



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**GEOLOGÍA, MINERALIZACIÓN Y ALTERACIÓN DEL
DISTRITO MINERO PAMPA LARGA. REGIÓN DE ATACAMA,
CHILE.**

“Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
título de Geólogo”

Profesor guía: Mg. Francisco Tapia Guerra

Christian Alejandro Bravo San Martín

Resumen

Este trabajo constituye la primera caracterización integral del distrito minero Pampa Larga en más de seis décadas, estableciendo una base sólida para futuras campañas de exploración y estudios metalogenéticos en la región de Atacama. Basado en 48 muestras de roca con análisis geoquímicos multielementales, mapeo geológico a escala 1:10.000 y la integración de observaciones mineralógicas y estructurales, se definieron formalmente las unidades litológicas de la Formación Cerrillos, el Plutón Pampa Larga, las corneanas de wollastonita y los depósitos cuaternarios. La mineralización se encuentra estrechamente controlada por estructuras subverticales de rumbo NW–SE, donde se emplazan vetas bandeadas y brechadas con sulfuros, sulfosales y baritina, acompañadas por halos de alteración argílica y propilítica bien desarrollados. El análisis geoquímico mostró concentraciones de Cu superiores al 10 % en el flanco occidental y anomalías de Ba y As en el oriental, además de correlaciones significativas Cu–Zn, Au–Ag y As–Sb, que sustentan una zonación coherente con sistemas epitermales híbridos. La evolución del distrito se inicia con un metamorfismo de contacto que generó corneanas ricas en wollastonita, seguido por pulsos hidrotermales de alta sulfuración con transiciones intermedias y culmina con un perfil supérgeno enriquecido en gossans, arseniatos y óxidos de cobre, expuesto por erosión. Aunque las labores históricas alcanzaron apenas 100 m de profundidad, analogías con depósitos epitermales andinos como El Indio y Pascua–Lama sugieren un potencial exploratorio en profundidad. A ello se suma un recurso no metálico tangible en wollastonita (>150.000 m³, >1,5 Mt) y un valor alternativo ligado al mercado de minerales de colección, dada la presencia de especies raras como lavendulana, zincolivenita y mansfieldita. En conjunto, este estudio confirma la hipótesis de un sistema epitermal híbrido multiepisódico y aporta un modelo metalogénico original que no solo enriquece la comprensión científica de los sistemas polimetálicos de Atacama, sino que también ofrece aplicaciones prácticas para la prospección minera, la revalorización de recursos no metálicos y la puesta en valor de la mineralogía regional.

Abstract

This work constitutes the first comprehensive characterization of the Pampa Larga mining district in more than six decades, establishing a solid basis for future exploration campaigns and metallogenetic studies in the Atacama Region. Based on 48 rock samples with multielement geochemical analyses, 1:10,000 scale geological mapping, and the integration of mineralogical and structural observations, the lithological units of the Cerrillos Formation, the Pampa Larga Pluton, wollastonite hornfels, and Quaternary deposits were formally defined. Mineralization is closely controlled by subvertical NW–SE structures that host banded and brecciated veins with sulfides, sulfosalts, and barite, accompanied by well-developed argillic and propylitic alteration halos. Geochemical analysis revealed Cu concentrations exceeding 10 % in the western flank and Ba and As anomalies in the eastern sector, in addition to significant Cu–Zn, Au–Ag, and As–Sb correlations that support a zoning pattern consistent with hybrid epithermal systems. The district’s evolution begins with contact metamorphism that generated wollastonite-rich hornfels, followed by hydrothermal pulses of high sulfidation with intermediate transitions, and culminates in a supergene profile enriched in gossans, arsenates, and copper oxides exposed by erosion. Although historical workings reached only about 100 m depth, analogies with Andean epithermal deposits such as El Indio and Pascua–Lama suggest latent exploration potential at depth. Furthermore, a tangible non-metallic resource is represented by wollastonite (>150,000 m³, >1.5 Mt), complemented by alternative economic value linked to the mineral collecting market due to the presence of rare species such as lavendulan, zincolivenite, and mansfieldite. Overall, this study confirms the hypothesis of a hybrid, multiepisodic epithermal system and provides an original metallogenetic model that not only enriches the scientific understanding of polymetallic systems in Atacama but also offers practical applications for mineral exploration, the revaluation of non-metallic resources, and the promotion of regional mineralogical heritage.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al proyecto FIC–FNDR “Expansión de zonas de explotación y aumento de reservas minerales en la pequeña minería artesanal mediante prospección magnética e hiperespectral aerotransportada” (Código BIP 40057805), financiado por el Fondo de Innovación para la Competitividad del Gobierno Regional de Atacama, cuyo apoyo fue fundamental para el desarrollo de esta investigación y para fortalecer mi compromiso con el avance del conocimiento geológico y el apoyo a la pequeña minería de nuestra región.

Agradezco especialmente al Dr. Karl Riveros, director del proyecto, por brindarme la oportunidad de formar parte de esta iniciativa y confiar en mis capacidades, y al Mg. Francisco Tapia, mi profesor guía, por su orientación constante, su paciencia y su invaluable apoyo en cada decisión que marcó el rumbo de este trabajo.

A mis padres, Eliana y Marcelo, gracias por su amor incondicional, por enseñarme el valor del esfuerzo y por ser mi mayor fuente de motivación en los momentos más desafiantes. A mi pareja, gracias por tu compañía, tu apoyo incansable y por creer en mí incluso cuando yo mismo dudaba. Y a mis amigos, quienes con su compañía y palabras de aliento hicieron más liviano el camino, mi más sincera gratitud.

Cada página de esta tesis es también reflejo de ustedes. Sin su apoyo, este logro no habría sido posible.

Índice de contenidos

	N° de página
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Problema de investigación.....	1
1.2 Hipótesis.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.4 Ubicación y accesos.....	2
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Yacimientos epitermales.....	4
2.1.1 Clasificación de los depósitos epitermales.....	4
2.1.2 Metalogénesis de los depósitos epitermales.....	8
2.2 Yacimientos epitermales de alta sulfuración en Chile.....	10
2.3 Procesos de oxidación y enriquecimiento supérgeno.....	11
CAPÍTULO 3: MARCO GEOLÓGICO.....	14
3.1 Unidades litológicas.....	15
3.1.1 Formación Cerrillos [Kc].....	15
3.1.2 Stock diorítico y monzodiorítico [Ksd].....	16
3.1.3 Depósitos aluviales inactivos [PIHa1].....	16
3.1.4 Depósitos aluviales activos [PIHa2].....	16
3.2 Geología económica.....	17
3.2.1 Mina Descubridora.....	17
3.2.2 Mina Alacrán.....	17
3.2.3 Mina María Catalina.....	18

3.2.4 Mina Veta Negra.....	18
3.2.5 Mina Jote.....	19
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA.....	19
4.1 Caracterización de las unidades litológicas, estructuras geológicas y tipos de alteración.....	20
4.2 Evaluación del control estructural de la mineralización.....	21
4.3 Cuantificación de la concentración de elementos traza en las muestras.....	22
4.4 Determinación del potencial económico del distrito Pampa Larga.....	22
CAPÍTULO 5: RESULTADOS.....	23
5.1 Unidades litológicas.....	23
5.1.1 Unidad de depósitos sedimentarios no consolidados.....	23
5.1.2 Unidad metamórfica.....	24
5.1.3 Unidad intrusiva.....	26
5.1.4 Unidad de andesitas y brechas volcanoclásticas.....	30
5.2 Alteración hidrotermal.....	33
5.2.1 Alteración propilítica.....	33
5.2.2 Alteración argílica.....	35
5.2.3 Alteración <i>vuggy sílica</i>	36
5.3 Mineralización.....	37
5.3.1 Mina Descubridora.....	38
5.3.2 Mina Alacrán.....	39
5.3.3 Mina Veta Negra.....	40
5.3.4 Mina María Catalina.....	44

5.3.5 Mina Jote.....	48
5.3.6 Mina Hornitos (Ex San Pedro).....	53
5.3.7 Labores sin nombre (s/n).....	56
5.4 Estructuras geológicas.....	58
5.4.1 Diques.....	58
5.4.1.1 Diques pórfido dioríticos.....	59
5.4.1.2 Diques aplíticos.....	59
5.4.2 Fallas.....	60
5.4.3 Vetas.....	61
5.4.4 Análisis de datos estructurales.....	62
5.5 Geoquímica.....	63
5.5.1 Elementos mayores (SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe, MgO, CaO, K ₂ O, P ₂ O ₅).....	64
5.5.2 Elementos traza y metales base (Cu, Zn, Pb, Fe, Ba, Mn, Sr).....	66
5.5.3 Metales preciosos (Au, Ag).....	69
5.5.4 Elementos estratégicos (As, Sb, Mo).....	70
5.5.5 Mapas de anomalías geoquímicas.....	71
CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN.....	73
6.1 Correlación de unidades litológicas con unidades o sistemas estructurales formales.....	73
6.2 Interpretación de procesos de alteración-mineralización.....	77
6.3 Interpretación de resultados geoquímicos.....	90
6.3.1 Asociación geoquímica–mineralógica de elementos mayores.....	90
6.3.2 Asociación geoquímica de metales base y minerales hipógenos.....	92

6.3.3 Metales preciosos y sulfosales.....	93
6.3.4 Distribución espacial.....	95
6.4 Modelo metalogénico del distrito minero Pampa Larga.....	96
6.5 Potencial económico.....	100
6.5.1 Potencial polimetálico.....	100
6.5.2 Potencial no metálico.....	101
6.5.3 Potencial alternativo.....	104
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.....	105
CAPÍTULO 8: RECOMENDACIONES.....	107
BIBLIOGRAFÍA.....	109
ANEXOS.....	117

Índice de figuras

N° de página

- Figura 1.** Mapa de ubicación y accesos al distrito minero Pampa Larga.....3
- Figura 2:** Diagrama de zonación de alteración en un sistema epitermal HS, mostrando la transición desde la zona de lixiviación ácida (vuggy sílica) hasta la periferia propilitica (adaptado de Hedenquist et al., 2000).....5
- Figura 3.** Diagrama de correlación entre temperatura y fugacidad de azufre para los estados de sulfuración relativos de los fluidos hidrotermales en el ámbito de depósitos metalíferos en pórfidos y epitermales, definidos según los campos de estabilidad de minerales clave. Adaptado de Einaudi et al. (2003). Las reacciones de sulfuración fueron tomadas de Barton y Skinner (1979).....6
- Figura 4:** Esquema estructural general de los depósitos epitermales alcalinos (baja e intermedia sulfuración), modificado de Buchanan (1981), indicando la mineralogía de ganga, la generalización de los patrones de alteración típicos, y la variación en la mineralogía de mena típica en profundidad, y en la morfología de la mineralización. Ello incluye la distribución del sínter formado in situ, y la superposición de la alteración argílica avanzada derivada de vapores liberados por ebullición en profundidad. La extensión lateral y volumen de las aureolas de alteración depende, en gran manera, de la presencia de litologías permeables; debido a ello, la morfología y extensión de los halos puede variar desde el orden decimétrico hasta el hectométrico, inclusive dentro de un mismo depósito.....7
- Figura 5:** Esquema comparativo (no a escala) de la estructura, procesos, tipos de alteración, volátiles liberados, temperaturas, pH, tipos de fluidos y reacciones involucradas en la formación de los depósitos epitermales ácidos (alta sulfuración) y alcalinos (baja e intermedia sulfuración), y su relación con las rocas magmáticas como fuente de calor, fluidos y componentes químicos para estos depósitos, desde una cámara magmática en proceso de enfriamiento, la formación de depósitos metálicos relacionados a pórfidos (cupríferos, auríferos, o molibdeníferos), hasta el ambiente epitermal (modificado de Sillitoe, 1995a; en base a los datos de Hedequist y Lowenstern, 1994; Gammons y Williams-Jones, 1997; Corbett y Leach, 1998). La posición de la transición frágil-dúctil se ha ubicado en temperaturas ~400°C, y a 5-7 km de profundidad (*e. g.* Fournier, 1991; Nielson *et al.*, 1999).....8
- Figura 6.** Distribución de los principales yacimientos epitermales HS en Chile. 1. Cerro Marqués (Arica y Parinacota); 2. Cerro Dominador (Antofagasta); 3. El Guanaco (Antofagasta); 4. La Coipa (Atacama); 5. Ladera Farellón (Atacama); 6. Cerro Blanco (Atacama); 7. Cerro Maricunga (Atacama); 8. Santa Teresa (Atacama); 9. Nueva Esperanza (Atacama); 10. Pascualama (Coquimbo); 11. El indio (Coquimbo); 12. Tambo de oro (Coquimbo).....11
- Figura 7.** Corte esquemático de una veta con mineralización de cobre, la cual muestra el patrón típico de zonación vertical: una zona superior oxidada (zona eluvial o lixiviada), sobre una zona reducida de enriquecimiento secundario (manto supérgeno o zona iluvial). La parte más superficial está representada por el gossan, compuesto por

material ferruginoso que puede conservar la morfología de los sulfuros originales. La barrera redox, que controla esta zonación, puede corresponder al nivel freático o a un amortiguador litológico (modificado de Robb, L. J; 2005).....13

Figura 8. Mapa geológico regional para el distrito minero Pampa Larga. Modificado del mapa de la cuenca del río Copiapó: Carta Los Loros (Arévalo, 2009).....14

Figura 9. Diagrama de flujo metodológico aplicado en el distrito Pampa Larga.....20

Figura 10. A. Fotografía del paisaje del distrito minero Pampa Larga con vista hacia el norte, los depósitos sedimentarios no consolidados son resaltados en color amarillo. B. Depósitos aluvionales pobremente consolidados que incluyen materiales rocosos heterogéneos de mala selección con clastos angulosos a sub redondeados, inmersos en una matriz arenosa.....24

Figura 11. A. Contacto neto entre granodiorita en el nivel superior y un afloramiento de wollastonita en el nivel inferior. B. Muestra de wollastonita (CaSiO_3), de hábito fibroso, textura granoblástica y color blanco, que constituye la litología predominante de la unidad metamórfica. C. Muestra de cuarcita compuesta por cuarzo recristalizado, con textura entrelazada, alta dureza y brillo vítreo, dispuesta de manera lenticular dentro de la unidad metamórfica.....25

Figura 12. A. Muestra de mano FIC-PL-M18. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M18.....25

Figura 13. Microfotografías de la muestra FIC-PL-M18 (wollastonita) observada en sección delgada. (Wo): Wollastonita, (Clo): Corita.....26

Figura 14. A. Afloramiento de granodiorita en el sector noroeste del área, en él se aprecia una vetilla de material calcáreo de aproximadamente 3 cm de grosor relleno una fractura. B. Muestra de granodiorita del afloramiento mostrado en la fotografía A, esta roca de textura fanerítica posee un grano medio a grueso y se compone principalmente por cuarzo, feldespato (plagioclasa y algo de ortoclasa) y biotita, con pequeños porcentajes de hornblenda. C. Afloramiento de monzodioritas entrando a mina Jote en el sector sur suroeste del área D. Muestra de monzodiorita del afloramiento mostrado en la fotografía C bajo zoom de lupa 20x, esta roca fanerítica de grano medio a grueso se compone principalmente por plagioclasa, feldespato potásico y minerales máficos como hornblenda y biotita.....28

Figura 15. A. Muestra de mano FIC-PL-M22. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M22.

Figura 16. Microfotografías representativas de la muestra FIC-PL-M22 (monzodiorita). (Plg): Plagioclasa, (Qz): Cuarzo, (Bt): Biotita, (Hbl): Hornblenda, (Ght): Goetita.....29

Figura 17. A. Prominente estratificación de andesita en el sector este del distrito. B. Andesita porfídica con abundante magnetita y alteración clorítica leve. C. Afloramiento de andesita con vetillas polidireccionales de yeso. D. Contacto entre andesitas y brechas volcanoclásticas.....31

Figura 18. A. Muestra de mano FIC-PL-M46. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M46.....32

- Figura 19.** A. Rechazo pulido de la muestra FIC-PL-M46. B y C. Microfotografías representativas de la asociación mineral observada en la sección delgada de la muestra FIC-PL-M46. (Plg): Plagioclasa, (MnO): Óxidos de manganeso, (Jar): Jarosita, (Ght): Goetita (Qz): Cuarzo.....32
- Figura 20.** A. Afloramiento de brechas volcanoclásticas con alteración clorítica moderada. B. Alteración propilitica diseminada en una vetilla calcárea. C. Muestra de mano de actinolita.....33
- Figura 21.** A. Muestra de mano FIC-PL-M45. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M45.....34
- Figura 22.** A. Rechazo pulido de la muestra FIC-PL-M45. B y C. Microfotografías representativas de la asociación mineral observada en el corte delgado de la muestra FIC-PL-M45. (Plg): Plagioclasa, (Clo): Clorita, (Ep): Epidota. (Qz): Cuarzo, (Cal): Calcita, (Op): Opaco.....35
- Figura 23.** A. Alteración argílica pervasiva aledaña a una zona de falla dentro de la unidad de andesitas del distrito. B. Alteración argílica pervasiva situada en halos metamórficos de wollastonita y granodioritas.....36
- Figura 24.** A. Afloramiento rocoso con evidencia de alteración vuggy sílica en el sector centro sur del distrito. B. Desmonte abandonado en proximidad a cuerpos con mineralización de cobre, en ella se puede observar una textura oquerosa.....37
- Figura 25.** Mina Descubridora. A. Entrada a la mina Descubridora; se observan derrumbes en el acceso y pircas laterales construidas con bloques de roca. B. Interior de la mina, donde se aprecian túneles que siguen el rumbo de la veta, una intensa alteración argílica adyacente a la veta y sectores con derrumbes parciales. C. Mineralización de crisocola diseminada en la pared de la veta, acompañada de cuarzo masivo con desarrollo de alteración *vuggy sílica*. D. Estructura de piedra correspondiente a un horno artesanal ubicado en las inmediaciones de la entrada a la mina.....39
- Figura 26.** Mina Alacrán. A. Vista de la entrada principal de la mina Alacrán, parcialmente cubierta por depósitos aluviales. B. Pique vertical que conecta con niveles inferiores, actualmente inaccesibles. C. Túnel principal de la mina, donde se observa continuidad de labores subterráneas y la traza de una veta en el techo. D. Sección de veta brechada, con fragmentos líticos angulosos contenidos en una matriz compuesta por minerales oscuros, donde destacan óxidos de manganeso, arsénico y, en menor proporción, cobre.....40
- Figura 27.** Veta Negra. A. Entrada principal a Veta Negra. B. Entrada del túnel principal de veta negra C. Cuerpo vetiforme situado en el nivel inferior al túnel principal con mineralización de azurita, tetrahedrita y conicalcita. D. Cavidad con mineralización de zincolivenita y cuproadamita. E. Ludlockita ((FePb)As₂O₆), F. Azurita y olivenita (Cu₃(CO₃)₂(OH)₂ / Cu₂As₂O₄OH). G. Tennantita rica en As (Cu₁₂As₄S₁₃). H. Zincolivenita (CuZnAsO₄(OH)).....41
- Figura 28.** A. Muestra de mano FIC-PL-M07. B. Corte pulido correspondiente a la muestra FIC-PL-M07.....42

Figura 29. Microfotografías en luz reflejada correspondientes al corte pulido de la muestra FIC-PL-M7. (Py): Pirita, (Ccp): Calcopirita, (Tn): Tennantita, (Sph): Esfalerita, (Hem): Hematita.....	43
Figura 30. A. Muestra de mano FIC-PL-M16. B. Corte pulido correspondiente a la muestra FIC-PL-M16.....	43
Figura 31. Microfotografías del corte pulido correspondiente a la muestra FIC-PL-M16, observadas bajo luz reflejada. (Ba): Baritina, (Sph): Esfalerita, (Ght): Goetita, (MnO): Óxidos de manganeso.....	44
Figura 32. María Catalina. A. Entrada a la mina María Catalina. B. En el interior de la mina se encuentran dos túneles, el del lado izquierdo es pequeño y se desvía de la veta principal, mientras que el túnel del lado derecho persigue el rumbo de la veta. C. Veta rica en arsénico. D. Roca de caja de la veta principal, esta se encuentra con abundante arsenopirita diseminada y alteración argílica. E. Muestra de la veta principal, partida para observar la sutura central de arsénico nativo con habito botroidal. E. Estibina (Sb ₂ S ₃) en veta principal.....	45
Figura 33. A. Muestra de mano FIC-PL-M01. B. Corte pulido correspondiente a la muestra FIC-PL-M01.....	46
Figura 34. Microfotografías del corte pulido correspondiente a la muestra FIC-PL-M1, observadas bajo luz reflejada. (Stb): Estibina, (Ccp): Calcopirita, (Tn): Tennantita, (Cv): Covelina, (Bn): Bornita, (Ar): Arsénico.....	46
Figura 35. A. Muestra de mano FIC-PL-M25. B. Corte pulido correspondiente a la muestra FIC-PL-M25.....	47
Figura 36. Microfotografías del corte pulido correspondiente a la muestra FIC-PL-M25, observadas bajo luz reflejada. (Aspy): Arsenopirita, (Ccp): Calcopirita, (Py): Pirita.....	48
Figura 37. Mina Jote. A. Múltiples labores mineras para la explotación del mismo sistema mineralizado en diferentes puntos cercanos entre sí.....	49
Figura 38. A. Muestra de mano FIC-PL-M13. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M13.....	49
Figura 39. A. Rechazo pulido de la muestra FIC-PL-M13. B y C. Microfotografías representativas de la asociación mineral observada en el corte delgado de la muestra FIC-PL-M13 . (Ma): Mansfieldita, (Qz): Cuarzo, (Plg): Plagioclasa, (Con): Conicalcita, (Ght): Goetita, (MnO): Óxidos de manganeso, (Jar): Jarosita.....	50
Figura 40. A. Muestra de mano FIC-PL-M27. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M27.....	51
Figura 41. Microfotografías representativas de la asociación mineral observada en el corte delgado de la muestra FIC-PL-M27. (Az): Azurita, (Qz): Cuarzo, (Ght): Goetita, (Con): Conicalcita.....	51
Figura 42. A. Muestra de mano FIC-PL-M29. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M29.....	52

Figura 43. A. Rechazo pulido de la muestra FIC-PL-M29. B y C. Microfotografías representativas de la asociación mineral observada en el corte delgado de la muestra FIC-PL-M29. (Lav): Lavendulana, (MnO): Óxidos de manganeso, (Ght): Goetita, (Jar): Jarosita. (Qz): Cuarzo.....53

Figura 44. Mina Hornitos (ex San Pedro) A. Veta de baritina con mineralización diseminada de óxidos de Cu, la labor minera al ser sub vertical se vuelve inaccesible para su estudio en detalle. B. Mineralización diseminada de óxidos y arseniatos de Cu en la pared de una veta ya explotada. C. Pircas aledañas a las labores mineras, en contraste con los vistos en otras minas, estas se ven bastante destruidas.....54

Figura 45. A. Muestra de mano FIC-PL-M09. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M09.....55

Figura 46. A y B. Microfotografías en luz transmitida y reflejada correspondientes al corte delgado de la muestra FIC-PL-M09. B. Rechazo pulido de la muestra FIC-PL-M09. (Con): Conicalcita, (Ba): Baritina, (Ght): Goetita, (Qz): Cuarzo, (Lav): Lavendulana, (Jar): Jarosita, (MnO): Óxidos de manganeso.....55

Figura 47. Labores mineras A. A pesar de no contar con una identificación formal, la labor situada en la coordenada 6947418N; 387865E, presenta clara evidencia de una extensa explotación en el pasado, incluyendo grandes desmontes y distintos niveles de trabajo en su interior. Al igual que otros laboreos en el distrito se caracteriza por ser un cuerpo vetiforme alojado en una zona de falla dentro de la unidad volcánica (sigmoide de la derecha indica movimiento normal). La ganga corresponde principalmente a baritina, cuarzo y óxidos de manganeso, con paredes de salbanda y alteración argílica, mientras que la mineralización económica se compone por óxidos y arseniatos de Cu diseminados en la veta principal B. Trabajos sub verticales con considerable infraestructura y profundidad asociada. A través de los desmontes y vestigios se reconoce la generalidad del distrito, imponentes vetas de baritina y diseminados de Cu. Estas labores en su mayoría son inaccesibles para el mapeo y descripción a detalle sin un equipo de descenso adecuado.....56

Figura 48. A. Muestra de mano FIC-PL-M28. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M28.....57

Figura 49. Microfotografías representativas de la asociación mineral observada en el corte delgado de la muestra FIC-PL-M28. (Con): Conicalcita, (Qz): Cuarzo, (MnO): Óxidos de manganeso, (Lav): Lavendulana, (Plg): Plagioclasa. C. Rechazo pulido de la muestra FIC-PL-M28.....58

Figura 50. A. Dique pórfido microdiorítico alojado en un afloramiento de andesita con alteración clorítica B. Dique aplítico hospedado en la unidad intrusiva.....60

Figura 51. A. Fotografía satelital de Google earth, el distrito Pampa Larga es delimitado en el recuadro rojo, en color azul se destaca la falla normal más extensa del área. Esta misma se extiende por varios kilómetros en los sectores cercanos. A su derecha se muestra una fotografía en el sector sureste del área de estudio, donde es posible ver claramente el plano de falla. B. Fotografía satelital de Google earth pro enfocada en el sector este del distrito, en ella es posible observar una falla sinistral normal que desplaza dos bloques de andesita estratificada, esta falla se encuentra

aledaña a vetas con importante mineralización en ciertos puntos. C. Criterio cinemático “estructura de árbol” presente en una falla muy localizada en el área, se caracteriza por un relleno calcáreo con cloritización. D. Criterio cinemático “Sigmoide” perteneciente a la falla siniestral normal mencionada anteriormente, esta estructura se encuentra al interior de una labor minera. E. Criterio cinemático “Estrías de falla” aledañas a una veta/falla de baritina con mineralización de cobre en un afloramiento de andesita.....61

Figura 52. A Veta de baritina con mineralización diseminada de óxidos y carbonatos de cobre. B. Veta de baritina con mineralización de óxidos y arseniatos de cobre. C. Veta óxidos y arseniatos de cobre D. Veta de arsénico E. Veta de baritina con mineralización de carbonatos de cobre F. Vetas de óxidos de manganeso G. Veta de baritina sin mineralización económica. H. Veta de arsénico rica en cobre, plata y oro.....62

Figura 53. A. Diagrama de roseta que representa la distribución de rumbos estructurales medidos en el área. Se observa una concentración predominante entre 290°–310°, acompañada por agrupaciones secundarias cercanas a 170° y 280°. B. Proyección estereográfica en hemisferio inferior que muestra la densidad de polos a planos correspondientes a las estructuras registradas. La concentración máxima alcanza un 12,63 % en el cuadrante suroeste, indicando un predominio de estructuras subverticales con orientación WNW–ESE a NW–SE, junto con una densidad secundaria en el cuadrante oriental.....63

Figura 54. Mapa de ubicación de las 48 muestras geoquímicas recolectadas en el distrito Pampa Larga. Las muestras se distribuyen en torno a las principales vetas y labores mineras, tanto en el flanco occidental como en el flanco oriental del distrito.....64

Figura 55. Diagramas de caja (box plots) de los elementos mayores en muestras del distrito minero Pampa Larga. Se muestran los rangos de concentración (%), valores centrales, distribución intercuartílica y presencia de valores atípicos de SiO₂, Al₂O₃, Fe, MgO, CaO, K₂O y P₂O₅.....65

Figura 56. Diagramas de Harker de los elementos mayores Al₂O₃, Fe, MgO, CaO, K₂O y P₂O₅ en función del contenido de SiO₂ (%) en muestras del distrito minero Pampa Larga. Cada gráfico incluye una línea de tendencia lineal, con un área sombreada que representa la dispersión de los datos respecto de dicha tendencia.....66

Figura 57. Diagramas de caja (box plots) de las concentraciones de Cu, Zn, Pb, Fe, Ba, Mn y Sr en muestras del distrito minero Pampa Larga. Los valores se representan en escala logarítmica, mostrando rangos de concentración, medianas, cuartiles y valores atípicos. El Fe se expresa en porcentaje (%), mientras que los demás elementos en ppm.....68

Figura 58. Diagramas binarios de los pares de elementos Cu–Zn, Pb–Zn, Fe–Cu y Ba–Mn en muestras del distrito minero Pampa Larga. Las líneas de tendencia se acompañan de áreas sombreadas que representan la dispersión de los datos respecto de cada ajuste.....68

- Figura 59.** Diagramas de caja (box plots) de las concentraciones de Au y Ag en muestras del distrito minero Pampa Larga. Se muestran los valores mínimos, máximos, cuartiles, mediana y valores atípicos.....69
- Figura 60.** Diagrama binario Au–Ag en muestras del distrito minero Pampa Larga. La línea de tendencia representa la relación estadística entre ambos elementos, y el área sombreada corresponde a la dispersión de los datos respecto del ajuste.....69
- Figura 61.** Diagramas de caja (box plots) de las concentraciones de As, Sb y Mo en muestras del distrito minero Pampa Larga. Se observa una amplia dispersión, en especial en As y Sb, con valores anómalos puntuales.....70
- Figura 62.** Mapas de anomalías geoquímicas de Cu, Ba, Au, Ag, As y Sb en el distrito minero Pampa Larga. La simbología circular representa los rangos de concentración definidos para cada elemento, indicados en la escala respectiva.....72
- Figura 63.** Mapa geológico del distrito minero Pampa Larga. Simplificado.....75
- Figura 64.** A la derecha se propone un modelo estructural basado en el experimento de Riedel (1929) adaptado al distrito minero Pampa Larga, construido a partir de los rumbos estructurales medidos en terreno como los que se evidencian en las fotografías que acompañan al modelo.....76
- Figura 65.** Representación esquemática de las etapas iniciales del sistema epitermal en el distrito Pampa Larga. A. Exsolución de fluidos mineralizantes desde una cámara magmática alojada a nivel cortical medio. Los fluidos ricos en volátiles (H_2O , CO_2 , H_2S , SO_2 , Cl^-) y metales (As, Sb, Cu, Au, Ag) se comienzan a separar en fases líquida y vapor, constituyendo la fuente primaria del sistema hidrotermal. B. Representación de una diferenciación magmática y cristalización fraccionada en profundidad previo a los eventos de ebullición hidrotermal.....78
- Figura 66.** Evidencia del ascenso estructural de fluidos hidrotermales y reactivación tectónica en el distrito Pampa Larga. A. Representación conceptual del ascenso de soluciones hidrotermales por estructuras subverticales reactivadas, donde la interacción fluido–roca y el control estructural definen la arquitectura del sistema (modificado de Sillitoe, 2010). B. Estrías de falla en la roca de caja de la veta principal de la mina Alacrán. Se observan dos direcciones principales: una estría horizontal que indica componente de transcurrencia, y una estría inclinada que sugiere movimiento oblicuo–normal, compatibles con un régimen transtensional. C. Evidencia de desplazamiento oblicuo en una falla menor reactiva. La traza de falla (líneas azules) rellena de yeso corta y desplaza vetillas secundarias de la veta principal de Descubridora (líneas punteadas naranjas), lo que indica múltiples pulsos tectónicos y superposición de eventos estructurales en el sistema.....80
- Figura 67.** Representación esquemática y fotografías de campo asociadas a la etapa de ebullición hidrotermal y precipitación mineral súbita en el distrito Pampa Larga. A la izquierda, se observa un corte conceptual donde vetas subverticales alcanzan niveles someros, generando un halo argílico blanco en contacto directo con las vetas, y un halo propilítico verdoso más distal, de las estructuras mineralizadas A. Veta brechada con halo argílico perteneciente a la mina Alacrán. B. Fotografía panorámica que muestra la zonación de alteración en superficie, donde la argílica aparece inmediatamente

asociada a la veta explotada, y la clorítica más alejada, siguiendo el patrón de zonación lateral típico de sistemas epitermales de alta sulfuración.....82

Figura 68. Esquema conceptual que ilustra la exhumación tectónica y la erosión progresiva de un sistema epitermal. La erosión elimina la zona lixiviada superior, dejando expuestas vetas con mineralización hipógena y zonas de oxidación directamente en superficie. La tectónica compresiva favorece el ascenso de bloques con vetas mineralizadas, lo cual genera un perfil truncado típico de sistemas epitermales erosionados, como se observa actualmente en el distrito Pampa Larga....84

Figura 69. Representación esquemática del proceso de oxidación de sulfuros en condiciones meteóricas. La infiltración de aguas meteóricas oxigenadas genera ácido sulfúrico mediante la oxidación de pirita, lo cual da lugar a la disolución de sulfuros metálicos y a la movilización descendente del cobre en etapas posteriores. Esta zona se encuentra mayoritariamente erosionada en el distrito Pampa Larga.....85

Figura 70. Evidencias de procesos de oxidación supérgena avanzados en el distrito Pampa Larga. (Izquierda) Esquema representativo de la formación de gossans ferruginosos sobre cuerpos sulfurados menores, donde la oxidación meteórica de sulfuros genera fluidos ácidos y ricos en Fe^{3+} (círculos azules) y Mn^{4+} (círculos morados), favoreciendo la precipitación secuencial de jarosita (Jar), goetita (Ght) y hematita (Hem), en función del pH y Eh del sistema. A. Afloramiento con goetita irisada masiva y hematita secundaria, sin relación directa con vetas principales, típico de zonas localmente oxidadas sobre el plutón Pampa Larga. B. Muestra de limonita ferruginosa que conserva relictos de pirita (Py) parcialmente transformados en jarosita (Jar), indicando un proceso de oxidación parcialmente incompleto en superficie....87

Figura 71. Modelo integrado de zonación vertical y ejemplos representativos de la sucesión mineralógica observada en las vetas del distrito Pampa Larga (Basado en Robb, L. J; 2005). A la izquierda se muestra un corte conceptual de una veta de baritina de potencia constante idealizada que asciende desde el subsuelo hasta aflorar en superficie; en profundidad la roca de caja contiene abundante pirita diseminada, mientras que hacia arriba se desarrolla un gradiente oxidativo (tonos verdes) asociado a infiltración meteórica. A. Zincolivenita. B. Conicalcita. C. Azurita y olivenita. D. Arsénico nativo. E. Arsénico nativo opaco. F. Tennantita rica en arsénico. G. Pirita y calcopirita. H. Estibina.....88

Figura 72. Matriz de Pearson para los elementos Cu, Zn, Pb, Fe, Ba, Mn y Sr. Los coeficientes reflejan la intensidad y dirección de la asociación lineal entre cada par de elementos. El gradiente de colores indica la magnitud de la correlación (valores positivos en tonos cálidos y negativos en tonos fríos). Todas las concentraciones se expresan en ppm, excepto el Fe, que se reporta en porcentaje por tratarse de un elemento mayor.....92

Figura 73. Matriz de correlación de Pearson entre Au, Ag, As, Sb y Mo en el distrito Pampa Larga. Los coeficientes reflejan la intensidad y dirección de la asociación lineal entre cada par de elementos. El gradiente de colores indica la magnitud de la correlación (valores positivos en tonos cálidos y negativos en tonos fríos). Todas las concentraciones están expresadas en ppm.....94

Figura 74. Modelo metalogénico propuesto para el distrito Pampa Larga. Representa la evolución del sistema hidrotermal desde la acumulación de fluidos en la cámara magmática, el colapso del sistema por sobrepresión, la separación de fases y el fraccionamiento de metales, hasta la migración a través de estructuras reactivadas, la precipitación mineral y la evolución supérgena. Las ilustraciones laterales muestran ejemplos de vetas bandeadas, brechadas y tardías con baritina, representativas de distintos pulsos del sistema mineralizante. Elaboración propia. La posición de la transición frágil-dúctil se ha ubicado en temperaturas ~400°C, y a 2 km de profundidad (e. g. Fournier, 1991; Nielson *et al.*, 1999).....99

Figura 75. Diagrama de dispersión CaO vs SiO₂ para las muestras FIC-PL-M18, FIC-PL-M31 y FIC-PL-M32 de la unidad metamórfica, indicando la línea de relación ideal CaO:SiO₂ = 1:1 y la franja de tolerancia comercial (±10%) aceptada para wollastonita industrial. Solo las muestras situadas dentro de este rango cumplen con los requisitos de pureza y composición definidos por la industria internacional (Harben & Kuzvart, 1996; Roskill, 2018; U.S. Geological Survey, 2023).....102

Figura 76. Contenidos de impurezas (Fe, MgO, Al₂O₃, Mn, As) en las muestras FIC-PL-M18, FIC-PL-M31 y FIC-PL-M32 de la unidad metamórfica, comparados con los valores máximos permitidos para wollastonita comercial según Harben & Kuzvart (1996) y Roskill (2018). Se observa que únicamente las muestras con impurezas bajo estos límites presentan viabilidad para uso industrial, resaltando la importancia del control de calidad mineralógico en la potencial explotación del recurso.....102

Figura 77. Algunos minerales de colección presentes en Pampa larga. A. Zincolivenita (Veta Negra). B. Ludlockita (Veta Negra). Picrofarmacolita (Alacrán). Las fotografías macro fueron obtenidas utilizando una cámara Canon EOS (APS-C), con un lente Canon EF 50mm f/1.8 STM montado en reversa mediante un anillo inversor de 58 mm, y una combinación de anillos de extensión automáticos (Meike). Esta configuración permitió alcanzar un campo de visión efectivo de hasta 02 mm.....105

Figura 78. Sectores recomendados para la aplicación de métodos geofísicos (IP, ERT y magnetometría) en el distrito Pampa Larga. En rojo se delimita el polígono correspondiente a las minas María Catalina y Veta Negra, mientras que en azul se señala el polígono del sector Hornitos. Ambas áreas representan zonas prioritarias para detectar la continuidad en profundidad de vetas y estructuras mineralizadas.....107

Índice de tablas

Nº de página

Tabla 1. Resumen estadístico de las concentraciones de Cu, Zn, Pb, Fe, Ba, Mn y Sr en muestras del distrito minero Pampa Larga. Se presentan los valores mínimos, medianas, máximos, medias y desviaciones estándar.....67

Tabla 2. Parámetros estadísticos descriptivos de las concentraciones de As, Sb y Mo en muestras del distrito minero Pampa Larga. Se presentan los valores mínimos, medianas y máximos obtenidos para cada elemento, expresados en ppm.....70

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La región de Atacama, en el norte de Chile, posee una larga tradición minera donde la pequeña minería ha sido clave en la explotación de yacimientos de cobre, oro, plata y hierro (Ramírez, 2023; Townley *et al.*, 2017; Valderrama *et al.*, 2015). Este sector, de operaciones limitadas en escala y recursos, ha permitido aprovechar depósitos de alta ley y dimensiones acotadas, muchas veces fuera del interés de proyectos de mayor envergadura.

En este contexto, el distrito Pampa Larga destaca por su historia productiva y por la variedad de minerales presentes en antiguas faenas hoy inactivas. Aunque conserva afloramientos con evidencias de mineralización relicta, gran parte de la información disponible es fragmentaria y de calidad variable, dificultando una visión integrada de su potencial. La actualización y sistematización de este conocimiento se vuelve esencial para orientar futuras evaluaciones y fortalecer la sostenibilidad de la pequeña minería en la región.

1.1 Problema de investigación

El distrito minero Pampa Larga, actualmente abandonado, carece de un mapa geológico actualizado y de detalle, así como de una caracterización mineralógica y geoquímica que permita comprender con precisión sus unidades, asociaciones de alteración y patrones de mineralización. La información disponible es fragmentaria y heterogénea, lo que impide establecer un modelo geológico confiable. Abordar este vacío resulta esencial, ya que el distrito conserva afloramientos con evidencias de mineralización relicta que podrían representar un potencial de interés para la pequeña minería en la región de Atacama, además de aportar al entendimiento de los procesos metalogénicos cretácicos en la Cordillera de la Costa. En caso de no generarse esta información, el distrito seguirá relegado y con altos niveles de incertidumbre técnica, dificultando una eventual revalorización económica y aumentando los riesgos de prácticas extractivas ineficientes o ambientalmente insustentables.

1.2 Hipótesis

La integración de la caracterización litológica, mineralógica, estructural y geoquímica multielemental del distrito Pampa Larga permitirá definir un modelo metalogénico multiepisódico que explique la distribución y zonación de los cuerpos vetiformes polimetálicos. Se espera que esta integración revele relaciones claras entre las estructuras tectónicas y la concentración de minerales polimetálicos, facilitando la evaluación del potencial exploratorio del distrito. La hipótesis se fundamenta en conocimientos previos de sistemas epitermales híbridos y en la relevancia del control estructural en la localización de la mineralización.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Establecer un modelo metalogénico para el distrito minero Pampa Larga.

Objetivos específicos

- Caracterizar las unidades litológicas, estructuras geológicas y tipos de alteración presentes en el área.
- Evaluar el control estructural de la mineralización, determinando su relación con las fallas, vetas y otras estructuras geológicas que han influenciado en la distribución de los cuerpos mineralizados.
- Determinar y cuantificar la concentración de elementos traza presentes en la muestras extraídas del distrito.
- Determinar el potencial económico del distrito minero Pampa Larga.

1.4 Ubicación y accesos

El área de estudio corresponde al distrito minero Pampa Larga, situado geomorfológicamente en la pampa ondulada o austral de la región de Atacama. Administrativamente, se encuentra al sureste de la comuna de Tierra Amarilla, provincia de Copiapó.

El acceso desde el campus central de la Universidad de Atacama implica tomar la Av. Copayapu/Panamericana Norte/Ruta 5 y continuar por aproximadamente 10.6 km en

dirección a Tierra Amarilla. Posteriormente, se sigue por la ruta C-35 durante 4,3 km hasta alcanzar la salida hacia Costanera, avanzando 350 metros adicionales. Continuando por la Av. Costanera Margarita Rocco, se recorren 2,5 km hasta una rotonda, donde se toma la primera salida hacia la ruta C-35, que se sigue por 10,4 km más. Finalmente, se gira a la izquierda hacia la ruta C-33 y se avanza 10,1 km. El área de estudio se localiza a la izquierda del camino principal (C-33), con dos opciones principales de ingreso: la ruta C-405 como primera alternativa y, 6,2 km adelante, la ruta C-523. Para esta última, se recomienda el uso de vehículos con tracción 4x4 o realizar el acceso a pie (figura 1). A continuación, se proporciona un enlace de Google Maps para facilitar la navegación desde dispositivos con GPS: <https://maps.app.goo.gl/NEemkVjsqo3dJup38>.

La extensión territorial total del área de estudio es de aproximadamente 19 km². En su mayor parte, la movilidad dentro del terreno se realiza a pie debido a las condiciones topográficas, que presentan elevaciones entre los 790 ms.n.m. en los puntos más bajos y los 1.300 ms.n.m. en las crestas de los cerros más altos. Sin embargo, en el interior del área existen caminos no asfaltados en condiciones regulares que permiten la movilidad vehicular hasta ciertos puntos. Estas características orográficas determinan que los puntos de entrada más viables sean desde el costado occidental del área.

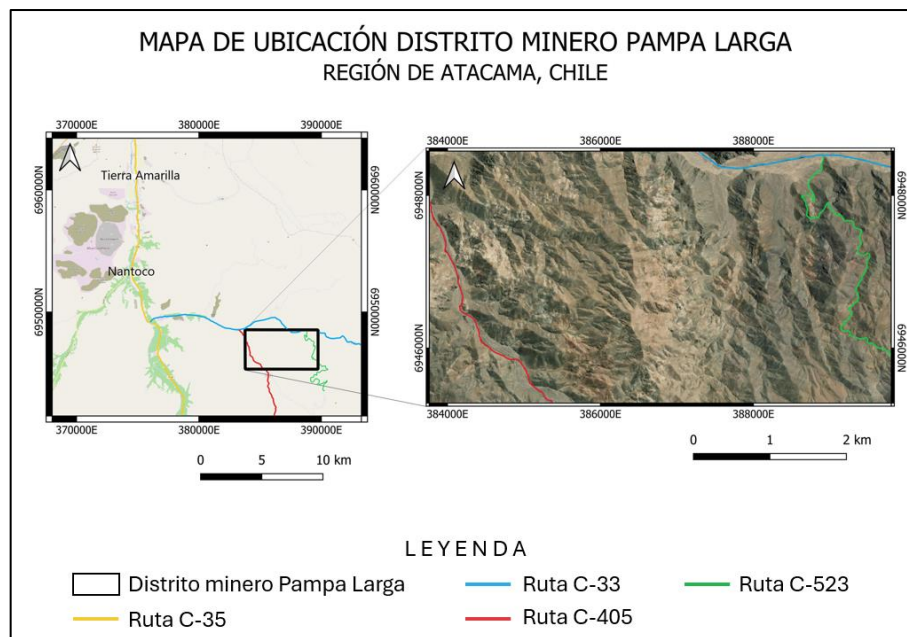


Figura 1. Mapa de ubicación y accesos al distrito minero Pampa Larga.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Yacimientos epitermales

Los yacimientos epitermales son depósitos minerales formados por soluciones hidrotermales a profundidades someras (generalmente < 2 km) y temperaturas bajas a moderadas (150–300°C), asociados a sistemas volcánicos y magmáticos en ambientes de arco continental e insular (Sillitoe, 2010; Hedenquist *et al.*, 2000). Estos depósitos se caracterizan por su variabilidad en estilos de mineralización, controles estructurales y asociaciones de alteración hidrotermal, siendo fundamentales en la explotación de metales preciosos (Au, Ag) y base (Cu, Pb, Zn) (Simmons *et al.*, 2005).

2.1.1 Clasificación de los depósitos epitermales

Los depósitos epitermales se clasifican tradicionalmente en tres grupos principales según la composición química de los fluidos mineralizantes, su mineralogía característica y las condiciones fisicoquímicas de formación. Estas categorías comprenden los depósitos de alta sulfuración (HS), sulfuración intermedia (IS) y baja sulfuración (LS) (Einaudi *et al.*, 2003; Sillitoe & Hedenquist, 2003). Cada tipo refleja una interacción variable entre fluidos hidrotermales de origen magmático y meteórico, controlando los patrones de alteración, la mineralogía de mena y el ambiente geológico de emplazamiento. A continuación, se detallan las generalidades que caracterizan y clasifican estos depósitos.

- **Depósitos epitermales de alta sulfuración (HS)**

Los depósitos epitermales de alta sulfuración se generan en contextos magmáticos fuertemente oxidados, donde los fluidos ascendentes están enriquecidos en especies sulfuradas como dióxido de azufre (SO₂), generando una intensa acidificación del sistema debido a la formación de ácido sulfúrico por oxidación y disociación en la zona de condensación. Esta condición favorece procesos de lixiviación ácida, que producen un espectro distintivo de alteración avanzada, frecuentemente en forma de zonas masivas de sílice residual (alteración vuggy sílica), acompañadas por minerales como alunita, caolinita, dickita y pirofilita (figura 2) (Hedenquist *et al.*, 1998). Este tipo de alteración puede llegar a obliterar completamente la textura original de la roca huésped, formando un núcleo de alteración intensiva que sirve como vector exploratorio clave.

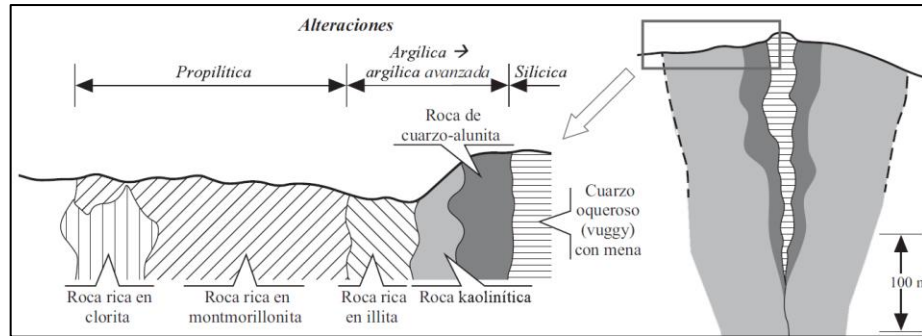


Figura 2: Diagrama de zonación de alteración en un sistema epitermal HS, mostrando la transición desde la zona de lixiviación ácida (vuggy sílica) hasta la periferia propilitica (adaptado de Hedenquist et al., 2000). La mineralización típica incluye sulfuros y sulfosales de cobre y arsénico como enargita, luzonita y covelina, en asociación con piritita, oro nativo y minerales subordinados de plata (Arribas, 1995). En profundidad o en etapas tardías, pueden desarrollarse asociaciones de bornita y calcopirita. Estos depósitos suelen ubicarse sobre o en proximidad a domos dacíticos, calderas colapsadas o centros volcánicos activos, donde se favorecen los procesos de ebullición, condensación de vapores y circulación de fluidos descendentes. Ejemplos paradigmáticos incluyen El Indio (Chile), Yanacocha (Perú), y Lepanto (Filipinas), los cuales han sido ampliamente utilizados como modelos de referencia para la exploración en arcos magmáticos andinos (Sillitoe, 2010).

- **Depósitos epitermales de sulfuración intermedia (IS)**

Los depósitos de sulfuración intermedia representan un estilo híbrido, intermedio tanto en condiciones químicas como mineralógicas, entre los sistemas de alta y baja sulfuración (figura 3). Su origen se atribuye a la mezcla de fluidos magmáticos ascendentes con aguas meteóricas más frías, lo que genera condiciones de pH moderadamente ácido a neutro, favoreciendo el desarrollo de zonas de alteración argílica intermedia. Esta alteración se caracteriza por la presencia de minerales como illita, esmectita, sericita y clorita, en ausencia de sílice masiva, aunque puede haber cuarzo en vetillas (Simmons *et al.*, 2005).

La mineralogía de mena es más diversa que en los sistemas HS, incluyendo sulfuros y sulfosales como esfalerita, galena, piritita, enargita, famatinita y en ocasiones electrum. La presencia de elementos como plomo, zinc y plata puede ser significativa, lo que otorga a estos depósitos un carácter polimetálico. Geológicamente, se ubican en zonas de transición estructural o tectónica, donde coinciden influencias volcánicas, intrusivas y

meteóricas (Seedorff *et al.*, 2005). Entre los ejemplos más citados están los depósitos de Fresnillo (México), conocidos por su contenido de plata, y Hishikari (Japón), un sistema epitermal con vetas de alta ley alojadas en rocas volcánicas y sedimentarias.

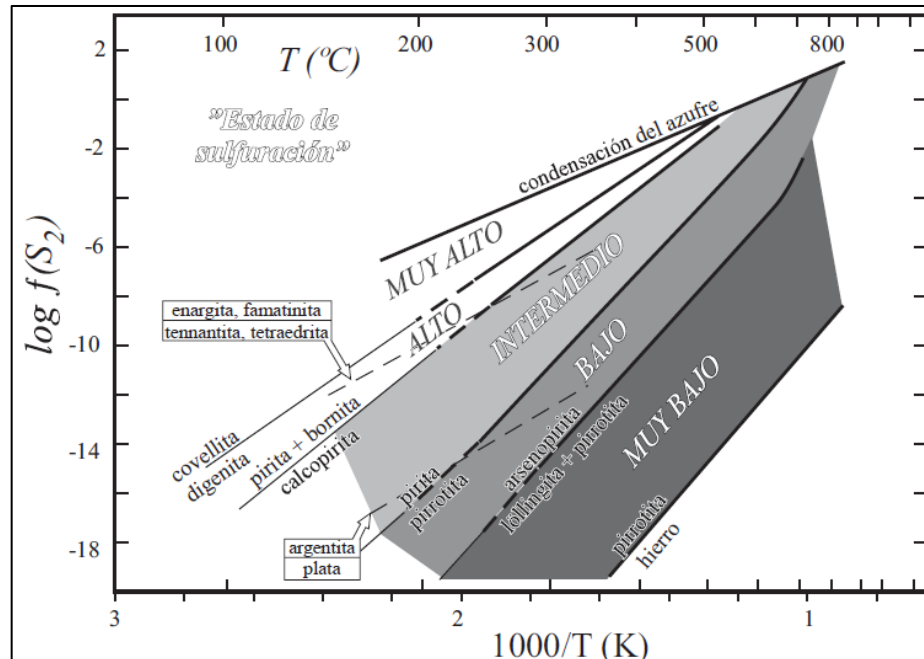


Figura 3. Diagrama de correlación entre temperatura y fugacidad de azufre para los estados de sulfuración relativos de los fluidos hidrotermales en el ámbito de depósitos metalíferos en pórfidos y epitermales, definidos según los campos de estabilidad de minerales clave. Adaptado de Einaudi *et al.* (2003). Las reacciones de sulfuración fueron tomadas de Barton y Skinner (1979).

- **Depósitos epitermales de baja sulfuración (LS)**

Los sistemas epitermales de baja sulfuración se desarrollan en condiciones químicas más neutras a ligeramente alcalinas, dominadas por la circulación descendente de aguas meteóricas recalentadas, con mínima participación de componentes magmáticos volátiles. Este ambiente favorece la formación de minerales como sericita, adularia, calcita, clorita y sílice colofome, dispuesta comúnmente en bandas crustiformes a lo largo de vetas abiertas (Henley & Berger, 2011). También pueden generarse zonas con sílice calcedónica y rellenos botroidales de carbonatos, característicos de los sistemas de deposición por ebullición y mezcla de fluidos.

Estas características pueden ser entendidas en el contexto de los distintos tipos de depósitos epitermales relacionados con procesos de ebullición a diferentes profundidades, tal como se ilustra en la figura 4

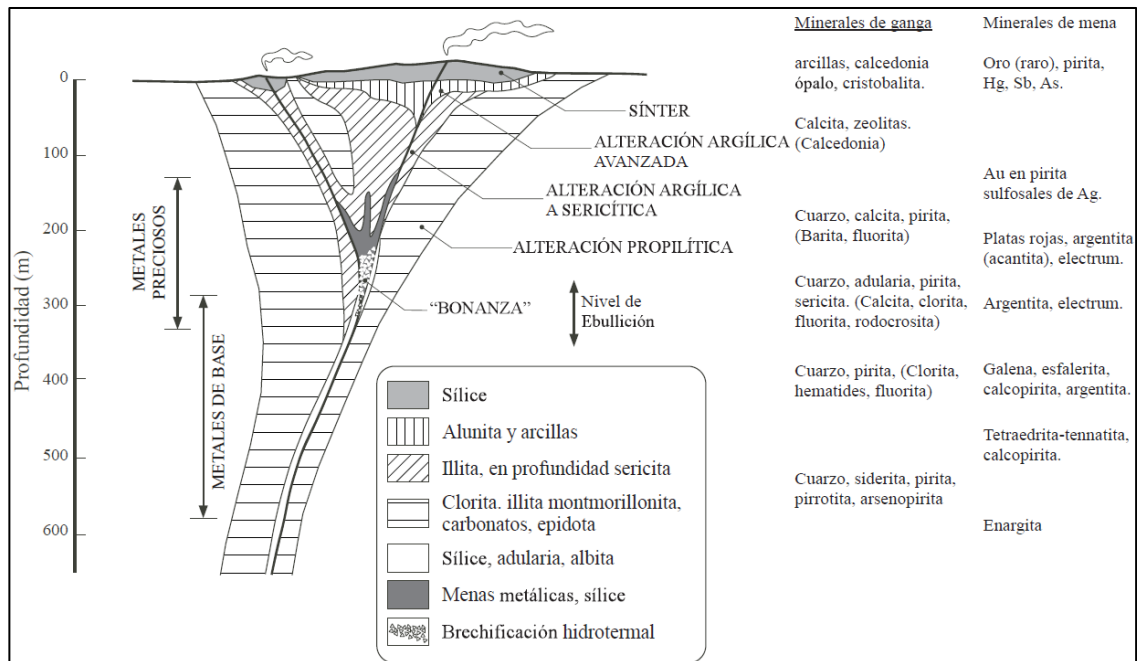


Figura 4: Esquema estructural general de los depósitos epitermales alcalinos (baja e intermedia sulfuración), modificado de Buchanan (1981), indicando la mineralogía de ganga, la generalización de los patrones de alteración típicos, y la variación en la mineralogía de mena típica en profundidad, y en la morfología de la mineralización. Ello incluye la distribución del sínter formado in situ, y la superposición de la alteración argílica avanzada derivada de vapores liberados por ebullición en profundidad. La extensión lateral y volumen de las aureolas de alteración depende, en gran manera, de la presencia de litologías permeables; debido a ello, la morfología y extensión de los halos puede variar desde el orden decimétrico hasta el hectométrico, inclusive dentro de un mismo depósito.

La mineralización está dominada por oro y plata en forma de vetas de cuarzo, con texturas bandeadas, laminadas o crustiformes-coloformes, indicativas de múltiples pulsos de precipitación hidrotermal. Es común observar electrum y sulfuros subordinados como pirita, además de sulfosales y telururos en algunos casos. Estos sistemas se desarrollan típicamente en zonas extensionales con vulcanismo riolítico, calderas colapsadas o estructuras con alta permeabilidad vertical (Sillitoe, 2010). Ejemplos bien documentados son Round Mountain (EE. UU.) y Cerro Vanguardia (Argentina), ambos explotados por su alto contenido aurífero.

2.1.2 Metalogénesis de los depósitos epitermales

La formación de depósitos epitermales está intrínsecamente relacionada con sistemas magmático-hidrotermales desarrollados en contextos volcánicos activos, usualmente en las etapas finales de la evolución de un sistema porfídico. Estos depósitos se emplazan a temperaturas relativamente bajas (150–300 °C) y a profundidades someras (<2 km), siendo controlados por la interacción entre fluidos magmáticos ricos en volátiles y aguas meteóricas o de origen superficial (Sillitoe, 2010). Tal como se muestra en la figura 5, estos sistemas tienen su raíz en una cámara magmática en proceso de enfriamiento, la cual actúa como fuente de calor, fluidos y metales para el desarrollo de mineralizaciones tanto porfídicas como epitermales (modificado de Sillitoe, 1995a; Hedenquist & Lowenstern, 1994; Corbett & Leach, 1998).

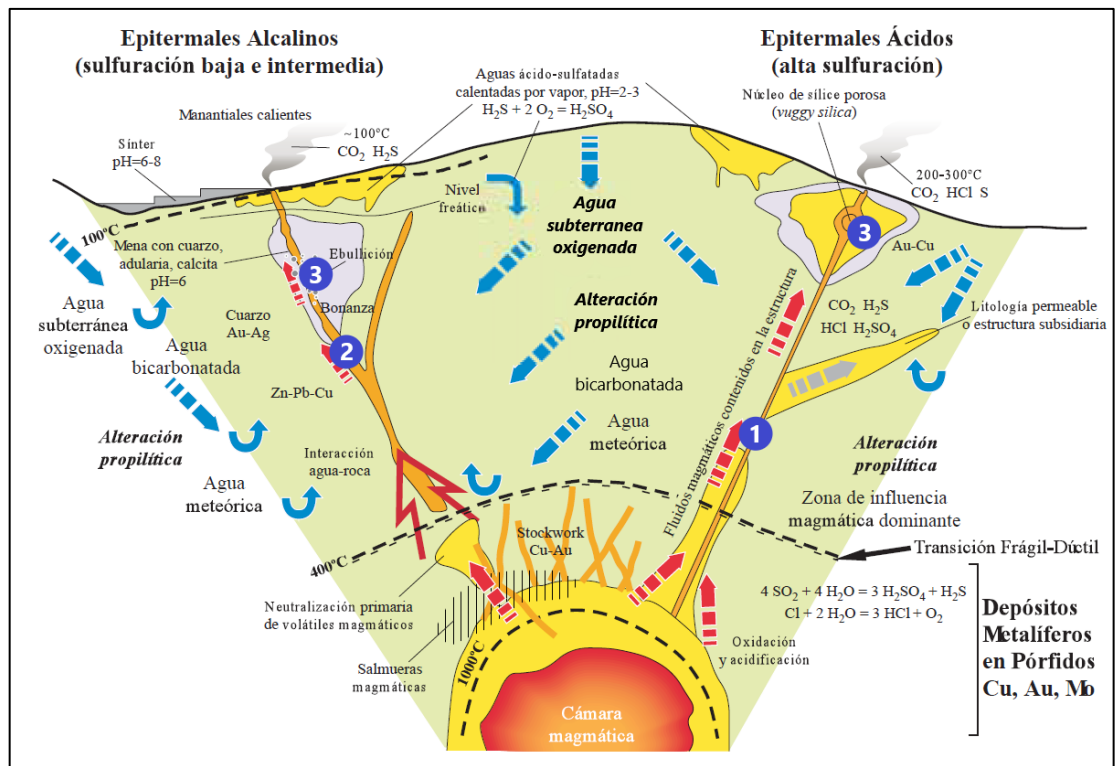


Figura 5: Esquema comparativo (no a escala) de la estructura, procesos, tipos de alteración, volátiles liberados, temperaturas, pH, tipos de fluidos y reacciones involucradas en la formación de los depósitos epitermales ácidos (alta sulfuración) y alcalinos (baja e intermedia sulfuración), y su relación con las rocas magmáticas como fuente de calor, fluidos y componentes químicos para estos depósitos, desde una cámara magmática en proceso de enfriamiento, la formación de depósitos metalíferos relacionados a pórfidos (cupríferos, auríferos, o molibdeníferos), hasta el ambiente epitermal (modificado de Sillitoe, 1995a; en base a los datos de Hedenquist y Lowenstern, 1994; Gammons y Williams-Jones, 1997; Corbett y Leach, 1998). La posición de la transición frágil-dúctil se ha ubicado en temperaturas ~400°C, y a 5-7 km de profundidad (e. g. Fournier, 1991; Nielson *et al.*, 1999).

Las etapas de alteración mineralización corresponde a una seguidilla de eventos metalogénicos a lo largo de millones de años, con diferentes pulsos hidrotermales que se emplazan en las rocas hospedantes. Para efectos prácticos estos se han dividido en 3 etapas, tal como se muestra espacialmente en la figura 5 y se detalla a continuación:

1. Ascenso de fluidos magmáticos oxidados:

En primer lugar, el proceso comienza con el ascenso de fluidos magmáticos oxidados, provenientes de una cámara magmática rica en volátiles tales como SO₂, HCl, CO₂ y H₂S (figura 5). Estos fluidos portadores de metales como Cu, Au, As y Sb migran a través de fracturas y zonas de debilidad estructural, interactuando con la roca encajante. Durante esta etapa, la desgasificación magmática da origen a condiciones de fuerte acidez (pH entre 2 y 3), promoviendo la lixiviación de elementos móviles y la formación de sílice residual, comúnmente en forma de núcleos de alteración vuggy silica, considerados rasgos diagnósticos de estos sistemas (Arribas, 1995; Hedenquist *et al.*, 1998). Esta etapa también genera zonas de alteración argílica avanzada, rica en minerales como caolinita, alunita y pirofilita.

2. Interacción con aguas meteóricas:

A medida que estos fluidos ascienden a niveles más superficiales, se produce una interacción progresiva con la roca de caja, aguas meteóricas y subterráneas oxigenadas. Esta mezcla genera cambios significativos en las condiciones fisicoquímicas del sistema, particularmente en la temperatura y el pH, lo que favorece la precipitación de sulfuros y óxidos metálicos (Simmons *et al.*, 2005) (figura 5). En ambientes donde se alcanza el punto de ebullición del fluido, se produce un fuerte desgasificado que contribuye adicionalmente a la sobresaturación de ciertos elementos, propiciando su precipitación.

3. Precipitación de minerales económicos:

Finalmente, la zona de mezcla y ebullición se convierte en un ambiente altamente favorable para la deposición de minerales económicos (figura 5). Es común observar la formación de vetas y brechas mineralizadas que contienen enargita, oro nativo, sulfosales de As-Sb, y ocasionalmente calcopirita o covelina, en función del régimen redox y del grado de neutralización del sistema (Seedorff *et al.*, 2005). Estas zonas suelen coincidir

con estructuras subsidiarias o litologías permeables que canalizan los fluidos hacia el nivel freático. En contraste, los sistemas epitermales de baja e intermedia sulfuración presentan una composición de fluidos menos ácida, pH más neutro (6–8) y una mineralogía diferente, dominada por cuarzo, adularia, calcita y sulfuros polimetálicos.

2.2 Yacimientos epitermales de alta sulfuración en Chile

Los yacimientos epitermales de alta sulfuración (HS) representan una clase metalogénica de gran relevancia en el contexto geológico y económico del norte y centro-norte de Chile. Estos depósitos están mayormente localizados entre las regiones de Arica y Parinacota y Coquimbo (figura 6), alineados a lo largo de la faja volcánica Paleógeno-Neógeno, un cinturón de actividad volcánica y volcanoplutónica que se desarrolló entre el Oligoceno superior y el Plioceno, como parte del magmatismo de arco asociado a la subducción activa bajo el margen occidental de Sudamérica (Sillitoe, 1999; Camus, 2003; JICA–SERNAGEOMIN, 1992).

Dentro de esta faja metalogénica destacan dominios estructurales como la Franja Maricunga - El Indio, una zona con notable concentración de sistemas epitermales HS, la cual se caracteriza por la presencia de centros volcánicos miocenos bien preservados, extensas zonas de alteración hidrotermal y una tectónica favorable para el emplazamiento de fluidos mineralizantes (Muntean & Einaudi, 2001). Esta franja ha sido históricamente una de las más prolíficas en cuanto a descubrimientos de oro y plata en Chile, contribuyendo significativamente al desarrollo del sector minero nacional.

Desde una perspectiva económica, los sistemas HS han jugado un rol fundamental en el auge de la minería aurífera chilena desde fines del siglo XX, no solo mediante grandes operaciones industriales, sino también como blanco de interés para iniciativas de pequeña minería y empresas junior de exploración, debido a su potencial de mineralización de alta ley en cuerpos subvolcánicos someros y brechas estructurales accesibles (Camprubí, 2013; Cooke *et al.*, 2005). Su distribución geográfica en zonas cordilleranas elevadas y su relación con secuencias volcánicas miocenas han permitido delinear zonas metalogénicas prioritarias, utilizadas actualmente como guías para nuevas campañas de exploración.

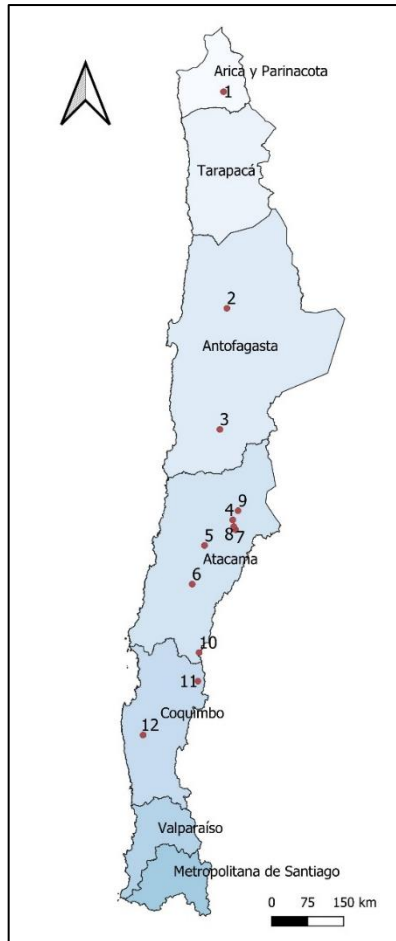
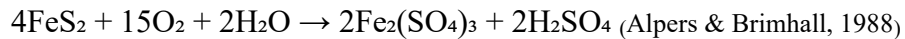


Figura 6. Distribución de los principales yacimientos epitermales HS en Chile. 1. Cerro Marqués (Arica y Parinacota); 2. Cerro Dominador (Antofagasta); 3. El Guanaco (Antofagasta); 4. La Coipa (Atacama); 5. Ladera Farellón (Atacama); 6. Cerro Blanco (Atacama); 7. Cerro Maricunga (Atacama); 8. Santa Teresa (Atacama); 9. Nueva Esperanza (Atacama); 10. Pascualama (Coquimbo); 11. El indio (Coquimbo); 12. Tambo de oro (Coquimbo)

2.3 Procesos de oxidación y enriquecimiento supérgeno

Tras la formación inicial de sulfuros primarios en ambientes hipógenos (2-4 km de profundidad), los sistemas mineralizados experimentan profundas transformaciones cuando son exhumados por procesos tectónicos y expuestos a condiciones supérgenas. Este fenómeno es particularmente relevante en el norte de Chile, donde el clima semiárido (30-40 mm/año de precipitación) y la prolongada exposición geológica (desde el Mioceno) han generado perfiles de alteración excepcionalmente desarrollados (Sillitoe, 2005; Hedenquist & Arribas, 1998).

El mecanismo fundamental comienza con la oxidación de la pirita (FeS₂), el sulfuro más reactivo, mediante la siguiente reacción global:



Esta reacción, catalizada por bacterias acidófilas como *Acidithiobacillus ferrooxidans* en ambientes naturales, genera soluciones extremadamente ácidas (pH 1-2) ricas en iones férricos (Fe³⁺) y sulfato (SO₄²⁻). La acidez producida (H₂SO₄) ataca otros sulfuros presentes en el sistema, como la enargita, calcopirita, bornita y magnetita, liberando tanto Cu como Fe. El hierro disuelto puede precipitar como óxidos e hidróxidos (hematita y goetita) en ambientes oxidados, mientras que el azufre liberado reacciona con el hierro y precipita como jarosita (Alpers & Brimhall, 1988; Nordstrom, 2011).

En la parte superior del perfil, se desarrolla un "Gossan" o "sombrero de hierro", caracterizado por una intensa oxidación y lixiviación de cobre, pero que permanece enriquecido en minerales como magnetita y óxidos de Fe, tal como se ilustra en la figura 7. En esta zona se pueden observar estructuras características como *boxworks*, que corresponden a moldes cúbicos dejados por la disolución de cristales de sulfuros primarios, principalmente pirita (Guilbert & Park, 1986).

El cobre movilizado desde las zonas superiores puede migrar hacia abajo junto con las soluciones ácidas y, en ambientes reductores presentes en niveles más profundos, precipitar como sulfuros secundarios tales como covelina (CuS) y calcosina (Cu₂S). Este enriquecimiento secundario da lugar a zonas con alta ley de cobre, y representa una etapa fundamental en la evolución económica de estos depósitos (Sillitoe, 2005; Mudd *et al.*, 2013).

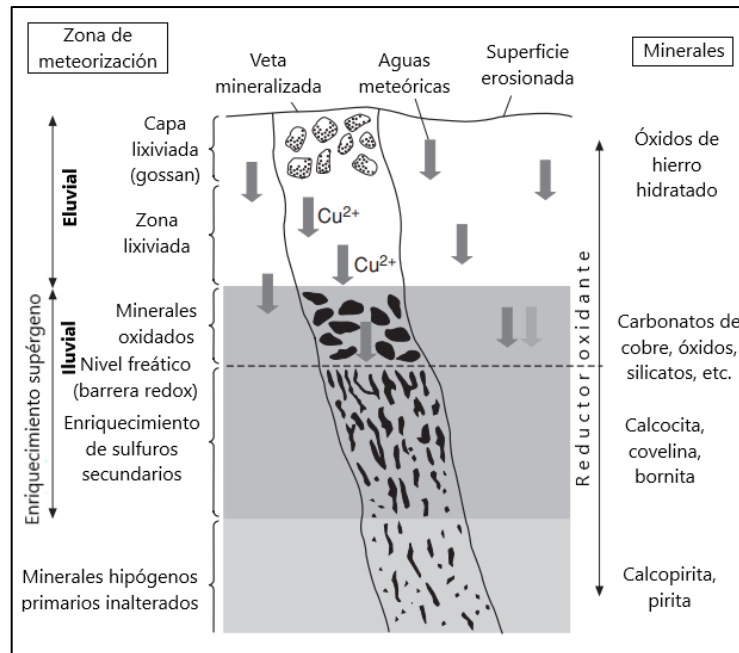


Figura 7. Corte esquemático de una veta con mineralización de cobre, la cual muestra el patrón típico de zonación vertical: una zona superior oxidada (zona eluvial o lixiviada), sobre una zona reducida de enriquecimiento secundario (manto supérgeno o zona iluvial). La parte más superficial está representada por el gossan, compuesto por material ferruginoso que puede conservar la morfología de los sulfuros originales. La barrera redox, que controla esta zonación, puede corresponder al nivel freático o a un amortiguador litológico (modificado de Robb, L. J; 2005).

Además, parte del cobre también puede precipitar en forma de sales secundarias como sulfatos (brochantita), carbonatos (malaquita) u óxidos (cuprita), dependiendo del pH y del potencial redox del ambiente (Hitzman *et al.*, 2005). En sistemas con condiciones semiáridas, donde la precipitación anual es limitada (30–40 mm/año), estos procesos pueden ocurrir con relativa eficiencia debido a la presencia de pequeñas pero persistentes infiltraciones meteóricas.

CAPÍTULO 3: MARCO GEOLÓGICO

La evolución geológica del distrito minero Pampa Larga es el resultado de una serie de eventos tectónicos, magmáticos y sedimentarios que han moldeado su geomorfología actual. Para comprender esta evolución en un contexto más amplio, a continuación, se presenta el marco geológico regional y un extracto de la carta geológica Los Loros (Arévalo, 2009) (figura 8) que sitúa al distrito dentro de las unidades estructurales y litológicas de la región de Atacama.

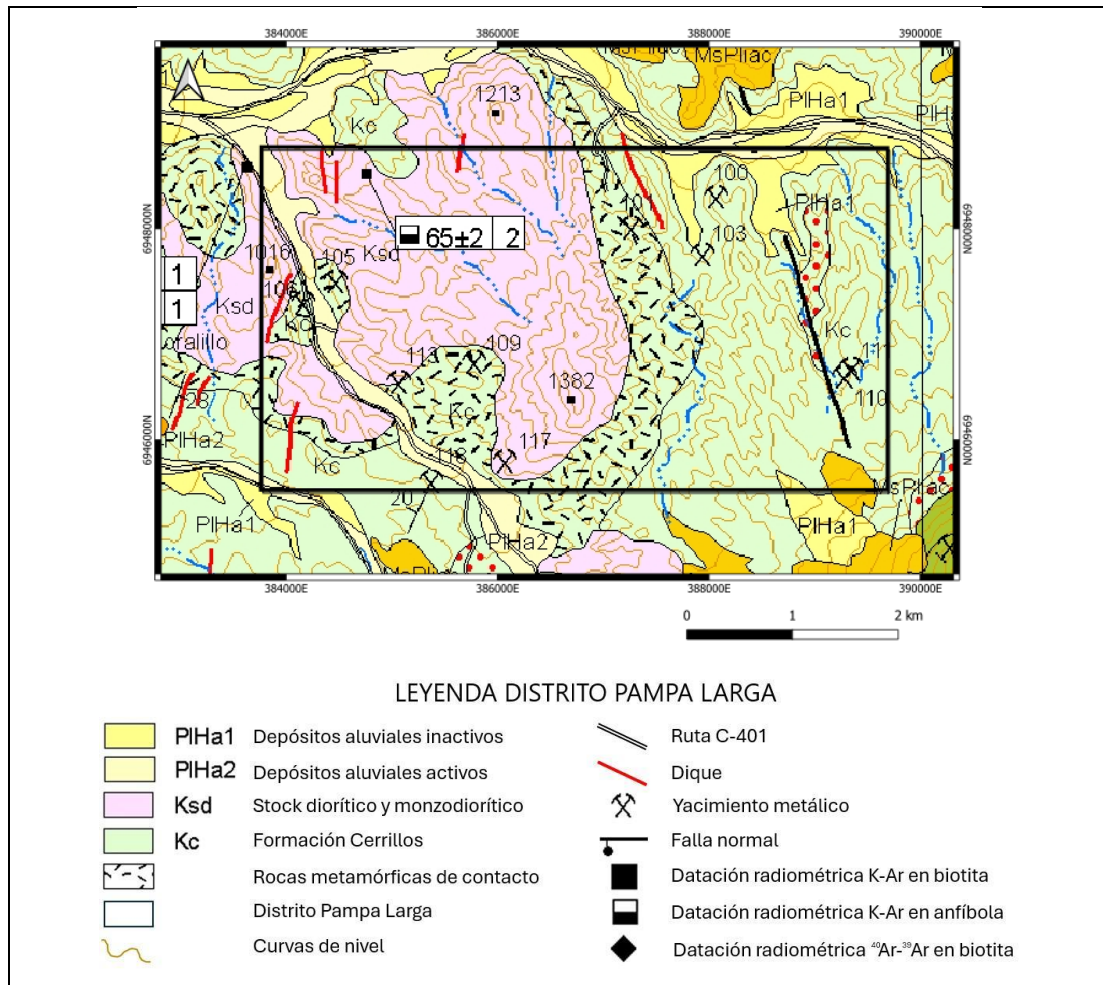


Figura 8. Mapa geológico regional para el distrito minero Pampa Larga. Modificado del mapa de la cuenca del río Copiapó: Carta Los Loros (Arévalo, 2009).

3.1 Unidades litológicas

La siguiente descripción de unidades está basada principalmente en la información presentada en la Carta Los Loros (Arévalo, 2009).

3.1.1 Formación Cerrillos [Kc]

Secuencia sedimentaria, volcánica y continental que yace en discordancia erosiva sobre la Formación Pabellón y un sill de pórfido diorítico. Esta formación está cubierta en discordancia angular por la Formación Hornitos. Su espesor varía entre 4.000 y 6.000 metros y se extiende en una franja NNE de unos 8 km de ancho desde el llano de Llampos hasta las proximidades de la quebrada Cachiyuyo.

La Formación Cerrillos se compone esencialmente de materiales clásticos. Su sección inferior, con un espesor de aproximadamente 2.300 metros, está formada por areniscas verde rojizas de grano medio a grueso con clastos andesíticos, presentando capas planas con gradación inversa-normal e intercalaciones de paraconglomerados. En el área de la Carta Copiapó, los 800 metros basales de estas areniscas fueron descritas originalmente como el Miembro Checo de Cobre, aunque la falta de continuidad de estos estratos impide darle la categoría de miembro estratigráfico en otras áreas.

La sección superior incluye un mínimo de 3.500 metros de paraconglomerados y brechas volcánicas, alternando con areniscas gris rojizas y lavas andesíticas y andesítico-basálticas, algunas de las cuales son amigdaloidales y brechas andesíticas autoclásticas. La formación Cerrillos no contiene fósiles de valor cronoestratigráfico, por lo que su edad se ha estimado indirectamente por la datación de las formaciones subyacentes y suprayacentes, así como de los intrusivos que la cortan. La edad mínima de la formación Pabellón es aptiana superior, y la formación Hornitos, que sobreyace a la formación Cerrillos, data del Campaniano - Maastrichtiano. Además, una edad U-Pb de 90.4 ± 0.5 Ma. obtenida en un pórfido de hornblenda sugiere que la formación Cerrillos se ubica temporalmente entre el Albiano y el Turoniano. Esta formación se correlaciona con los estratos de Sierra Alcota en la hoja Carrera Pinto. (Segerstrom y Parker, 1959).

3.1.2 Stock diorítico y monzodiorítico [Ksd]

Serie de intrusivos de extensión limitada (1 a 20 km de exposición) y geometría variada (stocks, cuerpos irregulares, apófisis menores, diques y filones mantos) que intruyen la formación Cerrillos. Estos afloramientos se encuentran en una franja nornoreste, desde la quebrada de Paipote hacia el sur, extendiéndose hacia la carta Los Loros.

Petrográficamente, estos intrusivos están formados por dioritas, pórfidos dioríticos y monzodioritas subordinadas con clinopiroxeno (frecuentemente uralitizado y cloritizado), hornblenda y biotita ocasional, de grano fino a medio y de color verde oscuro. Estas rocas desarrollan silicificación y argilización en las rocas huéspedes. Las edades de estos intrusivos varían desde el Cretácico Superior, con edades Ar/Ar y K-Ar en diferentes muestras que van desde 86.5 ± 0.8 Ma a 64 ± 8 Ma., indicando una prolongada actividad intrusiva en la región. (Arévalo, 2005).

3.1.3 Depósitos aluviales inactivos [PIHa1]

Depósitos de materiales no cohesivos a medianamente consolidados, formados por clastos heterocomposicionales y subangulosos en una matriz limo arenosa. Estos depósitos, que constituyen los rellenos volumétricamente más importantes de quebradas y valles anchos como la quebrada Carrizalillo, son restos de antiguos eventos de sedimentación fluvial. (Arévalo, 2005).

3.1.4 Depósitos aluviales activos [PIHa2]

Depósitos compuestos principalmente por gravas y ripios no consolidados, caracterizados por una baja selección de materiales. Estos depósitos rellenan cursos disecados en depósitos aluviales más antiguos y se encuentran en constante cambio debido a la acción actual del agua. Las gravas y ripios son transportados y depositados por corrientes de agua, formando acumulaciones en cauces fluviales y áreas de inundación. Estos depósitos se distinguen por su falta de cohesión y su disposición temporal más reciente en el paisaje. (Arévalo, 2005).

3.2 Geología económica

Los antecedentes históricos sobre el distrito Pampa Larga han sido recopilados principalmente en los boletines y cartas geológicas del Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile publicados entre 1959 y 1966. Estas fuentes constituyen la base para la caracterización histórica del distrito, proporcionando información sobre las principales minas, sus parámetros estructurales y la mineralogía tanto hipógena como supérgena.

3.2.1 Mina Descubridora

La mina Descubridora constituye una de las principales estructuras mineralizadas del distrito Pampa Larga. Se emplaza en una veta de rumbo norte, con inclinaciones de 70°–85°O, que se extiende por cerca de 3 km y presenta espesores de 1,5–2 m, alojada principalmente en el intrusivo de Pampa Larga y localmente en rocas de la Formación Cerrillos. Las labores históricas alcanzaron profundidades cercanas a 100 metros, registrándose una mineralogía compuesta por baritina, calcita, hematita, limonita, antimonita, sulfosales de plata, argentita, cerargirita, plata nativa, arsénico, rejalgar y óxidos de manganeso, con fuerte desarrollo de enriquecimiento secundario (Parker *et al.*, 1963). Posteriormente, Bowes *et al.* (1966) destacaron la plata como principal producto, acompañada de antimonita, arsenopirita y tetraedrita en la zona primaria, además de rejalgar, eritrina, minerales oxidados de cobre y torbernita, identificando además mineralización uranífera con torbernita y anomalías radiométricas de hasta 1,0 mr/hr.

3.2.2 Mina Alacrán

La mina Alacrán constituye una de las vetas más destacadas del distrito, emplazada en el flanco suroeste de la quebrada La Cortadera. De acuerdo con Parker *et al.* (1963), está compuesta por dos estructuras principales, con espesores combinados cercanos a 3 m y características de relleno de fisuras, alcanzando profundidades de explotación cercanas a 100 metros. La mineralogía descrita incluye baritina, calcita, hematita, cuarzo, antimonita, arsénico nativo, argentita, sulfosales de plata, galena, piritita, calcopirita y pechblenda, además de impregnaciones de piritita en la roca de caja.

Complementariamente, Bowes *et al.* (1966) señalaron que la veta principal alcanza espesores de 30 a 40 cm, mostrando un cambio mineralógico con la profundidad. En los

niveles superiores predominan rejalgar, oropimente, baritina y minerales oxidados de cobre, mientras que bajo los 42 metros se observan asociaciones de pirita, arsenopirita, calcopirita, galena, arsénico nativo, plata y antimonio, con cuarzo, baritina y calcita como ganga. También se documentaron pequeñas manifestaciones de uranio en forma de pechblenda diseminada en cuarzo asociado a antimonita, así como valores puntuales de radioactividad entre 0,1 y 0,2 mr/hr.

3.2.3 Mina María Catalina

La mina María Catalina corresponde a un cateo de plata emplazado en una veta de rumbo norte, con buzamientos de 70° a 80° hacia el oeste y espesores entre 40 y 70 cm, la cual se extiende por más de 270 metros en superficie y se aloja en rocas metamórficas cercanas al contacto con el plutón Pampa Larga (Parker *et al.*, 1963; Bowes *et al.*, 1966). Los trabajos descritos corresponden principalmente a una galería de 105 metros y chimeneas menores, limitados a la zona oxidada sin alcanzar mineralización sulfurada primaria. La mineralogía está dominada por baritina, calcita, cuarzo, eritrina, zeunerita, plata nativa, minerales secundarios de cobre y óxidos de manganeso, acompañados de torbernita en las salbandas de la veta. Las cajas presentan un fuerte blanqueamiento y caolinización. Diversos estudios radiométricos registraron valores de hasta 2,0 mr/hr en desmontes y zonas de fractura, lo que confirma la presencia de mineralización uranífera asociada (Bowes *et al.*, 1966).

3.2.4 Mina Veta Negra

La mina Veta Negra se ubica a 3 km al sureste de la confluencia de las quebradas Cerrillos y La Cortadera, desarrollada en una veta de rumbo N 86°E e inclinación de 60° a 70°N, con espesores variables entre 1 y 3 m, emplazada en un amplio sector de rocas metamórficas (Parker *et al.*, 1963). El laboreo principal corresponde a un túnel de más de 150 metros de longitud, conectado mediante un pique inclinado de más de 100 metros que sigue la mineralización, aunque se encuentra inundado desde los 80 metros de profundidad. A lo largo del túnel existen accesos secundarios hacia caserones ubicados sobre y bajo este, además de un gran caserón al final de la labor y dos vetas aproximadamente paralelas separadas por 3 a 4 m de roca estéril muy fracturada. La mineralogía descrita incluye baritina, hematita, limonita, cuarzo, antimonita, plata nativa,

argentita, querargirita, tetraedrita, arsenopirita, eritrina, óxidos de manganeso, yeso y minerales oxidados de cobre. La mayor parte de los trabajos bajo el túnel son sólo parcialmente accesibles, aunque la presencia de un gran desmonte sugiere una explotación intensa en el pasado. Según Bowes *et al.* (1966), en esta veta se registraron anomalías radiométricas equivalentes a hasta tres veces el nivel normal de radiación natural (*background*), lo que evidencia la presencia localizada de minerales uraníferos en el sistema.

3.2.5 Mina Jote

La mina Jote se localiza aproximadamente a 6 km al sureste de la confluencia de las quebradas La Cortadera y Cerrillos. Corresponde a una veta de rumbo general N 20°W, con inclinación cercana a 75°W y espesores de 20 a 40 cm, alojada en granodiorita en la parte suroriental del distrito (Parker *et al.*, 1963; Bowes *et al.*, 1966). La mineralogía descrita incluye baritina, limonita, antimonita, arsénico nativo, plata nativa, argentita, sulfosales de plata y calcopirita en menor proporción, además de minerales oxidados de cobre, yeso y óxidos de manganeso. Los trabajos históricos alcanzaron profundidades cercanas a 35 m, con labores en zig-zag siguiendo la estructura y pequeños rajos en superficie, aunque la mineralización reconocida fue discontinua, con cuerpos lenticulares de baja potencia y sólo lentes de buen mineral de 15 a 20 cm de espesor. De acuerdo con Bowes *et al.* (1966), en esta veta se registraron anomalías radiométricas equivalentes a seis veces el nivel normal de radiación natural (*background*), lo que indica la presencia localizada de minerales uraníferos en la estructura.

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

La metodología aplicada en este estudio se orientó a generar los insumos necesarios para la formulación de un modelo metalogénico del distrito Pampa Larga. Se combinaron trabajos de terreno y gabinete que incluyeron levantamiento litológico y estructural, caracterización de alteraciones hidrotermales, análisis geoquímicos exploratorios y evaluación del potencial económico. Aunque no se incorporaron análisis geocronológicos ni isotópicos, la integración de estos procedimientos permitió elaborar un modelo

comparativo con depósitos análogos documentados en la literatura formal. La secuencia metodológica y su relación con los objetivos se presenta en la figura 9.

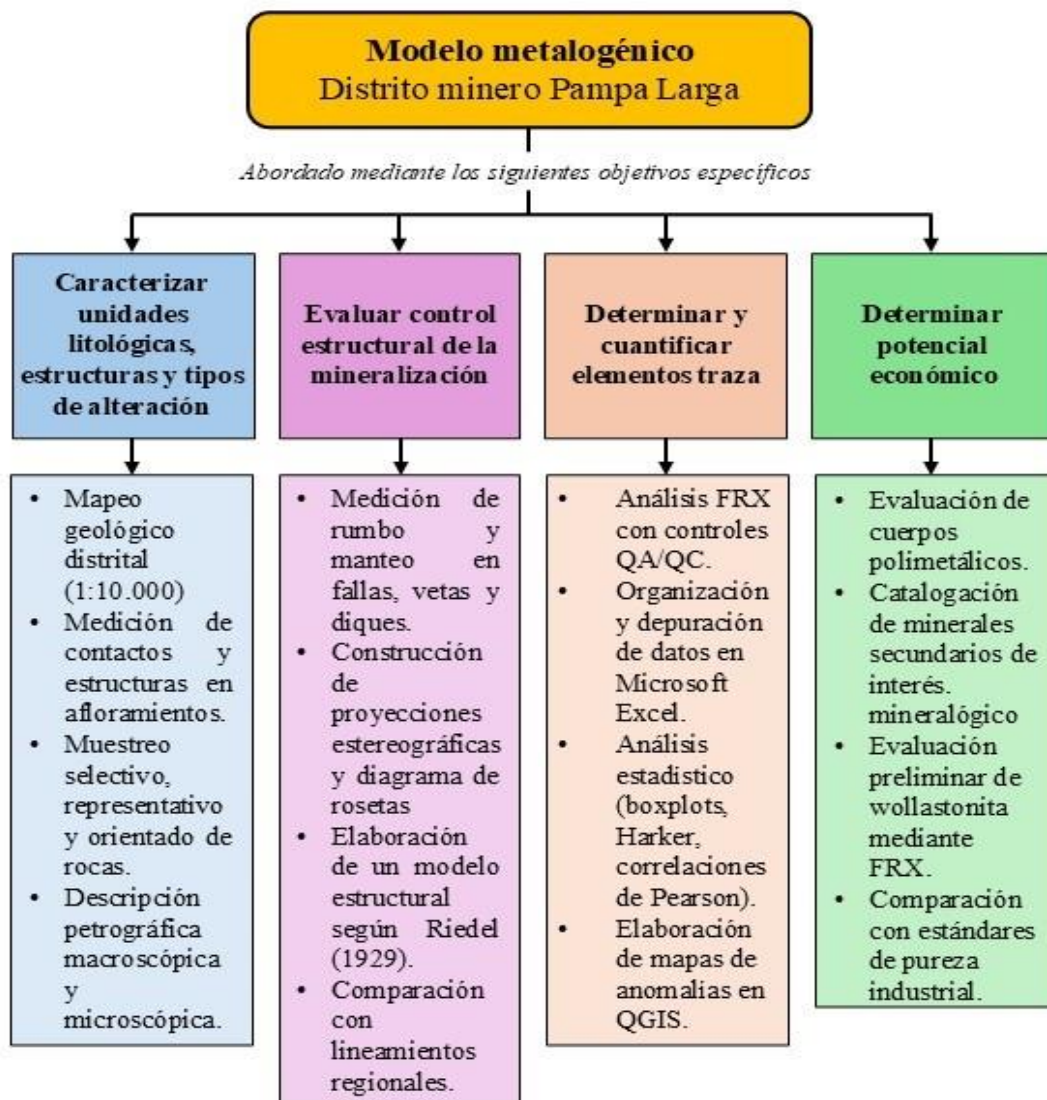


Figura 9. Diagrama de flujo metodológico aplicado en el distrito Pampa Larga.

4.1 Caracterización de las unidades litológicas, estructuras geológicas y tipos de alteración

El levantamiento geológico distrital se efectuó a escala base de 1:10.000. Se registraron afloramientos representativos de cada unidad litológica, describiendo contactos, estructuras primarias y relaciones de corte. Las orientaciones estructurales se midieron

con brújula tipo Brunton y se estandarizaron bajo el sistema de la regla de la mano derecha, complementándose con georreferenciación a través de un GPS marca Garmin, modelo Etrex 22x y registro fotográfico geotiquetado con la aplicación móvil “SW Maps”.

El muestreo de rocas fue selectivo y orientado, considerando representatividad litológica, evidencias de mineralización y presencia de alteración hidrotermal. En gabinete se realizaron descripciones macroscópicas y se seleccionaron muestras para la preparación de secciones delgadas y pulidas, que fueron analizadas bajo microscopía óptica de luz transmitida y reflejada. Este procedimiento permitió identificar asociaciones mineralógicas primarias y secundarias, texturas diagnósticas y facies de alteración hidrotermal. La clasificación de unidades se basó en nomenclatura estandarizada de la IUGS y en criterios de alteración hidrotermal establecidos en la literatura especializada.

4.2 Evaluación del control estructural de la mineralización

Las estructuras mayores y menores (fallas, vetas y diques) fueron medidas en terreno, registrándose rumbo, buzamiento y dirección de inclinación. Cada medición fue vinculada a un punto georreferenciado y acompañada de registro fotográfico, lo que permitió integrar la información en una base de datos espacial única.

Los datos estructurales fueron procesados en Microsoft Excel y Dips 7, construyéndose proyecciones estereográficas equal-angle, diagramas de densidad de polos y diagramas de roseta. Estos análisis permitieron reconocer familias estructurales recurrentes y establecer tendencias dominantes. Para jerarquizar la importancia relativa de las estructuras se aplicó un criterio de orden estructural (fallas regionales, distritales y vetillas menores), discriminándose aquellas con mayor probabilidad de haber actuado como conductos preferenciales de fluidos hidrotermales.

Las tendencias identificadas fueron comparadas con lineamientos tectónicos regionales descritos para la Cordillera de la Costa, con el objetivo de vincular la distribución de la mineralización del distrito con su marco geológico regional. Sobre esta base se construyó un modelo estructural del área de estudio, empleándose como marco teórico el sistema de cizalla propuesto por Riedel, 1929. Dicho modelo permitió interpretar la disposición y jerarquía relativa de fallas y vetas en función de su rol como estructuras *R*, *R'*, *P* e *Y*,

aportando un fundamento cinemático a la evaluación del control estructural de la mineralización.

4.3 Cuantificación de la concentración de elementos traza en las muestras

La cuantificación geoquímica se realizó con un equipo portátil de fluorescencia de rayos X (FRX), marca Bruker, modelo S1, efectuándose múltiples lecturas por muestra para reducir la variabilidad asociada a heterogeneidad mineralógica. Los resultados fueron organizados en planillas Excel, integrando información de campo como ubicación, unidad litológica y observaciones macroscópicas.

El tratamiento estadístico de los datos incluyó la creación de diagramas boxplot para identificar valores atípicos, diagramas binarios y de Harker para evaluar tendencias elementales, así como matrices de correlación de Pearson para establecer asociaciones entre variables geoquímicas. Posteriormente, la información fue representada espacialmente en el software QGIS mediante simbología graduada y clasificación por rupturas naturales (*Jenks*), lo que permitió generar mapas de anomalías y reconocer posibles tendencias de zonación metálica en el distrito.

Se reconoció que el uso de FRX portátil confirió un carácter exploratorio a los resultados, debido a sus limitaciones en la detección de elementos ligeros y en concentraciones cercanas al límite instrumental. En consecuencia, las interpretaciones derivadas de estos análisis deben considerarse preliminares y sujetas a validación futura mediante técnicas de laboratorio más precisas.

4.4 Determinación del potencial económico del distrito Pampa Larga

La determinación del potencial económico del distrito Pampa Larga se abordó considerando que no existen cuerpos polimetálicos visibles y/o explotables en la actualidad, y que la única mineralización preservada correspondió a relictos superficiales sin o poca continuidad. En este contexto, la metodología se orientó a dos líneas principales:

a) Mineralización secundaria de interés mineralógico de colección

Se documentaron y caracterizaron especies minerales secundarias de interés por su rareza o valor estético, susceptibles de generar oportunidades en el ámbito del

coleccionismo especializado. Este procedimiento incluyó el registro fotográfico sistemático de ejemplares, la catalogación mineralógica de acuerdo con la nomenclatura de la Asociación Mineralógica Internacional (IMA) y una comparación preliminar con catálogos comerciales locales, lo que permitió establecer un primer marco de referencia para su potencial valorización.

b) Unidad metamórfica con desarrollo de wollastonita

Se recolectaron y analizaron muestras de la unidad metamórfica con desarrollo de wollastonita, utilizando fluorescencia de rayos X portátil (FRX) para estimar contenidos de CaO, SiO₂ e impurezas críticas (Fe, Mn, Al). Estos resultados fueron contrastados con estándares internacionales de pureza industrial y complementados con descripciones petrográficas orientadas a reconocer texturas y asociaciones mineralógicas.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

5.1 Unidades litológicas

A continuación, se describen las unidades litológicas que afloran en el distrito minero Pampa Larga, en base a sus características petrográficas y texturales (anexo 1), observadas durante el levantamiento geológico.

5.1.1 Unidad de depósitos sedimentarios no consolidados

La unidad está compuesta por materiales no consolidados, constituidos principalmente por depósitos aluviales y aluvionales de composición heterogénea. Estos materiales incluyen ripios, gravas y arenas, los cuales se encuentran distribuidos sobre laderas de baja pendiente y relleno de manera significativa las quebradas y valles amplios del área de estudio (figura 10A). Los depósitos corresponden a acumulaciones matriz-soportadas, con clastos angulosos a subredondeados inmersos en una matriz de textura limo-arenosa. La composición de los clastos incluye principalmente litologías de la unidad intrusiva, además de fragmentos provenientes de la unidad metamórfica y de las andesitas y brechas volcanoclásticas. El depósito presenta un carácter oligomíctico y una variación en el

tamaño y esfericidad de los clastos, desde bloques angulosos de gran tamaño hasta fragmentos más pequeños y subredondeados (figura 10B). De manera local se observan estratificaciones discretas, que corresponden a diferentes niveles de acumulación, diferenciados por variaciones en el tamaño de los clastos contenidos en la matriz.

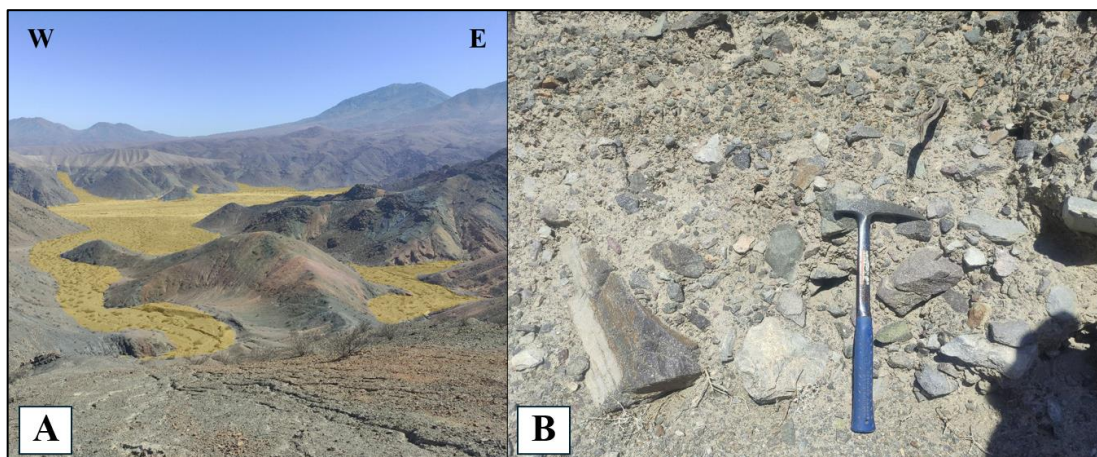


Figura 10. A. Fotografía del paisaje del distrito minero Pampa Larga con vista hacia el norte, los depósitos sedimentarios no consolidados son resaltados en color amarillo. B. Depósitos aluvionales pobremente consolidados que incluyen materiales rocosos heterogéneos de mala selección con clastos angulosos a sub redondeados, inmersos en una matriz arenosa.

5.1.2 Unidad metamórfica

La unidad metamórfica ocupa una extensión aproximada de 4 km² y está compuesta principalmente por corneanas de wollastonita y cuerpos de cuarcita, asociados espacialmente al contacto con la unidad intrusiva (figura 11A), así como en forma de cuerpos lenticulares emplazados en su interior. En este contexto, la wollastonita (figura 11B) se presenta en cuerpos masivos y en bandas con texturas granoblásticas, caracterizadas por una red entrelazada de cristales aciculares con disposición radial (figura 13A, B y C). Este mineral exhibe una composición dominada por silicio y calcio, lo cual se refleja en los resultados geoquímicos de las muestras FIC-PL-M18, FIC-PL-M31 y FIC-PL-M32 (Anexo 2). De manera accesoria, la wollastonita puede contener trazas de minerales como clorita y epidota.

Las cuarcitas (figura 11C), por su parte, se disponen en lentes elongados y discontinuos, presentando una textura recrystalizada y cuarzo de grano fino a medio.

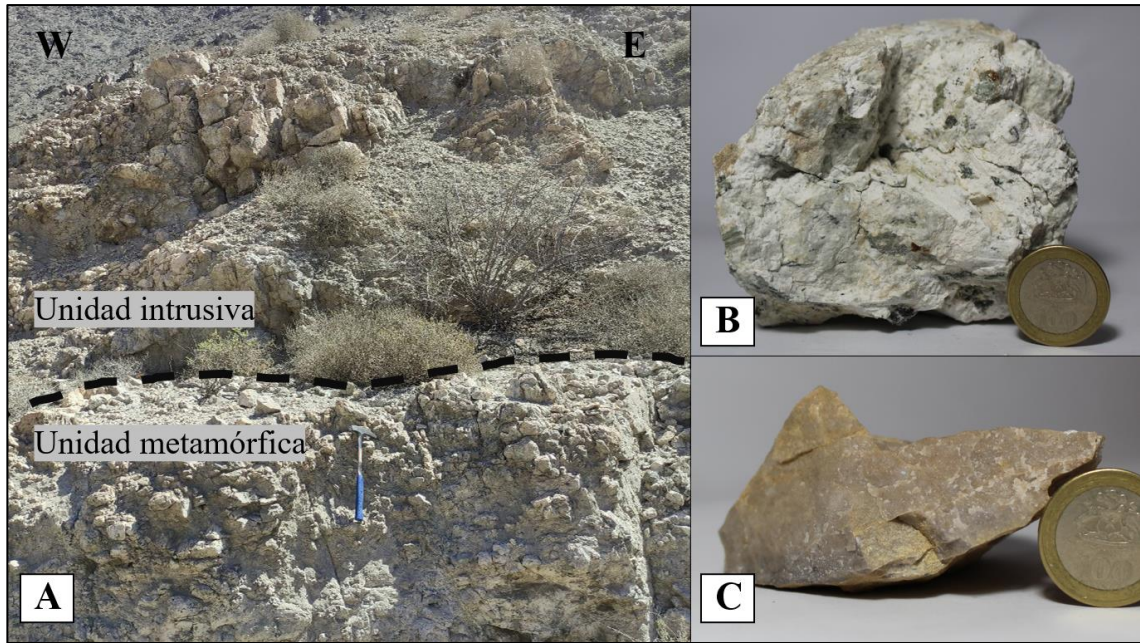


Figura 11. A. Contacto neto entre granodiorita en el nivel superior y un afloramiento de wollastonita en el nivel inferior. B. Muestra de wollastonita (CaSiO_3), de hábito fibroso, textura granoblástica y color blanco, que constituye la litología predominante de la unidad metamórfica. C. Muestra de cuarcita compuesta por cuarzo recristalizado, con textura entrelazada, alta dureza y brillo vítreo, dispuesta de manera lenticular dentro de la unidad metamórfica.

Con el fin de profundizar estas observaciones, la muestra FIC-PL-M18 fue sometida a análisis petrográfico en sección delgada. Esta muestra corresponde a un afloramiento de wollastonita dentro de la unidad metamórfica del distrito Pampa Larga (coordenada UTM: 6946621 N; 384624 E), caracterizado por una litología de alto contenido silíceo y calcáreo (figura 12). El análisis geoquímico por FRX muestra concentraciones elevadas de sílice (10,4 %), calcio (10,2 %), alúmina (2,5 %) y magnesio (1,8 %).

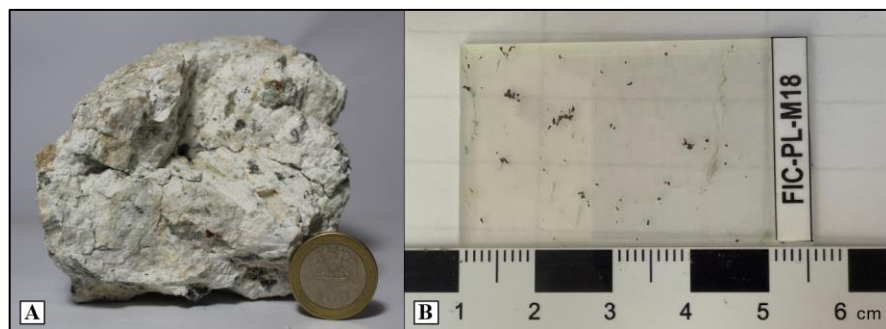


Figura 12. A. Muestra de mano FIC-PL-M18. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M18.

En corte delgado, la wollastonita se presenta con una textura granoblástica marcada por cristales elongados, dispuestos de forma subparalela y entrelazada. Bajo luz paralela

(PPL), los granos muestran un relieve moderado positivo y coloración mayormente incolora, con algunas zonas ligeramente turbias por inclusiones microscópicas. La morfología fibrosa es evidente, con orientación preferencial y clivaje bien definido. Bajo luz polarizada cruzada (LPX), la wollastonita exhibe birrefringencias bajas a moderadas de primer orden (tonos grises a anaranjados tenues), extinción prácticamente recta en secciones longitudinales y comportamiento anisótropo de tipo biaxial negativo (figura 13C). En zonas localizadas, especialmente asociadas a fracturas, se identifica clorita como producto de alteración secundaria; esta se distingue por tonos verdes en PPL (figura 13A) y colores de interferencia altos en LPX (figura 13B), rellenando microfracturas con una textura fibrosa divergente respecto a la matriz. La fábrica observable se caracteriza por la orientación preferencial de cristales elongados y la presencia de microfracturas rellenas por clorita.

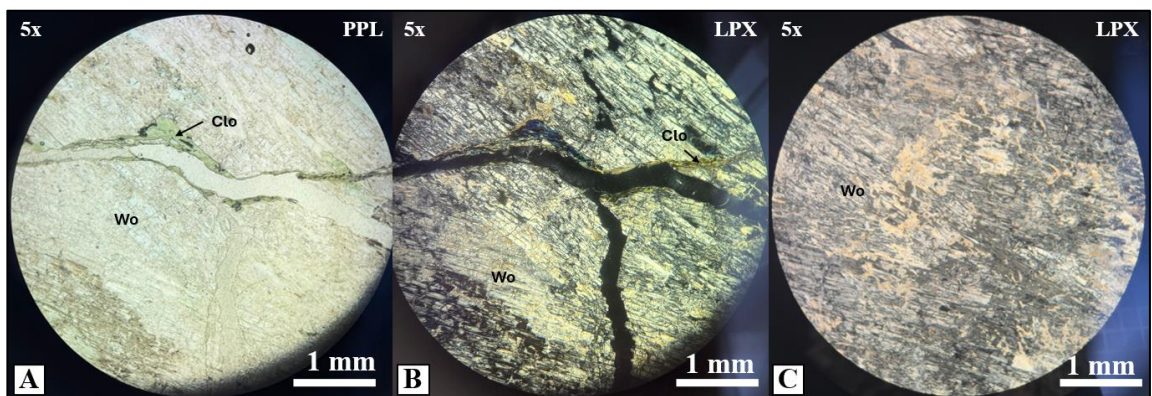


Figura 13. Microfotografías de la muestra FIC-PL-M18 (wollastonita) observada en sección delgada. (Wo): Wollastonita, (Clo): Corita.

5.1.3 Unidad intrusiva

La unidad intrusiva se localiza predominantemente en el sector noroeste del área de estudio, abarcando una superficie aproximada de 6,1 km². Está compuesta principalmente por granodiorita, que constituye cerca del 80% del afloramiento (figura 14A y B). La granodiorita presenta una textura fanerítica a porfídica, con cristales visibles de plagioclasa ($\pm 45\%$), feldespato potásico ($\pm 25\%$), cuarzo ($\pm 20\%$), biotita ($\pm 7\%$) y hornblenda ($\pm 3\%$), distribuidos en una matriz de grano medio a fino.

En menor proporción se observan cuerpos de tonalita y monzodiorita (figura 14C y D), intercalados de forma irregular dentro de la granodiorita. Estas litologías muestran texturas más homogéneas, con menor contenido de cuarzo y una mineralogía dominada por plagioclasa y ferromagnesianos.

El cuerpo intrusivo está cortado por diques de composición pórfido diorítico y otros de composición aplítica, que intruyen de manera discordante a lo largo de fracturas preexistentes. Estos diques muestran contactos netos con la granodiorita, monzodioritas, tonalitas y dioritas. Asimismo, en diversas diaclasas de la granodiorita se reconoce relleno de carbonato, conformando vetillas de pocos centímetros de espesor, pero de extensión considerable, que atraviesan sistemáticamente el intrusivo (figura 14A).

La unidad presenta alteración hidrotermal de intensidad leve a moderada, caracterizada por el reemplazo parcial por clorita en ferromagnesianos y bordes de plagioclasas. Localmente, en el sector oriental, se observa un aumento de la alteración argílica, reflejada en la transformación de feldespatos en arcillas y en el desarrollo de texturas pulverulentas.

El contacto con la unidad metamórfica circundante es neto y bien definido, delimitando con claridad la transición entre las rocas intrusivas y aquellas afectadas por metamorfismo de contacto.

Además de los diques y vetillas carbonáticas descritos, se reconocen vetas y vetillas de actinolita de espesor milimétrico a centimétrico, que rellenan fracturas en disposición subparalela a las estructuras principales. La actinolita se distingue macroscópicamente por su hábito fibroso a acicular, color verde oscuro y brillo sedoso, formando agregados radiales o subparalelos a la dirección de las vetillas. En algunos sectores, estas estructuras presentan un magnetismo leve a moderado

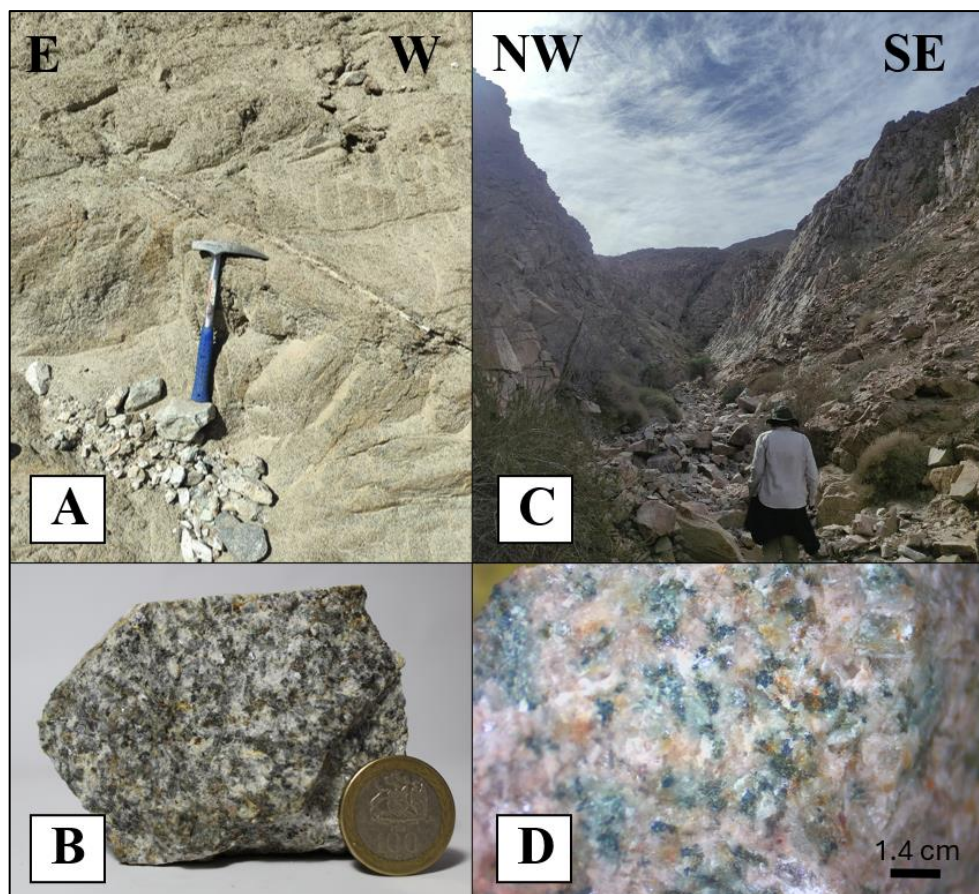


Figura 14. A. Afloramiento de granodiorita en el sector noroeste del área, en él se aprecia una vetilla de material calcáreo de aproximadamente 3 cm de grosor rellenando una fractura. B. Muestra de granodiorita del afloramiento mostrado en la fotografía A, esta roca de textura fanerítica posee un grano medio a grueso y se compone principalmente por cuarzo, feldespato (plagioclasa y algo de ortoclasa) y biotita, con pequeños porcentajes de hornblenda. C. Afloramiento de monzodioritas entrando a mina Jote en el sector sur suroeste del área D. Muestra de monzodiorita del afloramiento mostrado en la fotografía C bajo zoom de lupa 20x, esta roca fanerítica de grano medio a grueso se compone principalmente por plagioclasa, feldespato potásico y minerales máficos como hornblenda y biotita.

Con el fin de profundizar en la caracterización de la unidad intrusiva, se seleccionó la muestra FIC-PL-M22 para análisis petrográfico en sección delgada (figura 15 A y B). Esta muestra fue recolectada desde un afloramiento de monzodiorita en las cercanías de la quebrada que conduce a la mina Jote (coordenadas UTM: 6945496 N; 385620 E). Macroscópicamente corresponde a una roca de textura fanerítica de grano medio, compuesta mayoritariamente por plagioclasa ($\pm 45\%$), cuarzo ($\pm 25\%$), hornblenda ($\pm 15\%$), biotita ($\pm 10\%$) y feldespato potásico ($\pm 5\%$), con minerales opacos subordinados (figura 16). El análisis geoquímico por FRX muestra concentraciones elevadas de sílice (20,0 %), alúmina (3,2 %), potasio (1,3 %) y magnesio (1,2 %).

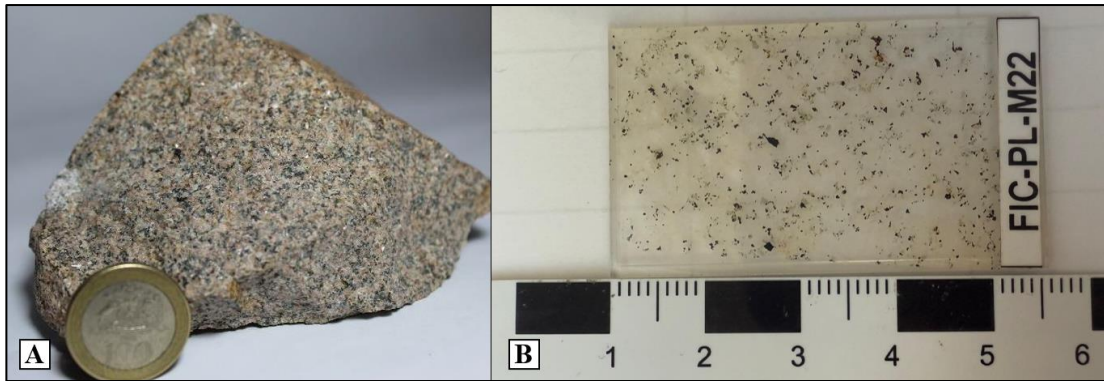


Figura 15. A. Muestra de mano FIC-PL-M22. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M22.

En luz polarizada cruzada (LPX), la muestra FIC-PL-M22 muestra una fábrica equigranular fanerítica, homogénea y sin evidencias de deformación significativa (figura 16). La plagioclasa se presenta en cristales subhedrales, de birrefringencia baja, con maclas polisintéticas regularmente definidas y algunas zonas de alteración incipiente. El cuarzo se identifica por sus tonos grises de interferencia y extinción ondulante, con contactos interlobulados respecto a otros minerales. La hornblenda exhibe colores de interferencia de primer orden, pleocroísmo fuerte en secciones orientadas y hábito prismático en agregados dispersos. La biotita se reconoce por sus colores anaranjados y marrones intensos, comúnmente plegada o intercrecida con hornblenda, y en ocasiones con bordes corroídos. También se observan minerales opacos distribuidos en la matriz, usualmente asociados a los máficos. Asimismo, se registran vetillas de óxidos de hierro y rellenos microfracturados, especialmente visibles en las imágenes B y C de la figura 16.

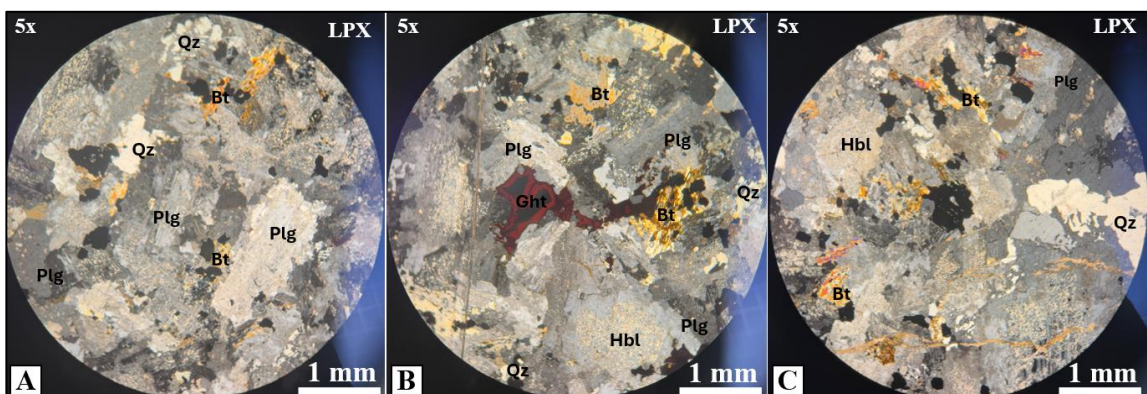


Figura 16. Microfotografías representativas de la muestra FIC-PL-M22 (monzodiorita). (Plg): Plagioclasa, (Qz): Cuarzo, (Bt): Biotita, (Hbl): Hornblenda, (Ght): Goetita.

5.1.4 Unidad de andesitas y brechas volcanoclásticas

La unidad de andesitas y brechas volcanoclásticas ocupa una extensión aproximada de 9,2 km², distribuyéndose principalmente en los sectores oriental y meridional del área de estudio. Esta unidad se caracteriza por la presencia de estratificaciones de andesitas que conforman afloramientos prominentes y continuos (figura 17A).

Las andesitas presentan texturas porfídicas, con fenocristales de plagioclasa (± 60 %) y piroxeno (± 25 %) inmersos en una matriz microlítica de composición intermedia (± 15 %). Localmente se observa magnetismo de intensidad leve a moderada, coincidente con magnetita finamente diseminada en la matriz (figura 17B). En algunos sectores, estas rocas exhiben microfracturas rellenas por clorita, calcita o yeso (figura 17C).

Las brechas volcanoclásticas (figura 17D) están compuestas por fragmentos angulares a subangulares de andesita y fragmentos líticos subordinados, contenidos en una matriz de grano fino a medio con abundancia de carbonatos (muestra FIC-PL-M46). Los fragmentos presentan tamaños variables desde pocos milímetros hasta varios centímetros, con predominio de bordes angulosos, aunque localmente se observan fragmentos subredondeados en menor proporción.

La unidad presenta alteración hidrotermal de intensidad variable, caracterizada principalmente por cloritización en la matriz y en los fenocristales, junto con argilización de intensidad moderada a pervasiva en otros sectores. En diversos puntos se observan recubrimientos de óxidos e hidróxidos de hierro, principalmente goetita y jarosita, que cubren superficies de fractura y planos de debilidad.

A nivel microscópico, la unidad muestra variaciones texturales locales. Se reconocen flujos de andesitas con textura afanítica, otros con textura vesicular en proporción subordinada, así como brechas con matriz calcárea en las que los fragmentos se disponen de manera heterogénea.

El contacto con la unidad intrusiva es neto y bien definido, reconocible por la diferencia textural entre ambas unidades y por la presencia de una zona de recristalización en la matriz volcánica adyacente al intrusivo.

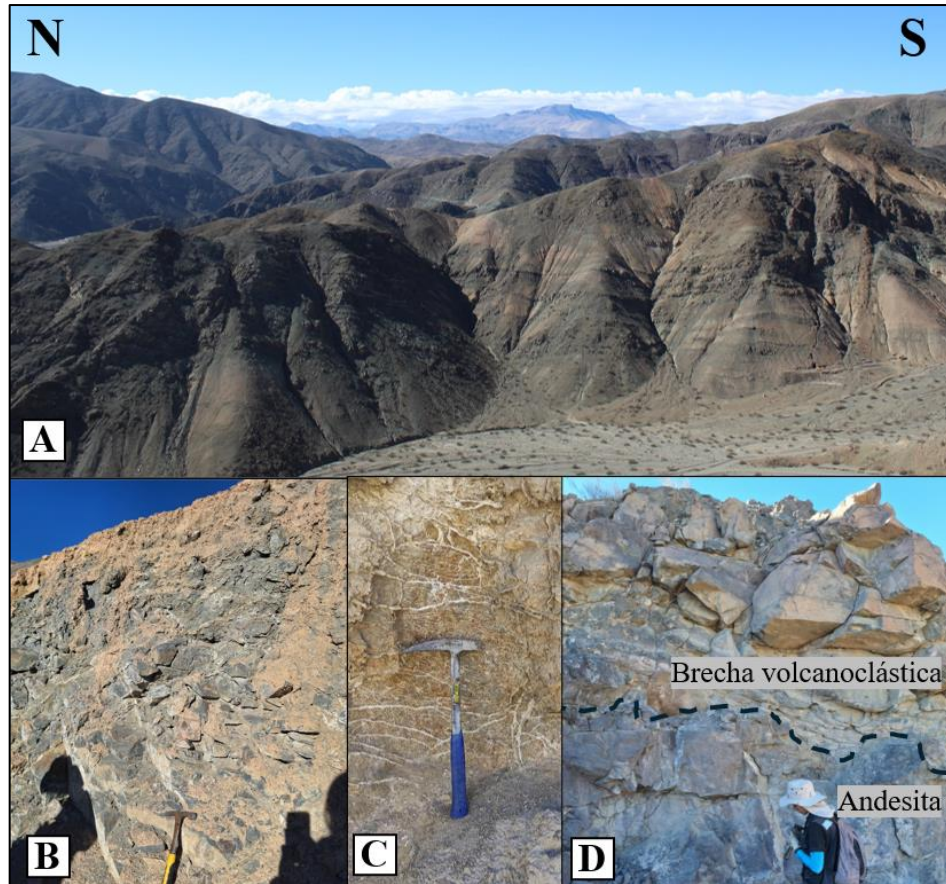


Figura 17. A. Prominente estratificación de andesita en el sector este del distrito. B. Andesita porfídica con abundante magnetita y alteración clorítica leve. C. Afloramiento de andesita con vetillas polidireccionales de yeso. D. Contacto entre andesitas y brechas volcanoclásticas.

Con el fin de profundizar en la caracterización de esta unidad, se seleccionó la muestra FIC-PL-M46, recolectada mediante chip sampling en el sector noreste del distrito Pampa Larga (coordenada UTM: 6947742 N; 388713 E). Corresponde a una roca volcanoclástica, caracterizada por plagioclasas fracturadas, fragmentos líticos oxidados, vetillas polidireccionales con leve magnetismo, mineralización diseminada de óxidos de cobre y escasa alteración argílica (figura 18 A y B). El análisis geoquímico por FRX muestra concentraciones elevadas de sílice (67,1 %), hierro (0,59 %), cobre (0,32 %) y potasio (3,5 %).

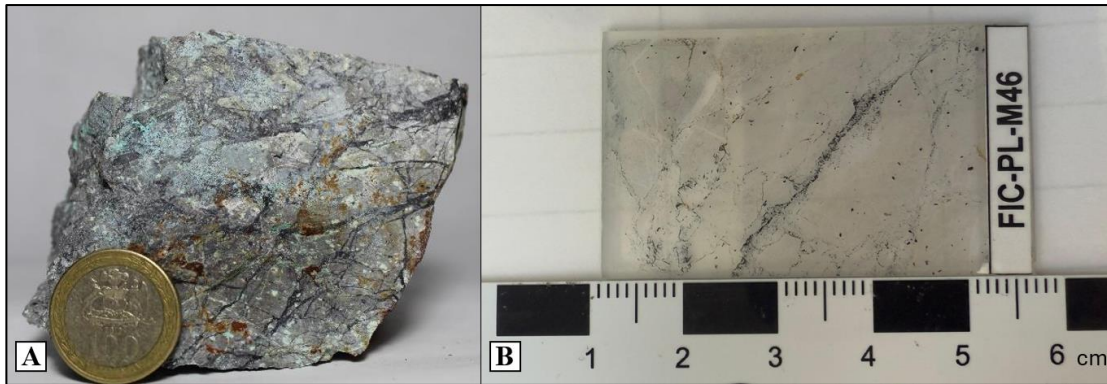


Figura 18. A. Muestra de mano FIC-PL-M46. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M46.

En lupa estereoscópica (LRB), se identifican clastos de andesita de forma subangular, con plagioclasas intensamente fracturadas, algunas con zonación relicta y localmente teñidas de tonalidades verde-azuladas, vinculadas a procesos de alteración secundaria (figura 19A). Estos fragmentos se encuentran inmersos en una matriz de grano fino, de aspecto criptocristalino, atravesada por vetillas polidireccionales de escaso grosor, rellenas por jarosita de color amarillento, goetita de aspecto pardo-rojizo y óxidos de manganeso.

En luz polarizada cruzada (LPX), se distinguen fragmentos líticos de contornos irregulares y bordes netos, distribuidos en una matriz de textura microcristalina rica en cuarzo secundario, goetita, jarosita y materiales opacos de alto índice de absorción. Algunos granos de cuarzo aparecen como clastos individuales anhedrales, con extinción ondulante y microfracturación interna, dispersos entre los fragmentos (figura 19 B y C). La fábrica general carece de orientación preferente, con fragmentos de distinto tamaño, composición y grado de alteración, inmersos en una matriz de grano fino.

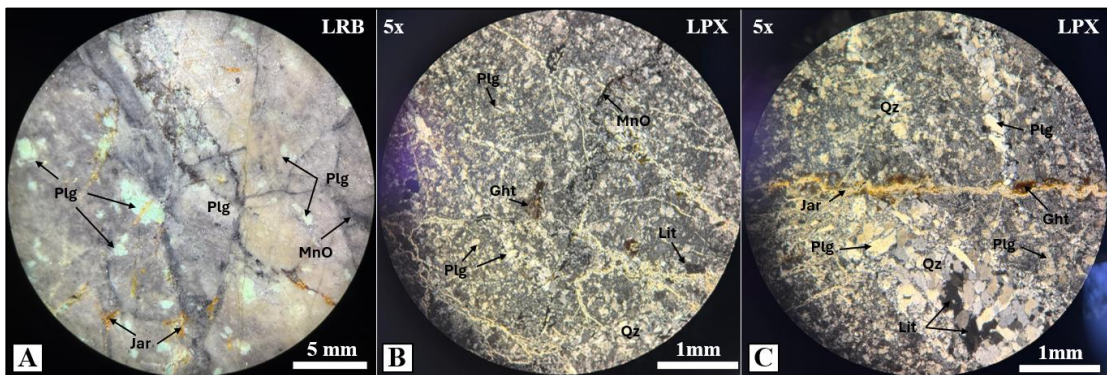


Figura 19. A. Rechazo pulido de la muestra FIC-PL-M46. B y C. Microfotografías representativas de la

asociación mineral observada en la sección delgada de la muestra FIC-PL-M46. (Plg): Plagioclasa, (MnO): Óxidos de manganeso, (Jar): Jarosita, (Ght): Goetita (Qz): Cuarzo.

5.2 Alteración hidrotermal

El distrito minero Pampa Larga presenta una marcada zonación de alteraciones hidrotermales, las cuales se distribuyen de manera heterogénea en las distintas unidades litológicas identificadas. Estas alteraciones se expresan a través de variaciones mineralógicas y texturales, registradas tanto en afloramientos de superficie como en muestras recolectadas en distintos sectores del área de estudio.

5.2.1 Alteración propilítica

La alteración propilítica es la más ampliamente distribuida, afectando tanto a la unidad de andesitas y brechas volcánicas como a la unidad intrusiva y metamórfica. En campo se reconoce por una coloración verde masiva observable tanto en superficies frescas como en sectores meteorizados (figura 20 A y B). Es especialmente evidente en zonas de fracturamiento, donde las rocas adquieren un aspecto friable y satinado.

Este tipo de alteración se caracteriza por la presencia de clorita y epidota en reemplazo de minerales ferromagnesianos como biotita, hornblenda y piroxeno, y de manera localizada se acompaña por el desarrollo de actinolita en forma de cristales fibrosos de color verde oscuro (figura 20C), dispuestos dentro de vetillas centimétricas que cortan la roca de caja.

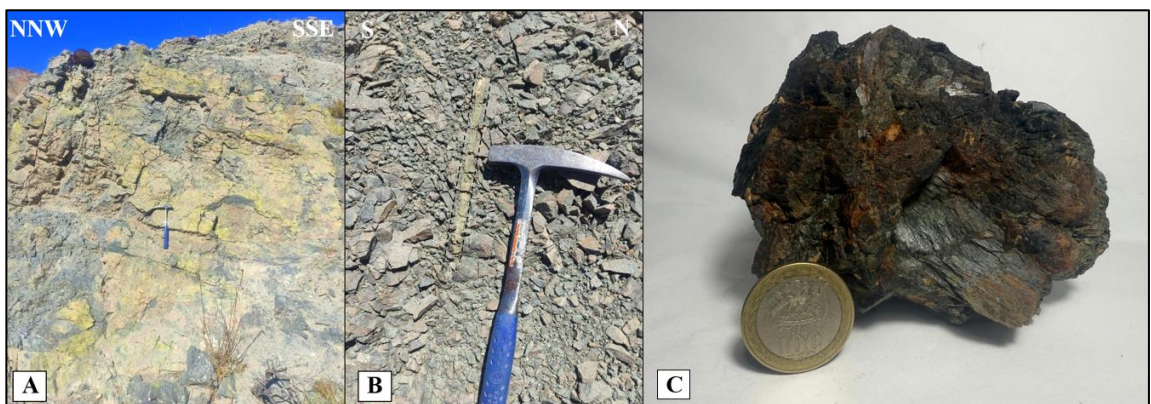


Figura 20. A. Afloramiento de brechas volcanoclásticas con alteración clorítica moderada. B. Alteración propilítica diseminada en una vetilla calcárea. C. Muestra de mano de actinolita.

Con el fin de confirmar el ensamblaje mineralógico asociado a esta alteración, se seleccionó la muestra FIC-PL-M45 (figura 21A) para análisis petrográfico en sección

delgada (figura 21B). La muestra fue recolectada mediante chip sampling desde la roca de caja más distal de la veta principal de la mina María Catalina (coordenadas UTM: 6947742 N; 388713 E). Corresponde a una litología granítica de composición intermedia, sin mineralización visible, que presenta clorita y epidota en zonas discretas de la matriz. El análisis geoquímico por FRX muestra concentraciones de sílice (40,8 %), calcio (17,9 %), alúmina (12,9 %) y magnesio (3,3 %).

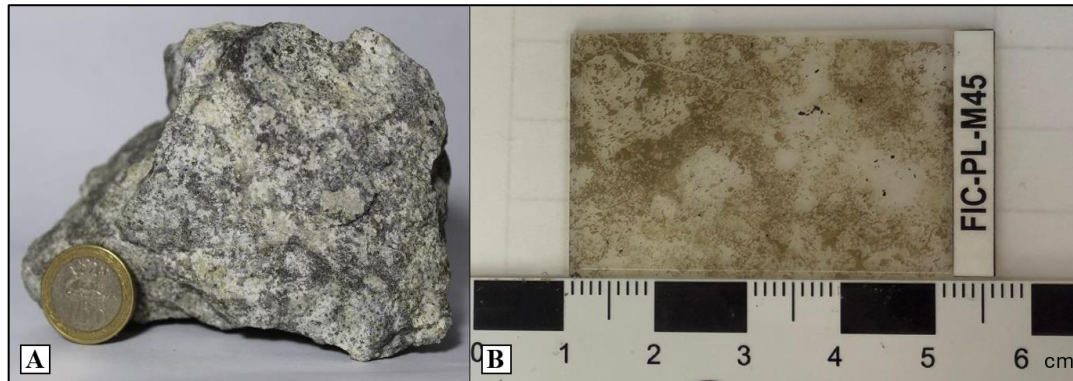


Figura 21. A. Muestra de mano FIC-PL-M45. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M45.

Bajo lupa estereoscópica (LRB), la muestra presenta una textura fanerítica de grano medio, con plagioclasas subhedrales de color blanco lechoso, intercrecidas con cuarzo de hábito anhedral y distribución irregular. Los minerales máficos se encuentran alterados, observándose agregados fibrosos de clorita de tonalidad verdosa a grisácea (figura 22A).

En luz transmitida (PPL), las plagioclasas muestran extinción simple y contornos irregulares, mientras que la clorita se distingue por su bajo relieve, colores de interferencia apagados y extinción anómala, dispuesta en agregados masivos (figura 22B). Se identifican además minerales opacos dispersos, de contornos netos, sin birrefringencia ni transmisión de luz; su identificación precisa requiere métodos complementarios.

En LPX, se observa epidota de birrefringencia alta y colores del segundo orden en granos anhedrales asociados a zonas cloríticas, junto a calcita de birrefringencia alta y extinción oblicua, distribuida de manera discontinua en zonas intersticiales. También se reconocen indicios de albita asociada a plagioclasas alteradas (figura 22C). El ensamblaje mineralógico observado corresponde a clorita, epidota, calcita y posible albita, distribuido en una matriz de composición granodiorítica parcialmente preservada.

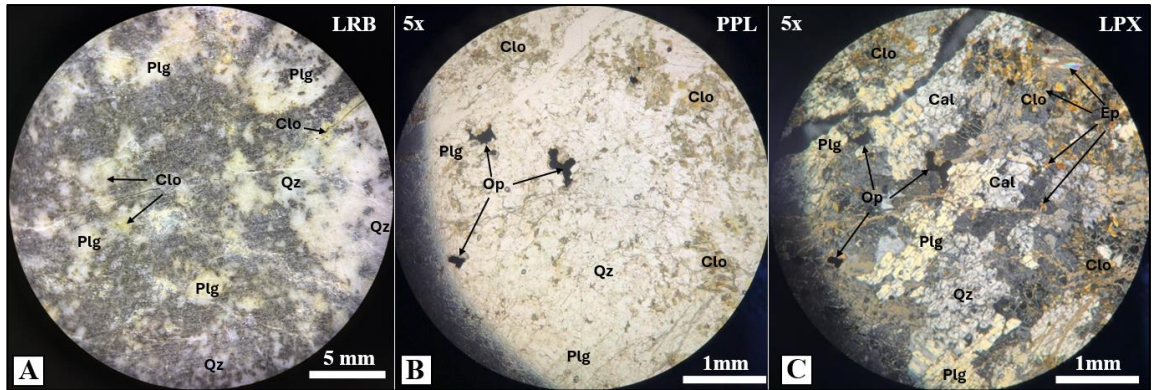


Figura 22. A. Rechazo pulido de la muestra FIC-PL-M45. B y C. Microfotografías representativas de la asociación mineral observada en el corte delgado de la muestra FIC-PL-M45. (Plg): Plagioclasa, (Clo): Clorita, (Ep): Epidota. (Qz): Cuarzo, (Cal): Calcita, (Op): Opaco.

5.2.2 Alteración argílica

La alteración argílica se presenta de forma moderada a pervasiva en la porción central y hacia el este del distrito, afectando tanto a la unidad de andesitas y brechas volcanoclásticas (figura 23A) como a la unidad intrusiva y metamórfica (figura 23B). En campo se reconoce por colores que varían entre blanquecinos, beige y amarillentos, evidentes en las superficies aflorantes. Las rocas afectadas muestran una textura pulverulenta o terrosa, perdiendo cohesión y facilitando su fragmentación.

Este tipo de alteración se observa con mayor claridad en las proximidades de fracturas, diques, fallas y zonas de contacto entre unidades, donde el cambio en la textura y coloración es abrupto. Además, se encuentra comúnmente adyacente a la mayoría de las vetas reconocidas en el distrito, donde se desarrollan zonas de alteración arcillosa con minerales como caolinita y otras arcillas finas no determinadas con precisión.

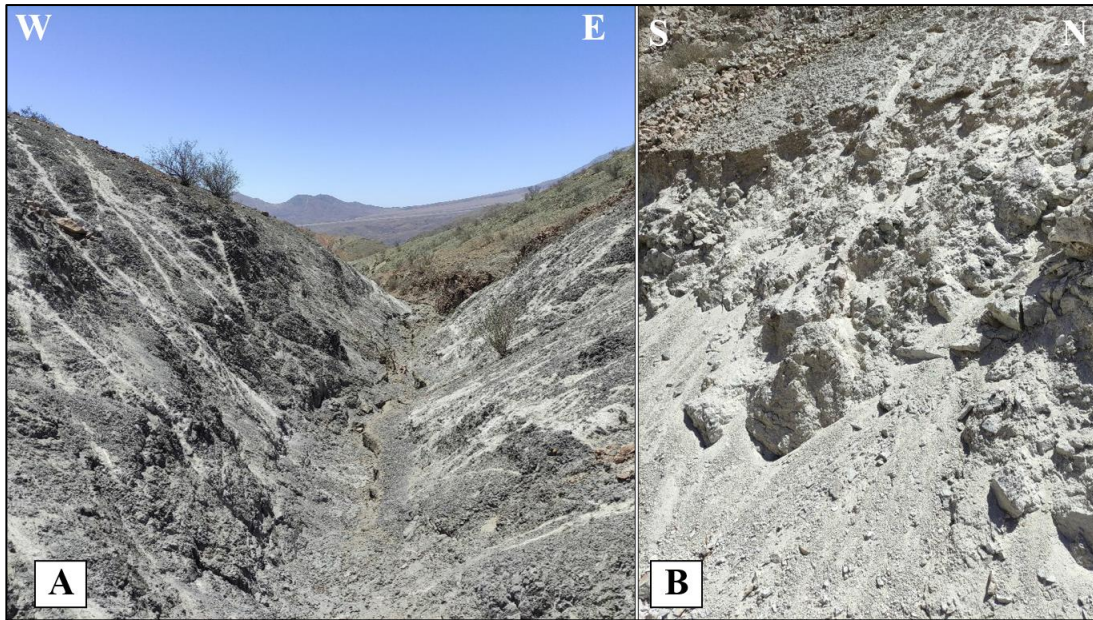


Figura 23. A. Alteración argílica pervasiva aledaña a una zona de falla dentro de la unidad de andesitas del distrito. B. Alteración argílica pervasiva situada en halos metamórficos de wollastonita y granodioritas.

5.2.3 Alteración *vuggy sílica*

Esta alteración se presenta de manera muy localizada, principalmente en sectores topográficamente elevados y en el flanco este del distrito. En campo se distingue por su elevada dureza y por una textura característica, definida por una matriz silíceica masiva con cavidades irregulares que le confieren un aspecto oqueroso. Los afloramientos muestran bloques resistentes y superficies rugosas de aspecto microgranular a afanítico. Esta alteración se encuentra en las inmediaciones de antiguas labores mineras y cateos actualmente abandonados, en cuyos alrededores se observan extensos desmontes que evidencian una intensa actividad extractiva en el pasado (figura 24A y B).

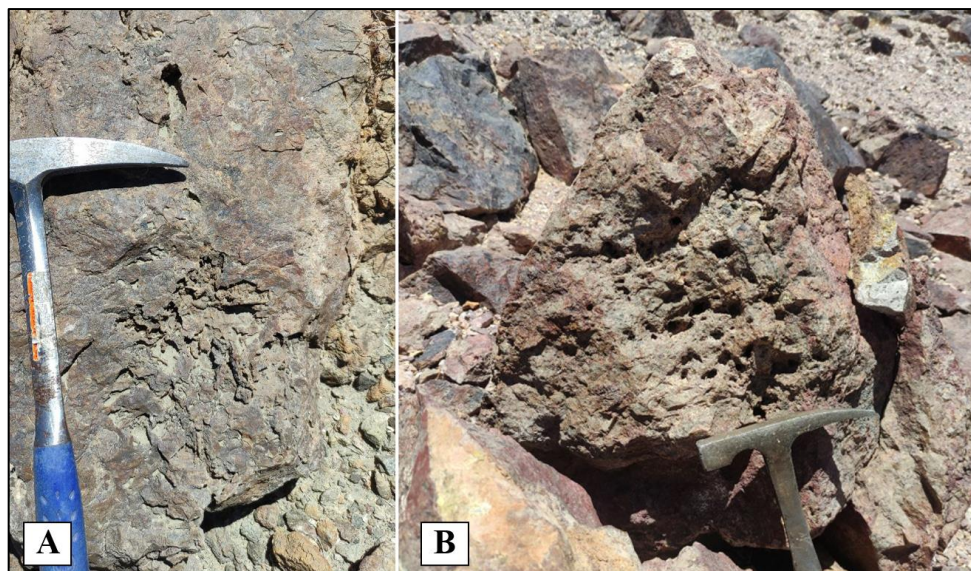


Figura 24. A. Afloramiento rocoso con evidencia de alteración vuggy silica en el sector centro sur del distrito. B. Desmonte abandonado en proximidad a cuerpos con mineralización de cobre, en ella se puede observar una textura oquerosa.

5.3 Mineralización

La mineralización del distrito minero Pampa Larga se presenta predominantemente en cuerpos vetiformes alojados tanto en la unidad intrusiva como en la unidad de andesitas y brechas volcanoclásticas. Estas vetas muestran geometría variable, desde estructuras rectas hasta formas lenticulares en algunos sectores, y se distinguen por contactos netos con la roca de caja, generalmente separados por delgadas capas de salbanda. En superficie, las vetas afloran con relieves que alcanzan algunos centímetros, mostrando colores pardos, negruzcos o blanco verdosos.

En cuanto a su orientación, las vetas poseen rumbos preferenciales noreste (NE) y, en menor medida, este-oeste (E-W), con buzamientos subverticales. La disposición interna de los minerales se organiza en texturas bandeadas de carácter simétrico, con cavidades y drusas frecuentes en los núcleos, además de diseminaciones minerales dentro de las estructuras principales. También se observan ramificaciones, empalmes e intersecciones entre vetas, lo que complejiza su geometría. En algunos sectores, pequeñas vetillas conectan las vetas principales con la roca de caja, evidenciando continuidad entre fracturas mineralizadas.

La descripción detallada de las vetas se presenta a continuación, agrupada según los principales sectores y labores mineras del distrito, con énfasis en sus características mineralógicas, texturales y estructurales. Cabe señalar que los accesos a las antiguas labores mineras son actualmente muy restringidos, debido al avanzado estado de deterioro asociado a décadas de abandono.

5.3.1 Mina Descubridora

La mina Descubridora corresponde a la explotación de una veta de rumbo N80°W y manteo 80°NE, la cual es cortada por una veta de cuarzo con rumbo N25°E y buzamiento 65°NE. La estructura mineralizada posee una extensión visible de aproximadamente 2 km y un espesor que varía entre 1,5 y 2 metros. En su interior se reconocen además una falla siniestral de orientación N0°W/80°NW y una falla de rumbo con orientación N80°E/27°N.

La veta se encuentra alojada en la unidad intrusiva, donde tonalitas de grano medio predominan como roca de caja. Actualmente, las galerías subterráneas se observan en gran parte colapsadas e inaccesibles, presentando túneles y contrapiques que alcanzan profundidades indeterminadas debido al derrumbe de varios sectores (figura 25A y B).

La mineralización observable es escasa, con relictos de arsénico nativo, arsenopirita y crisocola (figura 25C). Los minerales de ganga identificados corresponden principalmente a cuarzo, baritina, óxidos de manganeso y limonitas, entre las que destacan jarosita y goetita. Las vetas presentan silicificación abundante, mientras que la roca de caja adyacente muestra una alteración argílica evidente.

En el exterior se observan desmontes de gran volumen con restos de mineralización de óxidos de cobre, además de estructuras superficiales vinculadas a la actividad minera pasada, como pircas y un horno artesanal destinado a la fundición de minerales (figura 25D).

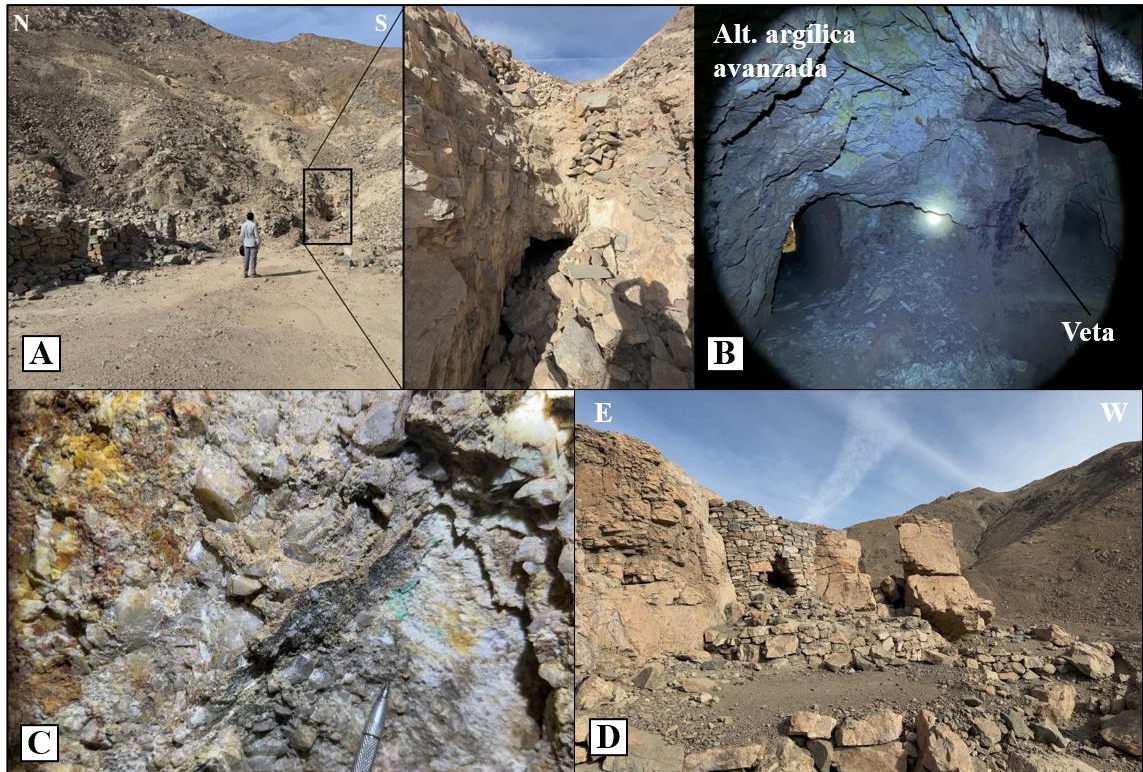


Figura 25. Mina Descubridora. A. Entrada a la mina Descubridora; se observan derrumbes en el acceso y pircas laterales construidas con bloques de roca. B. Interior de la mina, donde se aprecian túneles que siguen el rumbo de la veta, una intensa alteración argílica adyacente a la veta y sectores con derrumbes parciales. C. Mineralización de crisocola diseminada en la pared de la veta, acompañada de cuarzo masivo con desarrollo de alteración *vuggy sílica*. D. Estructura de piedra correspondiente a un horno artesanal ubicado en las inmediaciones de la entrada a la mina.

5.3.2 Mina Alacrán

La mina Alacrán se emplaza sobre una veta de rumbo $N70^{\circ}W$ y manto $87^{\circ}SW$, con una potencia que varía entre 30 y 40 cm y con marcada brechización interna (figura 26C y D). La veta presenta paredes de salbanda bien definidas, acompañadas de una zonación de alteración reconocible: argílica en sectores cercanos a la estructura y propilítica hacia zonas más distales. La veta se encuentra hospedada en la unidad intrusiva.

Las labores corresponden a varios niveles de explotación, cuya entrada principal es un túnel parcialmente cubierto por depósitos aluviales (figura 26A), con una extensión aproximada de 18 metros. Este túnel conecta con un pique que comunica con un nivel inferior, prolongándose hasta una profundidad no determinada (figura 26B). Se observan derrumbes en distintos sectores, lo que hace inaccesibles gran parte de las galerías subterráneas.

La mineralización reconocida en la mina incluye arsenopirita y arsénico nativo. Los minerales de ganga observados corresponden a baritina, calcita, cuarzo, hematita, yeso, jarosita y óxidos de manganeso.



Figura 26. Mina Alacrán. A. Vista de la entrada principal de la mina Alacrán, parcialmente cubierta por depósitos aluviales. B. Pique vertical que conecta con niveles inferiores, actualmente inaccesibles. C. Túnel principal de la mina, donde se observa continuidad de labores subterráneas y la traza de una veta en el techo. D. Sección de veta brechada, con fragmentos líticos angulosos contenidos en una matriz compuesta por minerales oscuros, donde destacan óxidos de manganeso, arsénico y, en menor proporción, cobre.

5.3.3 Mina Veta Negra

En el sector de la mina Veta Negra se reconocen amplios desmontes y una extensa red de antiguos caminos internos actualmente cubiertos por depósitos aluviales (figura 27A). La estructura principal corresponde a una veta ubicada en la unidad intrusiva, con rumbo $N85^{\circ}W$ y manto $60^{\circ}NW$, una corrida aproximada de 1 km y una potencia variable entre 1 y 3 metros.

El laboreo más destacado es un túnel de longitud no determinada, que a unos 30 metros de la entrada conecta con un pique subvertical (figura 27B). Este pique enlaza con varios niveles secundarios de explotación. A ambos lados de la galería principal se observan accesos hacia caserones superiores e inferiores. La mayoría de las labores bajo el túnel se encuentran solo parcialmente accesibles, siendo el pique del costado izquierdo la única vía de descenso, en condiciones de derrumbe parcial.

La mineralización hipógena observada incluye arsenopirita, esfalerita y tennantita (figura 27G), acompañados por ganga compuesta principalmente por baritina y hematita, como se aprecia en la muestra FIC-PL-M07 (figura 28A y B). En los niveles profundos, bajo el túnel principal, se identifican minerales correspondientes a las zonas de enriquecimiento secundario y oxidación, entre ellos óxidos de manganeso, yeso, limonita, azurita, zincolivenita, cuproadamita y ludlockita, diseminados en vetas masivas de baritina (figura 27C, D, E, F y H). En superficie se reconocen vetas subparalelas de óxidos de manganeso y vetas de baritina con diseminaciones de óxidos de cobre y esfalerita.

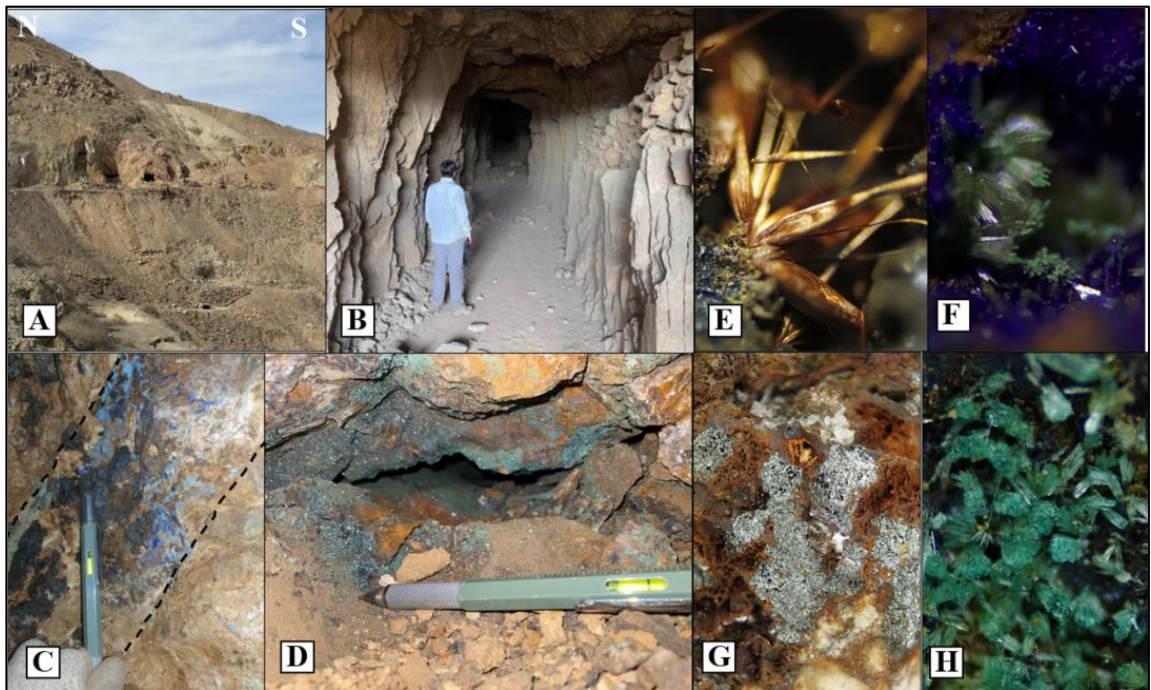


Figura 27. Veta Negra. A. Entrada principal a Veta Negra. B. Entrada del túnel principal de veta negra. C. Cuerpo vetiforme situado en el nivel inferior al túnel principal con mineralización de azurita, tetrahedrita y conicalcita. D. Cavidad con mineralización de zincolivenita y cuproadamita. E. Ludlockita ((FePb)As₂O₆), F. Azurita y olivenita (Cu₃(CO₃)₂(OH)₂ / Cu₂As₂O₄OH). G. Tennantita rica en As (Cu₁₂As₄S₁₃). H. Zincolivenita (CuZnAsO₄(OH)).

Con el fin de caracterizar con mayor detalle la mineralización de Veta Negra, se seleccionaron muestras representativas de diferentes sectores del túnel principal para análisis microscópico. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las muestras FIC-PL-M07 y FIC-PL-M16.

La muestra FIC-PL-M07 fue recolectada mediante chip sampling en una veta del nivel inferior del túnel principal de la mina Veta Negra, emplazada en la unidad intrusiva del distrito Pampa Larga (coordenada UTM: 6946484 N; 385405 E). Se caracteriza por la

presencia de tennantita rica en arsénico, esfalerita y óxidos de hierro como hematita y jarosita (figura 28A y B). El análisis geoquímico por FRX reporta concentraciones elevadas de zinc (100 %), azufre (33,2 %) y arsénico (3,3 %), además de proporciones significativas de oro (1,17 %), cobre (1,07 %) y hierro (2,07 %).

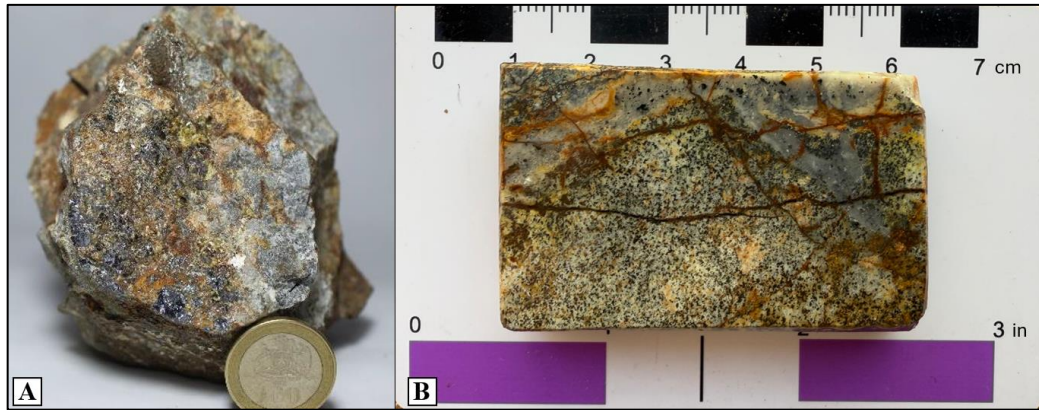


Figura 28. A. Muestra de mano FIC-PL-M07. B. Corte pulido correspondiente a la muestra FIC-PL-M07. Las microfotografías obtenidas en luz reflejada del corte pulido correspondiente a esta muestra (figura 29A, B y C) revelan una matriz masiva con sulfuros y sulfosales distribuidos de forma heterogénea. La pirita se presenta en cristales subhedrales, de alto brillo metálico, que han sido parcialmente reemplazados por tennantita y calcopirita mediante texturas de penetración guiada, concentradas principalmente en fracturas y bordes de cristales. La arsenopirita aparece como granos irregulares, con bordes corroídos, en contacto con pirita y tennantita. La esfalerita, en menor proporción, se distingue por su bajo relieve y débiles reflexiones internas, localizándose principalmente en zonas marginales de la matriz. Como fases de alteración tardía, se reconocen hematita, de color gris rojizo y brillo apagado, lo que indica un evento oxidante supérgeno posterior.

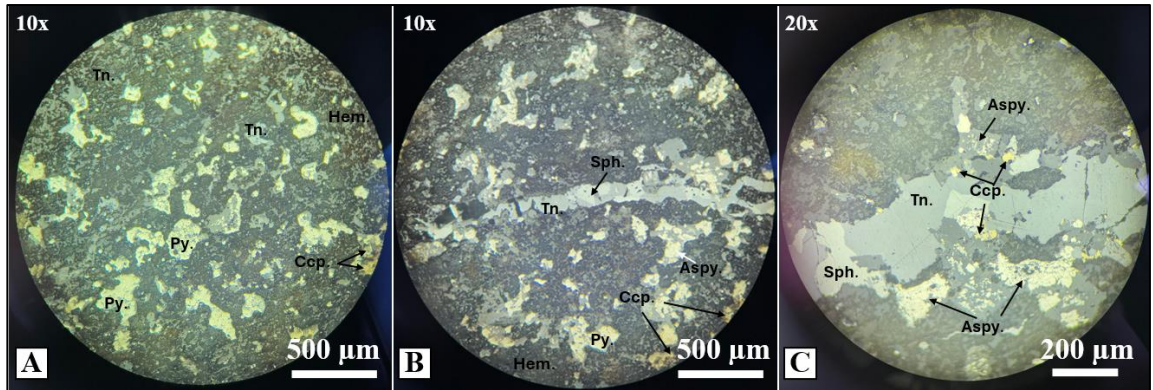


Figura 29. Microfotografías en luz reflejada correspondientes al corte pulido de la muestra FIC-PL-M7. (Py): Pirita, (Ccp): Calcopirita, (Tn): Tennantita, (Sph): Esfalerita, (Hem): Hematita.

Por otro lado, la muestra FIC-PL-M16 fue recolectada mediante *chip sampling* desde una veta ubicada al interior del túnel principal de la mina Veta Negra (figura 30A y B), correspondiente a una estructura con potencia aproximada de 2 metros y coloración oscura. Esta muestra está alojada en la unidad intrusiva del distrito Pampa Larga (coordinada UTM: 6946487 N; 385414 E). El análisis geoquímico por FRX indicó concentraciones de bario (23,7 %), manganeso (8,6 %) y zinc (3,7 %) (figura 48).



Figura 30. A. Muestra de mano FIC-PL-M16. B. Corte pulido correspondiente a la muestra FIC-PL-M16.

En corte pulido observado bajo luz reflejada, la muestra presenta una textura masiva con distribución irregular de fases opacas en una matriz densa (figura 31 B y C). La baritina se identifica por su tonalidad blanca, alto brillo y hábito fibroso-granular (figura 31A), dispuesta en agregados de grano fino a medio. Asociada a esta fase, se observan cristales dispersos de esfalerita, reconocibles por su bajo brillo y tonalidad gris claro, con forma anhedral y contornos difusos. En diferentes sectores se distinguen áreas oscuras de óxidos de manganeso, con textura masiva y bordes irregulares, en contacto con masas de

tonalidad parda correspondientes a goetita. Los minerales se distribuyen de forma diseminada, sin orientación preferente, con contactos irregulares entre fases minerales contrastantes.

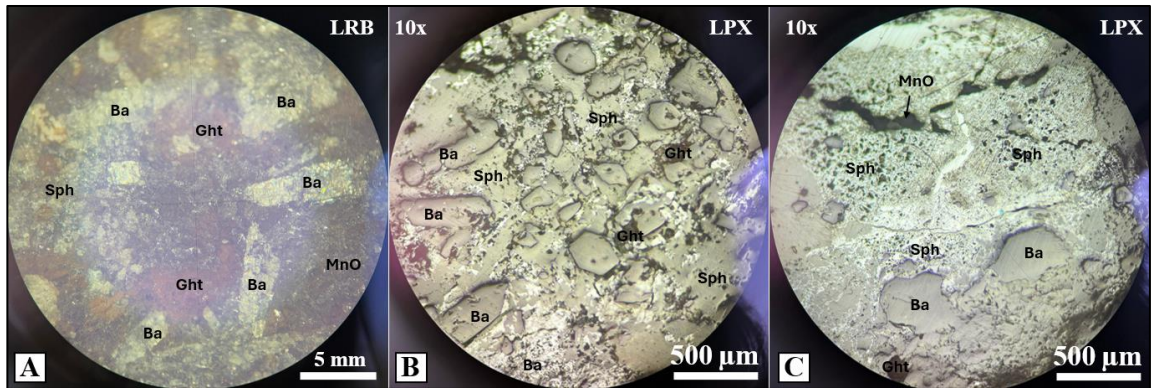


Figura 31. Microfotografías del corte pulido correspondiente a la muestra FIC-PL-M16, observadas bajo luz reflejada. (Ba): Baritina, (Sph): Esfalerita, (Ght): Goetita, (MnO): Óxidos de manganeso.

5.3.4 Mina María Catalina

La mina María Catalina se emplaza en la unidad intrusiva, en contacto con la unidad metamórfica (figura 32A), y corresponde a un cuerpo vetiforme con brechización interna y texturas bandeadas. La estructura presenta una corrida estimada de alrededor de 300 metros, con orientación N10°W/77°SW y una potencia variable entre 40 y 70 cm. La roca de caja está bien definida, mostrando alteración argílica evidente y cloritización débil en sectores más distales. Las paredes de salbanda marcan un notable contraste entre la veta mineralizada y la roca de caja circundante (figura 32C).

La labor principal consiste en un túnel de aproximadamente 100 metros de longitud excavado en la roca hospedante de la veta. En su extremo se observa una estoicada de 5 metros hacia el este que corta la veta principal (figura 32B), conectando en algún punto con la superficie a través de una chimenea en zigzag actualmente visible.

La mineralización hipógena de la veta incluye arsenopirita, pirita, calcopirita y bornita, acompañados por ganga compuesta principalmente de calcita, baritina, cuarzo, yeso y limonitas derivadas de óxidos de hierro. En la zona de enriquecimiento secundario se reconocen óxidos de manganeso, minerales oxidados de cobre, antimonita, plata nativa y arsénico nativo (figura 32E y F). En el extremo del túnel, la roca de caja contiene

acumulaciones ricas en arsenopirita diseminada (figura 32D), asociadas a una veta oscura con alta concentración de arsénico. Durante la prospección al interior de la mina, mediante el uso de un contador Geiger, se registraron valores de radioactividad de hasta 1 $\mu\text{Sv/h}$.

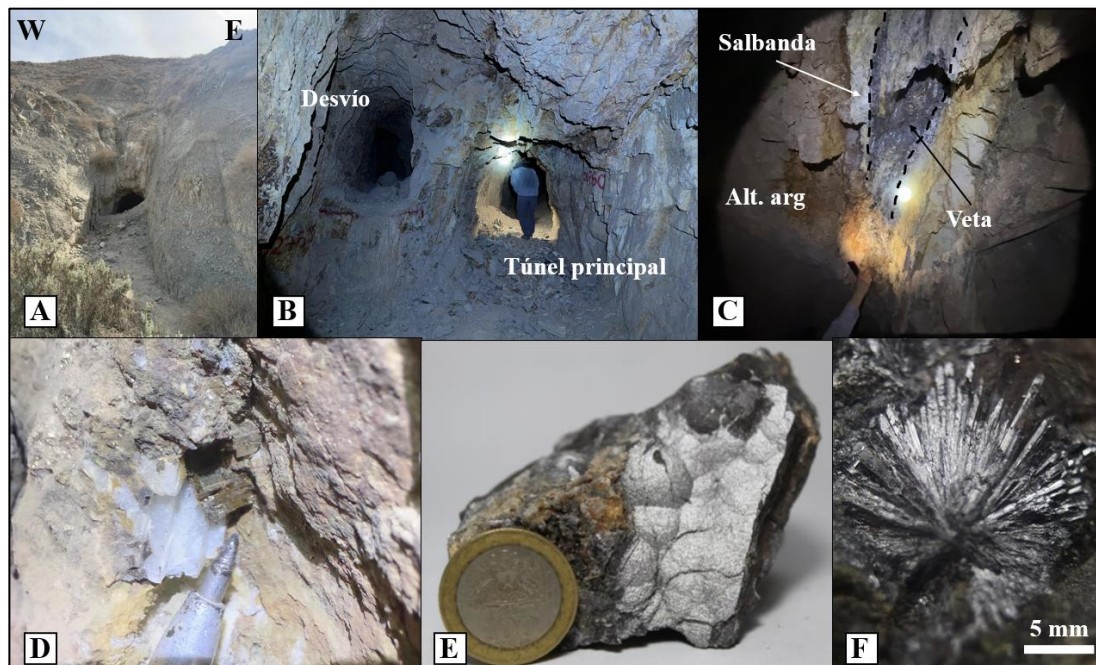


Figura 32. María Catalina. A. Entrada a la mina María Catalina. B. En el interior de la mina se encuentran dos túneles, el del lado izquierdo es pequeño y se desvía de la veta principal, mientras que el túnel del lado derecho persigue el rumbo de la veta. C. Veta rica en arsénico. D. Roca de caja de la veta principal, esta se encuentra con abundante arsenopirita diseminada y alteración argílica. E. Muestra de la veta principal, partida para observar la sutura central de arsénico nativo con hábito botroidal. F. Estibina (Sb_2S_3) en veta principal.

Con el fin de caracterizar con mayor detalle la mineralización de esta mina, se seleccionaron dos muestras representativas: la FIC-PL-M01, correspondiente a la veta principal, y la FIC-PL-M25, obtenida de la roca de caja inmediatamente adyacente para análisis microscópico.

La muestra FIC-PL-M01 fue recolectada mediante chip sampling en el extremo del túnel principal de la mina María Catalina, alojada en la unidad intrusiva del distrito Pampa Larga (coordenada UTM: 6946133 N; 384842 E). Macroscópicamente, se distingue arsénico nativo con hábito botroidal concentrado en la sutura central de la veta (figura 33A). El análisis geoquímico por FRX indican una mineralización de alta ley, con concentraciones elevadas de arsénico (100 %), plata (9,82 %), oro (4,2 %) y en menor proporción, cobre (2,30 %).

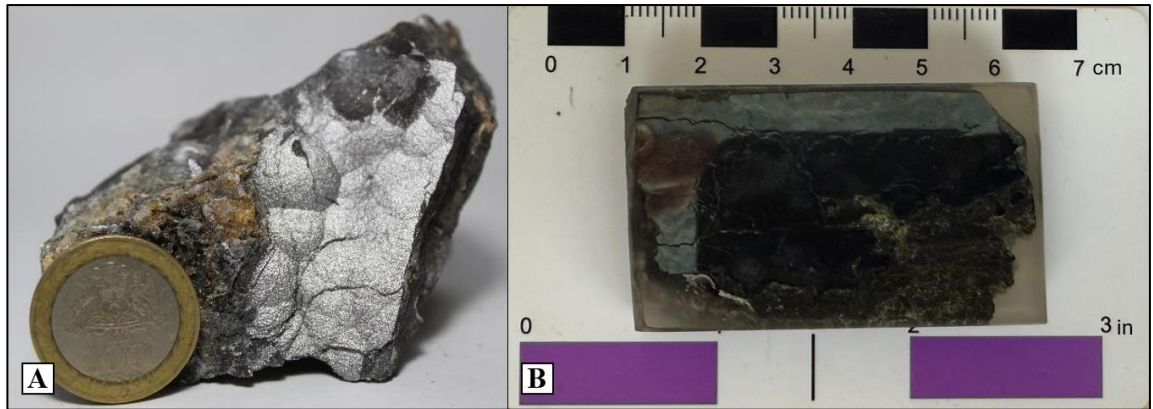


Figura 33. A. Muestra de mano FIC-PL-M01. B. Corte pulido correspondiente a la muestra FIC-PL-M01. En corte pulido bajo luz reflejada (aumento 10×, campo visual de 4,5 mm), la muestra una asociación mineralógica compuesta por arsenopirita, estibina, calcopirita, tennantita, covelina y bornita en trazas (figura 34A, B y C). La arsenopirita se presenta en cristales subhedrales fracturados, parcialmente reemplazados por estibina, de tonalidades gris azuladas y pleocroísmo marcado. La calcopirita aparece escasamente diseminada en la matriz, preferentemente en los márgenes de la estibina. Vetillas oscuras de tennantita atraviesan de manera irregular los agregados previos, generando texturas de reemplazo en bordes. La covelina se observa como películas delgadas de color azul intenso sobre estibina y márgenes de vetillas, mientras que la bornita se identifica en pequeños parches subordinados. La arsenopirita exhibe anisotropía débil al rotar el analizador.

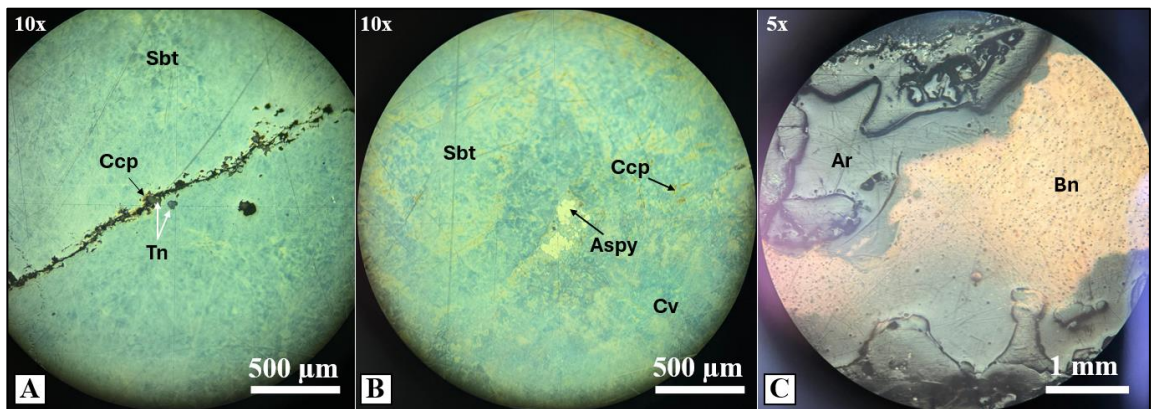


Figura 34. Microfotografías del corte pulido correspondiente a la muestra FIC-PL-M1, observadas bajo luz reflejada. (Sbt): Estibina, (Ccp): Calcopirita, (Tn): Tennantita, (Cv): Covelina, (Bn): Bornita, (Ar): Arsénico.

La muestra FIC-PL-M25 fue recolectada mediante chip sampling desde un afloramiento correspondiente a la roca de caja de la veta principal de la mina María Catalina (coordenada UTM: 6946129 N; 384843 E). Corresponde a una granodiorita con alteración

argílica moderada y mineralización diseminada de arsenopirita (figura 35A y B). Petrográficamente, presenta una textura fanerítica de grano medio, compuesta aproximadamente por cuarzo ($\pm 40\%$), arcillas ($\pm 30\%$), plagioclasa relictas parcialmente alterada ($\pm 10\%$), feldespato potásico parcialmente reemplazado ($\pm 8\%$), biotita alterada ($\pm 7\%$) y sulfuros ($\pm 5\%$). El análisis geoquímico por FRX reporta concentraciones elevadas de sílice ($17,3\%$), alúmina ($4,9\%$), azufre ($4,7\%$) y hierro ($3,2\%$).

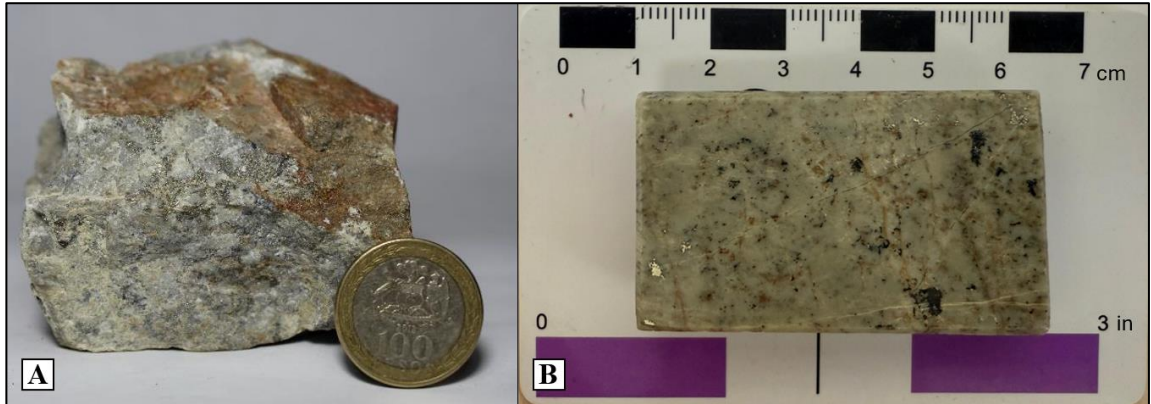


Figura 35. A. Muestra de mano FIC-PL-M25. B. Corte pulido correspondiente a la muestra FIC-PL-M25.

El corte pulido de la muestra FIC-PL-M25, observado bajo luz reflejada, muestra una mineralización metálica compuesta por arsenopirita, pirita y calcopirita, dispuesta de forma diseminada en una matriz granodiorítica bastante alterada (figura 36A, B y C). La arsenopirita se presenta en cristales subhedrales a anhedrales de tonalidad blanco grisáceo, con bordes irregulares y aspecto erosionado. En contacto con esta, se observan pequeñas acumulaciones de calcopirita, de color amarillo brillante, distribuidas en parches intersticiales o asociadas a fracturas en los márgenes de la arsenopirita. La pirita aparece como agregados anhedrales de menor tamaño, con tonalidad crema pálida y exhibe una textura de remplazo por múltiples vetillas internas finas y rectilíneas que fragmentan su estructura interna.



Figura 36. Microfotografías del corte pulido correspondiente a la muestra FIC-PL-M25, observadas bajo luz reflejada. (Aspy): Arsenopirita, (Ccp): Calcopirita, (Py): Pirita.

5.3.5 Mina Jote

La mina Jote, situada en la porción sur de la unidad intrusiva, se caracteriza por una veta principal con rumbo N20°W y buzamiento de 73°, cuya potencia varía entre 20 y 40 cm. Adicionalmente, se observan varios piques menores cercanos que forman parte del mismo sistema (figura 37), destacando uno con rumbo N50°E y buzamiento de 54°, con potencia similar a la veta principal. La presencia de estas estructuras secundarias genera la aparición de clavos mineralizados y laboreos en zigzag, que siguen el rumbo e inclinación de las vetas hasta profundidades decimétricas en las zonas más trabajadas.

La mineralización económica reconocida se concentra en pequeñas vetillas o suturas de vetas de mayor potencia dominadas por óxidos de manganeso. Entre los minerales secundarios más destacados se identifican azurita, lavendulana, mansfieldita y conicalcita.

En el sector este de la mina, los piques subverticales con rumbo N–S muestran una alteración argílica intensa, acompañada de cloritización distal y asociaciones de jarosita. Debido a la inaccesibilidad de estos piques, se recolectaron muestras de tipo grab sampling en los desmontes, en los cuales se identificaron concentraciones de minerales oxidados.



Figura 37. Mina Jote. A. Múltiples labores mineras para la explotación del mismo sistema mineralizado en diferentes puntos cercanos entre sí.

Con el fin de caracterizar de manera más detallada la mineralización de la mina Jote, se seleccionaron las muestras FIC-PL-M13 FIC-PL-M27 y FIC-PL-M29, recolectadas en vetas y desmontes del sector. Estas muestras fueron analizadas en mano y posteriormente sometidas a estudios microscópicos en cortes pulidos bajo luz reflejada, cuyos resultados se presentan a continuación.

La muestra FIC-PL-M13 destaca particularmente por la presencia de mansfieldita, esta muestra fue recolectada mediante *grab sampling* desde uno de los desmontes cercanos a una labor minera subvertical antigua (coordinada UTM: 6945673 N; 386075 E), correspondiente a uno de los piques que conforman la mina Jote (figura 38A y B). El análisis geoquímico por FRX muestra concentraciones elevadas de arsénico (49,6%), magnesio (24,2%) alúmina (6,5%) y cobre (1,87%).

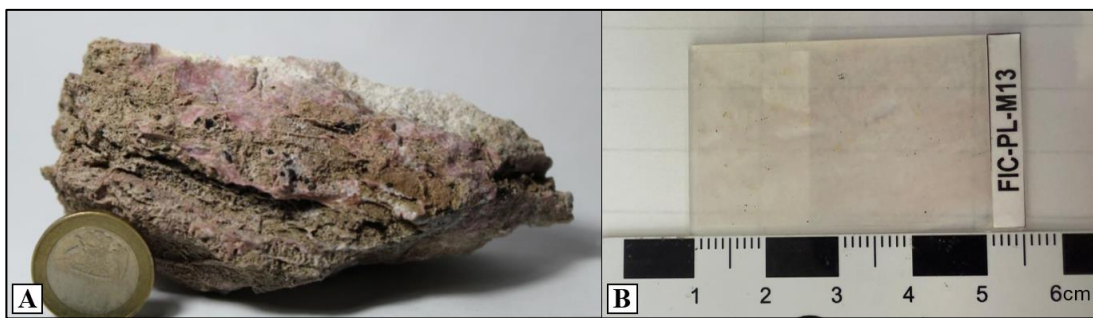


Figura 38. A. Muestra de mano FIC-PL-M13. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M13.

Las microfotografías obtenidas bajo lupa estereoscópica (LRB) y microscopio óptico en luz transmitida (PPL y LPX,) revelan una matriz intensamente alterada, dominada por asociaciones minerales secundarias características de ambientes de oxidación avanzada. Se observan agregados masivos a esferulíticos de mansfieldita de tonalidad blanco-rosada,

acompañados por plagioclasas alteradas, parcialmente rellenas por masas de jarosita de color amarillo terroso y recubrimientos oscuros de óxidos de manganeso (figura 39A). Destacan también pequeños cristales de alunita discretos y masas pardo-oscuras de goetita. Las imagen en PPL muestran con mayor detalle la estructura colapsada de la plagioclasa, que aparece como relictos angulosos y fragmentados, inmersos en una matriz rica en cuarzo microcristalino (figura 39B). En LPX se evidencia una birrefringencia muy baja y caótica, con pocos planos de clivaje definidos, lo que indica la destrucción parcial de la fábrica original del protolito. Los óxidos de manganeso aparecen en forma de manchas irregulares y opacas, localizadas en bordes y zonas intergranulares, confirmando un ambiente oxidante (figura 39C).

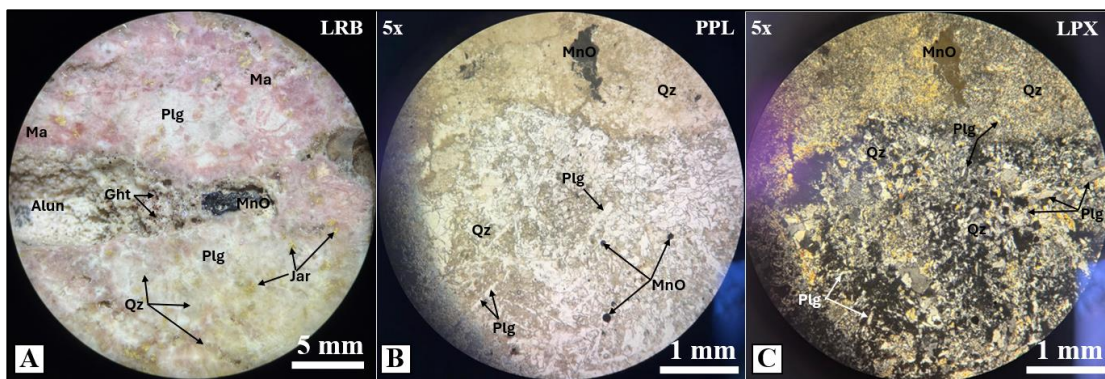


Figura 39. A. Rechazo pulido de la muestra FIC-PL-M13. B y C. Microfotografías representativas de la asociación mineral observada en el corte delgado de la muestra FIC-PL-M13 . (Ma): Mansfieldita, (Qz): Cuarzo, (Plg): Plagioclasa, (Con): Conicalcita, (Ght): Goetita, (MnO): Óxidos de manganeso, (Jar): Jarosita.

La muestra FIC-PL-M27 fue recolectada mediante *grab sampling* desde un desmonte aledaño a una de las labores mineras que conforman la mina Jote (coordenada UTM: 6945673 N; 385843 E). Corresponde a vetillas subparalelas con mineralización visible de azurita, conicalcita y lavendulana, alojadas en una matriz intensamente oxidada (figura 57). El análisis geoquímico por FRX muestra concentraciones elevadas de cobre (10,5 %), sílice (9,8 %), hierro (5,6 %) y alúmina (2,6%).

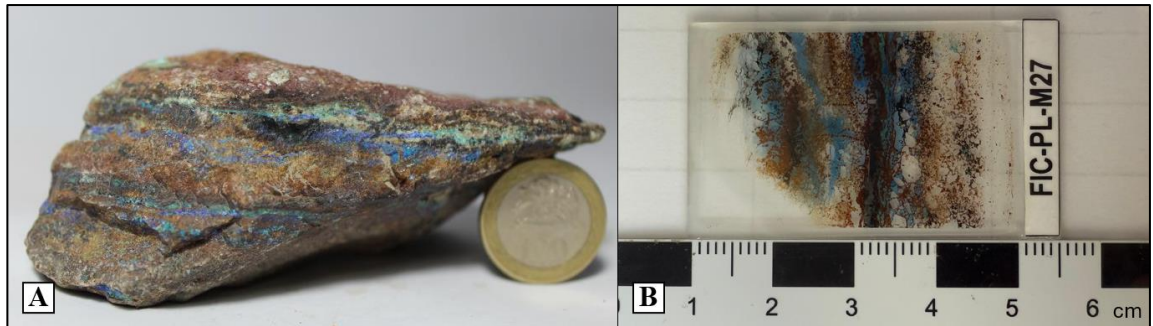


Figura 40. A. Muestra de mano FIC-PL-M27. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M27.

En corte delgado observado bajo luz polarizada cruzada (LPX), muestra una matriz intensamente oxidada, en la que se desarrollan vetillas y agregados de minerales secundarios con alta birrefringencia. Destacan agregados prismáticos y fibrosos de azurita, los cuales presentan colores de interferencia del segundo al tercer orden, a veces enmascarados por su color natural. También se observan masas verdes de conicalcita, de hábito masivo, distribuidas de forma irregular en el corte. En distintas zonas se reconocen agregados botroidales y esferulíticos de óxidos de hierro, probablemente goethita, de tonalidad rojiza a parda. En la matriz se observan áreas claras y finamente recristalizadas, pero no se identifican maclas diagnósticas ni rasgos ópticos suficientes para confirmar la presencia de feldespatos relictos. Los sectores incoloros podrían corresponder a sílice secundaria o productos avanzados de alteración (figura 41A, B y C).

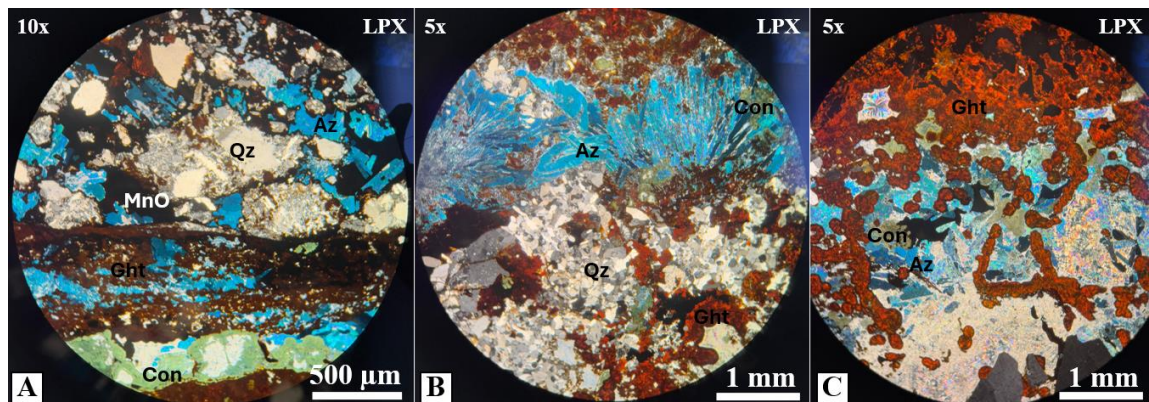


Figura 41. Microfotografías representativas de la asociación mineral observada en el corte delgado de la muestra FIC-PL-M27. (Az): Azurita, (Qz): Cuarzo, (Ght): Goetita, (Con): Conicalcita.

Por último, la muestra FIC-PL-M29 fue recolectada mediante *grab sampling* en una zona alterada contigua a una labor abandonada en mina Jote (coordenada UTM: 6945589 N; 385729 E). Corresponde a una roca de aspecto masivo, intensamente descompuesta, con

desarrollo de patinas de tonalidad azul vítreo visibles en superficie (figura 42). El análisis geoquímico por FRX indicó concentraciones elevadas de cobre (26,9 %), magnesio (12,5 %), arsénico (10,6 %) y calcio (10,0 %).

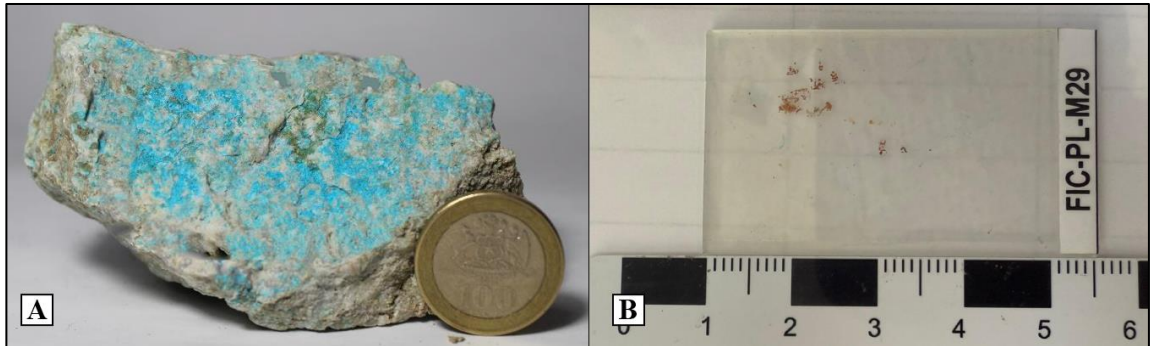


Figura 42. A. Muestra de mano FIC-PL-M29. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M29

En lupa estereoscópica (LRB), la muestra presenta una matriz clara de aspecto masivo con abundante cuarzo de color blanco lechoso, acompañado por lavendulana de color azul celeste con brillo vítreo, dispuesta en vetillas y diseminaciones irregulares (figura 43A). También se observan agregados pardo-amarillentos de jarosita y manchas oscuras a rojizas de posible goetita, asociadas a microfracturas. En luz transmitida bajo aumento de $5\times$, se reconocen cristales subhedrales a anhedrales de cuarzo con extinción ondulante, intercrecidos con agregados microlíticos de lavendulana, que presentan interferencias de primer orden y colores de interferencia débiles a moderados, en correspondencia con su hábito microgranular. La jarosita se presenta como masas isótropas o débilmente birrefringentes, de tonalidad amarilla pálida a parda, localizadas en bordes de granos o en vetillas marginales. También se identifican zonas opacas negras de óxidos de manganeso sin reflejos internos, con distribución intersticial. Las masas rojizas de goetita presentan birrefringencia baja, sin orientación preferente, con límites netos respecto a las fases claras (figura 43B y C).

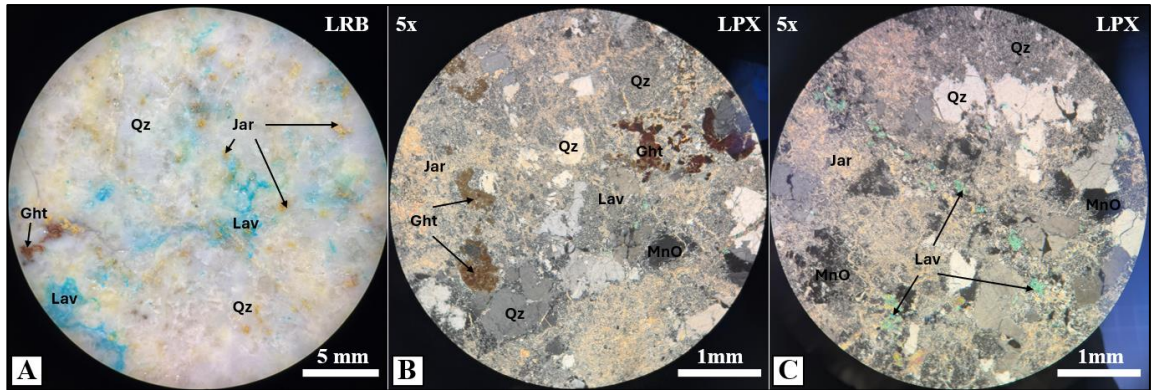


Figura 43. A. Rechazo pulido de la muestra FIC-PL-M29. B y C. Microfotografías representativas de la asociación mineral observada en el corte delgado de la muestra FIC-PL-M29. (Lav): Lavendulana, (MnO): Óxidos de manganeso, (Ght): Goetita, (Jar): Jarosita. (Qz): Cuarzo.

5.3.6 Mina Hornitos (Ex San Pedro)

La mina Hornitos, anteriormente conocida como San Pedro, se emplaza en la unidad de andesitas y brechas volcanoclásticas y está constituida por al menos dos cuerpos vetiformes subparalelos. Estas vetas presentan un rumbo predominante N25°E, con buzamientos entre 65° y 70°, y una potencia que varía entre 20 y 40 cm. Su extensión longitudinal alcanza aproximadamente 200 metros.

Las estructuras se alojan en antiguas fallas tectónicas y están delimitadas por delgadas paredes de salbanda que contrastan con la roca de caja. La mineralización está representada principalmente por vetas de baritina (figura 44A), las cuales contienen diseminaciones de óxidos de cobre como malaquita y crisocola, acompañados por vanadatos y arseniatos de cobre (figura 44B). En algunos sectores se identifican diseminaciones de hematita asociadas a las vetas de baritina. Los minerales de ganga corresponden a cuarzo, baritina, óxidos de manganeso y limonitas de óxido de hierro, observados en la muestra FIC-PL-09.

Las labores mineras desarrolladas en este sector son de carácter superficial y se restringen a la explotación de las vetas a lo largo de su rumbo, alcanzando profundidades que no superan los 15 metros.

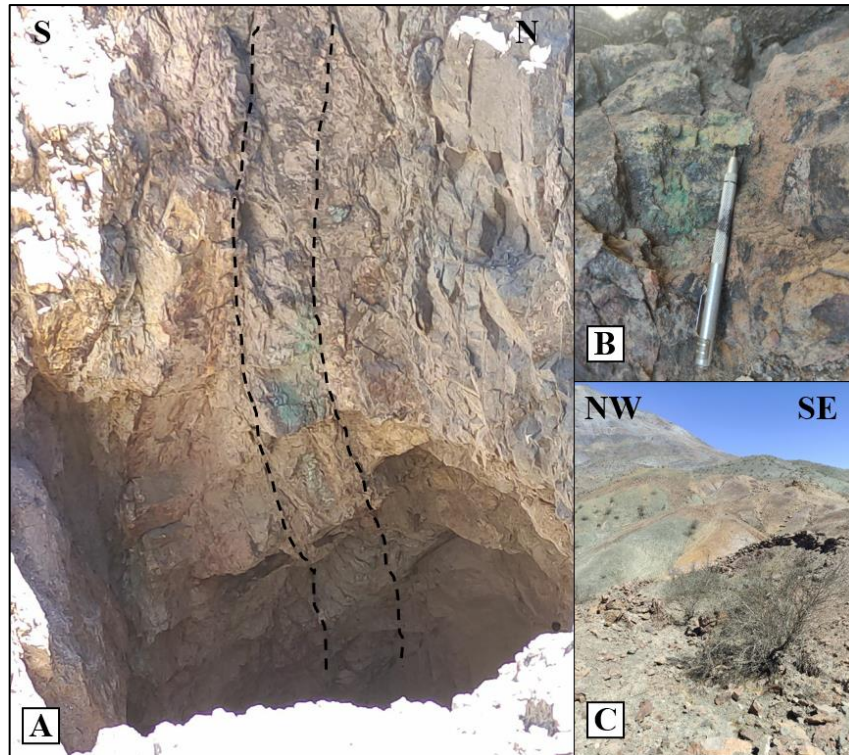


Figura 44. Mina Hornitos (ex San Pedro) A. Veta de baritina con mineralización diseminada de óxidos de Cu, la labor minera al ser sub vertical se vuelve inaccesible para su estudio en detalle. B. Mineralización diseminada de óxidos y arseniatos de Cu en la pared de una veta ya explotada. C. Pircas aledañas a las labores mineras, en contraste con los vistos en otras minas, estas se ven bastante destruidas.

Con el fin de caracterizar en mayor detalle la mineralización de la mina Hornitos, se seleccionó la muestra FIC-PL-09 (figura 45A), la cual fue recolectada mediante chip sampling desde un clavo mineralizado ubicado en las inmediaciones de la mina Hornitos, correspondiente a la intersección de dos vetas de baritina hospedadas en la unidad de andesitas y brechas volcanoclásticas (coordenada UTM: 6946724 N; 389472 E). El afloramiento se caracteriza por una intensa alteración oxidativa y abundante mineralización secundaria visible en superficie (figura 44B). El análisis geoquímico por FRX reveló concentraciones significativamente elevadas de cobre (25,8 %), bario (15,7 %) y arsénico (14,2 %).

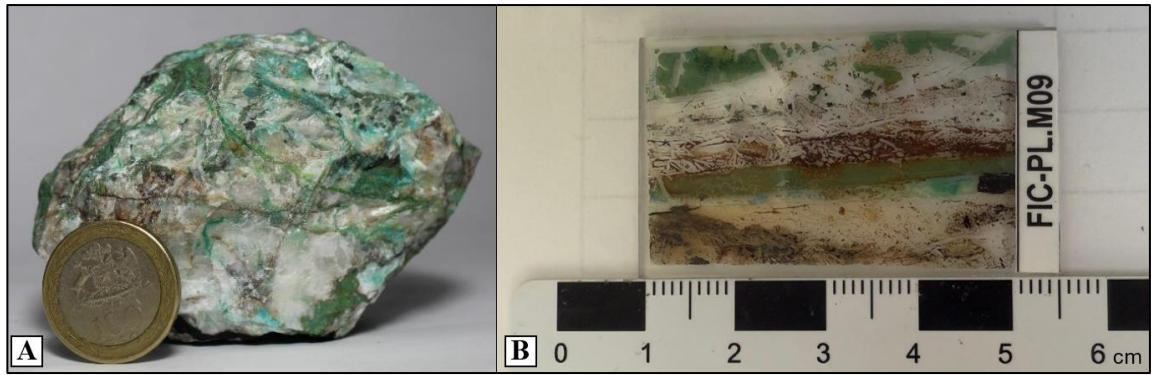


Figura 45. A. Muestra de mano FIC-PL-M09. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M09.

El análisis microscópico de la muestra FIC-PL-M09, realizado tanto en sección delgada como en un rechazo pulido, revela una asociación mineral compleja dominada por fases secundarias de cobre, bario, hierro y arsénico. Bajo luz polarizada paralela (PPL) y cruzada (XPL), se observa una textura bandeada y vetiforme, compuesta por agregados botroidales de conicalcita de tonalidad verde oliva, intercalados con cristales compactos de baritina de alto relieve, bordes netos y color blanco característico. En la base del corte se distingue un cúmulo de goetita masiva, de tonalidad parda oscura, con hábito finamente recrystalizado (figura 46A y B). En observaciones con lupa binocular (LRB), se reconocen pequeños cristales de baritina que hospedan agregados de conicalcita, acompañadas por cristales aciculares azulados de lavendulana, dispuestos preferentemente en las zonas de mayor porosidad. Además, se identifican sectores con jarosita de color amarillo intenso y manchas negras irregulares atribuibles a óxidos de manganeso, los cuales rellenan espacios intersticiales y bordes disueltos de la baritina (figura 46C).

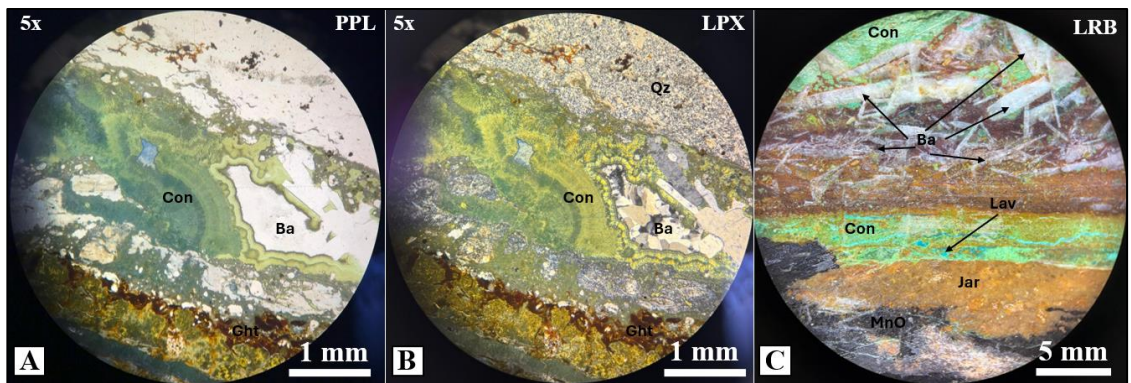


Figura 46. A y B. Microfotografías en luz transmitida y reflejada correspondientes al corte delgado de la muestra FIC-PL-M09. B. Rechazo pulido de la muestra FIC-PL-M09. (Con): Conicalcita, (Ba): Baritina, (Ght): Goetita, (Qz): Cuarzo, (Lav): Lavendulana, (Jar): Jarosita, (MnO): Óxidos de manganeso.

5.3.7 Labores sin nombre (s/n)

En el distrito minero Pampa Larga se identifican numerosas labores mineras carentes de registros oficiales o denominaciones reconocidas. Estas se encuentran dispersas a lo largo de distintos sectores del distrito y presentan características estructurales y mineralógicas similares a las observadas en la mina Hornitos.

Las vetas corresponden a cuerpos vetiformes constituidos predominantemente por baritina, acompañada de mineralización diseminada de óxidos, carbonatos, vanadatos y arseniatos de cobre, entre los que se incluyen malaquita, crisocola, conicalcita, azurita y chenevixita. La ganga está compuesta por baritina, cuarzo y óxidos de manganeso, con presencia de paredes de salbanda y alteración argílica en la roca de caja.

Los trabajos mineros asociados a estas vetas son diversos y abarcan desde excavaciones superficiales de pequeña escala hasta túneles profundos con varios niveles, así como grandes piques subverticales, actualmente inaccesibles por colapso. En algunos sectores se observan desmontes de gran volumen que evidencian una explotación de considerable magnitud en el pasado (figura 47A y B).



Figura 47. Labores mineras A. A pesar de no contar con una identificación formal, la labor situada en la coordenada 6947418N; 387865E, presenta clara evidencia de una extensa explotación en el pasado,

incluyendo grandes desmontes y distintos niveles de trabajo en su interior. Al igual que otros laboreos en el distrito se caracteriza por ser un cuerpo vetiforme alojado en una zona de falla dentro de la unidad volcánica (sigmoide de la derecha indica movimiento normal). La ganga corresponde principalmente a baritina, cuarzo y óxidos de manganeso, con paredes de salbanda y alteración argílica, mientras que la mineralización económica se compone por óxidos y arseniatos de Cu diseminados en la veta principal B. Trabajos sub verticales con considerable infraestructura y profundidad asociada. A través de los desmontes y vestigios se reconoce la generalidad del distrito, imponentes vetas de baritina y diseminados de Cu. Estas labores en su mayoría son inaccesibles para el mapeo y descripción a detalle sin un equipo de descenso adecuado.

Con el fin de caracterizar en mayor detalle la mineralización de las labores sin nombre, se seleccionó la muestra FIC-PL-M28 (figura 48A), la cual fue recolectada mediante *grab sampling* en un subafloramiento situado entre las minas María Catalina y Veta Negra, en una zona caracterizada por vetillas oxidadas con calcita y lavendulana alojadas en rocas intensamente alteradas (coordenadas UTM: 6946438 N; 385043 E). La litología de caja corresponde a la unidad intrusiva del distrito, aunque con un grado avanzado de alteración que dificulta su identificación macroscópica directa. En superficie, se observan recubrimientos verdosos y azulados, asociados a mineralización secundaria visible. Los resultados geoquímicos obtenidos por FRX indican concentraciones elevadas de cobre (16,7 %), sílice (18,1 %), calcio (12,4 %) y arsénico (5,5 %)

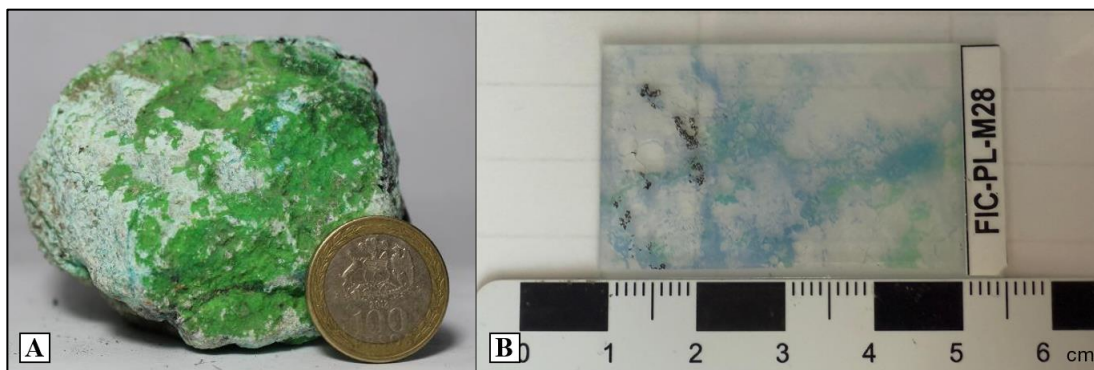


Figura 48. A. Muestra de mano FIC-PL-M28. B. Corte transparente correspondiente a la muestra FIC-PL-M28.

En sección delgada transparente (figura 48B), la muestra presenta una matriz microgranular heterogénea con distribución irregular de minerales secundarios. Se observan agregados masivos de conicalcita, con hábito botroidal y color verde oliva, dispuestos preferentemente en zonas porosas o alineados a lo largo de microfracturas. En sectores próximos se reconocen cristales prismáticos de lavendulana, de color azul intenso, ubicados en cavidades elongadas o como recubrimientos parciales en superficies internas. También se identifican áreas negras opacas de bordes irregulares, correspondientes a óxidos de manganeso, junto con fragmentos dispersos de cuarzo

microcristalino (figura 49A y B). Algunas plagioclasas parcialmente alteradas presentan bordes difusos y escasa interferencia óptica. La matriz general muestra evidencias de intensa descomposición, sin orientación preferente ni textura relictas bien definida.

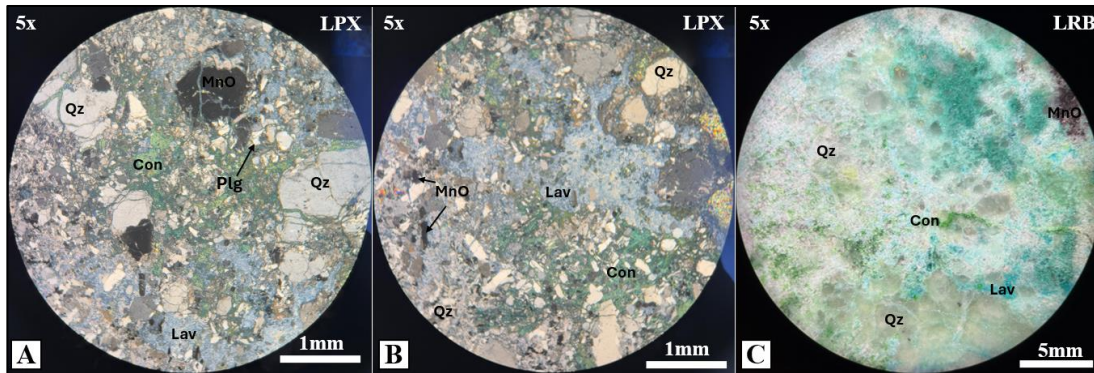


Figura 49. Microfotografías representativas de la asociación mineral observada en el corte delgado de la muestra FIC-PL-M28. (Con): Conicalita, (Qz): Cuarzo, (MnO): Óxidos de manganeso, (Lav): Lavendulana, (Plg): Plagioclasa. C. Rechazo pulido de la muestra FIC-PL-M28.

5.4 Estructuras geológicas

El distrito minero Pampa Larga presenta una red estructural compleja, conformada por fallas, diques y vetas que se reconocen en distintos sectores del área de estudio. Estas estructuras definen la disposición de las unidades litológicas y, en muchos casos, controlan la ubicación de la mineralización. Las fallas corresponden a planos de fractura de alto ángulo con continuidad variable, que localmente actúan como conductos para vetas mineralizadas. Los diques se presentan como cuerpos tabulares de composición intermedia a félsica, alojados tanto en la unidad intrusiva como en la unidad volcánica, y son frecuentes en los sectores de mayor fracturamiento. Las vetas, por su parte, se desarrollan preferentemente a lo largo de planos de falla y fracturas preexistentes, mostrando variaciones en potencia, continuidad y mineralogía.

La descripción de estas estructuras se organiza en los siguientes apartados, donde se detallan sus características geométricas, relaciones con la roca de caja y ejemplos representativos observados en terreno.

5.4.1 Diques

En el distrito Pampa Larga se identifican dos tipos principales de diques, clasificados de acuerdo con su composición: pórfido dioríticos y aplíticos.

5.4.1.1 Diques pórfido dioríticos

Corresponden a cuerpos tabulares hipabisales que intruyen tanto la unidad intrusiva como la unidad de andesitas y brechas volcanoclásticas. La mayoría presenta extensiones de varios metros y espesores promedio cercanos a 3 m (figura 50A). En algunos sectores se observan vetas de baritina con mineralización económica asociadas espacialmente (contiguas) a estos diques, los cuales destacan notablemente en afloramientos superficiales.

Petrográficamente, exhiben textura porfídica en matriz afanítica holocristalina. Los fenocristales representan más del ± 35 % de la composición, constituidos principalmente por plagioclasa ± 35 – 45 % y hornblenda ± 15 – 25 %, en menor proporción cuarzo ± 5 – 12 % y feldespato alcalino ± 3 – 8 %. La matriz microcristalina, de color grisáceo a gris oscuro, contrasta con los fenocristales, reflejando un enfriamiento relativamente rápido. Estas rocas son melanocráticas, con un índice de color cercano al 70 %. En áreas con alteración clorítica, adquieren tonalidades de gris oscuro a verdoso.

5.4.1.2 Diques aplíticos

Son cuerpos tabulares de composición félsica, que afloran principalmente en zonas de fracturamiento del distrito. Presentan textura holocristalina equigranular fina, típica de las rocas aplíticas. Están compuestos predominantemente por cuarzo (± 45 – 55 %) y feldespato alcalino (± 35 – 45 %), con proporciones subordinadas de plagioclasa (± 5 – 10 %) y biotita accesorio (± 2 – 5 %). Estas rocas, de color blanco a gris claro, tienen un índice de color bajo ($\leq \pm 10$ %), clasificándose como leucocráticas (figura 50B).

En general, los diques aplíticos son de distribución más localizada, presentan espesores menores y menor continuidad longitudinal que los diques pórfido dioríticos, apareciendo como cuerpos más cortos y restringidos a sectores específicos del distrito.

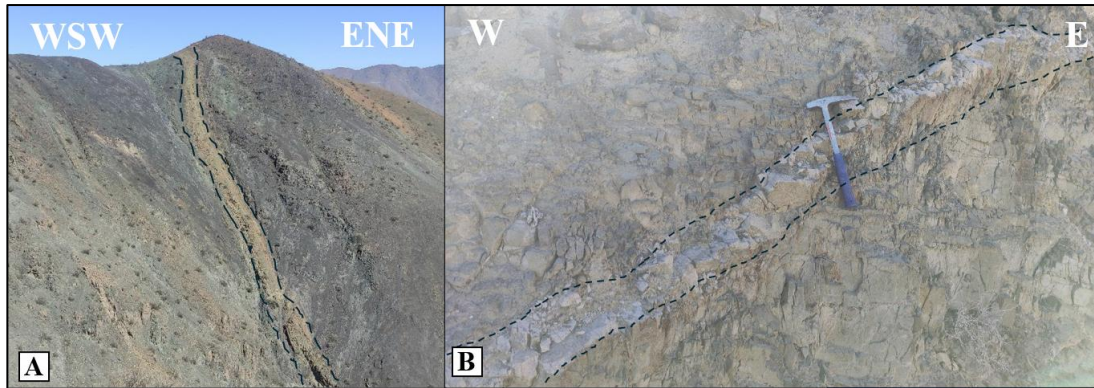


Figura 50. A. Dique pórfido microdiorítico alojado en un afloramiento de andesita con alteración clorítica B. Dique aplítico hospedado en la unidad intrusiva.

5.4.2 Fallas

En el distrito minero Pampa Larga se reconocen fallas de distintas escalas, distribuidas principalmente en la unidad de andesitas y brechas volcanoclásticas. La estructura más prominente corresponde a una falla normal ubicada en el flanco este del distrito, con una extensión aproximada de 3 km y orientación N10°W/80°WSW (figura 51A).

Otra estructura destacada es una falla con carácter sinistral-normal, de orientación N70°W/75°NNE, que desplaza un bloque de andesitas estratificadas y se extiende por cerca de 1 km. En varios sectores se observan vetas mineralizadas ricas en óxidos de cobre asociadas a esta falla sinistral (figura 51B).

Además de estas fallas principales, se registran fallas menores distribuidas en diferentes puntos del área. La mayoría de estas presentan escasa continuidad superficial o se encuentran cubiertas, lo que dificulta su representación cartográfica detallada. Su presencia se reconoce a partir de criterios cinemáticos, tales como estructuras de árbol con relleno calcáreo y cloritización (figura 51C), sigmoides documentados en labores subterráneas (figura 51D) y estrías en afloramientos de andesita aledaños a vetas de baritina con mineralización de cobre (figura 51E).



Figura 51. A. Fotografía satelital de Google earth, el distrito Pampa Larga es delimitado en el recuadro rojo, en color azul se destaca la falla normal más extensa del área. Esta misma se extiende por varios kilómetros en los sectores cercanos. A su derecha se muestra una fotografía en el sector sureste del área de estudio, donde es posible ver claramente el plano de falla. B. Fotografía satelital de Google earth pro enfocada en el sector este del distrito, en ella es posible observar una falla siniestral normal que desplaza dos bloques de andesita estratificada, esta falla se encuentra aledaña a vetas con importante mineralización en ciertos puntos. C. Criterio cinemático “estructura de árbol” presente en una falla muy localizada en el área, se caracteriza por un relleno calcáreo con cloritización. D. Criterio cinemático “Sigmoide” perteneciente a la falla siniestral normal mencionada anteriormente, esta estructura se encuentra al interior de una labor minera. E. Criterio cinemático “Estrías de falla” aledañas a una veta/falla de baritina con mineralización de cobre en un afloramiento de andesita.

5.4.3 Vetas

Las vetas del distrito Pampa Larga muestran orientaciones predominantes NW–SE y NE–SW. Sus extensiones varían desde decenas de metros (ejemplo: minas Jote y María Catalina) hasta centenares de metros (ejemplo: minas Descubridora y Veta Negra), con potencias que oscilan entre pocos centímetros y hasta casi 2 m en sectores localizados. Se desarrollan sobre planos de alto ángulo, con buzamientos comprendidos entre 70° y 85° (ejemplos en figura 52).

De acuerdo con sus características mineralógicas y texturales, se reconocen dos tipos principales de vetas en el distrito:

- a. **Vetas de baritina con mineralización de cobre:** Compuestas principalmente por baritina, con diseminaciones de óxidos, carbonatos, arseniatos y vanadatos de cobre, además de impregnaciones de óxidos de manganeso. Presentan texturas

bandeadas, coloformes y crustiformes. Ejemplos representativos se encuentran en la mina Hornitos y en varias labores sin nombre del distrito.

- b. **Vetas brechadas ricas en arsénico:** Caracterizadas por abundante arsenopirita y minerales arsenicales, asociadas a brechización interna. En varios sectores contienen sulfuros hipógenos y disseminaciones de metales preciosos como oro y plata. Ejemplos de este tipo corresponden a las minas María Catalina y Alacrán.

La mina Veta Negra constituye un caso particular, ya que en ella se reconocen vetas de ambos tipos, con asociaciones mineralógicas variadas y abundantes.

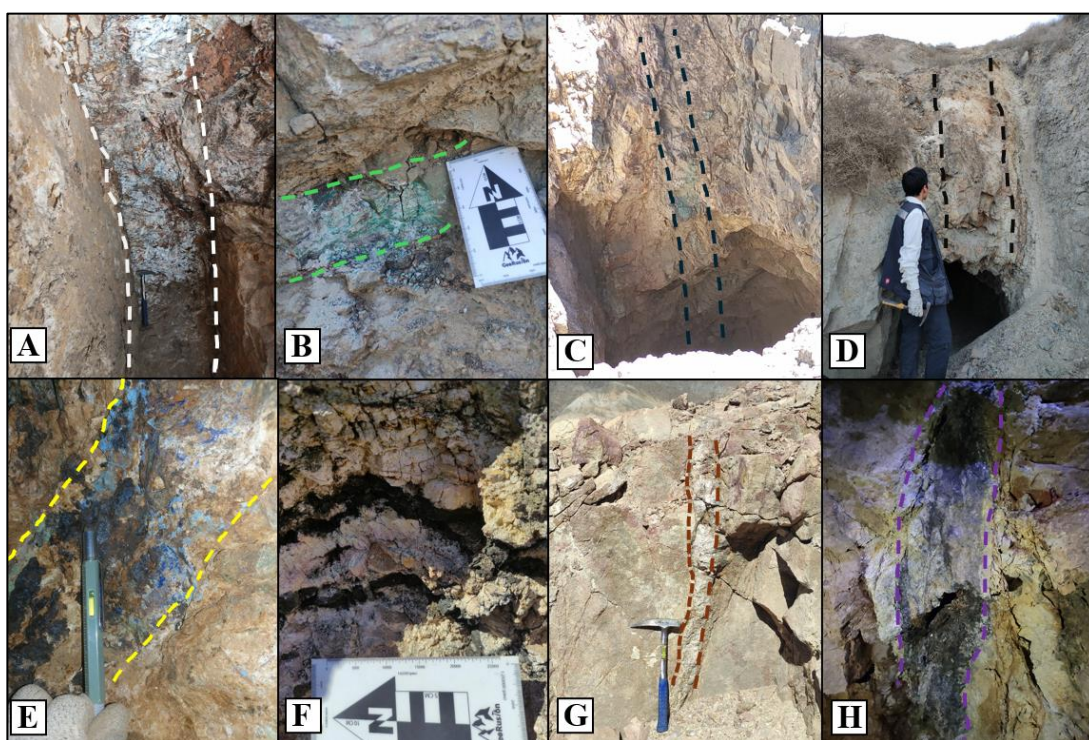


Figura 52. A Veta de baritina con mineralización diseminada de óxidos y carbonatos de cobre. B. Veta de baritina con mineralización de óxidos y arseniatos de cobre. C. Veta óxidos y arseniatos de cobre D. Veta de arsénico E. Veta de baritina con mineralización de carbonatos de cobre F. Vetas de óxidos de manganeso G. Veta de baritina sin mineralización económica. H. Veta de arsénico rica en cobre, plata y oro.

5.4.4 Análisis de datos estructurales

El conjunto de datos estructurales, compuesto por más de 60 mediciones de rumbo y manteo registradas en terreno (anexo 3), muestra concentraciones bien definidas en los diagramas de roseta y de polos.

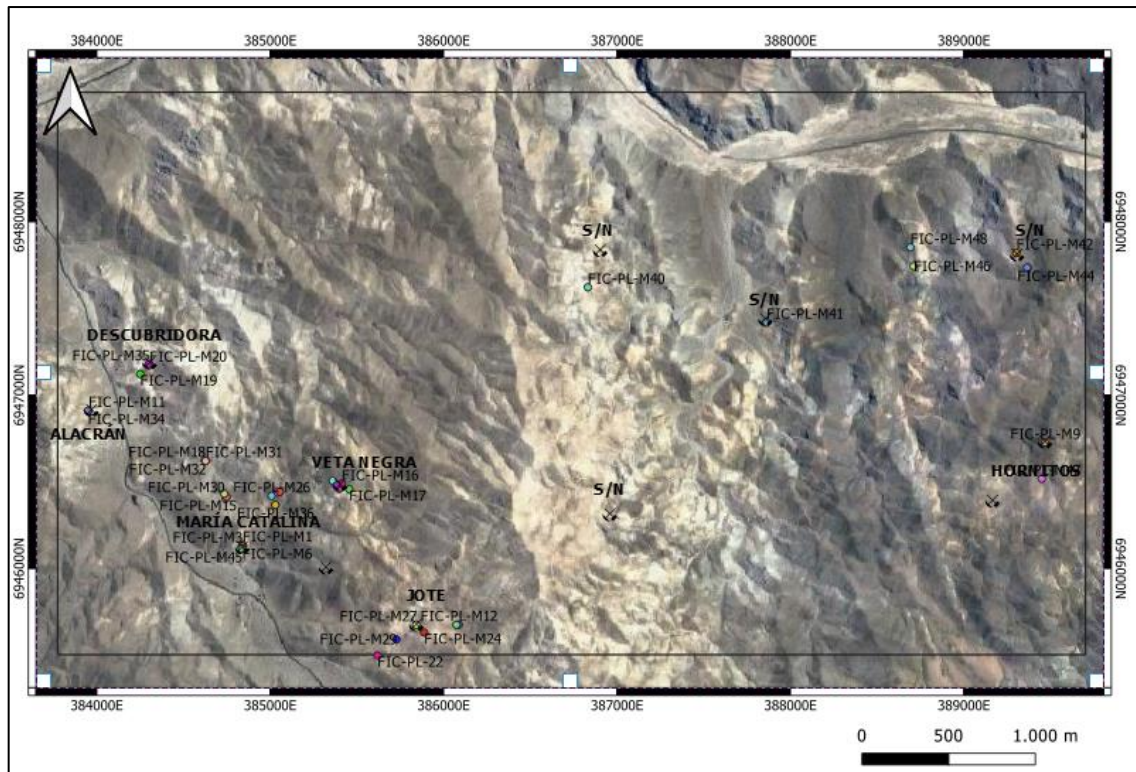


Figura 54. Mapa de ubicación de las 48 muestras geoquímicas recolectadas en el distrito Pampa Larga. Las muestras se distribuyen en torno a las principales vetas y labores mineras, tanto en el flanco occidental como en el flanco oriental del distrito.

5.5.1 Elementos mayores (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe, MgO, CaO, K_2O , P_2O_5)

Los resultados de las concentraciones de elementos mayores (figuras 55 y 56) muestran que el contenido de sílice (SiO_2) varía entre 0,56% y 86,29%, con una mediana de 10,49%. El óxido de aluminio (Al_2O_3) se encuentra entre 0,00% y 22,87%, con una mediana de 2,52%. El hierro total (Fe) presenta valores entre 0,036% y 30,33%, con una mediana de 0,93%. El óxido de magnesio (MgO) oscila entre 0,00% y 66,64%, con una mediana de 2,25%. El óxido de calcio (CaO) se distribuye entre 0,00% y 22,29%, con una mediana de 2,70%. El contenido de óxido de potasio (K_2O) varía entre 0,00% y 4,27%, con una mediana de 0,18%, mientras que el óxido de fósforo (P_2O_5) muestra valores entre 0,00% y 2,61%, con una mediana de 0,05%.

Estas concentraciones corresponden a un conjunto diverso de litologías, que incluye rocas de caja frescas, rocas alteradas y muestras mineralizadas. La distribución estadística se observa en los diagramas de caja (figura 55), donde se ilustran los valores mínimos,

máximos, medianas y dispersión de los datos. Adicionalmente, los diagramas de Harker (figura 56) muestran la relación composicional de cada óxido en función del SiO₂, representada mediante líneas de tendencia que permiten visualizar sus variaciones relativas.

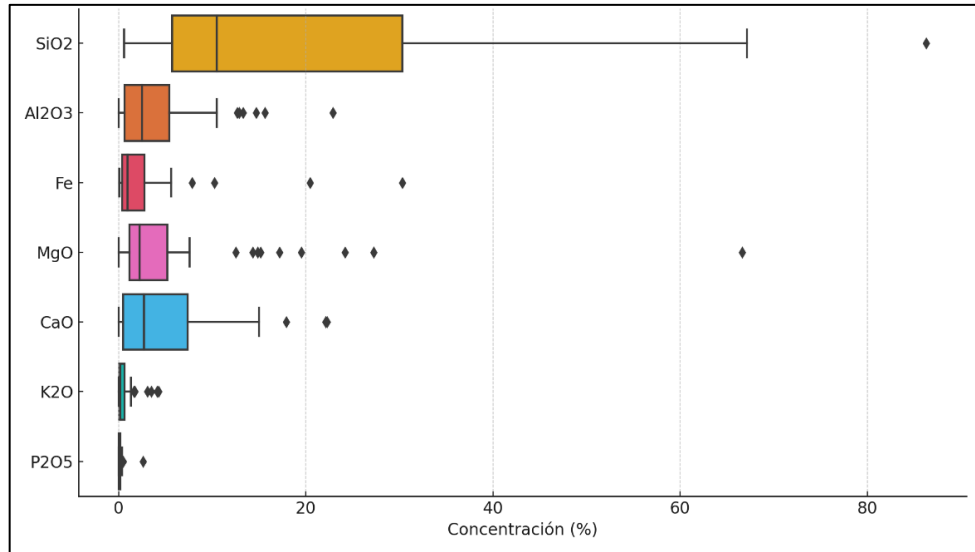


Figura 55. Diagramas de caja (box plots) de los elementos mayores en muestras del distrito minero Pampa Larga. Se muestran los rangos de concentración (%), valores centrales, distribución intercuartílica y presencia de valores atípicos de SiO₂, Al₂O₃, Fe, MgO, CaO, K₂O y P₂O₅.

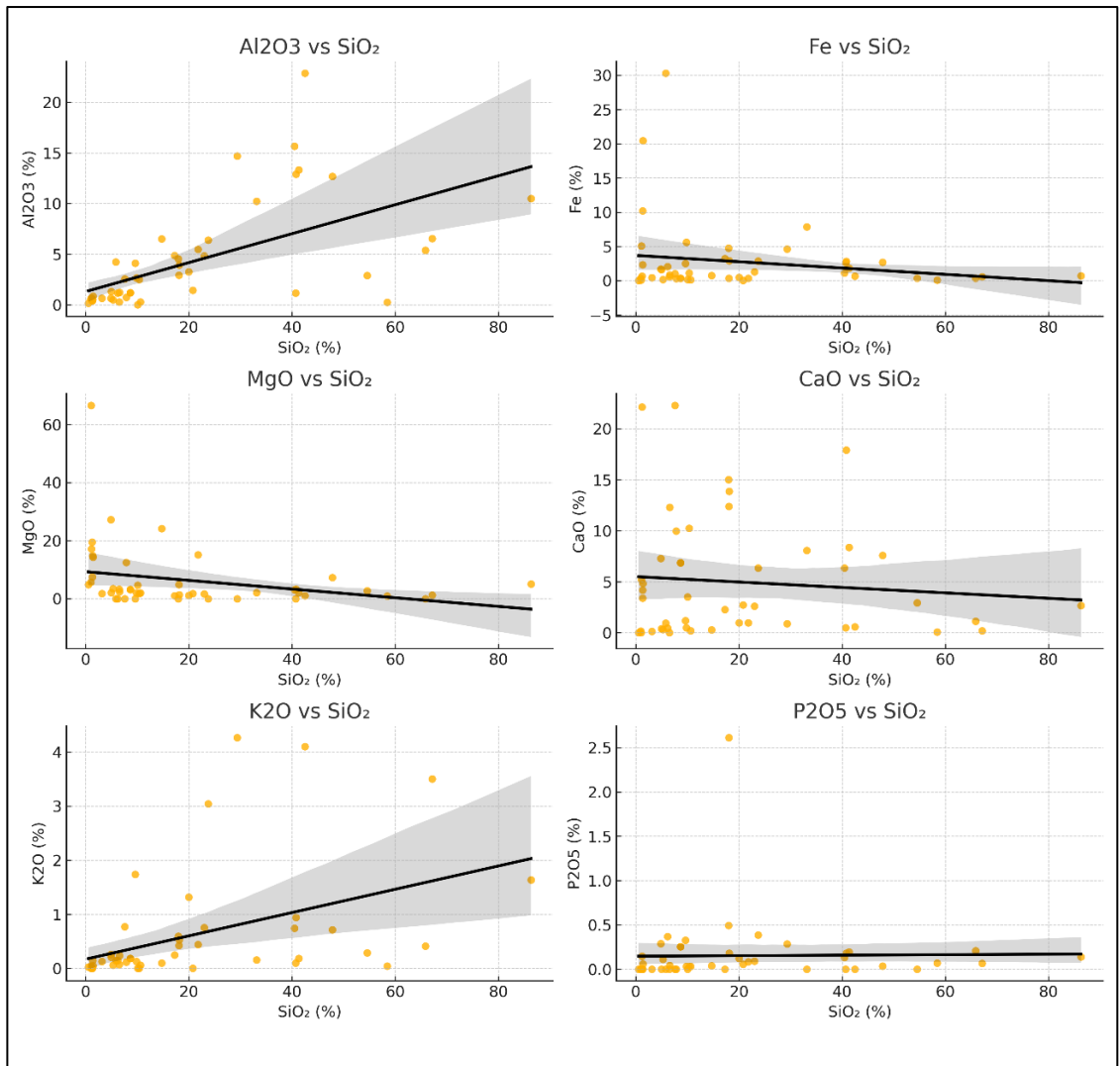


Figura 56. Diagramas de Harker de los elementos mayores Al₂O₃, Fe, MgO, CaO, K₂O y P₂O₅ en función del contenido de SiO₂ (%) en muestras del distrito minero Pampa Larga. Cada gráfico incluye una línea de tendencia lineal, con un área sombreada que representa la dispersión de los datos respecto de dicha tendencia.

5.5.2 Elementos traza y metales base (Cu, Zn, Pb, Fe, Ba, Mn, Sr)

Las concentraciones de elementos traza y metales base en el distrito Pampa Larga abarcan Cu, Zn, Pb, Fe, Ba, Mn y Sr. En general, los datos presentan una alta dispersión y amplios rangos de concentración, reflejando la heterogeneidad geoquímica entre las muestras analizadas. La mayor parte de estas proviene de desmontes contiguos a zonas de explotación pasada, lo que explica la presencia frecuente de mineralización en el material recolectado.

La tabla 1 resume los parámetros estadísticos descriptivos de cada elemento, incluyendo valores mínimos, medianas, máximos, medias y desviaciones estándar. Las concentraciones están expresadas en partes por millón (ppm), excepto en el caso del hierro (Fe), que se presenta en porcentaje (%).

ELEMENTO	MÍNIMO	MEDIANA	MÁXIMO	MEDIA	DESV. EST.	UNIDAD
CU	0.000	0.201	32.601	16.443	9.444	ppm
ZN	0.001	0.137	100.000	50.045	28.855	ppm
PB	0.000	0.000	1.235	0.618	0.357	ppm
FE	0.036	0.930	30.327	15.181	8.742	%
BA	0.000	0.000	35.721	17.861	10.335	ppm
MN	0.000	0.043	11.475	5.738	3.308	ppm
SR	0.000	0.021	1.179	0.590	0.339	ppm

Tabla 1. Resumen estadístico de las concentraciones de Cu, Zn, Pb, Fe, Ba, Mn y Sr en muestras del distrito minero Pampa Larga. Se presentan los valores mínimos, medianas, máximos, medias y desviaciones estándar.

Los diagramas de caja (figura 57), expresados en escala logarítmica, muestran la dispersión y presencia de valores atípicos para todos los elementos. Se observa que el cobre alcanza concentraciones máximas de hasta 32.601 ppm y el zinc valores de hasta 100.000 ppm, ambos correspondientes a muestras asociadas a zonas mineralizadas. En contraste, el plomo y el estroncio presentan medianas cercanas a cero y rangos restringidos, lo que refleja concentraciones bajas en la mayoría de las muestras de caja y alteradas. El hierro, bario y manganeso exhiben valores máximos elevados en muestras de vetas con óxidos de hierro, baritina y óxidos de manganeso, aunque con medianas bajas en el conjunto global, lo que evidencia distribuciones sesgadas hacia valores extremos.

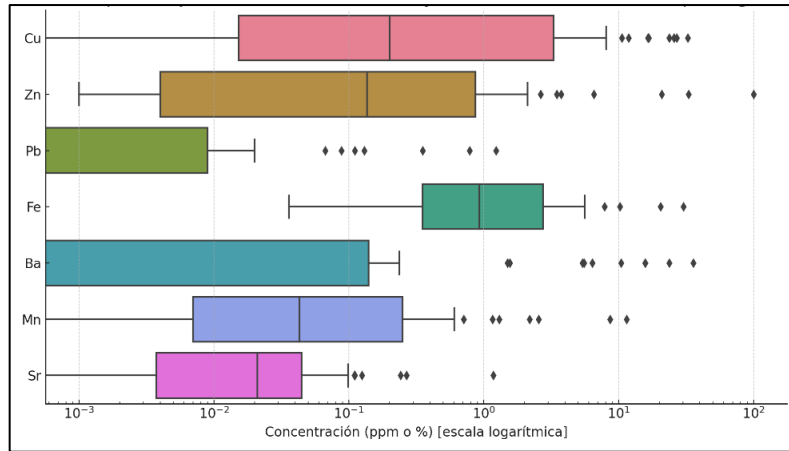


Figura 57. Diagramas de caja (box plots) de las concentraciones de Cu, Zn, Pb, Fe, Ba, Mn y Sr en muestras del distrito minero Pampa Larga. Los valores se representan en escala logarítmica, mostrando rangos de concentración, medianas, cuartiles y valores atípicos. El Fe se expresa en porcentaje (%), mientras que los demás elementos en ppm.

Para explorar la relación entre los elementos se utilizaron diagramas binarios (figura 58), en los que se representan pares seleccionados (Cu–Zn, Pb–Zn, Fe–Cu y Ba–Mn). En estos gráficos se distinguen tendencias de dispersión que reflejan la amplia variabilidad composicional registrada en las muestras.

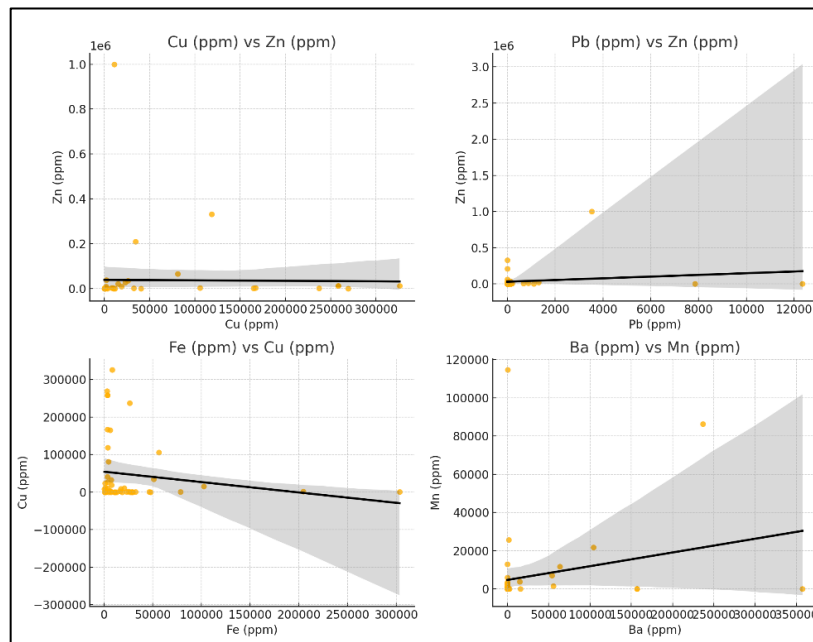


Figura 58. Diagramas binarios de los pares de elementos Cu–Zn, Pb–Zn, Fe–Cu y Ba–Mn en muestras del distrito minero Pampa Larga. Las líneas de tendencia se acompañan de áreas sombreadas que representan la dispersión de los datos respecto de cada ajuste.

5.5.3 Metales preciosos (Au, Ag)

Las concentraciones de oro (Au) y plata (Ag) en las muestras del distrito Pampa Larga presentan una marcada dispersión, con numerosos registros por debajo del límite de detección y algunos valores puntuales significativamente elevados.

El oro (Au) muestra concentraciones entre 0,0 ppm y 42,08 ppm, con una mediana de 0,0 ppm. La plata (Ag) varía entre 0,0 ppm y 98,23 ppm, también con una mediana de 0,0 ppm. En ambos casos, las distribuciones se caracterizan por rangos amplios y presencia de valores atípicos de alta concentración.

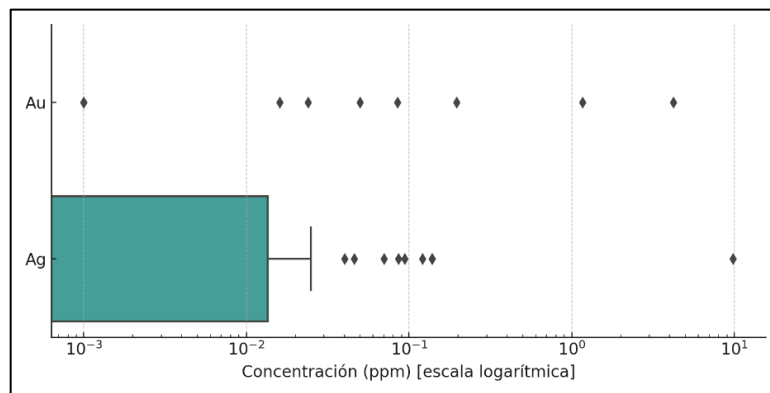


Figura 59. Diagramas de caja (box plots) de las concentraciones de Au y Ag en muestras del distrito minero Pampa Larga. Se muestran los valores mínimos, máximos, cuartiles, mediana y valores atípicos. Las concentraciones están expresadas en ppm.

La figura 59 presenta los diagramas de caja (box plots), donde se observa la dispersión y predominio de valores bajos en la mayoría de las muestras. En la figura 60 se muestra el diagrama binario Au–Ag, que evidencia una tendencia positiva entre ambos elementos.

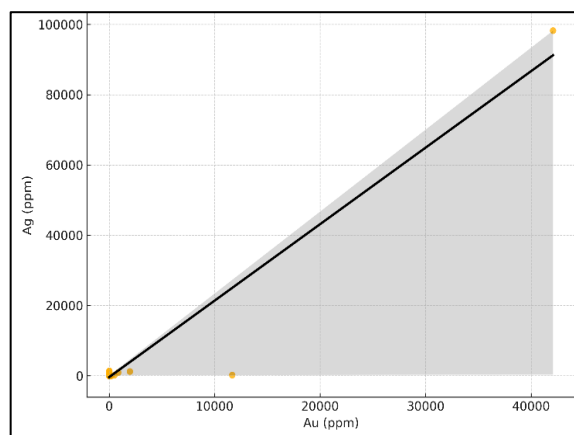


Figura 60. Diagrama binario Au–Ag en muestras del distrito minero Pampa Larga. La línea de tendencia representa la relación estadística entre ambos elementos, y el área sombreada corresponde a la dispersión de los datos respecto del ajuste.

5.5.4 Elementos estratégicos (As, Sb, Mo)

Las concentraciones de arsénico (As), antimonio (Sb) y molibdeno (Mo) en las muestras del distrito Pampa Larga presentan una amplia dispersión, con predominio de registros bajos y valores puntuales elevados (tabla 2). El arsénico (As) varía entre 0,0 y 1000,0 ppm, con una mediana de 2,41 ppm. El antimonio (Sb) se distribuye entre 0,0 y 139,2 ppm, con una mediana de 0,54 ppm, mientras que el molibdeno (Mo) alcanza concentraciones entre 0,0 y 2,12 ppm, con una mediana de 0,01 ppm.

ELEMENTO ESTRATÉGICO	MÍNIMO	MEDIANA	MÁXIMO	MEDIA	DESV. EST.	UNIDAD
AS	0.0	2.410	1000.0	482.37	284.77	ppm
SB	0.0	0.535	139.2	67.72	39.27	ppm
MO	0.0	0.010	2.12	1.053	0.598	ppm

Tabla 2. Parámetros estadísticos descriptivos de las concentraciones de As, Sb y Mo en muestras del distrito minero Pampa Larga. Se presentan los valores mínimos, medianas y máximos obtenidos para cada elemento, expresados en ppm.

La mayoría de las muestras muestra concentraciones por debajo de 1 ppm, aunque se registran algunos valores anómalos que generan distribuciones marcadamente asimétricas. Estos resultados se ilustran en los diagramas de caja (figura 61), donde se aprecia la dispersión de los datos y la presencia de valores extremos, en particular para As y Sb.

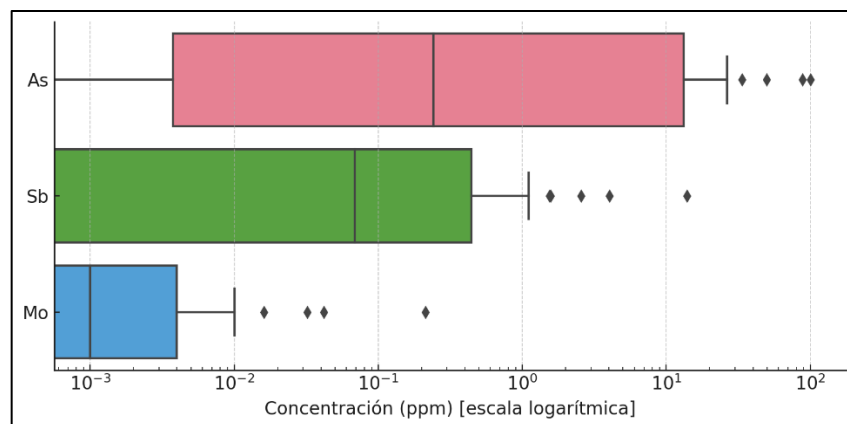


Figura 61. Diagramas de caja (box plots) de las concentraciones de As, Sb y Mo en muestras del distrito minero Pampa Larga. Se observa una amplia dispersión, en especial en As y Sb, con valores anómalos puntuales.

5.5.5 Mapas de anomalías geoquímicas

La figura 62 muestra la distribución espacial de las anomalías geoquímicas para los elementos Cu, Ba, Au, Ag, As y Sb en el distrito Pampa Larga. Las concentraciones se representan mediante símbolos circulares escalados de acuerdo con los rangos de valores obtenidos en cada muestra. Los mapas permiten visualizar los sectores donde se concentran los valores más elevados y diferenciar áreas con baja, media y alta intensidad geoquímica para cada elemento.

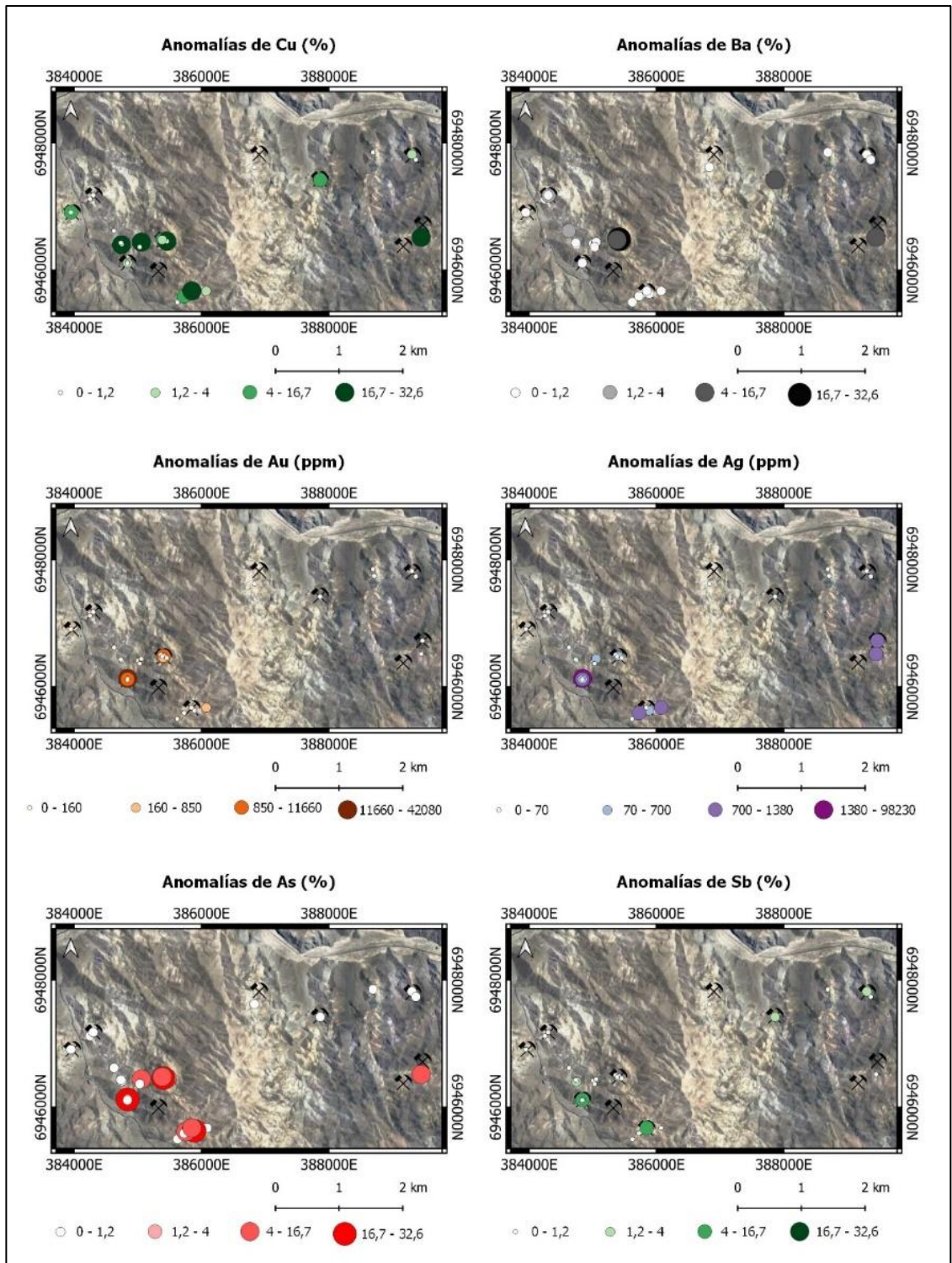


Figura 62. Mapas de anomalías geoquímicas de Cu, Ba, Au, Ag, As y Sb en el distrito minero Pampa Larga. La simbología circular representa los rangos de concentración definidos para cada elemento, indicados en la escala respectiva.

CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN

La discusión integrada de los resultados obtenidos en este estudio busca responder a los objetivos planteados para la caracterización del distrito minero Pampa Larga. A partir de la información litológica, estructural, mineralógica y geoquímica generada, se analizan las relaciones entre las unidades geológicas y los procesos hidrotermales que las afectan, estableciendo vínculos con la distribución de la mineralización observada.

Este análisis permite interpretar los estilos de alteración y mineralización, evaluar las asociaciones elementales derivadas de la geoquímica, y proponer un modelo metalogénico que sintetice la evolución del sistema. Con ello, se entrega una base sólida para valorar preliminarmente el potencial económico del distrito y su relevancia en el contexto de la pequeña minería en la región de Atacama.

6.1 Correlación de unidades litológicas con unidades o sistemas estructurales

formales

La evolución geológica del distrito Pampa Larga refleja una estrecha interdependencia entre los procesos volcánicos, intrusivos y metamórficos, condicionados por la dinámica estructural regional asociada al Sistema de Fallas de Atacama (SFA). Las unidades reconocidas en el área no constituyen cuerpos aislados, sino que forman parte de un marco tectonomagmático mayor, correlacionable con unidades formales previamente descritas en la literatura, lo que permite integrar los resultados obtenidos con el contexto regional.

En la base de la secuencia se identificó la unidad de andesitas y brechas volcanoclásticas, expuesta principalmente en los flancos oriental y meridional del distrito. Estas rocas corresponden a coladas porfídicas con fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno, matriz microlítica con magnetita y microfracturas rellenas por clorita y calcita. Las brechas asociadas contienen clastos angulares de andesita y fragmentos líticos subordinados en una matriz afanítica con inclusiones carbonatadas, lo que sugiere episodios de fragmentación y redeposición subaérea. Estas características permiten correlacionarlas con la Formación Cerrillos, definida por Arévalo (2009) como una sucesión continental de lavas andesíticas porfídicas, brechas autoclásticas y niveles epiclásticos, suprayacente

a los intrusivos intermedios y afectada localmente por magnetización secundaria. Parker *et al.*, (1963) habían descrito la “volcánica Cerrillos” con coladas porfídicas, brechas autoclásticas y cuellos leucogabro en la base, reconocidos también en el borde occidental del distrito. La correlación con Cerrillos se refuerza al considerar que esta unidad no constituye el basamento, sino que suprayace discordantemente a la Formación Pabellón, de edad preorogénica y vinculada a subsidencia extensiva (Maksaev *et al.*, 2009). En cambio, Cerrillos representa un paquete sinorogénico depositado en un ambiente intraarco transtensional, con influencia directa del SFA en la apertura de vías de extrusión y acumulación volcanoclástica (Grocott & Taylor, 2002). La discordancia angular y erosiva entre ambas formaciones es un indicador directo de la deformación activa durante la acumulación de Cerrillos.

Sobre esta sucesión se emplaza la unidad intrusiva de más de 6,5 km², cuya textura fanerítica a porfídica, con feldespatos potásicos en matriz intersticial, cuarzo anhedral, biotita y hornblenda, la cual coincide con los intrusivos intermedios “Ksd” de Arévalo (2009). Dicho autor los describe como cuerpos homogéneos de textura hipidiomórfica granular con vetillas carbonáticas y halos de cloritización, rasgos observados también en Pampa Larga. Parker *et al.*, (1963) habían denominado a este cuerpo “Plutón Pampa Larga”, con mineralogía similar y fracturas rellenas de carbonato, reforzando la correlación. Su emplazamiento puede asociarse al arco magmático temprano del Cretácico inferior, favorecido por estructuras transtensivas heredadas del SFA (Grocott & Taylor, 2002).

El intrusivo generó una aureola calcosilicatada discontinua de hasta 1,5 km de ancho, compuesta por corneanas de wollastonita masiva de hábito radial y cuarcita recristalizada, con geometrías bandeadas y cuerpos lenticulares que penetran hacia el interior del stock. Estas características concuerdan con la “aureola calcosilicatada” descrita por Arévalo (2009) en torno a intrusivos intermedios en la hoja Los Loros, y con las “rocas córneas compactas” bandeadas señaladas por Parker *et al.*, (1963), de espesores de 300 a 1800 m. Este metamorfismo de contacto se explica por un metasomatismo térmico directo sobre protolitos carbonatados y silíceos, intensificado por la permeabilidad secundaria generada en fracturas vinculadas al SFA, lo que asegura la correlación con el modelo regional.

En el Cuaternario, la región registra depósitos aluviales y fluviales no consolidados que sobreyacen discordantemente a todas las unidades previas. Estos corresponden a gravas polimícticas mal seleccionadas con clastos angulosos a subangulosos en matriz limo-arenosa, organizadas en abanicos aluviales y lechos de quebrada. Por sus características, pueden correlacionarse con el subnivel Qal2 definido por Arévalo (2009) en la hoja Los Loros, lo que coincide con los depósitos equivalentes descritos por Parker *et al.*, (1963) en los cauces de la misma cuenca.

Esta disposición litológica y estratigráfica queda sintetizada en el mapa geológico simplificado del original (anexo 4) del distrito Pampa Larga (figura 63), donde se aprecia la distribución espacial de las principales unidades y su relación de contacto

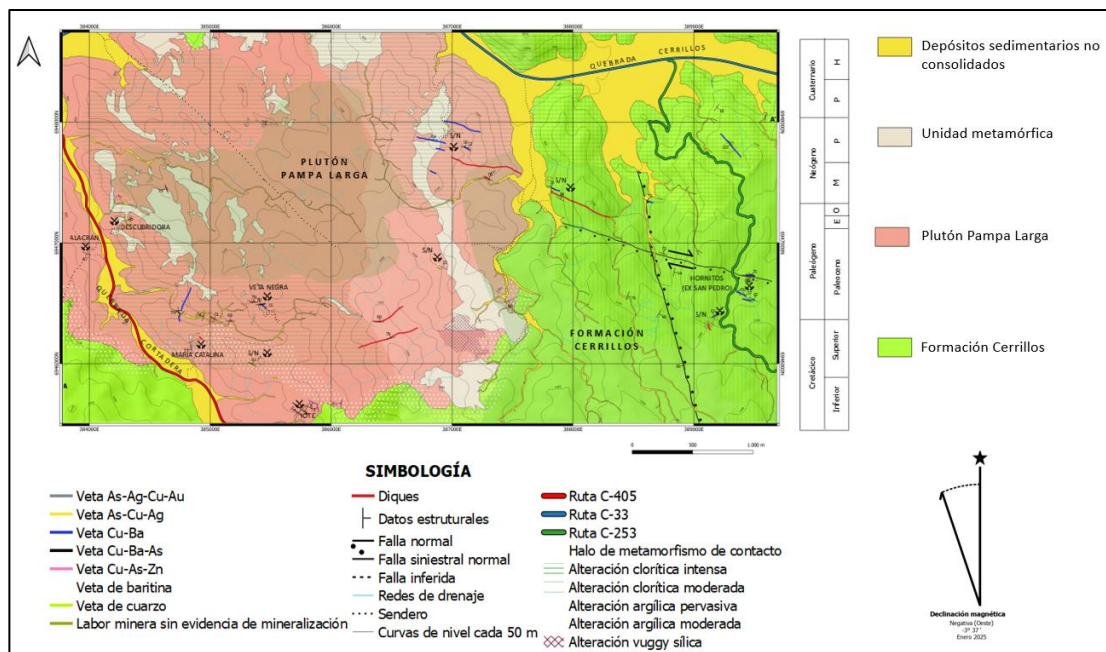


Figura 63. Mapa geológico del distrito minero Pampa Larga. Simplificado del original

El análisis estructural basado en más de 60 mediciones de rumbo y manteo evidencia un sistema dominado por direcciones NW-SE y WNW-ESE, con una familia subordinada N-S. La concentración de rumbos en 310°-320° y 290°-300°, junto con agrupaciones menores entre 0° y 10°, coincide con los dominios subsidiarios del SFA reconocidos en El Salado, Remolino y Montosa-Elisa (Cornejo *et al.*, 1997; González *et al.*, 2003). Este

patrón se interpreta como el reflejo de un campo de esfuerzos transcurrente, que organiza la red de fracturas del distrito y controla la disposición de vetas e intrusivos.

Para integrar este marco estructural se aplicó el modelo de Riedel (1929), que explica la disposición angular de fracturas en zonas de cizalla frágil sinistral. Se consideró como eje principal de cizalla (Y) una orientación $355^{\circ}-0^{\circ}$, expresada en una falla subvertical reconocida en Mina Jote y María Catalina. Sobre este eje se distribuyen las fracturas R ($\sim 345^{\circ}$), T ($310^{\circ}-320^{\circ}$), R' ($290^{\circ}-300^{\circ}$), P ($\sim 7^{\circ}$), P' ($\sim 245^{\circ}$) y S ($\sim 220^{\circ}$) (figura 64). La correspondencia entre estos sistemas y las mediciones de campo, reforzada por indicadores cinemáticos como estrías, sigmoides y estructuras en échelon (Petit, 1987), confirma que las estructuras de Pampa Larga son producto de la reactivación de segmentos del SFA bajo un régimen transcurrente. Los máximos de la roseta estructural coinciden con los rangos de R, R' y T, validando la interpretación cinemática (Cembrano & Lara, 2009).

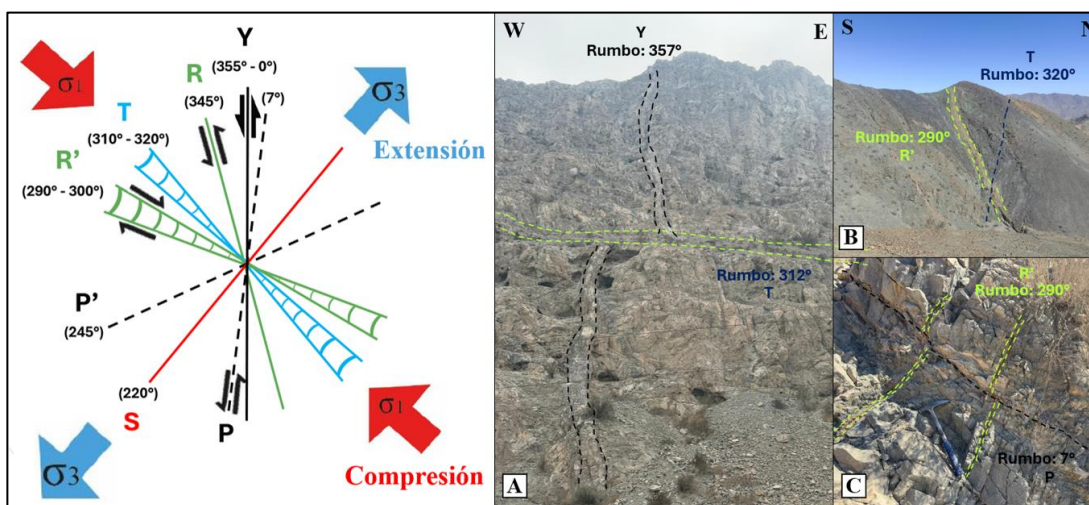


Figura 64. A la derecha se propone un modelo estructural basado en el experimento de Riedel (1929) adaptado al distrito minero Pampa Larga, construido a partir de los rumbos estructurales medidos en terreno como los que se evidencian en las fotografías que acompañan al modelo.

Este marco estructural se refleja directamente en la disposición de vetas y diques. Los diques pórfido dioríticos se alinean preferentemente con R' y Y, lo que indica intrusión sintectónica durante fases de cizalla antitética. Los diques aplíticos, más locales y de menor continuidad, tienden a ocupar T y P, vinculándose a pulsos tardíos en dominios extensivos residuales. Las vetas mineralizadas, en tanto, siguen principalmente los planos T y R', organizándose en enjambres con espaciamientos métricos y continuidad

hectométrica, como ocurre en Jote, Descubridora y Veta Negra. La mineralización asociada (Cu, Ba, As, metales preciosos) se concentra en intersecciones de T y R' con Y, donde la apertura repetida generó zonas de brechización y clavos mineralizados. La superposición de alteraciones propilítica, argílica y vuggy sílica en estas estructuras confirma su rol como conductos preferenciales de fluidos hidrotermales, coherente con los dominios subsidiarios del SFA (Cembrano & Lara, 2009; Grocott & Taylor, 2002).

En síntesis, la correlación de unidades litológicas con marcos estructurales formales demuestra que Pampa Larga es la expresión local de un sistema controlado por el SFA, en el que la Formación Cerrillos registra el volcanismo sinorogénico temprano, el stock granodiorítico corresponde al pulso intrusivo intermedio, y la aureola calcosilicatada refleja el metamorfismo de contacto generado. Todo ello se organiza bajo un campo de cizalla sinistral interpretado a través del modelo de Riedel, que explica la orientación de fallas, diques y vetas, así como la localización de la mineralización. Este marco cinemático constituye la base para interpretar los procesos hidrotermales y metalogénicos abordados en los apartados siguientes.

6.2 Interpretación de procesos de alteración-mineralización

La caracterización geológica del distrito Pampa Larga permite organizar la evolución hidrotermal y metalífera en una secuencia de ocho etapas sucesivas. Estas fueron establecidas a partir de la integración de evidencias mineralógicas, texturales y geoquímicas, contrastadas con descripciones de la literatura y análogos regionales de sistemas epitermales híbridos. La siguiente interpretación expone, en orden cronológico, los procesos responsables de la superposición de estilos de alteración y mineralización, constituyendo la base para comprender la distribución actual de los cuerpos vetiformes del distrito.

1. Exsolución de fluidos mineralizantes desde una cámara magmática.

El inicio del sistema hidrotermal de Pampa Larga corresponde a la exsolución de fluidos desde un cuerpo magmático emplazado a profundidad intermedia (~5 km), bajo condiciones de presión litostática superiores a 1 kbar y temperaturas mayores a 700 °C

(figura 65). Durante la cristalización fraccionada de la intrusión, la saturación en volátiles dio lugar a la separación de una fase acuosa compuesta principalmente por H₂O, SO₂, HCl, H₂S y CO₂, enriquecida además en Cu, As, Sb, Au y Ag. Este proceso corresponde al denominado “*second boiling*” (Candela, 1997), en el que la descompresión y el enfriamiento progresivo facilitan la división del fluido en una fase vapor, rica en volátiles, y una fase salmuera densa con capacidad para transportar altas concentraciones de metales mediante complejos clorurados y sulfurados.

Las características fisicoquímicas inferidas para este estadio inicial son soluciones hipersalinas, ácidas y oxidantes que son coherentes con la génesis de depósitos epitermales de alta sulfuración, donde la disponibilidad de SO₂ disuelto juega un rol decisivo en la formación de fluidos fuertemente ácidos y altamente efectivos en la movilización de metales (Fournier, 1999; Hedenquist & Lowenstern, 1994; Sillitoe & Hedenquist, 2003).

Este primer estadio constituye, por lo tanto, la fuente primaria de fluidos y metales que, al interactuar posteriormente con las estructuras reactivadas del distrito, darán origen a la evolución hidrotermal registrada en las etapas siguientes.

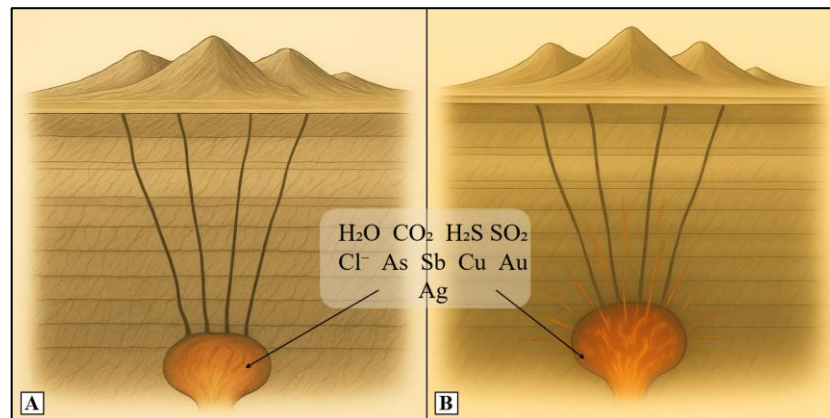


Figura 65. Representación esquemática de las etapas iniciales del sistema epitermal en el distrito Pampa Larga. A. Exsolución de fluidos mineralizantes desde una cámara magmática alojada a nivel cortical medio. Los fluidos ricos en volátiles (H₂O, CO₂, H₂S, SO₂, Cl⁻) y metales (As, Sb, Cu, Au, Ag) se comienzan a separar en fases líquida y vapor, constituyendo la fuente primaria del sistema hidrotermal. B. Representación de una diferenciación magmática y cristalización fraccionada en profundidad previo a los eventos de ebullición hidrotermal.

2. Advección de fluidos hidrotermales por estructuras reactivadas

La migración de los fluidos mineralizantes estuvo fuertemente controlada por estructuras subverticales de rumbo NW–SE, correspondientes a fallas y zonas de cizalla reactivadas, que actuaron como conductos de permeabilidad secundaria. Estos planos favorecieron el ascenso canalizado de soluciones hidrotermales desde niveles profundos hacia las zonas de precipitación (figura 66).

El ascenso fue impulsado por un gradiente de presión, a medida que los fluidos transitaron desde un dominio confinado por presión litostática hacia niveles menos profundos donde la presión se aproximaba al régimen hidrostático (Fournier, 1999; Hedenquist *et al.*, 2000). Esta transición facilitó la descompresión progresiva, condición crítica para la evolución termodinámica del sistema.

Los fluidos transportados eran soluciones cloruradas de salinidad moderada a alta (hasta 20 wt.% NaCl eq.), con pH ácido y elevada actividad de volátiles (HCl, SO₂, H₂S y CO₂). La circulación adveccional a lo largo de planos estructurales subverticales fue eficiente y lateralmente restringida por la baja permeabilidad de la roca de caja. Este control estructural se refleja en la geometría de las vetas, las cuales siguen con precisión la orientación de las fallas principales, como se observa en los sectores de Veta Negra, María Catalina y Mina Jote.

La reiterada inyección de fluidos a lo largo de estas estructuras sugiere una dinámica pulsátil, donde la reactivación tectónica propició múltiples episodios de flujo hidrotermal. Esta etapa constituye el tránsito crítico de los fluidos mineralizantes hacia condiciones de menor presión, preparando el escenario para los procesos de ebullición, la precipitación de sulfuros y el desarrollo de halos de alteración, que se manifiestan plenamente en la etapa siguiente.

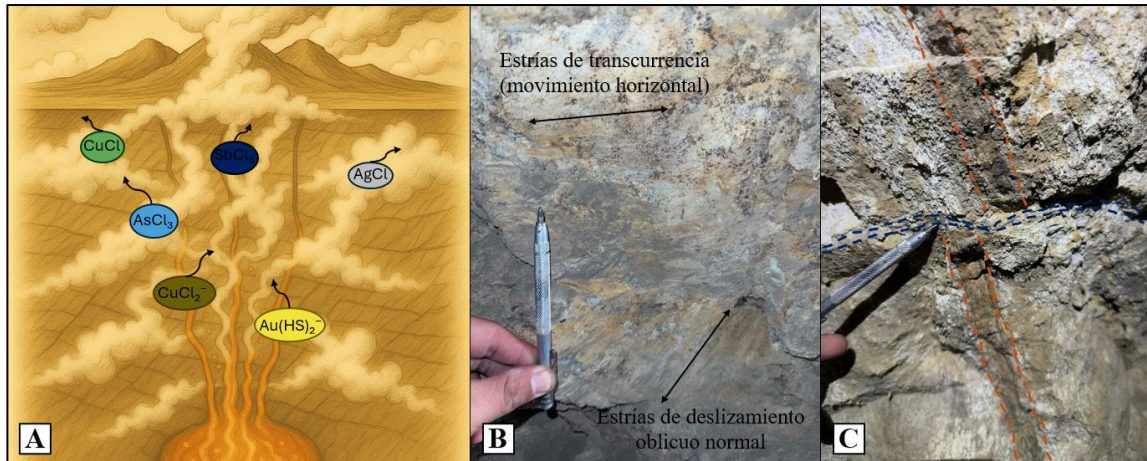


Figura 66. Evidencia del ascenso estructural de fluidos hidrotermales y reactivación tectónica en el distrito Pampa Larga. A. Representación conceptual del ascenso de soluciones hidrotermales por estructuras subverticales reactivadas, donde la interacción fluido–roca y el control estructural definen la arquitectura del sistema (modificado de Sillitoe, 2010). B. Estrías de falla en la roca de caja de la veta principal de la mina Alacrán. Se observan dos direcciones principales: una estría horizontal que indica componente de transcurrancia, y una estría inclinada que sugiere movimiento oblicuo–normal, compatibles con un régimen transtensional. C. Evidencia de desplazamiento oblicuo en una falla menor reactiva. La traza de falla (líneas azules) rellena de yeso corta y desplaza vetillas secundarias de la veta principal de Descubridora (líneas punteadas naranjas), lo que indica múltiples pulsos tectónicos y superposición de eventos estructurales en el sistema.

3. Precipitación masiva de sulfuros metálicos y baritina en un sistema multiepisódico de ebullición

El ascenso canalizado de soluciones cloruradas por estructuras subverticales culminó en niveles someros, donde el tránsito desde confinamiento litostático a presiones próximas al gradiente hidrostático produjo descompresión rápida y ebullición del fluido. La separación vapor–líquido y la pérdida de H_2S , SO_2 y CO_2 alteraron el equilibrio ácido–base y el estado redox, elevando localmente el pH y desestabilizando complejos metálicos Cl^- y HS^- , con sobresaturación y colapso de solubilidad de especies sulfuradas (Henley y Ellis, 1983; Hedenquist *et al.*, 2000). En este dominio se infiere $T \approx 240\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$, salinidades 5–20 wt.% NaCl eq., pH $\sim 3,5\text{--}5$ y $P < 50\text{--}70$ bar, parámetros característicos de la ventana epitermal somera de máxima eficiencia mineralizante (Fournier, 1999; Sillitoe, 2010).

Bajo estas condiciones precipitaron sulfuros hipógenos dominados por tennantita, calcopirita, arsenopirita, esfalerita, galena, bornita y estibina, acompañados por cuarzo y baritina, asociados a brechización hidráulica que fragmentó la roca de caja y cementó

clastos con matrices silíceo-sulfídicas. En minas como Alacrán y María Catalina, se registran vetas bandeadas y cuerpos brechados con altos tenores de Cu–As–Sb, mientras que Veta Negra evidencia segmentos masivos de baritina, reflejando fluctuaciones composicionales del fluido durante pulsos de ebullición (Fournier, 1999; Sillitoe, 2010). La arquitectura de alteración se organizó lateralmente: contiguo a las vetas se desarrolló un halo argílico avanzado dominado por caolinita por condensación de vapores ácidos; más distalmente, a menores T y con pH tendiendo a neutro, se estableció un halo propilítico con clorita, epidota, actinolita, calcita y albita (FIC-PL-M25; FIC-PL-M45 respectivamente), patrón coherente con zonaciones metasomáticas controladas por ebullición en sistemas epitermales (Hedenquist y Arribas, 2022; Candela, 1997; Sillitoe, 2010). Véase la figura 67 para la distribución esquemática de halos.

Las texturas bandeadas, la reactivación de vetas y las sucesiones de brechas con clastos angulosos y cementos silíceo-sulfurados apuntan a un comportamiento pulsátil: ciclos repetidos de sellado, sobrepresión y ruptura a lo largo de estructuras preestablecidas, como se reconoce en Descubridora y en segmentos de Alacrán, donde clastos silíceos rellenan intersticios intraveta (Hedenquist *et al.*, 2000; Sillitoe, 2010). Este pulso mineralizante no representó un cierre definitivo, sino un punto de máxima saturación del sistema, tras el cual las condiciones de presión, permeabilidad y química de fluidos comenzaron a modificarse progresivamente, abriendo paso a nuevas dinámicas de circulación y transformación hidrotermal.

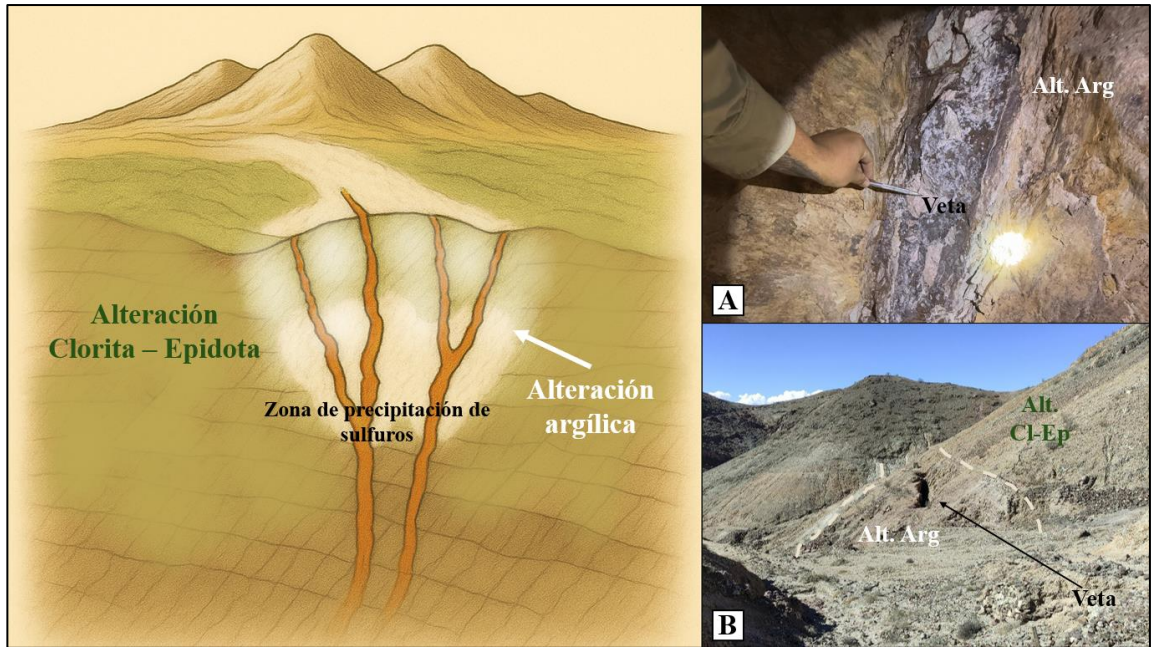


Figura 67. Representación esquemática y fotografías de campo asociadas a la etapa de ebullición hidrotermal y precipitación mineral súbita en el distrito Pampa Larga. A la izquierda, se observa un corte conceptual donde vetas subverticales alcanzan niveles someros, generando un halo argílico blanco en contacto directo con las vetas, y un halo propilítico verdoso más distal, de las estructuras mineralizadas A. Veta brechada con halo argílico perteneciente a la mina Alacrán. B. Fotografía panorámica que muestra la zonación de alteración en superficie, donde la argílica aparece inmediatamente asociada a la veta explotada, y la clorítica más alejada, siguiendo el patrón de zonación lateral típico de sistemas epitermales de alta sulfuración.

4. Exhumación tectónica y exposición progresiva del sistema a meteorización superficial

Tras los pulsos repetidos de ebullición y sellado de vetas, el sistema hidrotermal entró en un periodo de reorganización estructural controlado por fallas de rumbo NW-SE reactivadas bajo un régimen extensional. La continua deformación cortical promovió la exhumación progresiva de los cuerpos mineralizados, favoreciendo su emplazamiento a niveles más superficiales. Este levantamiento relativo expuso los conductos mineralizados a gradientes de presión y temperatura más bajos, interrumpiendo la estabilidad de las asociaciones sulfuradas generadas en profundidad y facilitando el ingreso de aguas meteóricas frías a través de las zonas de fracturamiento (Sillitoe & Hedenquist, 2003; Hedenquist & Lowenstern, 1994).

Las vetas bandeadas y brechadas, selladas por cuarzo, sulfuros y baritina, comenzaron a experimentar fisuración secundaria y apertura de microfracturas, las cuales actuaron como rutas preferenciales para la infiltración descendente de fluidos oxidados (figura 68). Esta interacción promovió un progresivo desequilibrio geoquímico: las fases sulfuradas primarias se enfrentaron a un medio más oxidante y con valores de Eh más elevados que en las etapas previas, iniciando los procesos de disolución parcial y movilización de metales base (Fournier, 1999; Candela, 1997).

La evidencia en Pampa Larga sugiere que la etapa de exhumación no fue un evento instantáneo, sino más bien un proceso gradual en el que la erosión removió parte de la cobertura volcánica y sedimentaria, dejando expuestos sectores mineralizados como los observados en Hornitos y varias labores sin nombre. Allí, la presencia de sulfuros parcialmente reemplazados y relictos en matriz cuarzo-barítica indica que las condiciones del sistema comenzaron a oscilar entre la preservación de texturas hipogénicas y la incipiente oxidación supergena. Estas observaciones concuerdan con registros de depósitos epitermales donde la transición entre mineralización hipógena y enriquecimiento secundario está condicionada por la tectónica exhumante y la remoción de la zona de lixiviación (Hedenquist & Lowenstern, 1994; Sillitoe & Hedenquist, 2003).

En este sentido, la etapa 4 puede interpretarse como un punto de inflexión: un periodo donde los cuerpos vetiformes, aún dominados por mineralogía primaria, quedaron expuestos a un ambiente cada vez más permeable y oxidante. Este cambio progresivo en el régimen hidrológico sería clave para los procesos que se desencadenaron posteriormente, cuando el contacto sostenido con aguas meteóricas intensificó la alteración supergena y la redistribución de metales.

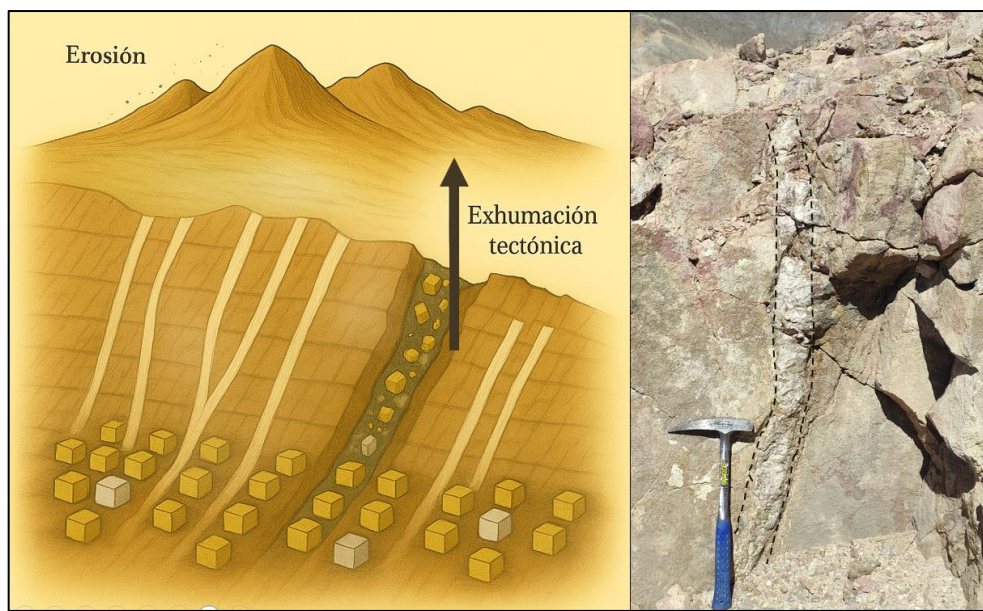
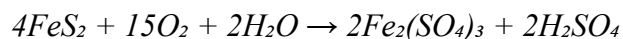


Figura 68. Esquema conceptual que ilustra la exhumación tectónica y la erosión progresiva de un sistema epitermal. La erosión elimina la zona lixiviada superior, dejando expuestas vetas con mineralización hipógena y zonas de oxidación directamente en superficie. La tectónica compresiva favorece el ascenso de bloques con vetas mineralizadas, lo cual genera un perfil truncado típico de sistemas epitermales erosionados, como se observa actualmente en el distrito Pampa Larga.

5. Oxidación de pirita y formación de ácido sulfúrico por interacción con aguas meteóricas

La infiltración progresiva de aguas meteóricas oxidadas en los niveles superiores del sistema favoreció la interacción directa entre estas soluciones y los sulfuros metálicos expuestos, particularmente pirita (FeS_2). Bajo condiciones de Eh elevado y pH ligeramente ácido, se desencadenó una reacción redox fundamental que marca el inicio de la alteración supergena: la oxidación de pirita y la consiguiente generación de ácido sulfúrico, según la reacción planteada por Alpers & Brimhall, 1988:



Este proceso provocó un descenso abrupto del pH (hasta valores < 3) y generó un entorno químicamente agresivo, con acumulación de iones H^+ , Fe^{3+} y SO_4^{2-} en solución (figura 69). La acidez resultante transformó la geoquímica del sistema, ya que facilitó tanto la disolución progresiva de sulfuros remanentes como la movilidad de metales hacia zonas más profundas (Nordstrom, 2011).

De manera muy local, y particularmente en sectores topográficamente elevados, se observan pequeños boxwork formados por la disolución de piritas, lo que constituye una evidencia tangible del avance de este proceso oxidativo. Dichas estructuras no solo reflejan la intensidad de la interacción entre aguas meteóricas y sulfuros, sino que también representan un marcador visual de la degradación mineral y del ambiente ácido-oxidante generado en esta etapa.

Así, la oxidación de pirita no solo marca el inicio de la transformación supergena, sino que abre paso a un escenario geoquímico radicalmente distinto, dominado por soluciones ácidas y cargadas en hierro, condiciones que más adelante darán lugar a nuevas fases minerales y a la configuración de rasgos distintivos en superficie, prolongando la evolución del sistema hacia etapas aún más visibles en el registro mineralógico (Chávez, 2000; Sillitoe, 2005).

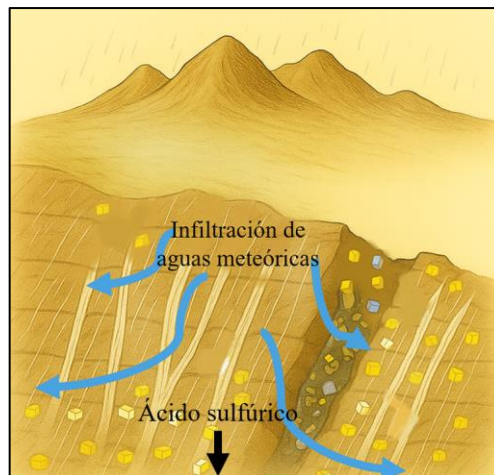


Figura 69. Representación esquemática del proceso de oxidación de sulfuros en condiciones meteóricas. La infiltración de aguas meteóricas oxigenadas genera ácido sulfúrico mediante la oxidación de pirita, lo cual da lugar a la disolución de sulfuros metálicos y a la movilización descendente del cobre en etapas posteriores. Esta zona se encuentra mayoritariamente erosionada en el distrito Pampa Larga.

6. Formación de gossans ferruginosos enriquecidos en Fe y empobrecidos en Cu

La continua oxidación de sulfuros metálicos, especialmente de pirita, favoreció la acumulación progresiva de hierro férrico (Fe^{3+}) y sulfato (SO_4^{2-}) en solución. En un medio dominado por aguas meteóricas ácidas y altamente oxidadas, el sistema evolucionó hacia condiciones de baja movilidad del hierro, lo que condujo a su precipitación como

minerales secundarios. Bajo pH inferiores a 3.5 y con un potencial redox elevado, el Fe^{3+} se estabilizó en fases como jarosita, goetita y hematita, concentradas en la parte superior del perfil supergeno (figura 70) (Nordstrom, 2011; Sillitoe, 2005). La diferenciación mineral responde a las variaciones locales de acidez y disponibilidad de sulfato: la jarosita se forma en ambientes extremadamente ácidos y ricos en sulfato, mientras que goetita y hematita tienden a desarrollarse en condiciones menos agresivas. Adicionalmente, en sectores con co-movilidad de manganeso, se generaron óxidos como la pirolusita.

Este ensamblaje mineral define los gossans ferruginosos, caracterizados por su enriquecimiento en hierro y el marcado empobrecimiento en cobre, consecuencia directa de la remoción de este último hacia niveles más profundos. Se trata de una etapa que representa un equilibrio relativo dentro del sistema supergeno: la acidez producida en fases previas comienza a tamponarse mediante la precipitación de fases estables de hierro, pero el cobre se mantiene en solución, desplazándose verticalmente. En el distrito Pampa Larga, este proceso se manifiesta de manera discontinua y restringida, con evidencias localizadas en piques subverticales y zonas de difícil acceso, donde afloran jarosita, goetita y hematita en asociación directa con relictos de pirita.

Lejos de constituir un evento final, la formación de gossans se interpreta como un umbral evolutivo que conecta la degradación oxidativa temprana con los procesos de enriquecimiento subsiguientes. En este sentido, los gossans no son solo un vestigio superficial del sistema, sino también un indicador de que el hierro se inmovilizó en superficie mientras el cobre siguió su trayecto en solución. Este tránsito marca la apertura hacia nuevas etapas, donde la dinámica geoquímica del cobre se expresará en la formación de minerales secundarios más estables en ambientes oxidados y, posteriormente, en sulfuros de enriquecimiento en condiciones reductoras (Chávez, 2000; Alpers & Brimhall, 1988).

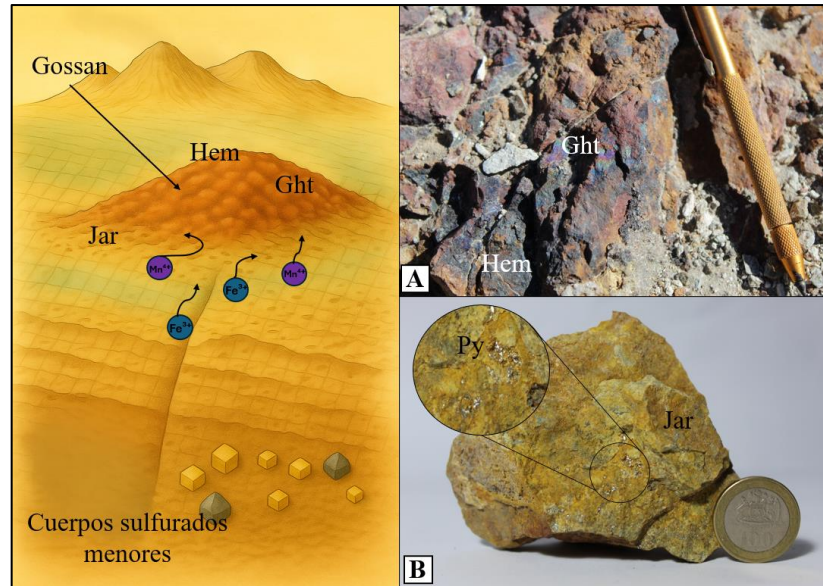


Figura 70. Evidencias de procesos de oxidación supérgena avanzados en el distrito Pampa Larga. (Izquierda) Esquema representativo de la formación de gossans ferruginosos sobre cuerpos sulfurados menores, donde la oxidación meteórica de sulfuros genera fluidos ácidos y ricos en Fe^{3+} (círculos azules) y Mn^{4+} (círculos morados), favoreciendo la precipitación secuencial de jarosita (Jar), goetita (Ght) y hematita (Hem), en función del pH y Eh del sistema. A. Afloramiento con goetita irisada masiva y hematita secundaria, sin relación directa con vetas principales, típico de zonas localmente oxidadas sobre el plutón Pampa Larga. B. Muestra de limonita ferruginosa que conserva relictos de pirita (Py) parcialmente transformados en jarosita (Jar), indicando un proceso de oxidación parcialmente incompleto en superficie.

7. Precipitación de cobre en ambientes oxidados: sulfatos, carbonatos y óxidos

La persistente circulación de aguas meteóricas ácidas a través de los niveles inmediatamente subyacentes a la zona oxidada generó un ambiente geoquímico propicio para la fijación progresiva de cobre secundario. Estas soluciones, ya enriquecidas en Cu^{2+} por la disolución de sulfuros primarios durante etapas previas, experimentaron una atenuación gradual de su acidez debido a la interacción con las rocas de caja reactivas, a procesos de dilución con aguas menos agresivas y a la precipitación de fases férricas y sulfatadas formadas en niveles superiores (Alpers & Brimhall, 1988; Nordstrom, 2011). Bajo estas nuevas condiciones, caracterizadas por pH entre 3 y 5 y Eh aún elevado, el cobre alcanzó estados de sobresaturación que facilitaron su fijación como especies minerales estables en un entorno todavía oxidante, aunque menos extremo en términos de acidez.

La mineralogía registrada en las vetas y zonas oxidadas de Pampa Larga refleja con claridad esta transición geoquímica. La presencia de brochantita, malaquita, azurita y

cuprita, junto a una diversidad de especies arseniatadas y fosfatadas como conicalcita, lavendulana, mansfieldita, zincolivenita, adamita y cuproadamita, evidencia la acción de aniones complejantes que circularon junto al cobre en estas soluciones meteóricas. Adicionalmente, la aparición de crisocola y óxidos de manganeso confirma la complejidad de los equilibrios geoquímicos en este ambiente de oxidación intermedia (figura 71). Estas asociaciones han sido documentadas principalmente en el flanco oriental del distrito, en muestras como FIC-PL-M09, FIC-PL-M27 y FIC-PL-M28, las cuales exhiben concentraciones significativas de Cu acompañadas de Ba, P y As.

Esta etapa no representa un cierre, sino un punto intermedio en la evolución del perfil supergeno. El cobre, tras haberse liberado desde sulfuros primarios y permanecer en solución durante los estadios de mayor acidez, comienza ahora a inmovilizarse en minerales secundarios dentro de ambientes oxidados más estables. Sin embargo, la continuidad de la circulación meteórica asegura que parte del cobre siga migrando en profundidad, preparando el terreno para condiciones geoquímicas reductoras capaces de estabilizarlo como sulfuros secundarios (Chávez, 2000; Sillitoe, 2005). En este sentido, la formación de sulfatos, carbonatos y óxidos de cobre constituye tanto una evidencia del tránsito desde un dominio altamente ácido hacia uno más moderado, como la antesala del enriquecimiento en sulfuros secundarios que caracteriza la etapa siguiente.

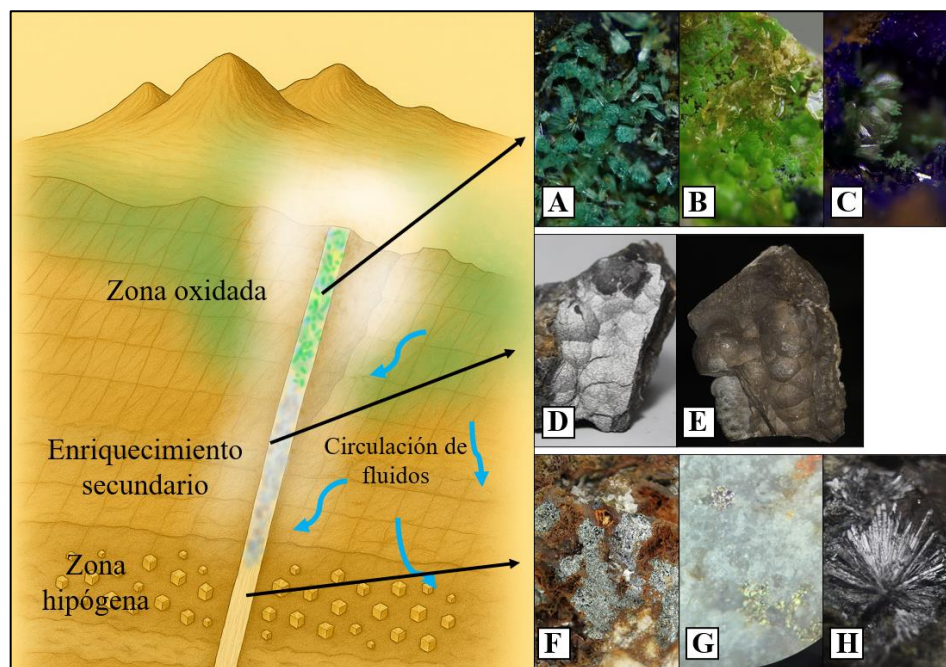


Figura 71. Modelo integrado de zonación vertical y ejemplos representativos de la sucesión mineralógica observada en las vetas del distrito Pampa Larga (Basado en Robb, L. J; 2005). A la izquierda se muestra un corte conceptual de una veta de baritina de potencia constante idealizada que asciende desde el subsuelo hasta aflorar en superficie; en profundidad la roca de caja contiene abundante pirita diseminada, mientras que hacia arriba se desarrolla un gradiente oxidativo (tonos verdes) asociado a infiltración meteórica. A. Zincolivenita. B. Conicalcita. C. Azurita y olivenita. D. Arsénico nativo. E. Arsénico nativo opaco. F. Tennantita rica en arsénico. G. Pirita y calcopirita. H. Estibina

8. Precipitación de sulfuros secundarios en ambientes reductores

En la base del perfil supergeno de Pampa Larga (figura 71), el cobre liberado desde niveles superiores continuó su migración descendente hasta alcanzar ambientes con condiciones geoquímicas marcadamente distintas. Allí, bajo el nivel freático, el potencial redox disminuyó de manera significativa y la acidez se vio atenuada, favoreciendo un entorno reductor. Este cambio fue resultado de la pérdida progresiva de oxígeno disuelto en las soluciones, de la interacción con minerales reductores presentes en la roca encajante (como clorita o magnetita), e incluso de la influencia de materia orgánica o fluidos confinados (Chávez, 2000; Nordstrom, 2011). En estas condiciones, el ion Cu^{2+} se redujo a Cu^+ , lo que facilitó la precipitación de sulfuros secundarios estables.

El resultado de este proceso fue la formación de minerales como calcosina (Cu_2S) y covelina (CuS) reportados por Parker *et al*, 1963, que se depositaron por reemplazo directo de sulfuros primarios como calcopirita y bornita. Este reemplazo generó texturas de enriquecimiento en bandas oscuras de alta ley o halos concentrados en torno a zonas oxidadas. La eficiencia de este mecanismo radica en la capacidad del sistema para reconcentrar el cobre en fases mineralógicas más favorables desde un punto de vista textural y económico, particularmente cuando los procesos de reducción estuvieron canalizados por fracturas o zonas de porosidad conectada (Alpers & Brimhall, 1988; Sillitoe, 2005).

En Pampa Larga, la evidencia de este enriquecimiento secundario se observa en vetas profundas y sectores con escasa presencia de óxidos de hierro, donde calcosina y covelina reemplazan de forma parcial a sulfuros preexistentes. Muestras como FIC-PL-M01 y FIC-PL-M08 muestran anomalías elevadas en cobre con baja proporción de Fe^{3+} , además de texturas mineralógicas que respaldan este proceso de sustitución. Estas observaciones confirman que, aunque discreto, el enriquecimiento secundario estuvo presente en el

distrito y permitió la formación de microambientes reductores capaces de fijar el cobre en profundidad.

Más allá de su importancia puntual, este estadio marca el cierre funcional de la secuencia supergena: el cobre, tras migrar y transformarse a lo largo de distintos dominios geoquímicos desde su liberación en ambientes fuertemente ácidos hasta su fijación en condiciones reductoras, completa un ciclo de redistribución vertical que refleja la maduración del sistema. Sin embargo, lejos de constituir un fin absoluto, este enriquecimiento secundario debe entenderse como la última expresión de un proceso dinámico, condicionado por la interacción entre tectónica, meteorización y química de fluidos. En este sentido, la evolución supergena de Pampa Larga no se interpreta solo como un episodio local de alteración, sino como la consecuencia natural de la continuidad de un sistema hidrotermal que, a lo largo de su historia, ha vinculado procesos profundos y superficiales en una misma trayectoria evolutiva.

6.3 Interpretación de resultados geoquímicos

La integración de los resultados geoquímicos permite establecer vínculos directos entre la composición elemental de las muestras, los estilos de alteración observados en terreno y gabinete, y los procesos metalogenéticos que han controlado la evolución del distrito Pampa Larga. Las concentraciones de elementos mayores, metales base, metales preciosos y estratégicos no solo reflejan la diversidad litológica y los efectos de la alteración hidrotermal, sino que además evidencian asociaciones sistemáticas entre elementos que se corresponden con fases mineralógicas específicas. Estas asociaciones, apoyadas en las correlaciones estadísticas y en la distribución espacial de anomalías, constituyen una herramienta fundamental para interpretar la zonación geoquímica del sistema y comprender los procesos de enriquecimiento hipógeno y supérgeno que definieron la metalogénesis del distrito.

6.3.1 Asociación geoquímica–mineralógica de elementos mayores

Los elementos mayores reflejan con claridad los efectos de los procesos de alteración hidrotermal y metasomática en el distrito Pampa Larga. El sílice (SiO_2) presenta un rango amplio de concentraciones, con máximos que superan el 80 %, lo que se interpreta como

evidencia de intensa silicificación asociada a vetas y reemplazos hidrotermales (figura 55). Estos enriquecimientos son coherentes con los sectores donde se reconocen fragmentos y vetillas de cuarzo, así como con zonas de silificación masiva en contacto con estructuras principales (alteración *vuggy silica*).

El óxido de calcio (CaO), en contraste, muestra un comportamiento inverso respecto del SiO₂ en los diagramas de Harker (figura 56), concentrándose en muestras de zonas metasomatizadas con wollastonita y en vetas portadoras de baritina y carbonatos cálcicos. Esta relación señala la coexistencia de dominios enriquecidos en sílice y otros enriquecidos en calcio, lo que denota la superposición de procesos metasomáticos locales sobre la silicificación más generalizada.

El hierro (Fe) y el magnesio (MgO) tienden a disminuir a medida que aumenta el contenido de sílice (figura 56), lo que indica la sustitución progresiva de fases ferromagnesianas (clorita, actinolita, magnetita) por minerales de alteración más estables en condiciones ácidas, como arcillas aluminosas y cuarzo. Esta tendencia es coherente con el desarrollo de halos propilíticos en sectores periféricos y su reemplazo hacia el núcleo por facies de alteración más avanzadas.

El comportamiento del Al₂O₃ es más disperso, sin un patrón lineal definido (figura 56), lo que refleja su doble procedencia: relictos de plagioclasa o feldespatos en rocas menos alteradas y arcillas aluminosas (caolinita, moscovita) en zonas argílicas. Por su parte, el K₂O muestra enriquecimientos puntuales en sectores con halos sericíticos o feldespatización potásica (figura 56), lo que confirma eventos de alteración intermedia a avanzada en torno a ciertas vetas.

En síntesis, la geoquímica de los elementos mayores, respaldada en los diagramas estadísticos y de Harker (figuras 55 y 56), revela un escenario de alteración caracterizado por la yuxtaposición de dominios intensamente silificados con cuerpos metasomatizados ricos en calcio, rodeados por zonas propilíticas con relictos de minerales máficos. Este marco composicional constituye la base geoquímica sobre la que se emplazan las mineralizaciones metálicas, y prepara la lectura de los metales base y minerales hipógenos discutidos en el apartado siguiente.

6.3.2 Asociación geoquímica de metales base y minerales hipógenos

La geoquímica de los metales base en el distrito Pampa Larga revela una estrecha relación con los procesos de mineralización hipógena y con su posterior reconfiguración durante la evolución supérgena. El cobre (Cu) alcanza concentraciones que superan los 30.000 ppm en muestras asociadas a vetas mineralizadas (tabla 1; figura 57), en concordancia con la presencia de calcopirita, bornita, tennantita y covelina observadas en cortes pulidos. Este enriquecimiento refleja un pulso mineralizante primario ligado a fluidos sulfurados, posteriormente modificado por procesos de reemplazo y oxidación.

El zinc (Zn) muestra un comportamiento parcialmente acoplado al Cu, con valores que llegan a 100.000 ppm en sectores puntuales (tabla 1; figura 57). La matriz de correlación de Pearson (figura 72) respalda esta asociación al mostrar una relación positiva entre ambos elementos, lo que sugiere coprecipitación en vetas polimetálicas bajo condiciones de sulfuración intermedia a alta. Este patrón es coherente con la presencia de esfalerita en Veta Negra y María Catalina, y constituye un indicador geoquímico de ambientes donde el Zn y el Cu respondieron a variaciones conjuntas en pH y fugacidad de azufre.

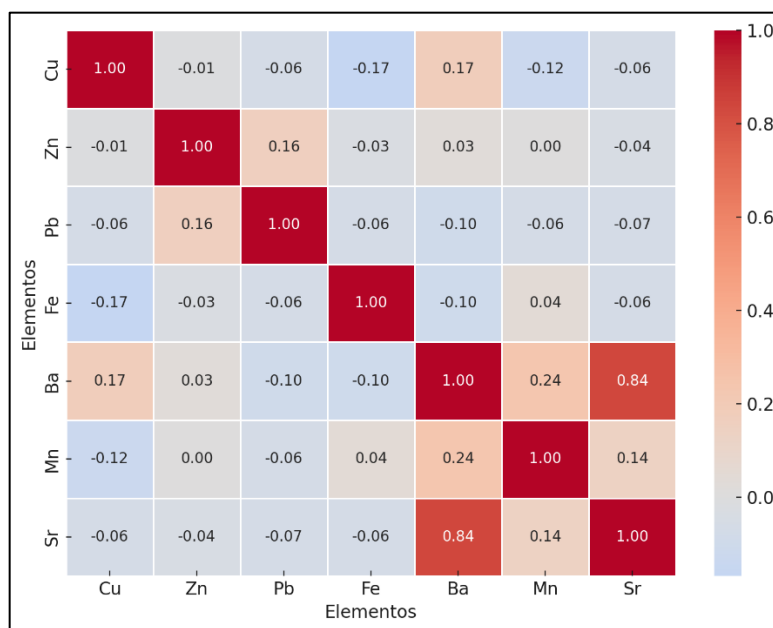


Figura 72. Matriz de Pearson para los elementos Cu, Zn, Pb, Fe, Ba, Mn y Sr. Los coeficientes reflejan la intensidad y dirección de la asociación lineal entre cada par de elementos. El gradiente de colores indica la magnitud de la correlación (valores positivos en tonos cálidos y negativos en tonos fríos). Todas las concentraciones se expresan en ppm, excepto el Fe, que se reporta en porcentaje por tratarse de un elemento mayor.

El plomo (Pb) presenta valores generalmente bajos, con medianas cercanas a cero (tabla 1; figura 57), y su débil representación en la matriz de correlación (figura 72) confirma su carácter subordinado en la evolución geoquímica del distrito. Este comportamiento sugiere que el Pb estuvo limitado a pulsos mineralizantes específicos, posiblemente más profundos, asociados a sulfosales complejas y no a mineralización de gran continuidad.

El hierro (Fe), aunque corresponde a un elemento mayor, actúa aquí como un proxy redox. Su registro en fases primarias (pirita, arsenopirita) y secundarias (goetita, hematita, jarosita) refleja la transición entre ambientes reductores y oxidantes. La correlación moderada Fe–Cu observada en la figura 72 puede interpretarse como evidencia de procesos de reemplazo y oxidación, donde la degradación de sulfuros de Fe generó acidez y favoreció la movilidad del Cu hacia niveles inferiores.

Finalmente, la matriz de correlación destaca una fuerte asociación entre Ba y Sr ($r = 0,84$; figura 72), coherente con su origen común en vetas de baritina. Una relación secundaria entre Ba y Mn, también evidente en la figura 72 y en los diagramas binarios (figura 58), sugiere la co-precipitación de óxidos de manganeso en ambientes con alta permeabilidad, particularmente en el flanco oriental del distrito.

En conjunto, los patrones expresados en los diagramas estadísticos (tabla 1; figuras 57 y 58) y en la matriz de correlación (figura 72) permiten reconocer dos dominios geoquímicos principales: un sector occidental dominado por mineralización sulfídica de Cu–Zn y un sector oriental caracterizado por vetas de baritina enriquecidas en Sr y Mn. Esta diferenciación subraya la influencia de la arquitectura estructural en la canalización de fluidos y en la distribución asimétrica de los metales base en el distrito.

6.3.3 Metales preciosos y sulfosales

La geoquímica de los metales preciosos en el distrito Pampa Larga muestra un patrón de fuerte dispersión, con numerosos valores bajo el límite de detección y enriquecimientos puntuales de alta concentración. El oro (Au) alcanza hasta 42 ppm y la plata (Ag) llega a 98 ppm, aunque ambas presentan medianas en 0 ppm (tabla 2; figura 59). Este comportamiento evidencia que, aunque la mayoría de las muestras contiene valores traza, existen sectores restringidos con enriquecimientos localizados que definen focos metalogénicos de interés.

La relación entre Au y Ag se manifiesta en el diagrama binario (figura 60) y se confirma en la matriz de correlación de Pearson (figura 73), donde ambos elementos exhiben una correlación muy alta ($r = 0,96$). Este patrón indica una co-movilización y co-precipitación bajo condiciones fisicoquímicas similares, lo que sugiere que no precipitaron como fases puras, sino alojados en sulfosales como tennantita o famatinita. La alta afinidad estadística refuerza la interpretación de que los eventos de enriquecimiento involucraron soluciones sulfuradas y cloruradas capaces de transportar ambos metales de manera conjunta.

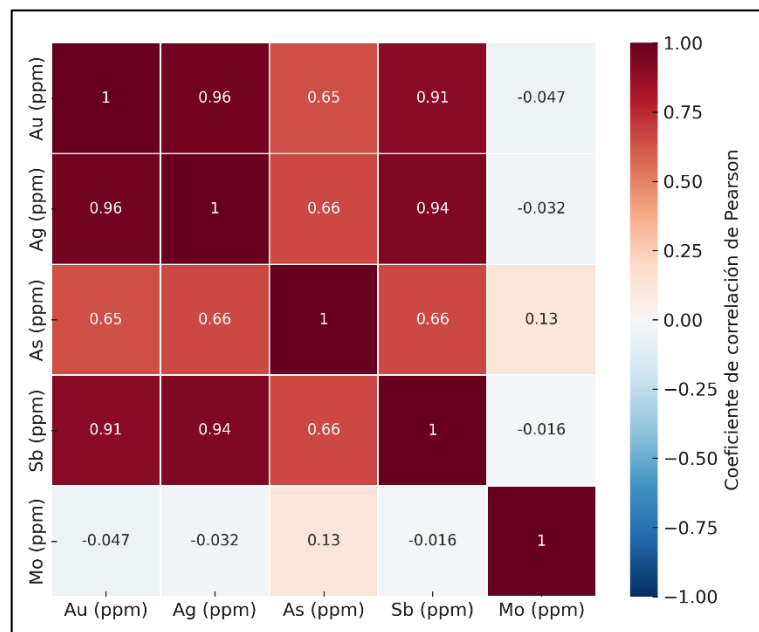


Figura 73. Matriz de correlación de Pearson entre Au, Ag, As, Sb y Mo en el distrito Pampa Larga. Los coeficientes reflejan la intensidad y dirección de la asociación lineal entre cada par de elementos. El gradiente de colores indica la magnitud de la correlación (valores positivos en tonos cálidos y negativos en tonos fríos). Todas las concentraciones están expresadas en ppm.

El arsénico (As) y el antimonio (Sb) también muestran comportamientos destacados. Ambos presentan distribuciones con valores máximos elevados y fuertes asimetrías (tabla 2; figura 61). En la matriz de Pearson (figura 73), As y Sb mantienen una correlación positiva moderada ($r \approx 0,66$), lo que respalda su co-movilidad en soluciones hidrotermales ácidas y su rol como hospedadores de metales preciosos. Este vínculo geoquímico se refleja mineralógicamente en la presencia de arsenopirita, estibina y tennantita, además de fases secundarias como mansfieldita y lavendulana, que documentan la participación de As y Sb en etapas hipógenas y supérgenas.

El molibdeno (Mo), en contraste, no exhibe correlaciones significativas con Au, Ag, As o Sb (figura 75). Su comportamiento más independiente sugiere que no participó de manera relevante en las asociaciones paragenéticas principales del distrito, lo que concuerda con su baja abundancia y distribución irregular.

En conjunto, las evidencias respaldadas en los diagramas estadísticos (tabla 2; figuras 59 y 61), los binarios (figura 60) y la matriz de correlación (figura 73) permiten concluir que los metales preciosos en Pampa Larga se alojaron preferentemente en sulfosales arsenicales, reforzados por la estrecha asociación con As y Sb. Este ensamblaje geoquímico explica la concentración de Au y Ag en vetas como María Catalina y Descubridora, y constituye un rasgo diagnóstico del sistema, cuya relevancia se proyecta hacia el modelo metalogénico del distrito.

6.3.4 Distribución espacial

La distribución espacial de las anomalías geoquímicas en el distrito Pampa Larga muestra un patrón coherente con la red estructural y con la disposición de las principales vetas mineralizadas. Los mapas de anomalías (figura 62) revelan una marcada asimetría entre el flanco occidental y el oriental, reflejando tanto diferencias en el grado de exposición como en el control estructural de la mineralización.

El flanco occidental concentra los mayores valores de Cu, con muestras que superan ampliamente los 10 % en sectores como María Catalina, Veta Negra, Descubridora y Jote. Este enriquecimiento coincide con la presencia de sulfuros hipógenos (calcopirita, tennantita, esfalerita) y con asociaciones de cobre secundario (crisocola, azurita, conicalcita), lo que indica que esta zona actuó como el principal corredor de transporte y precipitación de fluidos mineralizantes. La coincidencia de estas anomalías con vetas subverticales de rumbo NW–SE sugiere un control tectónico directo en la canalización de los fluidos.

En contraste, el flanco oriental está dominado por anomalías de Ba, As y Sb, asociadas a vetas de baritina en Hornitos y en vetas sin nombre de la porción noreste del distrito. Estas estructuras muestran una mineralización secundaria con cobre oxidado y arseniatos (lavendulana, mansfieldita, zincolivenita), lo que confirma que este sector estuvo condicionado por ambientes más oxidados y con mayor participación meteórica. La

asociación Ba–Sr–Mn identificada geoquímicamente se alinea con este dominio oriental, reforzando la idea de una mineralización más tardía y localizada.

En el caso de los metales preciosos, las anomalías de Au y Ag se concentran en las minas Descubridora y María Catalina, en el flanco occidental, donde las altas leyes coinciden con sulfosales arsenicales y con el fuerte acoplamiento Au–Ag evidenciado geoquímicamente (figura 73). La ausencia de anomalías significativas hacia el flanco oriental refuerza la interpretación de que los metales preciosos se asociaron a los eventos sulfurados canalizados por las estructuras principales del sector occidental.

En síntesis, la distribución espacial de las anomalías (figura 62) permite reconocer un distrito con dos dominios geoquímicos contrastantes: un occidente rico en sulfuros de Cu, Zn y metales preciosos, controlado por estructuras NW–SE, y un oriente dominado por baritina, Ba y elementos arsenicales, asociado a vetas oxidadas y discontinuas. Este patrón no solo refuerza la importancia del control estructural en la metalogénesis de Pampa Larga, sino que también constituye una base fundamental para orientar recomendaciones exploratorias hacia corredores específicos de alta prospectividad.

6.4 Modelo metalogénico del distrito minero Pampa Larga

La evolución del sistema mineralizado del distrito Pampa Larga se interpreta como el resultado de un proceso multiepisódico de carácter epitermal, con pulsos que transitaron desde condiciones de alta sulfuración hacia fases más intermedias. Este desarrollo tuvo lugar en corteza somera y estuvo condicionado tanto por la acumulación y liberación súbita de fluidos magmáticos como por la arquitectura estructural heredada, dominada por fracturas NW–SE, que canalizó los pulsos mineralizantes de manera recurrente.

En una cámara magmática profunda, no aflorante en el área, la cristalización fraccionada enriqueció el fundido residual en agua, volátiles (SO₂, HCl, H₂S, CO₂) y metales como Cu, Au, Ag, As y Sb (Hedenquist & Lowenstern, 1994; Heinrich, 2005). La menor densidad del agua respecto al magma favoreció la acumulación de fluidos en las zonas apicales, donde alcanzaron condiciones de sobrepresión.

Cuando la presión interna superó la litostática, el sistema colapsó mecánicamente en el límite frágil-dúctil (~400 °C), definido por la transición reológica del cuarzo (Fournier, 1991). Este evento generó fracturas hidráulicas y desencadenó un proceso de ebullición hidrotermal, con separación en dos fases: una salmuera hipersalina rica en cloruros metálicos (Cu-Cl, Zn-Cl, Fe-Cl) y un vapor portador de Au, Ag y Sb en forma de complejos bisulfurados (Heinrich, 2005; Williams-Jones *et al.*, 2009).

El fraccionamiento de metales resultante definió una zonación vertical marcada. La salmuera, más densa, tendió a acumularse en profundidad, originando stockworks y venillas subhorizontales con sulfuros masivos. El vapor, en cambio, ascendió por fracturas subverticales, precipitando mineralización polimetálica (tennantita, esfalerita, calcopirita) y sulfosales de As-Sb en vetas bandeadas y brechadas. La relación espacial de estas vetas con unidades litológicas contrastantes, en particular la Formación Cerrillos, el Plutón Pampa Larga y las corneanas de wollastonita, confirma que la interacción fluido - roca fue determinante en los procesos de neutralización y enfriamiento, modulando la precipitación de cuarzo, sulfuros y baritina (Simmons *et al.*, 2005; Sillitoe & Hedenquist, 2003).

Este acoplamiento entre estructura y litología, ya evidenciado en la correlación formal de unidades y sistemas estructurales discutida en el punto 6.1, se manifiesta en la disposición de halos de alteración concéntricos: argílicos avanzados próximos a vetas (illita, alunita, caolinita) y propilíticos distales (clorita, epidota, calcita, albita y actinolita) (Hedenquist *et al.*, 2000). Zonas dilatacionales asociadas a la acumulación de esfuerzo diferencial actuaron como sumideros barométricos, concentrando fluidos bajo un mecanismo tipo “bomba de succión” (Sibson *et al.*, 1988).

Etapas posteriores estuvieron dominadas por fluidos más oxidados y de menor temperatura, que precipitaron vetas de baritina masiva, arseniatos y óxidos de cobre en estructuras ya mineralizadas, especialmente en el flanco oriental (Hornitos). Finalmente, la infiltración meteórica dio origen a un perfil supérgeno bien desarrollado, con gossans ferruginosos y asociaciones de jarosita, goetita, hematita, crisocola, lavendulana y conicalcita. La zona lixiviada habría sido erosionada, dejando expuesta directamente la zona oxidada en superficie.

Esta secuencia de procesos se sintetiza en el modelo ilustrado en la figura 74, que integra la evolución del sistema desde la acumulación magmática hasta la mineralización supérgena. La representación esquemática destaca el rol combinado de la caja litológica y el control estructural en la canalización de fluidos, la coexistencia de dominios enriquecidos en sulfuros polimetálicos en el flanco occidental y de vetas baríticas con arseniatos en el oriental, así como la transición progresiva hacia condiciones oxidadas en superficie. De esta forma, el modelo propuesto ofrece una visión integradora que articula las observaciones litológicas, estructurales, mineralógicas y geoquímicas obtenidas en el distrito Pampa Larga.

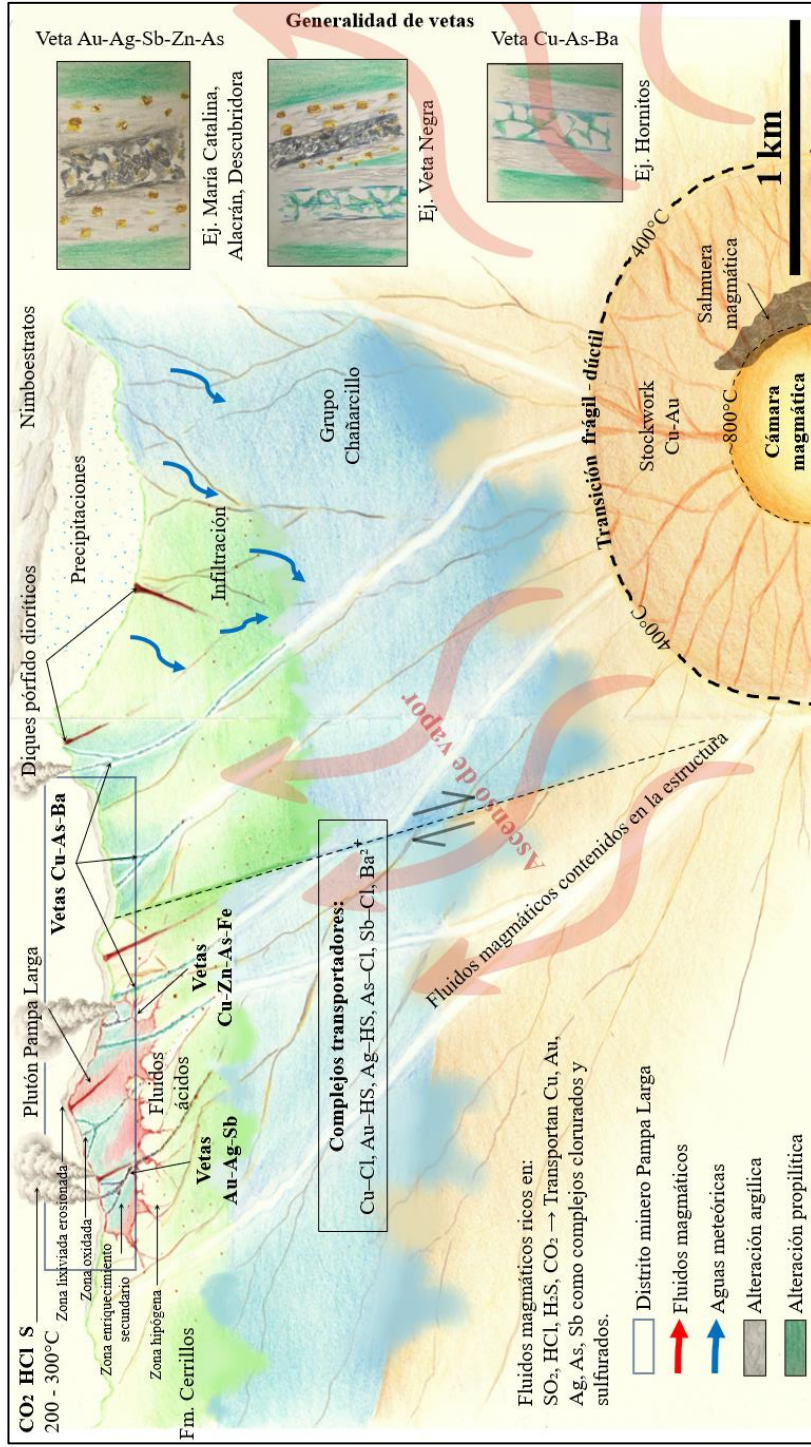


Figura 74. Modelo metalogénico propuesto para el distrito Pampa Larga. Representa la evolución del sistema hidrotermal desde la acumulación de fluidos en la cámara magmática, el colapso del sistema por sobrepresión, la separación de fases y el fraccionamiento de metales, hasta la migración a través de estructuras reactivadas, la precipitación mineral y la evolución supérgena. Las ilustraciones laterales muestran ejemplos de vetas bandeadas, brechadas y tardías con baritina, representativas de distintos pulsos del sistema mineralizante. Elaboración propia. La posición de la transición frágil-dúctil se ha ubicado en temperaturas ~400°C, y a 2 km de profundidad (e. g. Fournier, 1991; Nielson *et al.*, 1999).

6.5 Potencial económico

El distrito Pampa Larga presenta hoy un escenario marcado por la explotación histórica: las vetas que alguna vez sustentaron faenas mineras han quedado reducidas a desmontes, labores colapsadas y relictos de mineralización en minas abandonadas. Esta condición dificulta reconocer continuidad en superficie y limita la estimación de recursos inmediatos. Sin embargo, la información obtenida de estos vestigios, complementada con la integración litológica, estructural, mineralógica y geoquímica realizada en este estudio, permite abrir la discusión hacia el verdadero potencial económico del distrito, considerando su dimensión metálica, no metálica y alternativa.

6.5.1 Potencial polimetálico

La información geoquímica y mineralógica discutida en apartados previos confirma la presencia de asociaciones diagnósticas (Cu–Zn, Au–Ag, As–Sb, Ba–Sr) que reflejan un sistema polimetálico robusto. Aunque en superficie las vetas históricas aparecen colapsadas y disgregadas en desmontes y relictos, estas evidencias indican que el distrito conserva un potencial metálico aún vigente.

Los antecedentes históricos de Parker *et al.* (1963) señalan que las faenas alcanzaron profundidades cercanas a los 100 metros, lo que resulta somero en comparación con depósitos epitermales de alta sulfuración mejor conocidos en la región andina. En El Indio (Chile), por ejemplo, la mineralización se desarrolló principalmente entre 200 y 600 m de profundidad (Jannas *et al.*, 1990), mientras que en Pascua–Lama (Chile-Argentina) los cuerpos mineralizados se concentran entre 200 y 500 m (Chouinard *et al.*, 2005). Este contraste sugiere que en Pampa Larga podrían existir vetas ciegas o prolongaciones profundas que no fueron interceptadas por los trabajos antiguos, lo que explica la aparente ausencia de continuidad en superficie.

La comparación regional refuerza esta interpretación. Distritos ubicados en la misma franja estructural, como Nueva Jerusalén y San Marcos al sur, Checho de Cobre al norte, y Los Plomos y Cabeza de Vaca al este, se encuentran actualmente en explotación. A diferencia de ellos, Pampa Larga fue trabajado de manera superficial y con escasa profundidad, lo que refleja más una exploración incipiente que una falta de potencial. La distribución regional de estos distritos confirma que el corredor tectónico - magmático en

que se emplaza Pampa Larga sigue siendo altamente favorable para la preservación de cuerpos mineralizados en niveles inferiores.

En conjunto, el distrito debe ser comprendido no como un sistema agotado, sino como un escenario parcialmente erosionado y explorado de manera limitada, donde la mineralización polimetálica aún conserva un potencial latente en profundidad.

6.5.2 Potencial no metálico

Dentro del distrito, el recurso no metálico más tangible corresponde a las corneanas de wollastonita, con un área mínima de 4 km² y generadas en el contacto térmico del Plutón Pampa Larga con la Formación Cerrillos se sitúan como la materia prima más favorable para su explotación a mediano – largo plazo.

El análisis geoquímico de las muestras FIC-PL-M18, FIC-PL-M31 y FIC-PL-M32 evidencia una variabilidad composicional relevante: mientras FIC-PL-M18 muestra una relación CaO:SiO₂ cercana a 1:1 y bajos contenidos de impurezas, condición compatible con los estándares internacionales de wollastonita industrial (Harben & Kuzvart, 1996; Roskill, 2018), las otras muestras representan dominios de transición hacia cuarcita o skarn magnesiano, con mayores contenidos de SiO₂, MgO, Al₂O₃ y As, limitando su potencial como insumo industrial. Este comportamiento queda ilustrado en la figura 75 (CaO vs SiO₂) y la figura 76 (contenido de impurezas), donde solo una fracción de los afloramientos se ajusta a los requisitos de mercado internacional para wollastonita (Roskill, 2018; U.S. Geological Survey, 2023). Tras esta condición se establecen dos posibles escenarios.

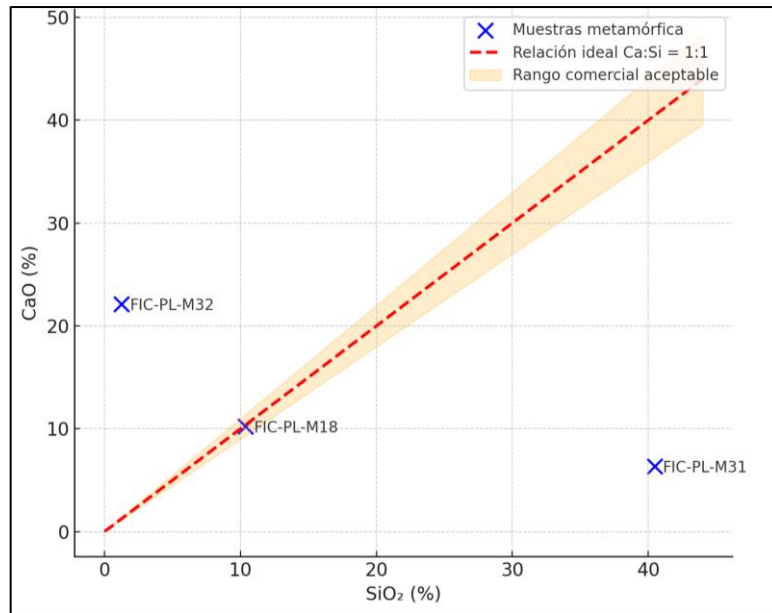


Figura 75. Diagrama de dispersión CaO vs SiO₂ para las muestras FIC-PL-M18, FIC-PL-M31 y FIC-PL-M32 de la unidad metamórfica, indicando la línea de relación ideal CaO:SiO₂ = 1:1 y la franja de tolerancia comercial (±10%) aceptada para wollastonita industrial. Solo las muestras situadas dentro de este rango cumplen con los requisitos de pureza y composición definidos por la industria internacional (Harben & Kuzvart, 1996; Roskill, 2018; U.S. Geological Survey, 2023).

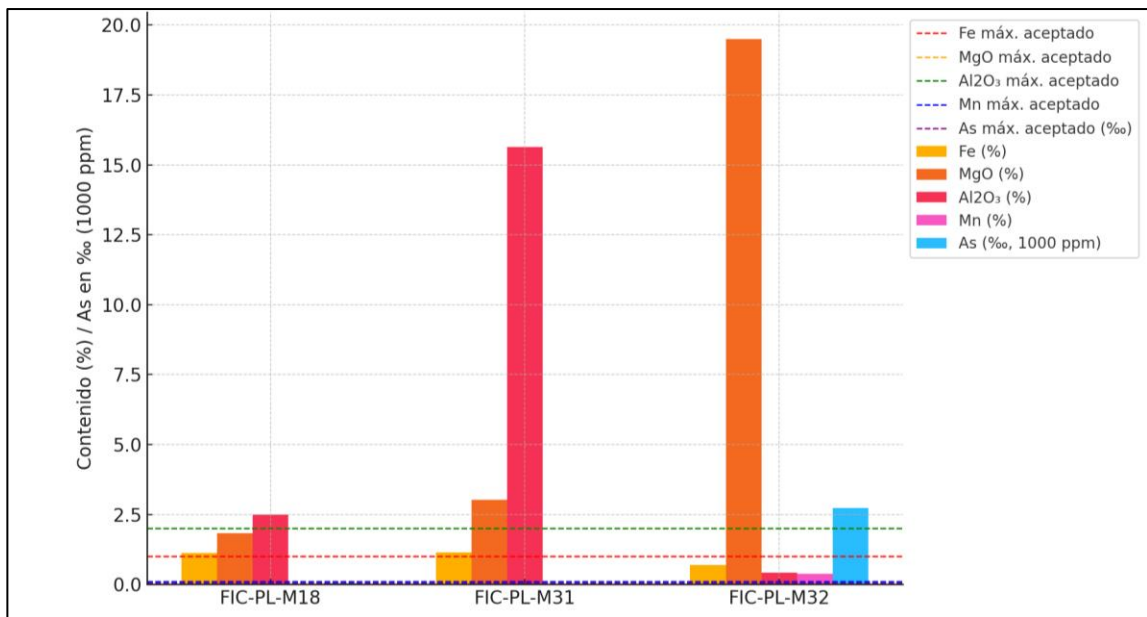


Figura 76. Contenidos de impurezas (Fe, MgO, Al₂O₃, Mn, As) en las muestras FIC-PL-M18, FIC-PL-M31 y FIC-PL-M32 de la unidad metamórfica, comparados con los valores máximos permitidos para wollastonita comercial según Harben & Kuzvart (1996) y Roskill (2018). Se observa que únicamente las muestras con impurezas bajo estos límites presentan viabilidad para uso industrial, resaltando la importancia del control de calidad mineralógico en la potencial explotación del recurso.

- **Escenario conservador**

Adoptando un criterio conservador y prudente, se estima que únicamente el 25% del volumen total de la unidad metamórfica podría corresponder a wollastonita de calidad comercial (de acuerdo con la proporción de muestras aptas observada en el gráfico CaO vs SiO₂ y el nivel de impurezas: Harben & Kuzvart, 1996; Roskill, 2018). Tomando un espesor mínimo de 10 metros, el volumen potencial sería de 40 millones de m³, lo que equivale a unas 10 millones de m³ de wollastonita. Considerando una densidad de 2,9 t/m³, el tonelaje estimado es de 29 millones de toneladas.

Aplicando el precio internacional más bajo registrado para wollastonita comercial (USD \$200/ton: Harben & Kuzvart, 1996; USGS, 2023) y un costo operativo elevado (USD \$50/ton: estimación referencial de minería no metálica en zonas remotas, Harben & Kuzvart, 1996), la utilidad bruta sería de USD \$4.350 millones. El resto del volumen, correspondiente a cuarcita y skarn, bajo un precio referencial de USD \$20/ton y el mismo costo operativo, arroja una pérdida operativa neta de USD \$2.340 millones. Así, la ganancia neta distrital bajo este escenario conservador se estima en USD \$2.010 millones (Harben & Kuzvart, 1996; Roskill, 2018; U.S. Geological Survey, 2023)

- **Escenario moderadamente optimista**

Considerando un enfoque algo más optimista, pero realista a la luz de la cartografía de detalle y de los sectores aflorantes con composición favorable, se podría asumir que hasta un 40% del volumen mapeado corresponde a wollastonita de alta pureza (en línea con experiencias internacionales en depósitos de contacto bien desarrollados; Harben & Kuzvart, 1996; Roskill, 2018). Manteniendo el mismo espesor de 10 metros (criterio aún conservador en términos volumétricos), se obtiene un volumen de 16 millones de m³ y, por tanto, 46,4 millones de toneladas (usando densidad de 2,9 t/m³).

En este caso, aplicando el precio internacional promedio de mercado para wollastonita industrial (USD \$250/ton: Roskill, 2018; USGS, 2023) y un costo operativo de USD \$45/ton (posible con alguna mejora logística o mayor escala de faena: Harben & Kuzvart, 1996), la utilidad bruta potencial ascendería a USD \$11.600 millones. El volumen restante, asignado a cuarcita/skarn, produciría una menor pérdida de USD \$1.872 millones

bajo los mismos supuestos de precio y costo. Así, la ganancia neta distrital bajo este escenario optimista sería del orden de USD \$9.728 millones (Harben & Kuzvart, 1996; Roskill, 2018; U.S. Geological Survey, 2023).

Cabe destacar que ambos escenarios representan estimaciones preliminares y dependen fuertemente de la confirmación mediante sondajes, estudios mineralógicos y evaluaciones geometalúrgicas, además de requerir la habilitación de infraestructura, control de calidad en la explotación y análisis de mercado. Sin embargo, la evidencia geoquímica actual demuestra que al menos una fracción significativa de la unidad metamórfica cumple con los requisitos de pureza y composición establecidos por la industria internacional para wollastonita (Harben & Kuzvart, 1996; Roskill, 2018; U.S. Geological Survey, 2023), lo que sustenta la proyección de un recurso no metálico de interés económico para el distrito

6.5.3 Potencial alternativo

El distrito Pampa Larga destaca por su notable diversidad mineralógica secundaria, donde se han identificado especies poco comunes como lavendulana, zincolivenita, picrofarmacolita, rejalgar, oropimente, mansfieldita y conicalcita, junto con asociaciones de azurita, malaquita, crisocola y numerosos otros minerales reportados en la zona (figura 77). A pesar de que estas mineralizaciones no constituyen un recurso explotable a gran escala, su rareza, variedad y atractivo estético les otorgan un valor significativo dentro del mercado internacional de minerales de colección, en el cual ejemplares bien cristalizados alcanzan precios elevados y circulan activamente en ferias y subastas especializadas.

Este potencial alternativo, aunque restringido en volumen, amplía la visión económica del distrito al vincularlo con un nicho comercial en crecimiento que trasciende la minería tradicional. Al mismo tiempo, ofrece una oportunidad para fortalecer la difusión patrimonial y educativa de la mineralogía regional, situando a Pampa Larga no solo como un sistema geológico de interés científico, sino también como un reservorio de identidad mineralógica con proyección económica y cultural para Atacama.

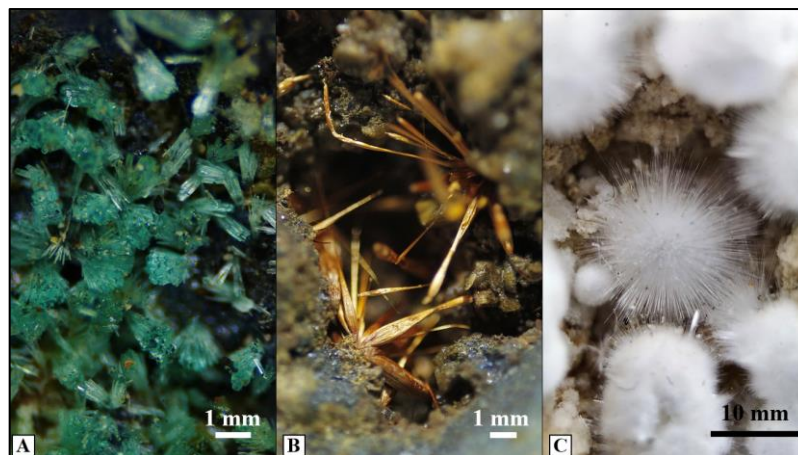


Figura 77. Algunos minerales de colección presentes en Pampa larga. A. Zincolivenita (Veta Negra). B. Ludlockita (Veta Negra). Picrofarmacolita (Alacrán). Las fotografías macro fueron obtenidas utilizando una cámara Canon EOS (APS-C), con un lente Canon EF 50mm f/1.8 STM montado en reversa mediante un anillo inversor de 58 mm, y una combinación de anillos de extensión automáticos (Meike). Esta configuración permitió alcanzar un campo de visión efectivo de hasta 02 mm.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

El análisis de los resultados obtenidos en el distrito minero Pampa Larga permiten establecer una síntesis integradora sobre su evolución geológica y metalogénica. A continuación, se presentan las principales conclusiones de este estudio.

El distrito Pampa Larga está conformado litológicamente por la Formación Cerrillos, el Plutón Pampa Larga, las corneanas de wollastonita y depósitos cuaternarios. El emplazamiento del plutón generó un metamorfismo de contacto que transformó rocas carbonatadas en corneanas ricas en wollastonita. La caracterización de la alteración hidrotermal y supergena evidencia un sistema multiepisódico, con halos argílicos y propilíticos bien definidos, y una evolución supergena que expone directamente la zona oxidada en superficie.

La mineralización se encuentra estrechamente controlada por estructuras de rumbo NW–SE reactivadas, que funcionaron como conductos principales para el ascenso de fluidos magmático–hidrotermales. La disposición de las vetas mineralizadas, junto con la distribución de anomalías geoquímicas, confirma la importancia de estas estructuras en la concentración y zonación de los cuerpos polimetálicos del distrito.

El análisis geoquímico multielemental permitió reconocer asociaciones diagnósticas que refuerzan el carácter polimetálico del sistema: Cu–Zn en el flanco occidental, Ba–Sr con Mn en el oriental, y fuertes correlaciones Au–Ag y As–Sb vinculadas a sulfuros y sulfosales. Estas asociaciones, en concordancia con la mineralogía observada, definen una zonación espacial coherente con el modelo epitermal planteado para el área.

El potencial económico del distrito se expresa en tres dimensiones: (I) un potencial metálico limitado en superficie, pero con indicios de continuidad en profundidad y analogía con distritos vecinos en explotación; (II) un recurso no metálico tangible representado por la wollastonita de las corneanas metamórficas; y (III) un valor alternativo asociado al mercado internacional de minerales de colección, donde especies raras y bien cristalizadas de Pampa Larga poseen interés tanto económico como patrimonial.

La integración de los resultados litológicos, estructurales, geoquímicos y mineralógicos permitió articular un modelo metalogénico consistente para el distrito Pampa Larga. Este modelo explica la superposición de procesos que van desde el metamorfismo de contacto inicial, con la formación de corneanas de wollastonita, hasta el desarrollo de un sistema hidrotermal multiepisódico canalizado por estructuras NW–SE reactivadas, responsables de la concentración de sulfuros, sulfosales y baritina, acompañados por halos de alteración bien definidos. Finalmente, la sobreimposición de procesos supérgenos generó un perfil enriquecido en óxidos y arseniatos, cuya expresión actual refleja la erosión parcial del sistema.

En conjunto, esta evidencia confirma la hipótesis planteada: el distrito Pampa Larga corresponde a un sistema epitermal híbrido, caracterizado por pulsos sucesivos de alta sulfuración con transiciones intermedias, cuya evolución quedó registrada en la zonación mineralógica y geoquímica reconocida en superficie.

CAPÍTULO 8: RECOMENDACIONES

El análisis realizado en el distrito minero Pampa Larga no solo permitió establecer un modelo metalogénico consistente, sino también identificar oportunidades y líneas de trabajo que pueden orientar futuras investigaciones y evaluaciones de viabilidad económica. Sobre esta base, se proponen las siguientes recomendaciones:

1. Profundizar la exploración superficial y subsuperficial

Se recomienda aplicar métodos geofísicos de alta resolución, tales como polarización inducida (IP), tomografía eléctrica de resistividad (ERT) y magnetometría, con el objetivo de detectar la continuidad en profundidad de las vetas y estructuras reconocidas. Las áreas prioritarias corresponden a la mina María Catalina, la franja comprendida entre María Catalina y Veta Negra, y los sectores adyacentes a Mina Hornitos. Estos sectores se señalan de manera explícita en la figura 78.

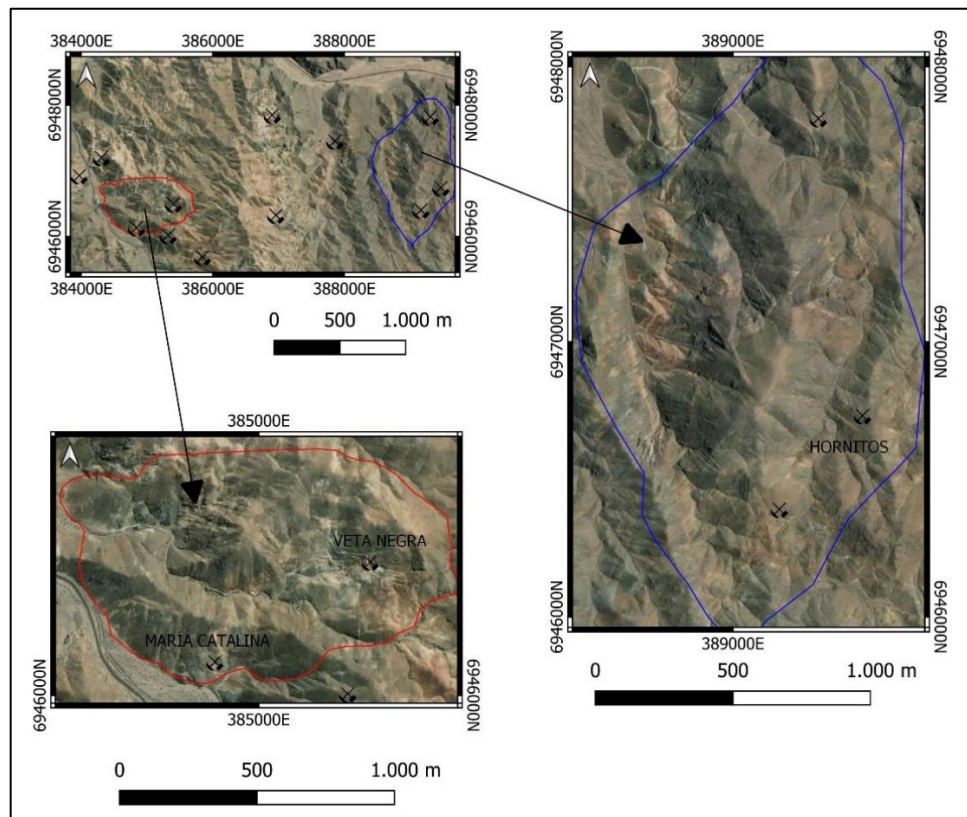


Figura 78. Sectores recomendados para la aplicación de métodos geofísicos (IP, ERT y magnetometría) en el distrito Pampa Larga. En rojo se delimita el polígono correspondiente a las minas María Catalina y Veta Negra, mientras que en azul se señala el polígono del sector Hornitos. Ambas áreas representan zonas prioritarias para detectar la continuidad en profundidad de vetas y estructuras mineralizadas.

2. Aplicar técnicas de teledetección y análisis espectral de alteración

Se recomienda el uso de sensores hiperespectrales y análisis espectral de reflectancia (ASD), orientados a la caracterización de minerales de alteración, especialmente filosilicatos (illita, caolinita, alunita) y óxidos de hierro. Estas técnicas permiten vectorizar los gradientes hidrotermales y reconocer la zonación de fluidos en superficie, constituyendo un insumo clave para guiar sondajes exploratorios y contrastar con el modelo metalogénico propuesto.

3. Revalorizar el potencial económico de los depósitos no metálicos

Las corneanas de wollastonita identificadas en el contacto con el Plutón Pampa Larga representan una extensión mayor a la mapeada en este estudio. Se recomienda realizar estudios especializados de cuantificación de reservas, caracterización mineralógica y evaluación de mercado, con el fin de determinar la viabilidad técnica y económica de su aprovechamiento. Este recurso, además de constituir un potencial productivo tangible, refuerza la importancia del distrito en el marco de la pequeña minería.

BIBLIOGRAFÍA

- Alpers, C. N., & Brimhall, G. H. (1988). Middle Miocene climatic change and episodic sulfide deposition in the Atacama Desert, northern Chile. *Economic Geology*, 84(2), 229–255. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1640:MMCCIT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1640:MMCCIT>2.3.CO;2)
- Arribas, A. (1995). Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid. In Thompson, J. F. H. (Ed.), *Magmas, Fluids, and Ore Deposits* (Vol. 23, pp. 419–454). Mineralogical Association of Canada, Short Course Series.
- Arévalo, C. (2005). *Metalogenia de Chile*. Publicación Geológica No. 93, Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Santiago, Chile, 402 pp.
- Arévalo, C. (2009). *Mapa metalogenético de Chile y catálogo de prospectos y yacimientos metálicos*. Publicación Geológica No. 61, Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Santiago, Chile, 98 pp.
- Barton, P. B., Jr., & Skinner, B. J. (1979). Sulphide mineral stabilities. In Barnes, H. L. (Ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (2nd ed., pp. 278–403). Wiley-Interscience.
- Bowes, W. A., Knowles, P. H., Serrano, M. C., Klohn, E. H., Moraga, A. B., & Gruenwald, R. S. (1966). *Exploración de minerales radiactivos en Chile. Segunda parte: Provincias de Atacama y Coquimbo*. Boletín N.º 22, Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago de Chile.
- Buchanan, L. J. (1981). Precious metal deposits associated with volcanic environments in the southwest. In Dickinson, W. R., & Payne, W. D. (Eds.), *Relations of Tectonics to Ore Deposits in the Southern Cordillera* (pp. 237–262). *Arizona Geological Society Digest* 14.
- Camprubí, A. (2013). Epithermal deposits in México—Update of current knowledge, and an empirical reclassification. *Ore Geology Reviews*, 53, 229–255.
- Camus, F. (2003). Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. *Sociedad Geológica del Perú – Boletín*, 96, 1–26.

- Candela, P. A. (1997). A review of shallow, ore-related granites: Textures, volatiles, and ore metals. *Journal of Petrology*, 38(12), 1619–1633. <https://doi.org/10.1093/petroj/38.12.1619>
- Cembrano, J., & Lara, L. (2009). The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. *Tectonophysics*, 471(1–2), 96–113. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.02.038>
- Chávez, W. X., Jr. (2000). Supergene oxidation of copper deposits: Zoning and distribution of copper oxide minerals. *Society of Economic Geologists Special Publication*, No. 7, 217–240.
- Chouinard, A. & Williams-Jones, Anthony & Leonardson, R. & Hodgson, C. & Silva, P. & Tellez, Carlos & Vega, J. & Rojas, F.. (2005). Geology and Genesis of the Multistage High-Sulfidation Epithermal Pascua Au-Ag-Cu Deposit, Chile and Argentina. *Economic Geology*. 100. 463-490. 10.2113/100.3.463.
- Cooke, D. R., Hollings, P., & Walshe, J. L. (2005). Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls. *Economic Geology*, 100(5), 801–818. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.5.801>
- Corbett, G. J., & Leach, T. M. (1998). *Southwest Pacific Rim gold-copper systems: Structure, alteration, and mineralization*. Society of Economic Geologists Special Publication No. 6, 238 pp.
- Cornejo, P., Tosdal, R. M., Mpodozis, C., Tomlinson, A. J., Rivera, O., & Fanning, C. M. (1997). *The Eocene (44–41 Ma) porphyry copper deposit at El Salvador, northern Chile: structural framework and metallogeny*. *International Geology Review*, 39(3), 239–261 <https://doi.org/10.1080/00206819709465258>
- Díaz, N., Lledó, L., & Vivallo, W. (1998). Geología y metalogénesis del área Inca de Oro, región de Atacama, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 25(2), 165–182.
- Einaudi, M. T., Meinert, L. D., & Newberry, R. J. (2005). Skarn deposits. In Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J., & Richards, J. P. (Eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume (1905–2005)* (pp. 317–391). Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.77.4.745>

- Fournier, R. O. (1991). The transition from hydrostatic to greater than hydrostatic fluid pressures in magmatic-hydrothermal systems: A review. *Economic Geology*, 86(7), 1961–1981. <https://doi.org/10.1029/91GL00966>
- Fournier, R. O. (1999). Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment. *Economic Geology*, 94(8), 1193–1211. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.94.8.1193>
- Gammons, C. H., & Williams-Jones, A. E. (1997). Chemical mobility of gold in the porphyry–epithermal environment. *Economic Geology*, 92(1), 45–59. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.92.1.45>
- Gill, R. (2010). *Igneous rocks and processes: A practical guide*. Wiley-Blackwell, 440 pp.
- González, G., Cembrano, J., Aron, F., Veloso, E., & Carrizo, D. (2003). The Liquiñe–Ofqui fault zone: A long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics*, 361(1–2), 45–66. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00066-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00066-6)
- Grocott, J., & Taylor, G. K. (2002). Magmatic arc fault systems, deformation zones, and pluton emplacement in the Coastal Cordillera of northern Chile. *Tectonics*, 21(1), 1015. <https://doi.org/10.1144/0016-764901-124>
- Guilbert, J. M., & Park, C. F., Jr. (1986). *The geology of ore deposits* (1st ed.). Waveland Press.
- Harben, P. W., & Kuzvart, M. (1996). *Industrial Minerals: A Global Geology*. Industrial Minerals Information Ltd.
- Hedenquist, J. W., & Arribas, A. (1998). Epithermal gold deposits: Types, characteristics and exploration. *Short Course Notes, Society of Economic Geologists*, SEG-GSN, Elko, Nevada, 27 pp.
- Hedenquist, J. W., & Arribas, A. (2022). Exploration implications of multiple formation environments of advanced argillic minerals. *Economic Geology*, 117(3), 609–642. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4880>
- Hedenquist, J. W., & Lowenstern, J. B. (1994). The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370, 519–527. <https://doi.org/10.1038/370519a0>

- Hedenquist, J. W., Arribas, A., & Gonzalez-Urien, E. (2000). Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. In Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J., & Richards, J. P. (Eds.), *Society of Economic Geologists Reviews in Economic Geology* (Vol. 13, pp. 245–277).
- Hedenquist, J. W., Arribas, A., & Reynolds, T. J. (1998). Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast–Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, 93(4), 373–404. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.4.373>
- Heinrich, Christoph A. (2005) The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: a thermodynamic study. *Mineralium Deposita*, 39 (8) 864-889 [doi:10.1007/s00126-004-0461-9](https://doi.org/10.1007/s00126-004-0461-9)
- Henley, R. W., & Berger, B. R. (2011). Magmatic-vapor expansion and the formation of high-sulfidation epithermal gold deposits. En *Reviews in Economic Geology*, no. 16, pp. 135–162. Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.11.003>
- Hemley, J. J., & Jones, W. R. (1964). Chemical aspects of hydrothermal alteration with emphasis on hydrogen metasomatism. *Economic Geology*, 59(4), 538–569. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.59.4.538>
- Henley, R. W., & Ellis, A. J. (1983). Geothermal systems ancient and modern: A geochemical review. *Earth-Science Reviews*, 19(1), 1–50. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(83\)90075-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(83)90075-2)
- Hitzman, M. W., Reynolds, N. A., Sangster, D. F., Allen, C. R., & Carman, C. E. (2005). The sediment-hosted stratiform copper ore system. In Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J., & Richards, J. P. (Eds.), *Society of Economic Geologists Reviews in Economic Geology* (Vol. 15, pp. 609–642). <https://doi.org/10.5382/AV100.19>
- Jannas, Raymond & Bowers, T.S. & Petersen, U. & Beane, R.E.. (1999). High-sulfidation deposit types in the El Indio district, Chile. *Geology and Ore Deposits of the Central Andes*. 7. 219-266.

- JICA–SERNAGEOMIN. (1992). *Estudio de los yacimientos minerales metálicos de Chile. Proyecto de Asistencia Técnica sobre Recursos Minerales en la República de Chile. Informe Final*, Vols. I–IV. Santiago, Chile.
- Lowell, J. D., & Guilbert, J. M. (1970). Lateral and vertical alteration–mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4), 373–408. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.65.4.373>
- MaksaeV, V., Munizaga, F., & Valencia, V. A. (2009). Geocronología U–Pb en circón por LA–ICP–MS para circunscribir la edad de depósitos continentales post-neocomianos de la Formación Cerrillos, región de Atacama, norte de Chile: Implicancias tectónicas y metalogénicas. *Andean Geology*, 36(2), 264–287. <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV36n2-a05>
- Meinert, L. D., Dipple, G. M., & Nicolescu, S. (2005). World skarn deposits. In Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J., & Richards, J. P. (Eds.), *Society of Economic Geologists Reviews in Economic Geology* (Vol. 15, pp. 299–336). <https://doi.org/10.5382/AV100.11>
- Muntean, J. L., & Einaudi, M. T. (2001). Porphyry–epithermal transition: Maricunga Belt, northern Chile. *Economic Geology*, 96(4), 743–772.
- Mudd, G. M., Weng, Z., & Jowitt, S. M. (2013). A detailed assessment of global Cu resource trends and endowments. *Economic Geology*, 108(5), 1163–1183. <https://doi.org/10.2113/econgeo.108.5.1163>
- Nordstrom, D. K. (2011). Mine waters: Acidic to circumneutral. *Elements*, 7(6), 393–398. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.6.393>
- Parker, R. L., Salas, R., & Pérez, F. (1963). *Cuadrángulo Tierra Amarilla, Provincia de Atacama*. Carta Geológica de Chile N° 015. Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG), Santiago, Chile.
- Parker, R. L., Salas, R., & Pérez, F. (1963). *Geología de los distritos mineros Pampa Larga, Checo de Cobre y Cabeza de Vaca, Provincia de Atacama*. Boletín N° 9, Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG), Santiago, Chile.
- Pérez, F. (1963). *Geología del distrito minero Las Ánimas, Provincia de Atacama*. Boletín N° 8, Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG), Santiago, Chile.

- Ramírez Pizarro, T. (2023). *Caracterización geológica y evaluación del potencial económico de mina San Antonio, distrito minero Jesús María, región de Atacama, Chile*. Universidad de Atacama.
- Re Reyes, A. G. (1990). Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 43(1–4), 279–309.
- Reynolds, J., & Shaw, R. (2018). Digital mineral marketplaces: Platforms, pricing, and perceptions. *Resources Policy*, 58, 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.03.007>
- Riedel, W. (1929). Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. *Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Abteilung B*, 1929, 354–368.
- Robb, L. J. (2005). *Introduction to ore-forming processes*. Blackwell Publishing.
- Rollinson, H. R. (1993). *Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific & Technical, 352 pp.
- Roskill. (2018). *Wollastonite: Global industry, markets & outlook (11th ed.)*. Roskill Information Services Ltd.
- Seedorff, E., Dilles, J. H., Proffett, J. M. Jr., Einaudi, M. T., Zurcher, L., Stavast, W. J. A., Johnson, D. A., & Barton, M. D. (2005). Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. En J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb, & J. P. Richards (Eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume (1905–2005)* (pp. 251–298). Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/AV100.10>
- Segerstrom, K., & Parker, R. L. (1959). *Cuadrángulo Cerrillos, Provincia de Atacama*. Santiago: Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG), Carta Geológica de Chile N° 002.
- SERNAGEOMIN. (1998). *Mapa de yacimientos metalíferos de la Hoja Los Loros, región de Atacama*. Escala 1:100.000 (Mapa Temático N° 4). Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile.
- SERNAGEOMIN. (2009). *Carta Geológica de Chile: Los Loros, región de Atacama*. Hoja Los Loros, escala 1:100.000 (Carta Geológica de Chile, Serie

Geología Básica N° 106). Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile.

- Sibson, R. H., Robert, F., & Poulsen, K. H. (1988). High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology*, 16(6), 551–555.
[https://doi.org/10.1130/00917613\(1988\)016%3C0551:HARFFP%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/00917613(1988)016%3C0551:HARFFP%3E2.3.CO;2)
- Sillitoe, R. H. (1995a). Exploration of porphyry copper lithocaps. *Australian Journal of Earth Sciences*, 42(4), 317–320.
- Sillitoe, R. H. (1999). Porphyry copper systems. In Stanley, C. J. *et al.* (Eds.), *Mineral Deposits: Processes to Processing* (Vol. 1, pp. 3–14). A.A. Balkema.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Sillitoe, R. H. (2005). Supergene copper ore formation: Processes, products and criteria for recognition. *Economic Geology*, 100(5), 111–118.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Sillitoe, R. H., & Hedenquist, J. W. (2003). Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. In Simmons, S. F., & Graf, C. G. (Eds.), *Society of Economic Geologists Special Publication* (Vol. 10, pp. 315–343).
- Simmons, S. F., White, N. C., & John, D. A. (2005). Geologic characteristics of epithermal precious and base metal deposits. In Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J., & Richards, J. P. (Eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume* (pp. 485–522). Society of Economic Geologists.
<https://doi.org/10.5382/AV100.16>
- Taylor, H. P., Jr. (1979). Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits. In Barnes, H. L. (Ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (2nd ed., pp. 236–277). John Wiley & Sons.
- Taylor, R. K., & Eggleton, R. A. (2001). Regimes of hydrothermal alteration of feldspar in granitic rocks. *Canadian Mineralogist*, 39(5), 1225–1244.

- Townley, B., Díaz, A., & Luca, R. (2017). *Estado del arte y potenciales recursos CO y MN en Chile*. CIREN. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstreams/46bb6767-93de-405d-a5d5-2aad3cc57adb/download>
- U.S. Geological Survey. (2023). *Mineral Commodity Summaries 2023*. U.S. Department of the Interior. <https://doi.org/10.3133/mcs2023>
- Valderrama, L., Zazzali, B., Chamorro, J., & Santander, M. (2015). Desulfuración de relave mediante la flotación de sulfuros de hierro. *Holos, Redalyc*. <https://www.redalyc.org/pdf/4815/481547290018.pdf>
- White, N. C., & Hedenquist, J. W. (1995). Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. In Mauk, J. L., & St. George, J. D. (Eds.), *Proceedings of PACRIM '95 Conference* (pp. 401–417). Australasian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM), Publication Series No. 9.
- Williams-Jones, A. E., Bowell, R. J., & Migdisov, A. A. (2009). Gold in solution. *Elements*, 5(5), 281–287. <https://doi.org/10.2113/gselements.5.5.281>

ANEXOS

Índice de Anexos

	N° de página
Anexo 1. Muestreo petrográfico y mineralógico.....	118
Anexo 2. Muestreo geoquímico.....	128
Anexo 3. Actitudes estructurales.....	148
Anexo 4. Mapa geológico.....	Adjunto a este informe.

Anexo 1. Muestreo petrográfico y mineralógico

1. Litologías

1.1 Unidad intrusiva – Plutón Pampa Larga



Código: FIC-PL-M48

Coordenadas UTM: 6948096 N; 384594 E

Litología: Granodiorita

Roca intrusiva de color gris claro, textura fanerítica de grano medio y aspecto inequigranular. La matriz está compuesta por plagioclasa (~40 %), cuarzo (~25 %) y feldespato potásico (~15 %), con biotita (~5 %) en láminas oscuras parcialmente alteradas. Destacan cristales aislados de piroxeno (~10 %), euhedrales y de mayor tamaño (hasta 7 mm), que sobresalen en la matriz, generando una textura porfirogranular débil. La roca presenta un índice de color mesocrático y leve oxidación superficial.



Código: FIC-PL-M49

Coordenadas UTM: 6947039 N; 384470 E

Litología: Tonalita

Roca fanerítica de grano medio y textura equigranular, de coloración gris clara con moteado oscuro y leve pátina de oxidación superficial. La mineralogía dominante corresponde a plagioclasa (~45 %), en cristales blanquecinos subhedrales; cuarzo (~25 %), anhedral y vítreo; y minerales máficos (~25 %), representados principalmente por biotita y hornblenda, ambos finamente intercrecidos y parcialmente alterados. El feldespato potásico es escaso o ausente (<5 %). La roca presenta una estructura masiva, sin evidencias de orientación preferencial ni deformación interna. El índice de color corresponde a una tonalita mesocrática.



Código: FIC-PL-M50

Coordenadas UTM: 6946169 N; 386698 E

Litología: Granodiorita alterada

Roca fanerítica de grano fino a medio, color gris verdoso opaco, con textura masiva e inequigranular. Compuesta por plagioclasa (~45 %), cuarzo (~20 %) y escaso feldespato potásico (<5 %), junto a relictos de biotita (~30 %) visiblemente afectados por alteración. Las micas ferromagnesianas se encuentran mayoritariamente disueltas, con bordes difusos y aspecto terroso, lo que sugiere una argilización moderada a intensa que ha destruido en gran parte los minerales máficos. El cuarzo se presenta en cristales anhedrales dispersos. La roca conserva un índice de color mesocrático, sin estructuras internas visibles.

1.2 Unidad metamórfica



Código: FIC-PL-M51

Coordenadas UTM: 6947555 N; 384711 E

Litología: Cuarcita

Roca metamórfica compacta, de color gris claro a verdoso, con textura sacaroidea y grano fino. Presenta brillo vítreo tenue y fractura irregular. El cuarzo es el mineral dominante (>90 %), formando una masa equigranular y fuertemente intercrecida. Se observan agregados máficos dispersos, de color negro a pardo oscuro, parcialmente alterados a clorita, visible como reemplazo verde pálido en bordes de los minerales máficos. La muestra es masiva, homogénea y no presenta foliación ni estructuras internas visibles.



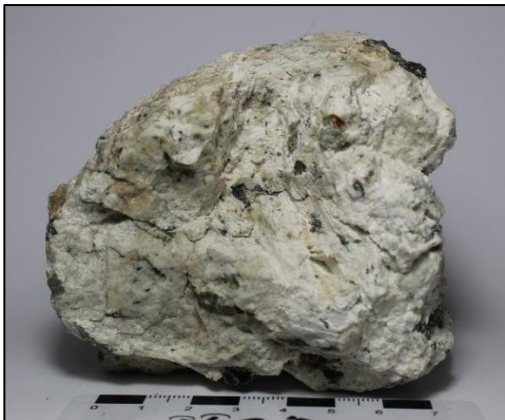
Código: FIC-PL-M52

Coordenadas UTM: 6948617N; 386295 E

Litología: Rocas silicatadas con desarrollo de wollastonita

Roca de aspecto masivo, color gris verdoso a crema, con zonas radiales blanquecinas prominentes. Presenta grano fino a medio, con textura sacaroidea en sectores y organización

radiada en otros, atribuible a agregados de wollastonita en hábito fibroso divergente. La matriz es rica en cuarzo recristalizado, con puntos oscuros finamente diseminados y localizadas patinas de alteración clorítica de tonalidad pardo verdosa. No se observa foliación, pero destaca una marcada anisotropía radial a partir del centro de los agregados. La superficie presenta leve brillo sedoso y fractura irregular.



Código: FIC-PL-M53

Coordenadas UTM: 6948185 N; 385593 E

Litología: Wollastonita

Roca de color blanco cremoso, de aspecto masivo y textura pulverulenta en superficie fresca. Presenta hábito irregular y fractura terrosa. Se observa predominio de wollastonita en agregados fibrosos finos, con tonalidades

blanquecinas a ligeramente verdosas. Se identifican relictos oscuros dispersos correspondientes a piroxenos del protolito, algunos de los cuales muestran alteración parcial a clorita y epidota, visibles como zonas verdosas. La roca presenta una matriz friable y aspecto algo poroso en sectores, atribuible a alteración argílica leve. No se reconoce foliación ni orientación preferencial.

1.3 Unidad hipabisal



Código: FIC-PL-M54

Coordenadas UTM: 6946378 N; 386433 E

Litología: Dique pórfido diorítico de actitud N90W/80N

Roca de color gris oscuro, textura porfídica con fenocristales dispersos de plagioclasa en una matriz de grano fino a muy fino. Los fenocristales, de hábito tabular y color blanquecino, se distribuyen de forma irregular y representan una fracción menor del volumen total. La matriz es microcristalina, de tonalidad verdosa oscura, con presencia de minerales máficos finamente diseminados, algunos de los cuales presentan alteración a clorita visible como manchas verde oliva. Superficie fresca de brillo apagado y fractura irregular. No se observa foliación.



Código: FIC-PL-M55

Coordenadas UTM: 6946346 N; 389128 E

Litología: Dique pórfido diorítico de actitud N10W;82SW

Roca de color gris oscuro, textura porfídica compuesta por fenocristales de plagioclasa (~25 %) dispersos en una matriz microcristalina de color gris verdoso oscuro. Los fenocristales son de hábito tabular, blanquecinos, de hasta 2 mm, sin orientación preferencial. La matriz constituye aproximadamente el 60 % del volumen y está formada por plagioclasa microlítica (~30 %), minerales máficos (~25 %, principalmente hornblenda y biotita subordinada), y escaso cuarzo intersticial (~5 %). Se observan también pequeños cristales opacos (~5 %) finamente diseminados. La roca es compacta, sin evidencias de alteración significativa. Presenta fractura irregular y brillo apagado.

1.4 Unidad de andesitas de andesitas y brechas volcanoclásticas - Fm. Cerrillos



Código: FIC-PL-M56

Coordenadas UTM: 6946656 N; 388543 E

Litología: Andesita oxidada

Roca volcánica de color rojo parduzco intenso en superficie fresca, con textura porfídica moderadamente desarrollada. Presenta fenocristales de plagioclasa (~20 %), de hábito tabular y color blanquecino, embebidos en una matriz afanítica a microcristalina (~75 %) de coloración rojiza uniforme. Se identifican también pequeños máficos opacos alterados (~5 %), probablemente piroxenos o hornblenda, fuertemente afectados por oxidación. La oxidación generalizada confiere a la muestra una tonalidad homogénea y aspecto terroso, con brillo apagado y fractura irregular. No se reconocen vesículas ni estructuras volcánicas a escala macroscópica.



Código: FIC-PL-M57

Coordenadas UTM: 6947568 N; 389245 E

Litología: Brecha volcanoclástica

Roca de textura heterogénea, color gris verdoso a pardo oscuro, con matriz porfídica de composición andesítica (~60 %) que engloba clastos subangulosos a subredondeados de composición silíceo (~30 %), de hasta 1 cm de diámetro. La matriz presenta plagioclasas finas, comúnmente fracturadas y teñidas por óxidos de cobre (5–10 %), que confieren tonalidades verdes y azuladas localizadas. Se observan vetillas polidireccionales delgadas (<1 mm), rellenas por óxidos férricos y cobres secundarios, asociadas a microfracturación difusa. La fractura es irregular, con brillo apagado y oxidación leve en planos de debilidad.

2 Alteración

2.1 Alteración argílica



Código: FIC-PL-M58

Coordenadas UTM: 6946922 N; 383946 E

Litología: Granodiorita argilizada

Roca de tonalidad blanquecina a crema, con sectores localmente pardo-amarillentos, de textura fanerítica parcialmente obliterada por alteración. Se identifican relictos de cuarzo anhedral (~20 %) y plagioclasa fuertemente caolinizada (~50 %), acompañados por manchas y diseminaciones de óxidos de hierro y dendritas de manganeso (~10 %). El feldespato potásico es poco distinguible, y los minerales máficos originales (~20 %) están completamente reemplazados por una matriz arcillosa blanda y pulverulenta. La roca presenta baja dureza, aspecto terroso y zonas blanquecinas masivas con desarrollo de pátinas oxidativas. La alteración argílica avanzada domina visualmente toda la muestra.



Código: FIC-PL-M59

Coordenadas UTM: 6947140 N; 384328 E

Litología: Granodiorita argilizada

Roca de aspecto masivo, color blanquecino a gris amarillento, con textura fanerítica obliterada por alteración. La plagioclasa original (~50 %) ha sido completamente transformada a arcillas claras, mientras que el cuarzo (~20 %) persiste como cristales anhedrales diseminados. El feldespato potásico (~5 %) es poco evidente, y los minerales máficos (~25 %) han sido reemplazados por una matriz arcillosa pardo-grisácea, con presencia de óxidos de hierro y costras oscuras irregulares. Se desarrollan pátinas superficiales de color oscuro asociadas a óxidos de magnesio (MgO).

2.2 Alteración propilítica



Código: FIC-PL-M60

Coordenadas UTM: 6946219 N; 385344 E

Litología: Tonalita con alteración clorita – epidota

Roca de color gris verdoso claro, con textura fanerítica de grano medio. Está compuesta principalmente por plagioclasa (~55 %) en cristales subhedrales blanquecinos y cuarzo anhedral intersticial (~25 %). Se observan escasos cristales de feldespato potásico (~5 %), dispersos y sin hábito definido. Los minerales máficos (~15 %), posiblemente hornblenda y biotita, están parcial a completamente reemplazados por clorita y epidota, visibles como agregados de tonalidades verde oscuro y pardo-verdosas. Se identifican también opacos finos (~5 %) diseminados, asociados a sulfuros primarios. La roca presenta fractura irregular y leve pátina de alteración en superficie fresca.



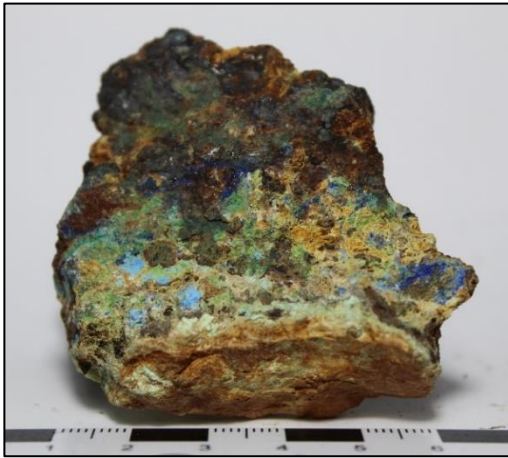
Código: FIC-PL-M61

Coordenadas UTM: 6946404 N; 389310 E

Litología: Brecha volcanoclástica con matriz alterada

Roca de aspecto masivo, compuesta por una matriz microcristalina a casi afanítica de tonalidad verde oscura, que representa aproximadamente el 70 % del volumen. En ella se encuentran dispersos fragmentos líticos subangulosos de hasta 1 cm, conformados por plagioclasa (~15 %), cuarzo (~5 %), baritina (~5 %) y máficos alterados (~15 %), principalmente clorita y epidota, visibles como zonas verdosas intensas dentro de los clastos. Los fragmentos no presentan orientación preferencial y se distribuyen de forma heterogénea en la matriz. La fractura es irregular y la superficie tiene brillo apagado.

3 Mineralización

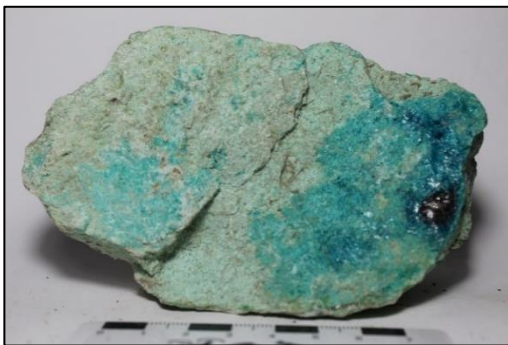


Código: FIC-PL-M62

Coordenadas UTM: 6946485 N; 385421 E

Litología: Veta oxidada de actitud N65W;25NNE

Muestra de roca fuertemente alterada y cementada por minerales de oxidación secundaria, con desarrollo de mineralización en cavidades, superficies irregulares y diseminaciones. Se identifican agregados finos de azurita (~10 %) en forma de costras microcristalinas y rellenos de microfracturas, íntimamente asociados con conicalcita (~10 %) como masas de hábito terroso, de aspecto algo pulverulento y distribución irregular. La matriz está impregnada por jarosita (~15 %), en forma de recubrimientos finos, intercrecidos con hematita (~20 %), que aparece como impregnaciones densas de grano fino. Se reconocen además óxidos de manganeso (~5 %) en forma de manchas oscuras diseminadas, especialmente en contacto con superficies porosas o zonas de disolución. La textura general es porosa a terrosa, con desarrollo de zonas parcialmente cementadas por minerales secundarios, propias de ambientes supergénicos avanzados.



Código: FIC-PL-M63

Coordenadas UTM: 6945658 N; 385865 E

Litología: Granodiorita argilizada con lavendulana

Muestra de granodiorita intensamente alterada por procesos argílicos avanzados, con pérdida casi total de la textura original y desarrollo de una matriz microcristalina friable, dominada por productos arcillosos derivados de feldespatos. Se observa lavendulana (~5–10 %) distribuida tanto de forma diseminada como en vetillas finas que cortan la roca en distintas orientaciones. La lavendulana se presenta con hábito terroso a microfibrroso, parcialmente cementando zonas de alteración. En uno de los extremos se distingue una concentración localizada de óxidos de manganeso (~1–2 %).



Código: FIC-PL-M64

Coordenadas UTM: 6946383 N; 389166 E

Litología: Veta de baritina con conicalcita
diseminada de actitud N60E; 30NW

Muestra proveniente de las cercanías de mina Hornitos, compuesta mayoritariamente por baritina maciza (>70 %), con hábito granular denso y textura compacta. Se identifica

conicalcita (~10–15 %) diseminada en la masa de baritina, presente como agregados microcristalinos y concreciones finas, principalmente en zonas de bordes de grano y porosidad secundaria. La muestra presenta un sistema de fracturas rellenas por óxidos de hierro, donde predominan jarosita y hematita (~10 %), infiltrados como vetillas delgadas y recubrimientos internos. La textura general es masiva, con fractura irregular.



Código: FIC-PL-M65

Coordenadas UTM: 6946232 N; 384829 E

Litología: Veta mineralizada

Muestra de alta densidad, con matriz de color gris oscuro a negro, textura masiva y brillo metálico tenue. Se observan vetillas y suturas de aspecto botroidal con color plateado brillante, dispuestas en microfracturas de la roca. En zonas específicas se identifican agregados de estibina con hábito acicular-radial de color gris metálico. La superficie muestra sectores con oxidación leve de tonalidad parda, sin presencia evidente de ganga silíceas. El material presenta un olor penetrante asociada a agregados de arsénico al manipularse en seco.

Se observan vetillas y suturas de aspecto botroidal con color plateado brillante, dispuestas en microfracturas de la roca. En zonas específicas se identifican agregados de estibina con hábito acicular-radial de color gris metálico. La superficie muestra sectores con oxidación leve de tonalidad parda, sin presencia evidente de ganga silíceas. El material presenta un olor penetrante asociada a agregados de arsénico al manipularse en seco.

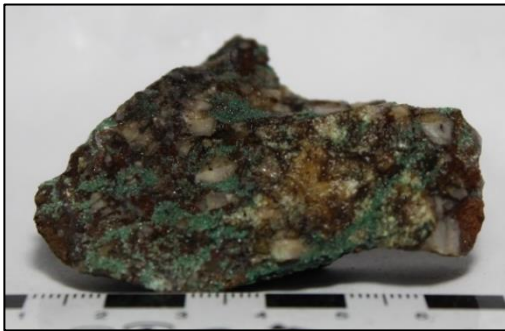


Código: FIC-PL-M66

Coordenadas UTM: 6946219 N; 384824 E

Litología: Granodiorita con arsenopirita

Roca de grano medio a fino, color gris claro, con textura fanerítica parcialmente obliterada por alteración argílica intensa, que confiere una matriz blanquecina y friable. Corresponde al halo de alteración contiguo a la veta de María Catalina, se observa una proporción estimada de ~45 % feldespato potásico y plagioclasa, ~30 % cuarzo, y ~20 % minerales máficos alterados. Destaca la presencia de arsenopirita (~5 %), diseminada de forma irregular en cristales subhedrales a euhedrales, con brillo metálico y color gris acerado a dorado pálido. La alteración argílica afecta especialmente a los feldespatos, generando bordes difusos y pérdida de brillo en la matriz.



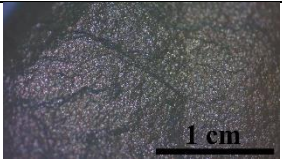
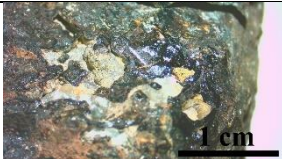
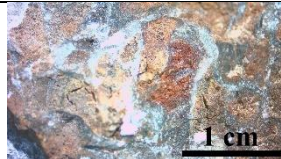
Código: FIC-PL-M67

Coordenadas UTM: 6946480 N; 385411 E


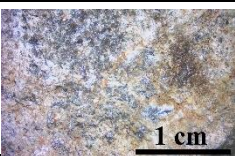

Litología: Baritina con mineralización diseminada

Roca de aspecto bandeado y textura masiva, compuesta predominantemente por cristales subhedrales a anhedrales de baritina (~85 %), de color blanco a beige claro, con hábito tabular y alto peso específico. Se reconocen parches y vetillas de zincolivenita (~10 %), en forma de agregados microcristalinos de tonalidad verde esmeralda intensa, con un modo de ocurrencia diseminada en la matriz. Se observan óxidos de hierro y manganeso (~5 %), impregnando fracturas y bordes de grano, otorgando pátinas pardas a negruzcas que contrastan con la coloración del mineral principal.

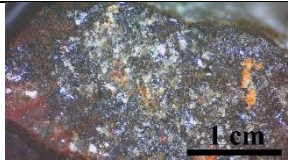
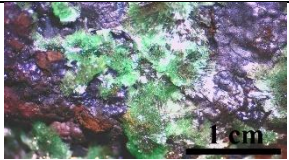
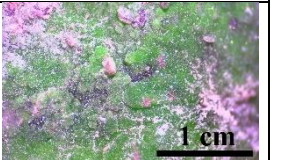
Anexo 2. Muestreo geoquímico

Elemento / Campo	FIC-PL-M01	FIC-PL-M02	FIC-PL-M03
Fotografía			
Coordenadas UTM	6946133 N; 384842 E	6946479 N; 385388 E	6946127 N; 384839 E
MgO	66.644 %	14.822 %	7.560 %
Al ₂ O ₃	0.633 %	0.511 %	0.398 %
SiO ₂	1.057 %	1.347 %	1.315 %
P ₂ O ₅	0.000 %	0.000 %	0.000 %
S	0.135 %	2.477 %	0.280 %
Cl	1.250 %	0.023 %	0.041 %
K ₂ O	0.000 %	0.147 %	0.001 %
CaO	0.000 %	3.393 %	4.181 %
Ti	0.017 %	1.816 %	0.002 %
V	0.017 %	0.000 %	0.004 %
Cr	0.040 %	0.000 %	0.000 %
Mn	0.009 %	1.164 %	0.257 %
Fe	0.100 %	10.224 %	2.316 %
Co	0.007 %	0.479 %	0.000 %
Ni	1.806 %	0.659 %	0.591 %
Cu	2.305 %	1.511 %	0.062 %
Zn	2.641 %	2.114 %	0.294 %
As	100.000 %	16.643 %	33.542 %
Se	6.618 %	0.064 %	0.100 %
Rb	0.000 %	0.001 %	0.000 %
Sr	0.000 %	0.242 %	0.018 %
Y	0.001 %	0.002 %	0.005 %
Zr	0.000 %	0.027 %	0.000 %
Nb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mo	0.000 %	0.002 %	0.032 %
Rh	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pd	0.371 %	0.000 %	0.000 %
Ag	9.823 %	0.046 %	0.025 %
Cd	0.000 %	0.002 %	0.000 %
Sn	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sb	13.920 %	0.224 %	0.408 %
Ba	0.000 %	6.371 %	0.000 %
La	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ce	0.295 %	0.000 %	0.000 %
Hf	0.022 %	0.000 %	0.000 %

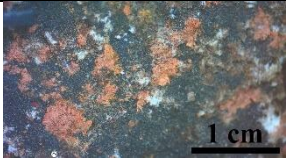
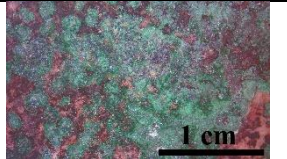

Ta	0.000 %	0.000 %	0.000 %
W	0.000 %	0.033 %	0.000 %
Pt	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Au	4.208 %	0.000 %	0.050 %
Hg	0.000 %	0.049 %	0.044 %
Tl	0.000 %	0.021 %	0.035 %
Pb	0.000 %	0.130 %	0.000 %
Bi	0.000 %	0.198 %	0.000 %
Th	0.000 %	0.000 %	0.000 %
U	0.000 %	0.000 %	0.000 %

Elemento / Campo	FIC-PL-M04	FIC-PL-M05	FIC-PL-M06
Fotografia			
Coordenadas UTM	6946126 N; 384841 E	6946120 N; 384839 E	6946119 N; 384840 E
MgO	4.639 %	2.093 %	4.859 %
Al ₂ O ₃	0.000 %	10.220 %	0.169 %
SiO ₂	10.053 %	33.144 %	0.556 %
P ₂ O ₅	0.000 %	0.000 %	0.000 %
S	0.213 %	11.382 %	0.185 %
Cl	0.060 %	0.030 %	0.086 %
K ₂ O	0.000 %	0.156 %	0.024 %
CaO	3.518 %	8.070 %	0.002 %
Ti	0.000 %	1.159 %	0.003 %
V	0.003 %	0.024 %	0.000 %
Cr	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mn	0.043 %	0.114 %	0.004 %
Fe	0.190 %	7.850 %	0.036 %
Co	0.000 %	0.000 %	0.002 %
Ni	0.030 %	0.006 %	0.303 %
Cu	0.020 %	0.027 %	0.780 %
Zn	0.022 %	0.215 %	0.272 %
As	8.736 %	0.095 %	88.239 %
Se	0.026 %	0.000 %	0.278 %
Rb	0.000 %	0.002 %	0.000 %
Sr	0.005 %	0.016 %	0.000 %
Y	0.000 %	0.001 %	0.000 %
Zr	0.000 %	0.008 %	0.000 %
Nb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mo	0.005 %	0.001 %	0.000 %
Rh	0.000 %	0.000 %	0.000 %


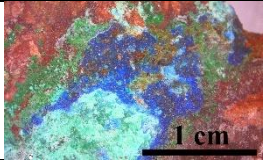

Pd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ag	0.000 %	0.000 %	0.121 %
Cd	0.007 %	0.000 %	0.000 %
Sn	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sb	0.087 %	0.015 %	1.051 %
Ba	0.000 %	0.000 %	0.000 %
La	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ce	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hf	0.001 %	0.000 %	0.001 %
Ta	0.000 %	0.000 %	0.000 %
W	0.000 %	0.003 %	0.000 %
Pt	0.000 %	0.009 %	0.000 %
Au	0.016 %	0.000 %	0.196 %
Hg	0.065 %	0.000 %	0.039 %
Tl	0.039 %	0.000 %	0.026 %
Pb	0.000 %	0.006 %	0.000 %
Bi	0.000 %	0.000 %	0.233 %
Th	0.000 %	0.000 %	0.000 %
U	0.000 %	0.000 %	0.000 %

Elemento / Campo	FIC-PL-M07	FIC-PL-M08	FIC-PL-M09
Fotografia			
Coordenadas UTM	6946484 N; 385405 E	6946480 N; 385390 E	6946724 N; 389472 E
MgO	0.000 %	5.729 %	3.182 %
Al2O3	1.147 %	0.573 %	1.193 %
SiO2	6.168 %	0.993 %	8.672 %
P2O5	0.368 %	0.000 %	0.253 %
S	33.234 %	1.176 %	1.754 %
Cl	0.050 %	0.016 %	0.163 %
K2O	0.145 %	0.041 %	0.185 %
CaO	0.458 %	0.157 %	6.875 %
Ti	0.069 %	1.052 %	1.318 %
V	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Cr	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mn	0.000 %	2.181 %	0.000 %
Fe	2.072 %	0.359 %	0.339 %
Co	0.033 %	0.359 %	0.008 %
Ni	0.052 %	0.307 %	0.087 %
Cu	1.066 %	11.849 %	25.814 %


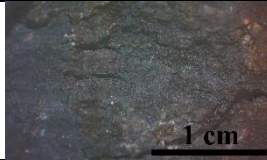

Zn	100.000 %	33.104 %	1.237 %
As	3.306 %	13.115 %	14.170 %
Se	0.000 %	0.000 %	0.032 %
Rb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sr	0.000 %	0.099 %	0.088 %
Y	0.013 %	0.000 %	0.000 %
Zr	0.000 %	0.010 %	0.010 %
Nb	0.000 %	0.021 %	0.000 %
Mo	0.000 %	0.002 %	0.004 %
Rh	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ag	0.020 %	0.000 %	0.138 %
Cd	0.174 %	0.000 %	0.000 %
Sn	0.000 %	0.020 %	0.000 %
Sb	0.554 %	0.449 %	0.146 %
Ba	0.000 %	10.438 %	15.690 %
La	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ce	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hf	0.000 %	0.000 %	0.034 %
Ta	0.007 %	0.000 %	0.000 %
W	0.104 %	0.000 %	0.000 %
Pt	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Au	1.166 %	0.000 %	0.000 %
Hg	0.000 %	0.000 %	0.049 %
Tl	0.000 %	0.000 %	0.003 %
Pb	0.353 %	0.000 %	0.000 %
Bi	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Th	0.000 %	0.000 %	0.022 %
U	0.000 %	0.000 %	0.000 %

Elemento / Campo	FIC-PL-M10	FIC-PL-M11	FIC-PL-M12
Fotografia			
Coordenadas UTM	6946458 N; 385399 E	6946909 N; 383953 E	6945674 N; 386089 E
MgO	14.339 %	1.786 %	0.000 %
Al2O3	0.846 %	0.627 %	4.232 %
SiO2	1.397 %	3.138 %	5.827 %
P2O5	0.059 %	0.000 %	0.000 %
S	0.284 %	0.104 %	3.310 %
Cl	0.000 %	2.143 %	0.033 %
K2O	0.046 %	0.127 %	0.147 %

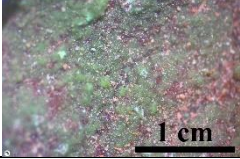
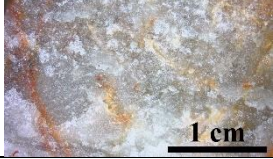
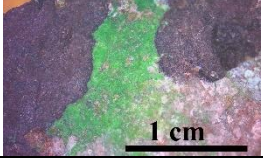
CaO	4.849 %	0.127 %	0.939 %
Ti	0.000 %	0.016 %	0.000 %
V	0.005 %	0.000 %	0.028 %
Cr	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mn	0.603 %	0.243 %	0.074 %
Fe	20.457 %	0.429 %	30.327 %
Co	0.021 %	0.000 %	0.000 %
Ni	0.057 %	0.687 %	0.009 %
Cu	0.186 %	8.099 %	0.074 %
Zn	0.865 %	6.552 %	0.069 %
As	18.932 %	0.002 %	0.175 %
Se	0.048 %	0.000 %	0.005 %
Rb	0.006 %	0.005 %	0.003 %
Sr	0.000 %	0.010 %	0.001 %
Y	0.002 %	0.005 %	0.000 %
Zr	0.000 %	0.000 %	0.006 %
Nb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mo	0.010 %	0.000 %	0.001 %
Rh	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ag	0.007 %	0.000 %	0.000 %
Cd	0.003 %	0.000 %	0.000 %
Sn	0.000 %	0.005 %	0.014 %
Sb	0.801 %	0.000 %	0.000 %
Ba	0.000 %	0.000 %	0.000 %
La	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ce	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hf	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ta	0.000 %	0.000 %	0.000 %
W	0.000 %	0.000 %	0.002 %
Pt	0.000 %	0.000 %	0.005 %
Au	0.024 %	0.000 %	0.001 %
Hg	0.060 %	0.000 %	0.000 %
Tl	0.028 %	0.000 %	0.000 %
Pb	0.067 %	0.000 %	0.010 %
Bi	0.013 %	0.000 %	0.005 %
Th	0.000 %	0.000 %	0.000 %
U	0.029 %	0.000 %	0.000 %

Elemento / Campo	FIC-PL-M13	FIC-PL-M14	FIC-PL-M15
Fotografía			
Coordenadas UTM	6945673 N; 386075 E	6946400 N; 384744 E	6946410 N; 384749 E
MgO	24.198 %	0.000 %	3.429 %
Al ₂ O ₃	6.505 %	1.169 %	0.488 %
SiO ₂	14.725 %	40.684 %	5.296 %
P ₂ O ₅	0.039 %	0.001 %	0.113 %
S	0.060 %	0.130 %	12.860 %
Cl	0.053 %	0.020 %	0.000 %
K ₂ O	0.099 %	0.098 %	0.059 %
CaO	0.290 %	0.484 %	0.329 %
Ti	0.087 %	0.020 %	9.091 %
V	0.000 %	0.002 %	0.000 %
Cr	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mn	0.129 %	0.195 %	0.000 %
Fe	0.753 %	2.630 %	0.168 %
Co	0.010 %	0.000 %	0.003 %
Ni	0.093 %	0.042 %	0.082 %
Cu	1.869 %	23.708 %	0.016 %
Zn	0.872 %	0.131 %	0.004 %
As	49.600 %	0.233 %	0.003 %
Se	0.130 %	0.000 %	0.000 %
Rb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sr	0.004 %	0.003 %	1.179 %
Y	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Zr	0.003 %	0.000 %	0.116 %
Nb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mo	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Rh	0.000 %	0.000 %	0.021 %
Pd	0.096 %	0.000 %	0.000 %
Ag	0.094 %	0.005 %	0.000 %
Cd	0.000 %	0.004 %	0.000 %
Sn	0.000 %	0.000 %	0.062 %
Sb	0.550 %	2.567 %	0.000 %
Ba	0.000 %	0.000 %	35.721 %
La	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ce	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hf	0.011 %	0.000 %	0.000 %
Ta	0.000 %	0.000 %	0.000 %
W	0.000 %	0.000 %	0.000 %

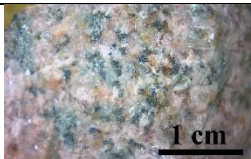
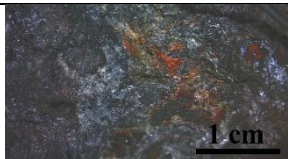
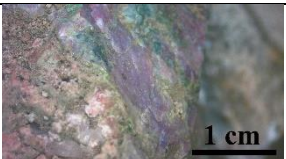
Pt	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Au	0.085 %	0.000 %	0.000 %
Hg	0.127 %	0.087 %	0.000 %
Tl	0.107 %	0.000 %	0.006 %
Pb	0.020 %	0.000 %	0.000 %
Bi	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Th	0.000 %	0.055 %	0.003 %
U	0.000 %	0.000 %	0.000 %

Elemento / Campo	FIC-PL-M16	FIC-PL-M17	FIC-PL-M18
Fotografia			
Coordenadas UTM	6946487 N; 385414 E	6946454 N; 385457 E	6946621 N; 384624 E
MgO	2.101 %	0.000 %	1.819 %
Al2O3	1.323 %	14.668 %	2.497 %
SiO2	4.964 %	29.331 %	10.360 %
P2O5	0.000 %	0.284 %	0.029 %
S	1.969 %	0.032 %	0.000 %
Cl	0.000 %	0.000 %	0.049 %
K2O	0.210 %	4.270 %	0.000 %
CaO	0.419 %	0.881 %	10.227 %
Ti	3.238 %	0.169 %	0.131 %
V	0.000 %	0.015 %	0.000 %
Cr	0.000 %	0.004 %	0.000 %
Mn	8.638 %	11.475 %	0.021 %
Fe	1.633 %	4.617 %	1.119 %
Co	0.000 %	0.017 %	0.000 %
Ni	0.082 %	0.009 %	0.006 %
Cu	0.215 %	0.020 %	0.016 %
Zn	3.739 %	0.156 %	0.017 %
As	0.249 %	0.104 %	0.004 %
Se	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Rb	0.000 %	0.009 %	0.000 %
Sr	0.267 %	0.111 %	0.021 %
Y	0.000 %	0.002 %	0.002 %
Zr	0.030 %	0.016 %	0.026 %
Nb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mo	0.042 %	0.016 %	0.001 %
Rh	0.010 %	0.000 %	0.000 %
Pd	0.000 %	0.000 %	0.000 %




Ag	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Cd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sn	0.028 %	0.000 %	0.001 %
Sb	0.252 %	0.024 %	0.000 %
Ba	23.666 %	0.040 %	0.000 %
La	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ce	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hf	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ta	0.000 %	0.000 %	0.000 %
W	0.011 %	0.003 %	0.000 %
Pt	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Au	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hg	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Tl	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Bi	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Th	0.000 %	0.000 %	0.000 %
U	0.000 %	0.000 %	0.000 %

Elemento / Campo	FIC-PL-M19	FIC-PL-M20	FIC-PL-M21
Fotografía			
Coordenadas UTM	6947119 N; 384251 E	6947171 N; 384306 E	6946440 N; 385056 E
MgO	1.960 %	0.927 %	5.041 %
Al ₂ O ₃	0.280 %	0.250 %	10.483 %
SiO ₂	10.618 %	58.407 %	86.291 %
P ₂ O ₅	0.033 %	0.069 %	0.140 %
S	0.027 %	0.303 %	0.439 %
Cl	0.261 %	0.014 %	0.121 %
K ₂ O	0.057 %	0.043 %	1.635 %
CaO	0.188 %	0.064 %	2.678 %
Ti	0.045 %	0.209 %	0.210 %
V	0.000 %	0.000 %	0.003 %
Cr	0.000 %	0.000 %	0.001 %
Mn	0.000 %	0.000 %	0.078 %
Fe	0.124 %	0.091 %	0.710 %
Co	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ni	0.018 %	0.005 %	0.003 %
Cu	1.157 %	0.005 %	3.248 %
Zn	0.016 %	0.001 %	0.142 %


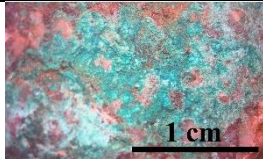
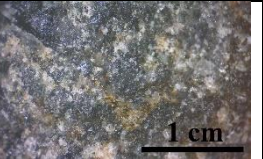
As	1.150 %	0.010 %	1.503 %
Se	0.002 %	0.000 %	0.000 %
Rb	0.000 %	0.000 %	0.003 %
Sr	0.000 %	0.021 %	0.004 %
Y	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Zr	0.000 %	0.002 %	0.002 %
Nb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mo	0.003 %	0.000 %	0.000 %
Rh	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ag	0.000 %	0.000 %	0.007 %
Cd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sn	0.019 %	0.000 %	0.000 %
Sb	0.192 %	0.091 %	0.215 %
Ba	0.237 %	1.561 %	0.000 %
La	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ce	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hf	0.012 %	0.000 %	0.045 %
Ta	0.000 %	0.000 %	0.000 %
W	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pt	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Au	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hg	0.006 %	0.000 %	0.000 %
Tl	0.002 %	0.000 %	0.000 %
Pb	0.015 %	0.000 %	0.015 %
Bi	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Th	0.000 %	0.000 %	0.000 %
U	0.000 %	0.000 %	0.000 %

Elemento / Campo	FIC-PL-M22	FIC-PL-M23	FIC-PL-M24
Fotografia			
Coordenadas UTM	6945496 N; 385620 E	6946121 N; 384841 E	6945628 N; 385890 E
MgO	1.179 %	27.240 %	15.176 %
Al ₂ O ₃	3.249 %	0.627 %	5.477 %
SiO ₂	19.993 %	4.856 %	21.782 %
P ₂ O ₅	0.121 %	0.290 %	0.083 %
S	0.035 %	9.697 %	0.548 %
Cl	0.061 %	0.002 %	0.050 %
K ₂ O	1.317 %	0.260 %	0.439 %

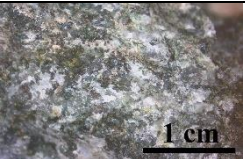
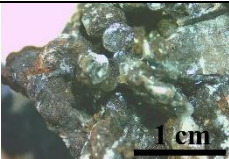
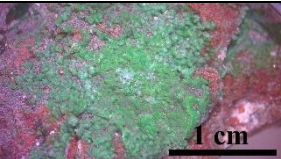
CaO	0.966 %	7.300 %	0.974 %
Ti	0.103 %	0.026 %	0.065 %
V	0.000 %	0.006 %	0.000 %
Cr	0.000 %	0.000 %	0.001 %
Mn	0.000 %	0.000 %	0.306 %
Fe	0.479 %	1.695 %	0.350 %
Co	0.000 %	0.030 %	0.024 %
Ni	0.007 %	1.576 %	0.050 %
Cu	0.005 %	0.925 %	2.613 %
Zn	0.001 %	0.242 %	3.487 %
As	0.001 %	26.339 %	21.866 %
Se	0.000 %	0.078 %	0.041 %
Rb	0.008 %	0.115 %	0.008 %
Sr	0.031 %	0.003 %	0.038 %
Y	0.002 %	0.124 %	0.001 %
Zr	0.006 %	0.032 %	0.009 %
Nb	0.000 %	0.141 %	0.008 %
Mo	0.000 %	0.212 %	0.006 %
Rh	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pd	0.000 %	0.049 %	0.490 %
Ag	0.000 %	0.070 %	0.040 %
Cd	0.000 %	0.016 %	0.000 %
Sn	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sb	0.000 %	0.599 %	0.184 %
Ba	0.066 %	0.000 %	0.000 %
La	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ce	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hf	0.000 %	0.001 %	0.000 %
Ta	0.000 %	0.000 %	0.000 %
W	0.000 %	0.046 %	0.000 %
Pt	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Au	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hg	0.000 %	0.088 %	0.078 %
Tl	0.000 %	0.064 %	0.069 %
Pb	0.000 %	0.111 %	0.013 %
Bi	0.000 %	0.000 %	0.009 %
Th	0.000 %	0.110 %	0.015 %
U	0.000 %	1.556 %	0.113 %

Elemento / Campo	FIC-PL-M25	FIC-PL-M26	FIC-PL-M28
Fotografía			
Coordenadas UTM	6946129 N; 384843 E	6946417 N; 385009 E	6946438 N; 385043 E
MgO	1.068 %	0.000 %	4.897 %
Al ₂ O ₃	4.854 %	4.114 %	2.923 %
SiO ₂	17.263 %	9.626 %	18.067 %
P ₂ O ₅	0.000 %	0.328 %	2.615 %
S	4.686 %	0.430 %	1.226 %
Cl	0.040 %	0.139 %	0.042 %
K ₂ O	0.248 %	1.737 %	0.425 %
CaO	2.271 %	1.191 %	12.386 %
Ti	0.260 %	0.067 %	0.044 %
V	0.000 %	0.000 %	0.080 %
Cr	0.000 %	0.000 %	0.001 %
Mn	0.012 %	2.563 %	0.008 %
Fe	3.222 %	2.534 %	0.350 %
Co	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ni	0.017 %	0.013 %	0.029 %
Cu	0.071 %	0.184 %	16.680 %
Zn	0.004 %	0.175 %	0.237 %
As	0.013 %	0.123 %	5.515 %
Se	0.001 %	0.000 %	0.011 %
Rb	0.003 %	0.009 %	0.002 %
Sr	0.024 %	0.067 %	0.009 %
Y	0.000 %	0.001 %	0.007 %
Zr	0.008 %	0.013 %	0.003 %
Nb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mo	0.000 %	0.004 %	0.000 %
Rh	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ag	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Cd	0.000 %	0.003 %	0.000 %
Sn	0.008 %	0.000 %	0.006 %
Sb	0.018 %	0.038 %	0.000 %
Ba	0.052 %	0.149 %	0.000 %
La	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ce	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hf	0.001 %	0.000 %	0.100 %
Ta	0.000 %	0.000 %	0.000 %
W	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pt	0.000 %	0.000 %	0.000 %

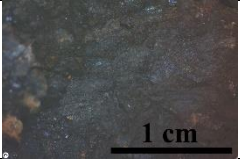

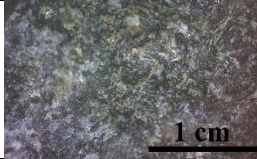
Au	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hg	0.000 %	0.000 %	0.031 %
Tl	0.003 %	0.000 %	0.011 %
Pb	0.008 %	0.000 %	0.000 %
Bi	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Th	0.000 %	0.000 %	0.017 %
U	0.000 %	0.000 %	0.000 %

Elemento / Campo	FIC-PL-M27	FIC-PL-M29	FIC-PL-M30
Fotografía			
Coordenadas UTM	6945673 N; 385843 E	6945589 N; 385729 E	6946429 N; 384735 E
MgO	1.974 %	12.503 %	1.634 %
Al ₂ O ₃	2.635 %	0.729 %	4.844 %
SiO ₂	9.823 %	7.858 %	22.987 %
P ₂ O ₅	0.031 %	0.000 %	0.092 %
S	0.030 %	5.501 %	0.125 %
Cl	0.063 %	1.268 %	0.050 %
K ₂ O	0.126 %	0.118 %	0.752 %
CaO	0.498 %	9.972 %	2.610 %
Ti	0.010 %	0.073 %	0.224 %
V	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Cr	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mn	0.039 %	0.006 %	0.038 %
Fe	5.631 %	0.311 %	1.301 %
Co	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ni	0.042 %	0.057 %	0.004 %
Cu	10.544 %	26.931 %	0.010 %
Zn	0.198 %	0.013 %	0.008 %
As	0.497 %	10.598 %	0.000 %
Se	0.000 %	0.031 %	0.000 %
Rb	0.002 %	0.000 %	0.007 %
Sr	0.000 %	0.003 %	0.032 %
Y	0.012 %	0.000 %	0.003 %
Zr	0.000 %	0.000 %	0.009 %
Nb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mo	0.006 %	0.006 %	0.000 %
Rh	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ag	0.000 %	0.086 %	0.000 %

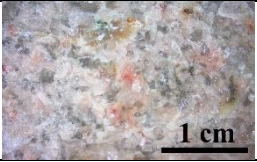
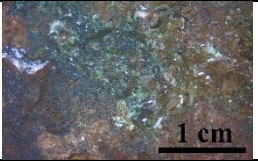

Cd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sn	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sb	0.038 %	4.042 %	0.000 %
Ba	0.000 %	0.000 %	0.053 %
La	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ce	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hf	0.030 %	0.119 %	0.000 %
Ta	0.000 %	0.000 %	0.000 %
W	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pt	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Au	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hg	0.000 %	0.076 %	0.000 %
Tl	0.000 %	0.053 %	0.000 %
Pb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Bi	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Th	0.000 %	0.050 %	0.000 %
U	0.000 %	0.000 %	0.000 %

Elemento / Campo	FIC-PL-M31	FIC-PL-M32	FIC-PL-M33
Fotografía			
Coordenadas UTM	6946620 N; 384629 E	6946618 N; 384628 E	6946440 N; 385056 E
MgO	3.015 %	19.493 %	2.402 %
Al2O3	15.642 %	0.408 %	1.220 %
SiO2	40.460 %	1.237 %	6.578 %
P2O5	0.134 %	0.145 %	0.042 %
S	0.173 %	0.238 %	0.424 %
Cl	0.075 %	0.078 %	0.055 %
K2O	0.745 %	0.000 %	0.238 %
CaO	6.354 %	22.137 %	12.299 %
Ti	0.167 %	0.251 %	0.064 %
V	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Cr	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mn	0.020 %	0.379 %	0.030 %
Fe	1.142 %	0.690 %	0.835 %
Co	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ni	0.000 %	0.003 %	0.088 %
Cu	0.009 %	0.013 %	32.601 %
Zn	0.003 %	0.024 %	1.231 %
As	0.001 %	0.272 %	13.626 %

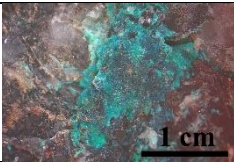

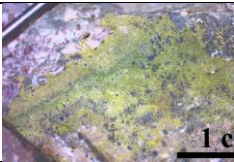
Se	0.000 %	0.000 %	0.034 %
Rb	0.003 %	0.000 %	0.000 %
Sr	0.049 %	0.043 %	0.024 %
Y	0.001 %	0.000 %	0.000 %
Zr	0.006 %	0.005 %	0.000 %
Nb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mo	0.000 %	0.002 %	0.008 %
Rh	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ag	0.000 %	0.000 %	0.020 %
Cd	0.000 %	0.001 %	0.004 %
Sn	0.000 %	0.011 %	0.000 %
Sb	0.000 %	0.069 %	1.103 %
Ba	0.000 %	1.503 %	0.105 %
La	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ce	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hf	0.000 %	0.000 %	0.107 %
Ta	0.001 %	0.000 %	0.000 %
W	0.000 %	0.001 %	0.000 %
Pt	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Au	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hg	0.000 %	0.000 %	0.037 %
Tl	0.000 %	0.000 %	0.020 %
Pb	0.000 %	0.000 %	0.088 %
Bi	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Th	0.000 %	0.000 %	0.017 %
U	0.000 %	0.000 %	0.000 %

Elemento / Campo	FIC-PL-M34	FIC-PL-M35	FIC-PL-M36
Fotografía			
Coordenadas UTM	6946908 N; 383949 E	6947178 N; 384301 E	6946365 N; 385031 E
MgO	1.034 %	0.000 %	7.256 %
Al ₂ O ₃	22.869 %	2.549 %	12.680 %
SiO ₂	42.490 %	7.568 %	47.827 %
P ₂ O ₅	0.000 %	0.000 %	0.036 %
S	0.311 %	20.760 %	1.115 %
Cl	0.066 %	0.077 %	1.224 %
K ₂ O	4.102 %	0.772 %	0.712 %
CaO	0.583 %	22.292 %	7.587 %

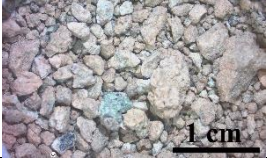
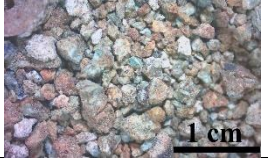

Ti	0.016 %	0.128 %	0.259 %
V	0.000 %	0.003 %	0.025 %
Cr	0.003 %	0.000 %	0.002 %
Mn	1.307 %	0.020 %	0.040 %
Fe	0.692 %	1.028 %	2.711 %
Co	0.057 %	0.000 %	0.000 %
Ni	0.024 %	0.000 %	0.001 %
Cu	0.141 %	0.005 %	0.003 %
Zn	0.149 %	0.003 %	0.002 %
As	0.030 %	0.007 %	0.000 %
Se	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Rb	0.009 %	0.003 %	0.003 %
Sr	0.001 %	0.016 %	0.022 %
Y	0.000 %	0.000 %	0.002 %
Zr	0.003 %	0.011 %	0.006 %
Nb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mo	0.004 %	0.001 %	0.001 %
Rh	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ag	0.000 %	0.001 %	0.000 %
Cd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sn	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sb	0.031 %	0.000 %	0.000 %
Ba	0.000 %	0.000 %	0.000 %
La	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ce	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hf	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ta	0.000 %	0.001 %	0.000 %
W	0.004 %	0.000 %	0.000 %
Pt	0.002 %	0.000 %	0.000 %
Au	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hg	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Tl	0.001 %	0.000 %	0.000 %
Pb	0.004 %	0.000 %	0.000 %
Bi	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Th	0.000 %	0.000 %	0.000 %
U	0.000 %	0.000 %	0.000 %

Elemento / Campo	FIC-PL-M37	FIC-PL-M38	FIC-PL-M39
Fotografía			
Coordenadas UTM	6946365 N; 385031 E	6946504 N; 385361 E	6946477 N; 385384 E
MgO	2.106 %	1.788 %	17.170 %
Al ₂ O ₃	13.304 %	1.423 %	0.641 %
SiO ₂	41.322 %	20.791 %	1.109 %
P ₂ O ₅	0.194 %	0.055 %	0.000 %
S	0.065 %	0.000 %	0.673 %
Cl	0.058 %	0.000 %	0.000 %
K ₂ O	0.184 %	0.000 %	0.028 %
CaO	8.386 %	2.715 %	5.210 %
Ti	0.240 %	0.093 %	0.711 %
V	0.009 %	0.017 %	0.000 %
Cr	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mn	0.028 %	0.003 %	0.711 %
Fe	1.835 %	0.058 %	5.081 %
Co	0.000 %	0.000 %	0.137 %
Ni	0.001 %	0.006 %	0.135 %
Cu	0.003 %	0.000 %	3.419 %
Zn	0.001 %	0.001 %	20.875 %
As	0.000 %	0.000 %	14.876 %
Se	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Rb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sr	0.027 %	0.007 %	0.054 %
Y	0.002 %	0.001 %	0.007 %
Zr	0.010 %	0.010 %	0.007 %
Nb	0.000 %	0.000 %	0.006 %
Mo	0.001 %	0.000 %	0.000 %
Rh	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ag	0.000 %	0.000 %	0.006 %
Cd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sn	0.000 %	0.014 %	0.000 %
Sb	0.000 %	0.000 %	0.434 %
Ba	0.000 %	0.000 %	5.397 %
La	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ce	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hf	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ta	0.000 %	0.002 %	0.000 %
W	0.000 %	0.000 %	0.000 %

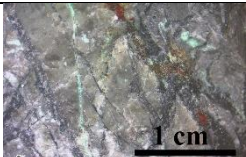

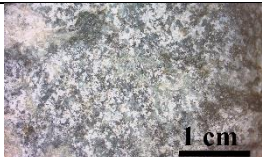
Pt	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Au	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hg	0.000 %	0.000 %	0.018 %
Tl	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Bi	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Th	0.000 %	0.000 %	0.000 %
U	0.000 %	0.000 %	0.000 %

Elemento / Campo	FIC-PL-M40	FIC-PL-M41	FIC-PL-M42
Fotografia			
Coordenadas UTM	6947620 N; 386834 E	6947418 N; 387865 E	6947818 N; 389306 E
MgO	1.349 %	3.240 %	2.769 %
Al2O3	3.931 %	0.290 %	2.882 %
SiO2	18.110 %	6.509 %	54.534 %
P2O5	0.182 %	0.000 %	0.000 %
S	5.595 %	0.457 %	3.471 %
Cl	0.544 %	0.046 %	0.052 %
K2O	0.529 %	0.070 %	0.286 %
CaO	13.875 %	0.000 %	2.942 %
Ti	0.316 %	0.629 %	0.823 %
V	0.019 %	0.000 %	0.550 %
Cr	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mn	0.062 %	0.157 %	0.000 %
Fe	2.930 %	0.603 %	0.352 %
Co	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ni	0.000 %	0.072 %	0.008 %
Cu	0.007 %	16.475 %	4.038 %
Zn	0.004 %	0.189 %	0.007 %
As	0.002 %	0.058 %	0.471 %
Se	0.000 %	0.000 %	0.001 %
Rb	0.003 %	0.000 %	0.001 %
Sr	0.125 %	0.110 %	0.032 %
Y	0.002 %	0.000 %	0.000 %
Zr	0.016 %	0.014 %	0.005 %
Nb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mo	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Rh	0.000 %	0.000 %	0.011 %
Pd	0.000 %	0.000 %	0.006 %

Ag	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Cd	0.000 %	0.005 %	0.000 %
Sn	0.000 %	0.000 %	0.214 %
Sb	0.000 %	1.545 %	1.566 %
Ba	0.000 %	5.551 %	0.000 %
La	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ce	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hf	0.000 %	0.000 %	0.004 %
Ta	0.000 %	0.000 %	0.000 %
W	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pt	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Au	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hg	0.000 %	0.000 %	0.076 %
Tl	0.000 %	0.000 %	0.009 %
Pb	0.000 %	0.000 %	0.785 %
Bi	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Th	0.000 %	0.021 %	0.000 %
U	0.000 %	0.000 %	0.000 %

Elemento / Campo	FIC-PL-M43	FIC-PL-M44	FIC-PL-M48
Fotografía			
Coordenadas UTM	6947734 N; 389370 E	6947734 N; 389368 E	6947850 N; 388694 E
MgO	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Al ₂ O ₃	5.376 %	6.386 %	4.519 %
SiO ₂	65.849 %	23.727 %	17.967 %
P ₂ O ₅	0.208 %	0.385 %	0.493 %
S	3.458 %	0.400 %	0.258 %
Cl	0.066 %	0.087 %	0.066 %
K ₂ O	0.412 %	3.043 %	0.596 %
CaO	1.143 %	6.352 %	15.019 %
Ti	0.063 %	0.688 %	0.579 %
V	0.510 %	0.041 %	0.019 %
Cr	0.003 %	0.000 %	0.000 %
Mn	0.344 %	0.071 %	0.092 %
Fe	0.366 %	2.888 %	4.765 %
Co	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ni	0.000 %	0.001 %	0.000 %
Cu	1.010 %	0.042 %	0.005 %
Zn	0.001 %	0.010 %	0.002 %
As	0.437 %	0.005 %	0.001 %

Se	0.002 %	0.000 %	0.000 %
Rb	0.001 %	0.015 %	0.004 %
Sr	0.002 %	0.014 %	0.022 %
Y	0.000 %	0.003 %	0.002 %
Zr	0.002 %	0.008 %	0.008 %
Nb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mo	0.002 %	0.001 %	0.000 %
Rh	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ag	0.001 %	0.000 %	0.000 %
Cd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sn	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sb	0.033 %	0.023 %	0.000 %
Ba	0.000 %	0.066 %	0.000 %
La	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ce	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hf	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ta	0.008 %	0.000 %	0.001 %
W	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pt	0.002 %	0.000 %	0.000 %
Au	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hg	0.008 %	0.000 %	0.000 %
Tl	0.010 %	0.009 %	0.000 %
Pb	1.235 %	0.000 %	0.002 %
Bi	0.000 %	0.046 %	0.000 %
Th	0.000 %	0.000 %	0.000 %
U	0.000 %	0.000 %	0.000 %

Elemento / Campo	FIC-PL-M46	FIC-PL-M47	FIC-PL-M45
Fotografía			
Coordenadas UTM	6947742 N; 388713 E	6946516 N; 389452 E	6946111 N; 384837 E
MgO	1.290 %	4.182 %	3.317 %
Al ₂ O ₃	6.533 %	2.193 %	12.886 %
SiO ₂	67.138 %	8.672 %	40.761 %
P ₂ O ₅	0.068 %	1.253 %	0.180 %
S	0.000 %	1.454 %	0.053 %
Cl	0.059 %	0.163 %	0.851 %
K ₂ O	3.504 %	0.185 %	0.944 %
CaO	0.187 %	6.875 %	17.918 %
Ti	0.058 %	0.318 %	0.446 %

V	0.004 %	0.000 %	0.017 %
Cr	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mn	0.000 %	0.000 %	0.063 %
Fe	0.593 %	0.639 %	2.839 %
Co	0.000 %	0.008 %	0.000 %
Ni	0.000 %	0.087 %	0.001 %
Cu	0.319 %	25.814 %	0.007 %
Zn	0.002 %	1.237 %	0.009 %
As	0.000 %	14.170 %	0.000 %
Se	0.000 %	0.032 %	0.000 %
Rb	0.010 %	0.000 %	0.005 %
Sr	0.005 %	0.088 %	0.027 %
Y	0.000 %	0.000 %	0.003 %
Zr	0.004 %	0.010 %	0.010 %
Nb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Mo	0.000 %	0.004 %	0.001 %
Rh	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ag	0.000 %	0.138 %	0.000 %
Cd	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sn	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Sb	0.000 %	0.146 %	0.000 %
Ba	0.137 %	18.690 %	0.000 %
La	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Ce	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Hf	0.000 %	0.034 %	0.000 %
Ta	0.000 %	0.000 %	0.000 %
W	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Pt	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Au	0.000 %	0.000 %	0.001 %
Hg	0.000 %	0.149 %	0.000 %
Tl	0.058 %	0.003 %	0.000 %
Pb	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Bi	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Th	0.000 %	0.022 %	0.000 %
U	0.000 %	0.000 %	0.000 %

Anexo 3. Actitudes estructurales

Los datos estructurales presentados en este informe fueron medidos utilizando el sistema “*right hand rule*” (regla de la mano derecha).

Norte	Este	Rumbo	Manteo	Observaciones
6945587.55	385721.95	230	54	Veta entrada a mina Jote
6945643.36	385804.42	115	73	Veta mediados a mina Jote
6945675.49	385850.08	113	75	Veta final mina Jote
6945628.71	385890.29	170	79	Pto 2 arriba de mina Jote
6945663.76	386084.04	190	81	Veta con mansfieldita
6945876.50	6945876.50	260	74	Laboreo sin evidencia de mineralización
6945992.56	385348.82	300	81	Laboreo sin evidencia de mineralización, presenta alteración argílica y jarosítica
6946116.51	384843.63	170	77	Veta María Catalina
6946399.96	384755.05	220	75	Veta Cu-Ba
6946430.59	384738.68	170	79	Veta de cuarzo
6946386.70	384944.66	200	74	Labor minera sin evidencia de mineralización
6946365.08	385031.04	300	72	Dique microdiorítico
6946349.62	385167.09	270	68	Dique microdiorítico
6946504.38	385361.66	270	70	Dique microdiorítico
6946486.22	385412.69	265	60	Veta negra
6946451.72	385457.78	310	65	Veta Cu-Ba arriba de veta negra
6946910.74	383979.24	110	87	Veta Alacrán
6947085.09	6947085.09	280	80	Veta descubridora
6947178.15	384301.43	335	65	Veta sobre descubridora
6947445.58	384639.64	160	72	Dique microdiorítico
6947359.00	387895.71	300	84	Dique microdiorítico
6947456.80	387819.79	290	73	Veta Cu-Ba
6947525.04	387306.45	290	78	Dique microdiorítico
6947776.93	387126.21	304	62	Veta Cu-Ba
6947785.18	387107.53	290	68	Veta Cu-Ba
6947839.64	386842.80	285	84	Veta Cu-Ba
6946518.03	387470.01	68	80	Veta de actinolita
6946208.51	386493.80	255	79	Dique microdiorítico
6946342.15	386401.85	270	80	Dique microdiorítico
6946797.75	386922.96	300	65	Veta de baritina
6947818.70	389306.51	140	65	Veta Cu-Ba

6947342.57	388617.63	300	79	Veta Cu-Ba
6946909.45	388747.28	290	75	Falla de rumbo
6945983.34	388923.30	170	80	Falla normal
6946392.16	389174.81	240	83	Veta Cu-Ba
6946528.73	389495.94	300	62	Veta Cu - Ba
6946516.74	389452.79	290	85	Veta Cu - Ba
6946560.09	389424.49	325	67	Veta Cu - Ba
6946590.56	389368.47	320	70	Veta Cu - Ba
6946721.76	389470.03	95	70	Veta Cu - Ba
6946731.59	389479.37	310	75	Veta Cu - Ba
6946731.50	389437.04	88	88	Veta Cu - Ba
6946723.59	389452.56	85	72	Veta Cu - Ba
6946591.84	389368.87	320	70	Veta Cu - Ba
6947103.78	384278.78	180	80	Falla siniestral interior descubridora
6947087.19	384279.53	280	27	Falla de rumbo interior descubridora
6946614.35	384608.30	160	75	Falla
6946534.63	384669.34	280	80	Falla
6946445.13	384683.29	290	81	Falla
6946407.44	384802.48	190	75	Falla
6946385.21	384814.27	190	75	Falla
6946507.38	384666.61	230	80	Falla
6946508.02	385342.19	245	75	Falla
6946516.23	385309.11	0	82	Falla
6946116.55	384841.07	60	65	Falla inversa interior María catalina
6945599.77	385730.98	290	75	Falla inversa
6945612.94	385747.13	100	80	Falla dextral
6945611.37	385759.96	130	80	Falla
6945688.07	385842.09	245	69	Falla siniestral al final de mina Jote

Anexo 4. Mapa geológico

Mapa escala 1:10.000, tamaño A0 adjunto a este informe.