La Estrella.

7.4 Evaluación económica preliminar

En base a los resultados obtenidos de la evaluación económica preliminar, se obtiene un VAN de 58.213.860 USD para una explotación de cobalto como subproducto del cobre, considerando hasta la formación de un cátodo de cobalto, es decir, que la pirita cobaltífera se flota, luego es tratada por lixiviación a presión y electroobtención finalmente. Sin embargo, muchos de los valores analizados son supuestos en base a información confidencial de otras empresas que explotan cobalto actualmente.

Con respecto al análisis de sensibilidad asociado al VAN del proyecto, podemos identificar la ley de cobalto como la variable más determinante, ya que, al variar la ley de cobalto desde 500 ppm hasta 1.500 ppm, hay una variación de hasta 150 millones de dólares. Al realizar la evaluación económica con una ley de cobalto de 1.500 ppm, se incrementa el VAN hasta 143.723.719 USD, sin embargo, al caer la ley de cobalto a 500 ppm, se obtiene un VAN negativo de -27.295.999 USD, siendo inviable el proyecto.

De las cinco variables utilizadas para sensibilizar el proyecto, la recuperación global es la cual tiene el menor impacto económico. Si bien, el caso base de 90% como

recuperación global permite obtener un VAN de 58.213.860 USD, al disminuir este porcentaje a 85%, el VAN disminuye de 58 a 48 millones de dólares aproximadamente, mientras que al aumentar la recuperación a 95%, el VAN varía de 58 a 67 millones de dólares.

El precio del cobalto para este caso de estudio ha sido evaluado en un rango entre 25.000 a 35.000 USD, donde el caso base utilizado fue 30.000 USD. Al disminuir este valor a 25.000 USD obtenemos una disminución del VAN de 58 a 17 millones de dólares aproximadamente, mientras que al aumentar 5.000 USD al caso base se obtiene un VAN de casi 100 millones de dólares.

Al evaluar el proyecto con respecto al payback podemos confirmar que la ley de cobalto también es la variable más determinante económicamente. El caso base evaluado tiene un payback de 5,4 años con una ley de 1.000 ppm de cobalto, sin embargo, al disminuir la ley a 500 ppm de cobalto, obtenemos un payback que supera los 12,5 años, siendo inviable la explotación de cobalto como subproducto del cobre en La Estrella. Por el contrario, al aumentar la ley de cobalto de 1.000 a 1.500 ppm de cobalto, tenemos un payback de solo 2,6 años, lo cual también está verificado con el importante aumento en el VAN que significa explotar una ley de 1.500 ppm de cobalto.

La segunda variable con mayor impacto según el análisis de sensibilidad asociado al payback corresponde al precio del cobalto, esto ya que al disminuir el caso base de 30.000 USD a 25.000 USD, el payback aumenta a casi 8 años, mientras que un aumento en el precio de mercado del cobalto a 35.000 USD significaría un payback de 3,9 años, beneficiando el proyecto y la extracción de este elemento.

La recuperación global, al igual que en el análisis de sensibilidad con respecto al VAN, también es la variable con menor impacto económico ya que al aumentar o disminuir el caso base de 90%, el payback se mantiene en un rango entre 4,8 a 5,8 años, sin fuertes variaciones.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

- El depósito mineral La Estrella se han reconocido 7 eventos de alteración y mineralización, en donde destacan alteraciones características de un depósito tipo IOCG, tales como alteración sódica-cálcica, alteración potásica, y clorita-sericita. La mineralización es de hierro con abundante magnetita, subordinada mineralización de cobre en forma de calcopirita, trazas de bornita, hasta 5 diferentes tipos de piritas y un débil enriquecimiento secundario de calcosina y covelina reemplazando a calcopirita.
- Mediante la metodología realizada en esta memoria, compuesta por descripciones macroscópicas, microscópicas, QEMSCAN e ICP-MS-LA, fue posible confirmar la presencia de cobalto en los cristales de pirita.
- Los análisis ICP-MS-LA realizados para los cinco tipos de piritas identificados en, al menos cinco eventos de mineralización y alteración el depósito mineral La Estrella, permiten confirmar la variación en concentración y distribución de cobalto en piritas dependiendo del evento mineralógico específico, en donde el promedio de cobalto en las distintas muestras está en un rango entre 5.612 ppm de cobalto en el evento I de piritas diseminadas en magnetita masiva, hasta 391 ppm en el evento VI de piritas en vetillas epitermales de cuarzo.
- Los eventos de mineralización temprana en el depósito La Estrella, han sido los responsables de incorporar las concentraciones más altas de cobalto al depósito mineral, por lo que el cobalto viene asociado a eventos de mineralización de magnetita, pirita y calcopirita, y alteración sódica-cálcica y potásica. Además, el cobalto en estos eventos está distribuido de forma gradualmente uniforme en el cristal de pirita, en donde las mayores concentraciones en ppm de cobalto se encuentran en el centro del cristal.
- El último evento de mineralización de pirita en el depósito mineral La Estrella, compuesto por vetillas de cuarzo y piritas euhedrales, presentan las concentraciones de cobalto más bajas. Además, el cobalto en este evento de mineralización tardía se presenta distribuido en zonación, ya que las concentraciones más bajas están en el centro del cristal y aumentan hacia los

bordes, en donde se presentan las concentraciones más altas de cobalto para este evento piritoso.

- El cobalto presenta una relación inversamente proporcional con el hierro, lo que confirma la presencia de cobalto como solución sólida en las piritas, sustituyendo al Fe en su estructura química.
- Para las muestras de un evento de mineralización temprana que tienen el cobalto distribuido en el centro del cristal principalmente, se puede usar un proceso de solubilización mediante lixiviación a presión en autoclave.
- Para la muestra de un evento de mineralización tardía que tiene el cobalto distribuido en los bordes del cristal de pirita, se puede usar un proceso de solubilización mediante biolixiviación.
- Económicamente, la extracción de cobalto como subproducto del cobre se considera viable, con un VAN de 58.213.860 USD y un *payback* de 5,4 años. Cabe destacar que las variables que tienen mayor impacto en la evaluación económica son el precio del cobalto y la ley de este elemento.

Finalmente, se recomienda realizar las siguientes actividades a futuro:

- Realizar un mapeo geológico del depósito mineral a escala del proyecto y del yacimiento sumado a sondajes y mapeo de galerías subterráneas, con el objetivo de definir en detalle la geología del depósito La Estrella y la distribución de los eventos de mineralización para modelar geológicamente la información.
- Estimar recursos y reservas para los elementos principales como Cu y Fe y, también para subproductos como Co, Ni, REE, P, entre otros.
- Realizar pruebas metalúrgicas para obtener concentrados piritosos y evaluar la recuperación y calidad del producto final en un posterior proceso de lixiviación y precipitación o SX-EW (extracción por solvente-electroobtención).
- Datar los distintos tipos de pirita para obtener edades de mineralización, aunque puede que estas no varíen en rangos de edad importante. Esto permitirá generar guías de exploración a lo largo de la Franja Ferrífera para piritas cobaltíferas.

REFERENCIAS

- Arévalo, C., Creixell, C. 2009. The Atacama Fault System and its role on the migration and deposition of Iron Oxide Copper Gold and Magnetite-Apatite ores: an evaluation from the Los Choros and Huasco valleys. 21th Colloquium on Latin American Geosciences. Alemania, p.23-25.
- Arévalo, C., Mourgues, O., Chávez, R. 2009. Geología del área Vallenar-Domeyko. Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica No. 120, mapa escala 1:100.000. p. 7-20.
- Arévalo, C., Welkner, D. 2008. Geología del Área Carrizal Bajo-Chacritas Región de Atacama. Carta Geológica de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala: 1:100.000. Serie Geológica Básica, 111.
- Arévalo, C. 2005. Carta Copiapó, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, escala 1:100.000, No. 91
- Barton, M. D. 2014. Iron Oxide(-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) Systems. In Treatise on Geochemistry: Second Edition (2nd ed, Vol 13). Elsevier Ltd., 515-536.
- Bartlett, R. 1995. Processing of cobalt-copper-arsenic complex ore concentrate, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 15:1-4, 51-59.
- Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M. 2007. Tectonostatigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. In: Moreno, T. & Gibbons, W. (eds) The Geology of Chile. The Geological Society, London, 21-114.
- Creixell, C., Fuentes, J., Bierma, H., Salazar, E. 2015. Tectónica regional y metalogénesis asociada al emplazamiento de la franja de pórfidos cupríferos cretácicos del norte de Chile (28°-30°S). XIV Congreso Geológico Chileno. p. 134.
- Cruzat, A. 1968. Monografía sobre los yacimientos de cobalto chilenos (Inédito). Corporación de Fomento de la Producción-Instituto de Investigaciones Geológicas-Naciones Unidas, 30 p.
- D' Aubarede, G. 1969. Chile, Evaluación de los conocimientos existentes sobre cobalto, manganeso y mercurio. PNUD/CORFO/IIRN. Santiago.
- De Haller, A., & Fontboté, L. 2009. The Raúl-Condestable Iron Oxide Copper-Gold Deposit, Central Coast of Peru: Ore and Related Hydrothermal Alteration, Sulfur Isotopes, and Thermodynamic Constraints. Economic Geology, 104(3), 365-384.
- Espinoza, S. 1990. The Atacama-Coquimbo Ferriferous Belt, Northern Chile. Stratabound Ore Deposits in the Andes. Special Publication No. 8 of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits. p. 353-364.
- Fisher, K G. 2011. Cobalt processing developments. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 6th Southern African Base Metals Conference 2011. p. 237-258.
- Fox, K.A., 2000. Fe-oxide (Cu-U-Au-REE) Mineralization and Alteration at the Productora Prospect. Colorado School of Mines, 144 p.

Fredes, M.J. 2017. Geología del prospecto IOCG Alcaparra D, Comuna de Huasco, Región de Atacama. Memoria de título Universidad de Chile.

Gipson, M., Taylor, G.K., Grocott, J. 2003. New palaeomagnetic results and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology from the Vallenar region (29°S), N. Chile. In General Assembly of the European Geophysical Society, No. 27, Actas 4, Abstract EGS02-A-06020. Nice, France.

Huston, D., Sie, S., Suter, G., Cooke, D., Both, R. 1995. Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: part I. Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and part II Selenium levels in pyrite: comparison with delta 34 S values and implications for the source of Sulphur in volcanogenic hydrothermal systems. *Economic Geology*, Vol. 90, p. 1167-1196.

I.d. Real, J.F.H. Thompson, J. Carriedo. 2018. Lithological and structural controls on the genesis of the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper Gold district, Northern Chile, *Ore Geology Reviews* (2018),

Jane, A. 2016. Geology, geochemistry and geometallurgy of the Productora Cu-Au-Mo deposit, Chile. Doctor of philosophy thesis. University of Tasmania.

Kuyvenhoven, R. 2019. Caracterización química-mineralógica y definición de rendimiento metalúrgico de mezclas de mineral de La Estrella. Informe final interno SMI-ICE Chile. p. 2-23.

Loyola, N. 2016. Origen de la mineralización y alteración hidrotermal del depósito tipo IOCG Diego de Almagro, III Región de Atacama, Chile. Memoria de título Universidad de Chile.

Marschik, R., & Fontboté, L. 2001. The Punta del Cobre formation, Punta del Cobre-Candelaria área, Northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 14(4), 401-433.

Morales, H. 2017. Estudio de la paragenesis y química mineral en magnetitas del depósito tipo IOCG Dominga, IV Región, Chile. Memoria de título Universidad de Chile.

Morin, D., Spolaore, P., d'Hugues, P., Teczan, A., Mafa, Ö. 2010. Pyrite bioleaching and slag neutralisation-two treatments in a single process for recovering valuable metals from both materials. XXV International Mineral Processing Congress, IMPC 2010. 469-479.

Morin, D. H. R., & D' Hugues, P. 2007. Bioleaching of a cobalt-containing pyrite in stirred reactors: A case study from laboratory scale to industrial applications. In D. E Rawlings & D. B. Johnson (Eds.). *Biomining* (pp. 35-55). Berlin.

Mourgues, F. 2007. *Sabaudiella Vasicek & hoedemaeker* (Ancyloceratidae, Ammonoidea) in the Andean lower Cretaceous Chañarcillo back-arc basin, northern Chile. In *Proceedings of 4th European Meeting on the Palaeontology and Stratigraphy of Latin America*. p. 267-271.

Nash, J.T. & Hahn, G.A. 1989. Stratabound Co-Cu deposits and mafic volcanoclastic rocks in the Blackbird mining district, Lemhi County, Idaho. *Geological Association of Canada Special Paper 36*: 339-356.

Rainford, S. 2013. A minimum pollution, low energy process for the recovery of cobalt and copper from complex sulphide minerals. *The Minerals, Metals & Materials Society*. p. 335-336.

- Ray, G.E., and Dick, L.A., 2002. The Productora prospect in north-central Chile: An example of an intrusion-related, Candelaria type Fe-Cu-Au hydrothermal system, in Porter, T.M., ed., Hydrothermal Iron Oxide, Copper-Gold & Related Deposits A Global Perspective, 2: Adelaide, PGC Publishing, p. 131-151.
- Reich, M., Kesler, S., Utsunomiya, S., Palenik, C., Chryssoulis, S., Ewing, R. 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 69. p. 2781-2796.
- Reich, M., Simon, A., Deditius, A., Chryssoulis, D., Tardani, D., Barra, F., Knipping, J., Bilenker, L., Sanchez-Alfaro, P. 2015. The Trace Element Signature of Pyrite from the Los Colorados Iron Oxide Apatite (IOA) Deposit: A Missing Link between IOA and IOCG Systems.
- Rieger, A., Marschik, R., Diaz, M., Hölzl, S., Chiaradia, M., Akker, B., & Spangenberg, J.E. 2010. The hypogene iron oxide copper-gold mineralization in the Mantoverde district, northern Chile. *Economic Geology*, 105(7), 1271-1299.
- Segerstrom, K., y Ruiz, C. 1962. Cuadrángulo Copiapó. Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, Vol. 3, No. 1, p. 115, 1 mapa escala 1: 50.000.
- Segerstrom, K., y Parker, R.L. 1959. Cuadrángulo Los Loros, Provincia Atacama, Carta Geológica de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago de Chile, p. 33.
- Shedd, K. B. 2019. USGS Minerals Information: Cobalt. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 52(1), 1-2.
- Sillitoe, 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita* (2003) 38: 787-812.
- Slack, J., Kimball, B., Shedd, K. 2017. Cobalt. Chapter F of Critical Mineral Resources of the United States-Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. USGS. p. F1.
- Smith, L. K., Han, K. N., Lawson, F. 1976. Laboratory studies on the recovery of some cobalt minerals, *Proc. Australas. Inst. Min. Metall*, n°257, 37-42.
- Tassara, A. 2013. Ciclo Andino. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Ciencias de la Tierra. p. 5-10.
- Townley, B., Díaz A., Luca, R. 2017a. Geología, alteración y mineralización preliminar de distritos/yacimientos seleccionados. Potenciales recursos de cobalto y manganeso en Chile: definición de zonas y selección de distritos/yacimientos u otras fuentes en Chile. CORFO, Comité Minería No Metálica y Sernageomin., AMTC, Universidad de Chile. p. 29.
- Townley, B., Díaz A., Luca, R. 2017b. Estado del arte y potenciales recursos Co y Mn en Chile. CORFO, Comité Minería No Metálica y Sernageomin., AMTC, Universidad de Chile. p. 55.
- Vivallo, W., Díaz, A., Jorquera, R. 2008. Yacimientos metalíferos de la Región de Atacama, Escala 1:500.000, Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos (n.27): 72 p. Santiago.

Welkner, D., Arévalo, C., Godoy, E. 2006. Geología del Área Freirina-El Morado, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 100: 50 p., 1 mapa escala 1:100.000.

Williams, P., Barton, M., Johnson, D., Fontboté, L., De Haller, A., Mark, G., Oliver, N., Marschik, R. 2005. Iron oxide copper gold deposits: geology, space-time distribution and possible modes of origin. Economic Geology 100th Anniversary Volume. p. 371-405.

Yoshida, M., 2017. Trench dynamics: Effects of dynamically migrating trench on subducting slab morphology and characteristics of subduction zones systems. Physics of the Earth and Planetary Interiors 268, 35-43.

SOLO USO ACADÉMICO