



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**“CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL
ECONÓMICO DE MINA SAN ANTONIO,
DISTRITO MINERO JESÚS MARIA, REGIÓN
DE ATACAMA, CHILE”**

Tatiana Ramírez Pizarro

Copiapó, Chile, 2023



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**“CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL
ECONÓMICO DE MINA SAN ANTONIO,
DISTRITO MINERO JESÚS MARIA, REGIÓN
DE ATACAMA, CHILE”**

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

Profesor guía: Sr Francisco Tapia

Tatiana Ramírez Pizarro

Copiapó, Chile, 2023

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo quisiera agradecer a mis papás por haber permitido seguir mi camino lejos de ellos, gracias a ellos María y Juan, por su apoyo y contención infinita, por hacer siempre mi vida más fácil y bonita. A mi hermana Silvana agradecer por siempre estar presente y preocupada por mí.

Agradecer a mi gran compañero Víctor que fue un gran apoyo en mis últimos años universitarios, por generar siempre confianza en mí, gracias por haber tomado mi mano.

Agradecer a la vida por las lindas personas que encontré en este camino y que formaron parte de él. A mis amigos gracias por las infinitas conversaciones en los pasillos, por tantas risas y enojos compartidos. A mis compañeros también por el tiempo compartido, muchas gracias a todos los que fueron de alguna u otra forma parte de esta gran etapa.

Agradecer a todos los profesores que aportaron con conocimientos y experiencias durante todos mis años universitarios, a mi profesor guía Francisco Tapia por su gran apoyo durante este proyecto, por sus consejos y por tener plena disposición ante mis dudas.

Gracias, profesores por la gran capacidad de algunos en transmitir el amor que tienen a esta hermosa ciencia, muchas gracias a todos.

Agradecer a don Armando Arias por la confianza que tomo en mí para realizar este proyecto y por la disposición de todos en la mina.

Por último, volver agradecer a mis padres, porque sin ellos, sin su apoyo infinito, esta etapa la contaría de otra forma, gracias por ser los padres más lindos.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	3
INDICE DE FIGURAS	8
INDICE DE TABLAS	13
RESUMEN	14
ABSTRACT.....	15
CAPÍTULO I: MARCO INTRODUCTORIO.....	16
1.1 Introducción	16
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo general.....	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 Planteamiento del problema.....	17
1.4 Hipótesis.....	19
1.5 Área de estudio.....	19
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 Depósitos minerales magmáticos-hidrotermales	21
2.2 Transporte y precipitación de metales.....	23
2.3 Alteración hidrotermal	25
2.4 Yacimientos IOCG-IOA.....	30

2.4.1 Yacimientos IOCG-IOA en Chile	35
2.5.1 Yacimientos epitermales en Chile	46
2.6 Oxidación y enriquecimiento supérgeno.....	49
CAPÍTULO III: MARCO GEOLÓGICO	53
3.1 Marco geológico regional	53
3.2 Marco geológico local.....	55
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA	58
4.1 Etapa de pre-terreno	58
4.1.1 Revisión bibliográfica.....	58
4.1.2 Elaboración de base de mapeo.....	59
4.1.3 Fotointerpretación.....	59
4.2 Etapa de terreno	59
4.2.1 Litología.....	60
4.2.2 Mineralización	61
4.2.3 Alteración.....	62
4.2.4 Estructura	63
4.2.5 Fotografías	64
4.3 Etapa post-terreno	65
4.3.1 Descripción	65

4.3.2 Datos estructurales.....	65
4.3.3 Microscopia óptica.....	65
4.3.4 Generación de metodologías estandarizada para la determinación de leyes de oro.....	66
4.3.5 Realización de mapas.....	70
CAPITULO V: RESULTADOS.....	71
5.1 Unidades litológicas.....	71
Diorita.....	71
Dique Microdiorítico porfídico.....	73
Diques de microdiorita.....	74
5.2 Mineralización.....	75
5.2.1 Mineralización de oro.....	80
5.2.2 Óxidos de cobre.....	81
5.3 Alteraciones hidrotermales.....	85
5.3.1 Alteraciones veta 1.....	85
5.3.2 Alteraciones veta 2.....	90
5.3.3 Alteraciones veta 3.....	91
5.3.4 Alteraciones veta 4.....	93
5.4 Levantamiento geológico mina interior.....	95

5.5 Estructuras.....	96
VI ANALISIS GEOQUIMICOS REALIZADOS MEDIANTE XRF	99
6.1 Elementos de interés Oro	99
6.2 Elemento de interés Cobre	104
6.3 Elemento de interés Hierro	105
VII POTENCIAL ECONOMICO.....	107
VIII DISCUSIONES.....	109
VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	112
CONCLUSIONES	112
RECOMENDACIONES.....	115
BIBLIOGRAFIA	116

INDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Mapa ubicación y acceso mina San Antonio, recuadro rosado corresponde al área de estudio, elaboración propia.	20
Figura N°2: Modelo esquemático, que ilustra los componentes principales del sistema mineral hidrotermal. Extraído de Vearncombe (2015).	23
Figura N°3: Asociaciones de minerales comunes en sistemas de alteraciones hidrotermales, en función de temperatura y pH del fluido, asociadas a la formación de depósitos minerales epitermales, mesotermales y porfídicos. Abreviaciones: Ab = albita, Ac = actinolita, Ad = adularia, Al = alunita, And = andalucita, Bi = biotita, Ca = calcedonia, Cb = carbonatos (de Ca, Mg, Mn y/o Fe), Cc = calcita, Cl = clorita, Co = corindón, Cr = cristobalita, Dc = dickita, Di = diápora, Do = dolomita, Ep = epidota, Fp = feldespatos potásicos, Ha = halloysita, I = illita o illita-esmectita, K = caolinita, Mt = magnetita, Op = ópalo o sílice opalina, Pi = pirofilita, Px = clinopiroxenos, Q = cuarzo, Se = sericita, Si = siderita, Sm = esmectita o esmectita-illita, Tri = tridimita, Z = zeolitas (de menor a mayor temperatura: natrolita, chabazita, mordenita, heulandita; laumontita; wairakita). Extraído de Camprubí et al., 2003a.	28
Figura N°4: Ubicación de provincias hidrotermales de óxido de Fe y las principales provincias de IOCG. Extraído de Williams et al, 2005.	31
Figura N°5: Arquitecturas y orígenes hidrotermales alternativos para sistemas IOCG ilustrando posibles fuentes de fluidos, recorridos del flujo hidrotermal, y distribución de alteraciones y menas (Figura modificada de Barton, 2014).	33
Figura N°6: Clasificación genética a distintas profundidades de yacimientos IOA en Chile extraído de Palma et al., (2020).	35
Figura N°7: Etapas de mineralización magmáticos e hidrotermales de la evolución termal de depósitos IOA andinos, magmática, magmática-hidrotermal, hidrotermal. Extraído Palma et al., (2020).	35
Figura N°8: Distribución de yacimientos tipo IOCG e IOA en Chile. Extraído de Barra et al., (2017).	37
Figura N°9: Esquema de depósitos IOCG en distintos ambientes tectónicos. Extraído de Groves et al., (2010).	38

Figura N°10: Distribución espacial de depósitos epitermales. Extraído de Hedenquist et al., 2000).....	41
Figura N°11: Esquema comparativo de la estructura, procesos, tipos de alteración, volátiles liberados, temperatura, pH, tipos de fluidos y reacciones involucradas en la formación de los depósitos epitermales de baja y alta sulfuración.	43
Figura N°12: Sección transversal idealizada de un depósito epitermal de baja sulfuración que muestra la distribución de alteraciones. Extraído de Tosdal et al., (2009).....	44
Figura N°13: Sección transversal idealizada de un depósito epitermal de alta sulfuración, que muestra la distribución de alteraciones. Extraído de Tosdal et al., (2009).....	46
Figura N°14: Distribución espacial de epitermales de alta sulfidación y baja sulfidación en Chile. Extraído de Kojima y Campos (2011).....	48
Figura N°15: Perfil esquemático de oxidación supérgeno. Extraído de Taylor (2011).....	52
Figura N°16: Mapa de ubicación y zonificación de vetas. Las zonas de vetas dominadas por Mt con alteración de Na-Mt en el núcleo están envueltas por vetas dominadas por Hm con Na-KHm(H ⁺) alteración. Mapa base compilado de Arevalo (1999) y Tilling (1963) y modificado por Barton et al. 2011	57
Figura N°17: A) Microscopio modelo DM1750, ubicado en departamento de Geología, de Universidad de Atacama. B) Cortes transparentes y cortes de pulido.....	66
Figura N°18: A) Muestras enviadas a análisis para obtención de leyes de oro y contramuestra. B) Contramuestra obtenida de laboratorio Geolaquim.	67
Figura N°19: A) Balanza Radwag AS 220/C/2, ubicada en el departamento de Geología, Universidad de Atacama. B) Muestreo de M1 con sus 3 respectivos pesos para A, B y C.	68

Figura N°20: A) Horno Memmert utilizado para el secado de las muestras, ubicado en departamento de geología, Universidad de Atacama. B) Muestras secadas para M1, M2, M3 y M4, A, B y C.....	69
Figura N°21: A) distribución de cuerpo diorítico y vetas mineralizadas de mina San Antonio, veta 1 y veta 2. B) muestra de mano de roca de caja definida como diorita, extraída de área presentada en A.	72
Figura N°22: A) fotomicrografía de roca de caja Luz Polarizada Plana (LPP) B) fotomicrografía en Nicoles Cruzados (NX). Plg: Plagioclasas; Ep: Epidota; Chl: Clorita; Ser: Sericita.	73
Figura N°23: Muestra de mano de dique microdiorítico porfídico.	74
Figura N°24: Afloramientos de diques microdioríticos porfídicos (rojos) intruyendo unidad diorítica (rosado).	74
Figura N°25: A) Muestra de mano de dique microdiorita. B) Fotomicrografía de dique microdiorita.....	75
Figura N°26: A) Veta 1 con zonaciones de óxidos de hierro; B) Zoom a zonas características en veta 1.	76
Figura N°27: Esquema de veta 1, con alteraciones y mineralización. Confección propia.	77
Figura N°28: Veta 2 con zonaciones de óxidos de hierro (hematita) y argilización.	78
Figura N°29: Esquema de veta 2, con alteraciones y mineralización. Confección propia.	79
Figura N°30: Veta 3 con mineralización de oro y presencia de óxidos de hierro. .	79
Figura N°31: Veta 4 con mineralización de oro, óxidos de hierro y cobre. Qz: cuarzo; Hem: hematita; Goe: goetitha; Jar: jarosita.	80
Figura N°32: Fotomicrografía de muestra veta 1, mineralización de oro con ganga de cuarzo, burbuja rellena de óxidos de hierro, aumento x40.....	81

Figura N°33: Muestra de mano que contiene oro en asociación con cuarzo y óxidos de hierro, extraída de veta1	81
Figura N°35: Fotomicrografía de muestra de veta 1, crisocola, brochantita, hematita y minerales opacos. Aumento x10.	83
Figura N°37: Fotomicrografía de brochantita cortando minerales opacos.	84
Figura N°38: Muestra de mano con crisocola, óxidos de negros de cobre y atacamita, leve magnetita	84
Figura N°39: Muestra de mano de zona 1 (extraída de veta 1), presencia de jarosita, hematita, alunita y arcillas blancas.	86
Figura N°40: A) fotomicrografía de zona 1 en Luz Polarizada Plana (LPP) B) fotomicrografía en Nícoles Cruzados (NX). Plg: Plagioclasas; Qz: Cuarzo; Ser: Sericita; Hm: Hematita; Jr: Jarosita.	86
Figura N°41: Muestra de mano de zona central (extraída de veta 1), presencia de hematita, goethita y arcillas blancas.	87
Figura N°42: A) fotomicrografía de zona 2 en Luz Polarizada Plana (LPP) B) fotomicrografía en Nícoles Cruzados (NX).	88
Figura N°43: A) fotomicrografía de caja techo en Luz Polarizada Plana (LPP) B) fotomicrografía en Nícoles Cruzados (NX).	89
Figura N°44: Muestra de mano con cuarzo oqueroso y óxidos de hierro. Extraída de veta 1.	89
Figura N°45: Muestra de mano con alunita supérgeno, acompañado con hematita y jarosita. Extraída de veta 1.	90
Figura N°46: Muestra de mano con hematita especular, cuarzo, calcopirita y hematita terrosa.	91
Figura N°47: Muestra de mano con presencia de calcita, magnetita y óxidos de cobre.	92

Figura N°48: Fotomicrografía de calcita en contacto con dique microdiorítico, zoom 10x	92
Figura N°49: Muestra de mano de óxidos de hierro, extraída de veta 4.....	93
Figura N°50: Muestra con cristalización de cuarzo y óxidos de hierro.....	94
Figura N°51: A) Muestra de mano con actinolita, óxidos de hierro y cobre. B) Fotomicrografía extraída de interior mina. Con zoom 10x.	95
Figura N°52: Mapa con mineralización y alteraciones presentes en interior mina. Elaboración propia.....	96
Figura N°53: Mapa estructural en interior mina. Elaboración propia.	97
Figura N°54: Mapa geológico de área de estudio y mina San Antonio.....	98
Figura N°55: Histograma de frecuencia de datos de Au.....	104
Figura N°56: Histograma de frecuencia de datos de Cu.....	105
Figura N°57: Histograma de frecuencia de datos de Fe.	106

INDICE DE TABLAS

Tabla N°1: Clasificación de ligantes en términos de su comportamiento duro (clase “a”) o blando (clase “b”) extraído de Townley, 2006.....	25
Tabla N°2: Ejemplos de rotulación de muestras extraídas de en mina San Antonio y zonas aledañas, confección propia.....	61
Tabla N°3: Ejemplo de rotulación y descripción de muestras extraída de en mina San Antonio, describiendo mineralización de mena y ganga, confección propia. 62	
Tabla N°4: Ejemplo de alteraciones con intensidad y observaciones.....	63
Tabla N°5: Rotulación de datos estructurales presentes en mina San Antonio y zonas aledañas, confección propia.....	64
Tabla N°6: Opciones y desglose de modo de codificar las fotografías realizadas en mina San Antonio, confección propia.....	65
Tabla N°7: Elementos analizados por equipo de fluorescencia de rayos X a 32 contramuestras.....	103
Tabla N°8: Estadística descriptiva para Au. de contramuestras.....	103
Tabla N°9: Estadística descriptiva para Cu. de contramuestras.....	104
Tabla N°10: Estadística descriptiva para Cu. de contramuestras.....	105
Tabla N°11: Estimación de tonelaje para las 4 vetas de oro definidas en mina San Antonio.	108

RESUMEN

Este trabajo se realizó en mina San Antonio, distrito Jesús María, a 13 km de la ciudad de Copiapó. La mina se hospeda dentro de rocas plutónicas pertenecientes a la unidad regional Diorita La Brea, y se encuentra en explotación activa, fundamentalmente de pequeña minería. Un estudio completo que se basa en mapeo del área de estudio e interior mina, tanto de litología, mineralogía, alteraciones y estructuras, permitió definir 4 vetas de oro en interior mina, donde se obtuvieron muestras de estas para determinar sus leyes, y análisis de XRF. Este análisis fue realizado con metodologías estandarizadas, como lo fue la metodología 1 a través de tomas de tiempos con movimientos del “cacho”, y metodologías 2 y 3 con distintos ángulos de inclinación (utilizando una canaleta). Otros minerales definidos encontrados son magnetita y óxidos de cobre, como crisocola, atacamita y brochantita, estos son encontrados en nivel principal de la labor, la asociación representativa de tal área es magnetita con atacamita y brochantita, en cambio la crisocola no presenta asociación definida, se encuentra en patinas en gran parte de la labor en roca intrusiva, también en planos de las vetas de oro y menor concentración con magnetita, cabe destacar que solo se observaron pequeñas concentraciones de pirita y calcopirita, es tan baja la concentración que no son definidas, menos aún sulfuros secundarios. Las vetas se encuentran controladas por 2 sistemas estructurales definidos NNE y NNW, en donde la veta 3 con control NNE presenta entre las 4 las leyes más altas, con 5,03 ppm. Además, en interior mina se encontraron las alteraciones calco-sódicas, propilítica, argílica, argílica avanzada, silicificación y hematización. Los análisis de XRF realizados a las contramuestras entregadas por laboratorio con sus respectivas metodologías son analizados, como se realiza un análisis por veta, no se pueden comparar a grandes rasgos o realizar otro tipo de análisis estadístico, si se comparan los resultados para las 4 vetas, indicando que vetas 2 y 3 contienen el doble de concentración de SiO_2 y la mitad de Fe y Cu en comparación a vetas 1 y 4.

ABSTRACT

This work is carried out at the San Antonio mine, Jesús María district, 13 km from the city of Copiapó. The mine is hosted within plutonic rocks belonging to the regional unit Diorita La Brea, and is in active exploitation, mainly small mining. A complete study based on mapping of the study area and inside the mine, lithology, mineralogy, alterations and structures, allowed to define 4 gold veins inside the mine, where samples were obtained to determine their grades, and XRF analysis. This analysis was carried out with standardized methodologies, such as methodology 1, through time lapse sampling with "cacho" movements, and methodologies 2 and 3 with different inclination angles (using a trough). Other defined minerals found are magnetite and copper oxides, such as chrysocolla, atacamite and brochantite, these are found in the main level of the work, the representative association of such area is magnetite with atacamite and brochantite, on the other hand, chrysocolla does not present defined association, it is found in patinas in great part of the work in intrusive rock, also in planes of the gold veins and minor concentration with magnetite, it is worth mentioning that only small concentrations of pyrite and chalcopyrite were observed, the concentration is so low that they are not defined, even less secondary sulfides. The veins are controlled by 2 structural systems defined NNE and NNW, where vein 3 with NNE control has among the 4 highest grades, with 5.03 ppm. In addition, calc-sodic, propylitic, argillic and advanced argillic alterations, silicification and hematization are found in the interior of the mine. The XRF analyses carried out on the counter-samples delivered by the laboratory with their respective methodologies are analyzed, as an analysis is carried out per vein, it is not possible to compare in broad terms or to carry out another type of statistical analysis, if the results for the 4 veins are compared, indicating that veins 2 and 3 contain double the concentration of SiO_2 and half of Fe and Cu in comparison to veins 1 and 4.

CAPÍTULO I: MARCO INTRODUCTORIO

1.1 Introducción

El sector de estudio se sitúa en el distrito minero Jesús María, ubicado en la región de Atacama, el cual se caracteriza por la extracción de oro como materia prima principal y por la cercanía de plantas de tratamiento de mineral. El presente estudio se enfoca específicamente en mina San Antonio.

El distrito Jesús María se emplaza en la comuna de Copiapó, y posee una superficie de 75.176 km² (Romero, 2012). Es el distrito aurífero más importante de la región, donde se han explotado alrededor de 40 vetas, principalmente en la zona de oxidación, desde comienzos del siglo XVIII (Kuntz, 1924). En 1938 se registró la mayor actividad, alcanzando una producción de 18.779,27 g de oro fino (Boletín de la Sociedad Nacional de Minería, 1939).

En mina San Antonio se lleva a cabo una extracción de mineral mediante minería subterránea, a escala de pequeña minería. En la actualidad la explotación se encuentra activa. La principal mineralización existente en el depósito corresponde a oro, en asociación con óxidos de cobre como crisocola, atacamita y brochantita. Por otro lado, la ganga se constituye fundamentalmente de cuarzo y óxidos de hierro (jarosita, hematita y goetita).

Actualmente la producción mensual alcanza las 1000 toneladas de mineral teniendo valor promedio de leyes de 3.9% cobre total. El cual abastece a planta Charito, donde luego de ser sometido a un proceso de concentración, es destinado al proceso de fundición, el cual se lleva a cabo en fundición Hernán Videla Lira (ENAMI), localizada en la comuna de Copiapó.

Como característica existente, se ha desarrollado una galería base de acopio y transporte desde la cual se levantan chimeneas cada 15 metros aproximadamente, usando estas chimeneas como caras libres, se generan frentes para la explotación por realce, dejando pilares de sostenimiento, los cuales se van definiendo de acuerdo con el avance de la explotación y del levantamiento geológico de la mina.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Definir el potencial económico de mina San Antonio y establecer metodología estandarizada para concentración de oro.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar petrográficamente las diferentes unidades litológicas que se presenten en el sector.
- Identificar y caracterizar mineralógica y geoméricamente las estructuras que se presenten en el área, con sus respectivas alteraciones y mineralizaciones.
- Establecer una metodología de determinación de leyes de oro mediante equipo XRF.

1.3 Planteamiento del problema

El foco de investigación recae en una propiedad minera de pequeña escala, ubicada en distrito minero Jesús María. En el área se emplazan numerosos yacimientos cupríferos y auríferos, asociados principalmente a estructuras vetiformes y de geometría irregular. La roca principal en donde se hospeda el

yacimiento a estudiar corresponde a un cuerpo intrusivo del cretácico inferior. El principal objetivo es aumentar las zonas de recursos y a su vez entender de mejor forma la geología del área, el arrendatario Sr. Armando Arias, realiza extracción netamente de oro fino y óxidos de cobre, el que es vendido en fundición Paipote de la empresa nacional de minería (ENAMI).

Debido a la ausencia de estudios geológicos exhaustivos de la propiedad minera, el Sr Arias no puede acceder a la venta de otros minerales o subproductos, de esta forma al determinar el control geológico-estructural sobre la mineralización de la veta, se podrá tener mayor claridad ante futura explotación en base a experiencias en terreno y no por criterios geológicos.

A través del siguiente trabajo, se busca realizar un estudio exhaustivo y sistemático del depósito, pudiendo caracterizar la veta, su mineralización y alteraciones asociadas, teniendo como fin, una evaluación del potencial económico del yacimiento, pudiendo ser beneficioso para la extracción de mineral, tanto en corto plazo como a largo plazo, además de brindar información geológica-estructural base, que pueda servir de apoyo para la planificación de labores de exploraciones futuras.

Por otra parte, la realización de análisis de fluorescencia de rayos X (XRF), es una técnica que analiza la radiación X generada por una muestra al ser ésta irradiada con rayos-X, con el propósito de obtener su composición química de manera rápida y no destructiva, permitiendo diferenciar cada elemento de la tabla periódica por tales características de los rayos X. El método ignora varios factores de interferencia, existiendo limitaciones en donde los resultados puedan verse alterados (atenuados o intensificados), como es el caso del material que rodea la muestra.

Se busca implementar y establecer una metodología estandarizada, utilizando análisis de XRF en muestras que presenten oro permitiendo compararlas con resultados de sus leyes de laboratorio. Su realización será bajo ciertos parámetros,

tomando importancia su granulometría, la cantidad de muestra a analizar y ángulo de inclinación a utilizar en el método.

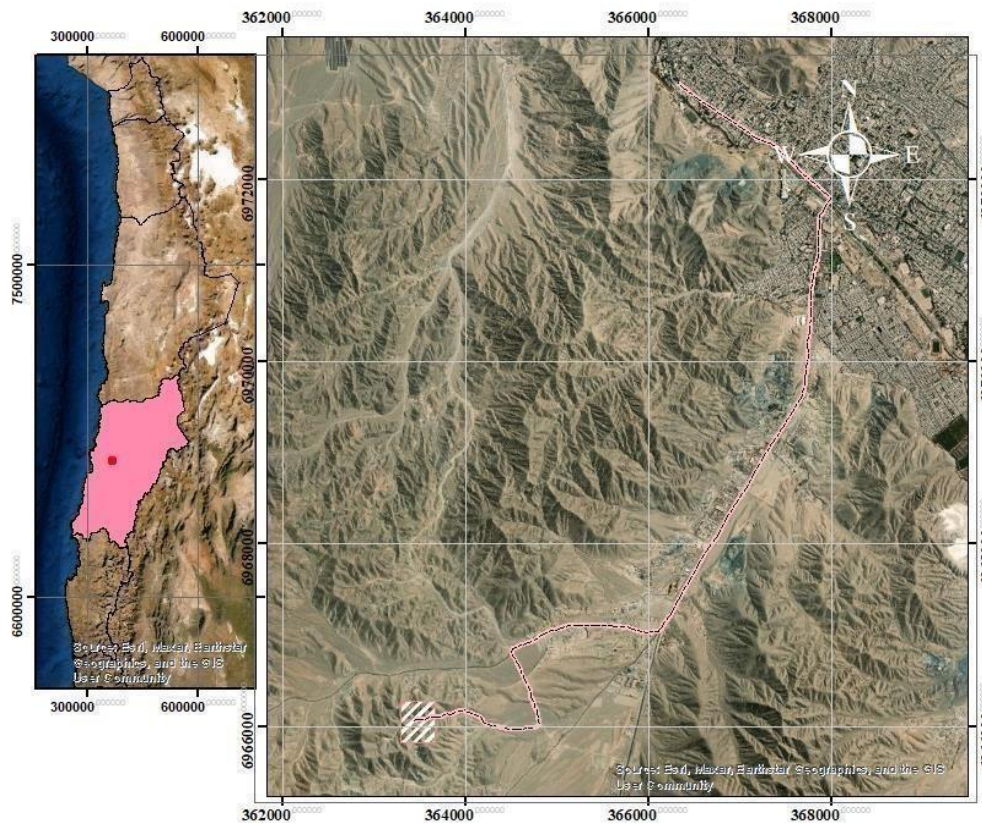
1.4 Hipótesis

En mina San Antonio será posible una explotación mejorada y adecuada dado un determinado control geológico-estructural sobre la mineralización, se hipotetiza en este trabajo que el tipo de yacimiento a encontrar en la mina a estudiar es un IOCG y vetas epitermales de alta sulfuración, permitiendo a la vez la identificación de nuevos minerales de mena y recuperación de subproductos que presente esta, aumentando así el potencial económico de la propiedad mineras. A la vez se generará una metodología con análisis de contenido de oro mediante XRF, la que entregará sus leyes con dicho análisis, esto permitirá su uso en estudios futuros.

1.5 Área de estudio

El área de estudio se encuentra en distrito minero Jesús María, a 13 Km al SW de la ciudad de Copiapó, región de Atacama, con punto central en coordenadas UTM N6.966.298; E- 363.764.

El acceso al sector de estudio, desde Copiapó, es a través de la Avenida Copayapu (C35), dirigiéndose a la Ruta Panamericana 5 Norte, se deben recorrer 8 kilómetros, se debe girar a la derecha en la intersección con el camino C-402, en dicho camino se encuentra la quebrada de Cardones recorriendo aproximadamente 2 kilómetros, transcurrida dicha distancia se encuentra un camino que corta en dirección NW-SE, se debe girar a la izquierda, ingresando a este camino de tierra se recorre 1 kilómetro, encontrando una tercera intersección la que nos dirige 1.5 kilómetros en dirección W.



LEYENDA

-  CAMINO
-  AREA TESIS

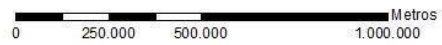


Figura N°1: Mapa ubicación y acceso mina San Antonio, recuadro rosado corresponde al área de estudio, elaboración propia.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Depósitos minerales magmáticos-hidrotermales

Un sistema magmático es el que incluye todos los procesos de fusión y cristalización de rocas y minerales, como también la interacción de fluidos acuosos. Se determina como un sistema de partes interactuantes que forman un todo complejo, la mayoría de los sistemas naturales pueden funcionar gracias a fuentes de energía que desplazan la materia o la energía de un lugar a otro.

Se producen en los bordes constructivos de las placas tectónicas, bajo las dorsales oceánicas, en zonas de subducción y en regiones localizadas en el interior de las placas, por efecto de puntos calientes. El magmatismo asociado con la subducción a lo largo del margen suroeste de América del Sur comenzó durante el Jurásico temprano (Del Rio et al., 2016).

El fundido está formado principalmente por iones de silicio y oxígeno que se combinan fácilmente y forman sílice (SiO_2), así como cantidades menores de aluminio, potasio, calcio, sodio, hierro y magnesio. Conforme una masa de magma se enfría los iones del fundido empiezan a perder movilidad y a disponerse en estructuras cristalinas, este proceso, denominado cristalización, genera granos minerales que se encuentran dentro del fundido remanente. El vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2) y el dióxido de azufre (SO_2) son los gases más comunes hallados en el magma y están confinados por la inmensa presión ejercida por las rocas suprayacentes. Estos componentes gaseosos, denominados volátiles, se disuelven dentro del fundido. Éstos continúan siendo parte del magma hasta que éste se acerca a la superficie (ambiente de baja presión) o hasta que la masa de magma cristaliza, momento en el que cualquiera de los volátiles restantes migra libremente (Tarbuck, 2005).

Posterior a la generación de masas rocosas como resultado de procesos geológicos, se pueden encontrar depósitos minerales, por lo general se definen como “cuerpos geológicos, donde algunos minerales (o elementos) están anómalamente concentrados”. Estas concentraciones que pueden ser explotados con beneficio económico, se generan dada la interacción de agentes importantes.

La formación de muchos depósitos minerales metálicos involucra la participación de soluciones acuosas calientes; las cuales dan origen a diferentes modos de ocurrencias en la mineralización como vetas, stockwork, brechas, etc. La mayor parte de los depósitos metálicos de la Cordillera de Los Andes son de origen hidrotermal, por lo que estos procesos son muy relevantes para comprender la formación de los yacimientos chilenos en particular.

Uno de los fluidos participantes en estos procesos se denominan fluidos hidrotermales, provenientes de procesos hipógenos, en donde los elementos o minerales son depositados por fluidos originados mayormente desde una fuente magmática (Giggenbach, 1997), por otra parte, se encuentran los fluidos meteóricos, por procesos supérgenos, en los cuales los elementos o minerales son depositados o redistribuidos.

Los depósitos de carácter magmáticos-hidrotermales serán característicos por la fuente, composición y particularidades termodinámicas de un fluido hidrotermal, pueden ser bastante variables y dependen en gran medida de las características de su origen, de la distancia de transporte, tiempo de modificación, y de las propiedades de la roca huésped.

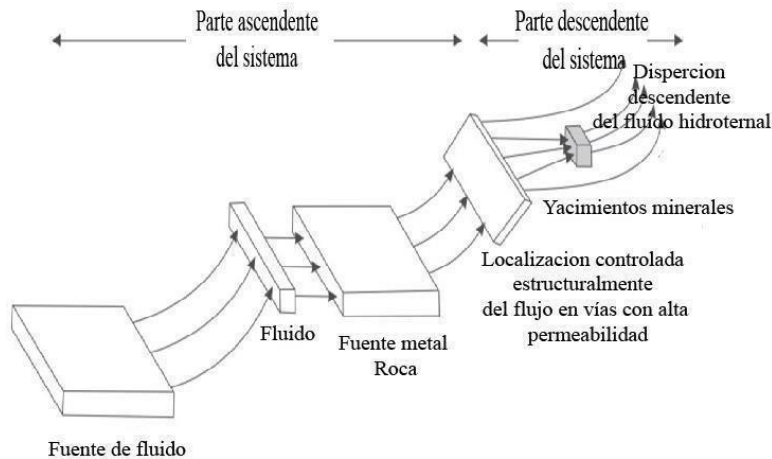


Figura N°2: Modelo esquemático, que ilustra los componentes principales del sistema mineral hidrotermal. Extraído de Vearncombe (2015).

2.2 Transporte y precipitación de metales

Para comprender los procesos implicados en la generación de depósitos minerales, es indispensable que se clarifiquen comprensivamente el origen de metales y fluidos hidrotermales, el proceso de su transporte y el mecanismo de su precipitación (Kojima, 2016).

El transporte de metales es un proceso dependiente de la solubilidad acuosa. Corresponde a la partición de una fase hidrotermal, la que se encargará de extraer y transportar metales desde un magma, por lo cual debe tener alta capacidad de solubilidad de metales a las altas temperaturas de cristalización, y luego durante su trayecto a una roca huésped.

Los sulfuros y otros minerales metalíferos tienen muy baja solubilidad en agua, de modo que debe existir otra forma de transporte de metales en fluidos hidrotermales. Sabemos que muchos elementos precipitan como sulfuros a partir de fuentes hidrotermales, pero si los metales son insolubles como iones simples,

consecuentemente son transportados como complejos o iones complejos, en los cuales los cationes metálicos se unen a grupos complejos denominados ligantes.

En función de la temperatura, la presión, el pH y el potencial redox constituye la base fundamental para comprender los procesos de formación de minerales hidrotermales (Sewar, 2013). Se tiene por un lado la temperatura que favorece a la formación de complejos cuando esta se ve incrementada, mientras que la presión creciente provoca disociación de complejos metálicos.

La fase hidrotermal particionada comprenderá una fase vapor y una fase de hidrosalmuera salina, con altos contenidos de Na y Cl. Bajo condiciones normales de cristalización, metales como el Cu, Zn, Pb, Au, Ag, etc. son incorporados a la fase cristalina como trazas en minerales formadores de roca (ya sea como microinclusiones de sulfuros magmáticos o en la red cristalina de estos) (Borrok et al., 1999). Sólo la separación masiva y violenta de una fase hidrotermal será capaz de secuestrar metales antes de que entren a formar parte de minerales formadores de roca. Esto implica que mientras menos cristalizado este un magma antes de que comience cristalización masiva y rápida, mejor será la probabilidad de extraer altos contenidos de metal.

Los ligantes más importantes son HS⁻, Cl⁻ y OH⁻, los cuales son capaces de transportar grandes cantidades de metales en sistemas acuosos naturales. Para que los complejos sulfurados sean estables se requieren altas concentraciones de H₂S y HS⁻. El cloruro sería el ligante más importante para el transporte de oro. (Sewar, 2013).

Los complejos metálicos pueden ser evaluados en términos donante-captor de electrones de ácidos y bases de Lewis tipo: duros (clase "a") y tipo blandos (clase "b"). Metales duros (captoreadores) forman los complejos más estables, y tienen mayor afinidad geoquímica con los ligantes duros (donantes de electrones).

Metales clase "a"	Intermedio	Metales clase "b"
H ⁺ , Li ⁺ , Na ⁺ , K ⁺ Be ³⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Sr ²⁺ Al ³⁺ , Fe ³⁺ , Cr ³⁺ , La ³⁺	Metales de transición divalentes, incluyendo Zn ²⁺ , Pb ²⁺ y Bi ³⁺	Cu ⁺ , Ag ⁺ , Au ⁺ , Au ³⁺ Hg ²⁺ , Cd ²⁺ , Sn ²⁺ Tl ⁺ , Tl ³⁺
Ligantes clase "a"	Intermedio	Ligantes clase "b"
F ⁻ , OH ⁻ , NH ₃ , NO ₃ ⁻ HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻ , HSO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ H ₃ SiO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻ , PO ₄ ³⁻ CH ₃ COO ⁻	Cl ⁻ , Br ⁻	I ⁻ , HS ⁻ , S ₂ O ₃ ²⁻ , SCN ⁻ , CN ⁻

Tabla N°1: Clasificación de ligantes en términos de su comportamiento duro (clase "a") o blando (clase "b") extraído de Townley, 2006.

Por ejemplo, el ligante HS⁻ es una base blanda en la clasificación de Lewis, y tiene una tendencia a generar complejos muy estables con metales blandos de la clase "b", cationes como Au⁺ y Hg⁺, como también con los elementos Ag, Cu, As y Sb.

2.3 Alteración hidrotermal

El proceso de alteración hidrotermal se entiende como el producto de una interacción fluido/roca, donde los minerales de alteración son el resultado de importantes volúmenes de rocas que experimentan drásticos cambios químicos y mineralógicos, implica necesariamente cambios químicos y termodinámicos del fluido hidrotermal que atraviesa la roca.

La alteración hidrotermal ocurre a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución de minerales y/o precipitación, y reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circuló por la misma.

La composición litológica inicial tiene una influencia en la mineralogía secundaria (hidrotermal), pero su efecto es menor en comparación a la influencia de otros factores, como la permeabilidad, temperatura o composición del fluido. En efecto, la temperatura del fluido y el pH de este son los factores más relevantes en la

asociación mineralógica resultante de los procesos de alteración hidrotermal (Corbett y Leach, 1997).

Las soluciones hidrotermales tienen evidentemente la capacidad de transportar una amplia variedad de materiales y depositarlos en minerales tan diversos como el oro o la sericita, lo que muestra que la físico-química de tales soluciones es compleja (Maksaev, 2001). La textura original de la roca puede ser modificada ligera o completamente obliterada por la alteración hidrotermal, esto es un tipo de metasomatismo que involucra la recristalización de la roca a nuevos minerales más estables bajo las nuevas condiciones impuestas por los fluidos.

El transporte de materiales involucrados en la alteración de las rocas puede ocurrir por advección o por difusión (transporte por difusión de especies químicas a través de fluidos estancados en los poros de las rocas) o por una combinación de ambos procesos. A continuación, se mencionan los factores que controlan las alteraciones hidrotermales en las rocas: a) temperatura y diferencia de temperatura (Δt°) entre la roca y el fluido que la invade; b) composición del fluido; sobre todo el pH del fluido hidrotermal; c) permeabilidad de la roca; d) duración de la interacción fluido/roca y variaciones de la razón fluido/roca; e) Composición de la roca; la proporción de minerales; f) presión (Quispe, 2019).

La alteración hidrotermal produce un amplio rango de mineralogía, abundancia mineral y texturas en distintas rocas. Esto hace que sea complicado tener un criterio uniforme para la clasificación de tipos de alteración (Meyer y Hemley, 1967). El método más simple es mediante la utilización del mineral más abundante. De ahí derivan denominaciones como:

Denominación	Presencia dominante de
Silicificación	sílice o cuarzo
Sericitización	sericita
Argilización	minerales de arcilla
Cloritización	clorita
Epidotización	epidota
Actinolitización	actinolita
Etc.	

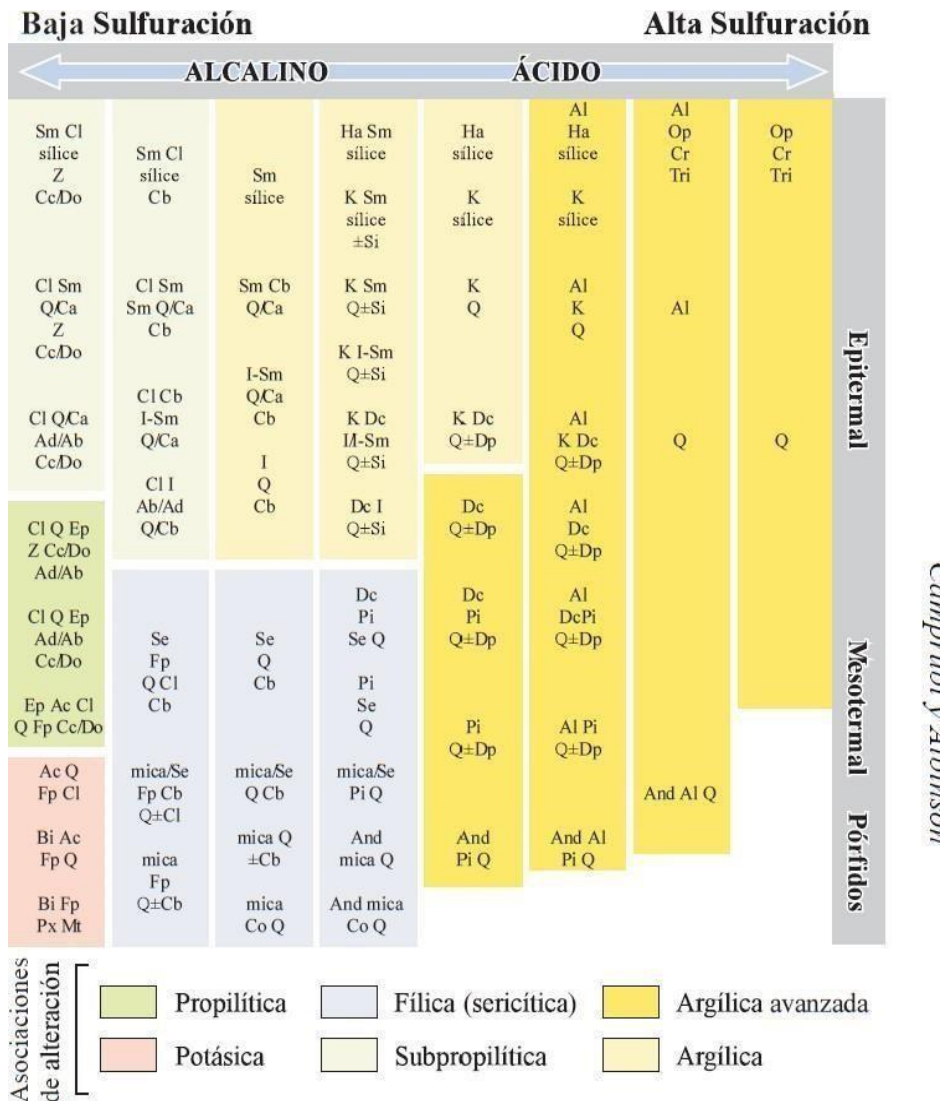


Figura N°3: Asociaciones de minerales comunes en sistemas de alteraciones hidrotermales, en función de temperatura y pH del fluido, asociadas a la formación de depósitos minerales epitermales, mesotermiales y porfídicos. Abreviaciones: Ab = albita, Ac = actinolita, Ad = adularia, Al = alunita, And = andalucita, Bi = biotita, Ca = calcedonia, Cb = carbonatos (de Ca, Mg, Mn y/o Fe), Cc = calcita, Cl = clorita, Co = corindón, Cr = cristobalita, Dc = dickita, Di = diápora, Do = dolomita, Ep = epidota, Fp =feldspatos potásicos, Ha = halloysita, I = illita o illita-esmectita, K = caolinita, Mt = magnetita, Op = ópalo o sílice opalina, Pi = pirofilita, Px = clinopiroxenos, Q = cuarzo, Se = sercita, Si = siderita, Sm =esmectita o esmectita-illita, Tri = tridimita, Z = zeolitas (de menor a mayor temperatura: natrolita, chabazita, mordenita, heulandita; laumontita; wairakita). Extraído de Camprubí et al., 2003a.

A continuación, se describen las alteraciones comunes relacionadas a yacimientos magmáticos-hidrotermales, asociaciones mineralógicas, según Meyer y Hemley (1967):

Propilítica: Presencia de epidota y/o clorita y ausencia de un apreciable metasomatismo catiónico o lixiviación de alcalis o tierras alcalinas; H₂O, CO₂ y S pueden agregarse a la roca y comúnmente se presentan también albita, calcita y pirita. Se forma a una temperatura menor al rango (250°C - 425°C).

Argílica: Importantes cantidades de caolinita, montmorillonita, esmectita o arcillas amorfas, principalmente reemplazando a plagioclasas; puede haber sericita acompañando a las arcillas; el feldespato potásico de las rocas puede estar fresco o también argilizado. Hay una significativa lixiviación de Ca, Na y Mg de las rocas. Se forma a temperaturas bajo 200°C.

Sericítica o cuarzo-sericítica: Ambos feldespatos (plagioclasas y feldespato potásico) transformados a sericita y cuarzo, con cantidades menores de caolinita. Normalmente los minerales máficos también están completamente destruidos en este tipo de alteración.

Argílica avanzada: gran parte de los minerales de las rocas transformados a dickita, caolinita, pirofilita, diásporo, alunita y cuarzo. Este tipo de alteración representa un ataque hidrolítico extremo de las rocas en que incluso se rompen los fuertes enlaces del aluminio en los silicatos originando sulfato de Al (alunita) y óxidos de Al (diásporo). En casos extremos la roca puede ser transformada a una masa de sílice oquerosa residual (“vuggy silica” en inglés).

Potásica: Alteración de plagioclasas y minerales máficos a feldespato potásico y/o biotita. Esta alteración corresponde a un intercambio catiónico (cambio de base) con la adición de K a las rocas. A diferencia de las anteriores este tipo de alteración no implica hidrólisis y ocurre en condiciones de pH neutro o alcalino a altas temperaturas principalmente en el rango 350°-550°C.

Carten (1986) definió la alteración sódico-cálcica en las zonas de raíz del pórfido cuprífero Yerrington (Nevada, USA), la que se caracteriza por una asociación de actinolita, albita- oligoclasa- andesina, epidota, magnetita, clorita, cuarzo, escapolita. Esta alteración ocurre en la porción profunda de pórfidos cupríferos y se desarrolla en forma simultánea con la alteración potásica a niveles más altos.

2.4 Yacimientos IOCG-IOA

Los depósitos IOCG óxidos de hierro-cobre-oro (“Iron Oxide Copper Gold”) pertenecen a una clase de depósitos caracterizados por abundante mineralización de Fe, pero pobre en Ti, conocida como depósitos de óxidos de Fe de clase (Cu-U-Au-REE), también clasificados como depósitos de Cu-Au con bajo contenido de azufre (Hitzman et al., 1992, 2000; Barton y Johnson, 1996).

Las mineralizaciones de tipo IOCG son numerosas y ampliamente distribuidas en el espacio y tiempo geológico. Ocurren en todos los continentes y varían en edad desde el presente al menos hasta el Arcaico Tardío. En términos económicos, los yacimientos de IOCG más importantes son los del distrito de Carajás, Brasil (Arqueano, cratón amazónico); en los distritos de Gawler craton y Cloncurry, Australia Paleoproterozoico tardío a Mesoproterozoico debatido intracratónico o entornos relacionados con la subducción distal), y en el arco del margen continental extendido Jurásico-Cretácico del cinturón batolítico costero en Chile y Perú (Williams et al, 2005).

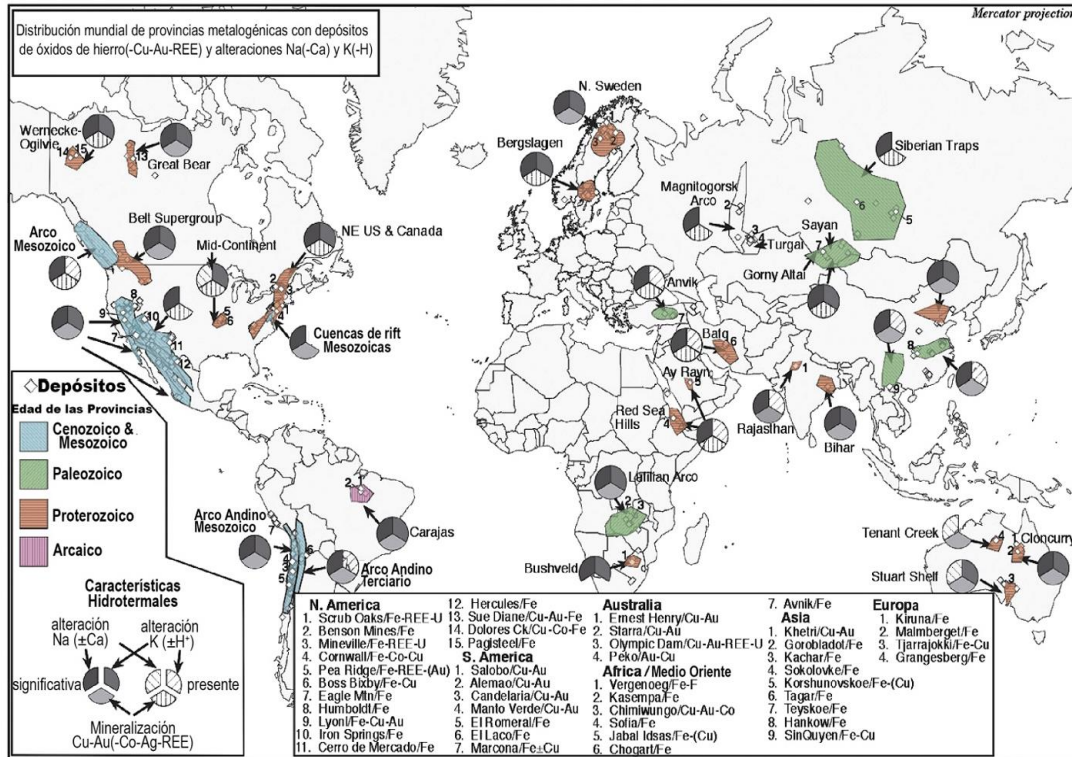


Figura N°4: Ubicación de provincias hidrotermales de óxido de Fe y las principales provincias de IOCG. Extraído de Williams et al, 2005.

Actualmente existen dos hipótesis generales para la génesis de estas mineralizaciones. La hipótesis magmática, defendida por Frietsch (1978), Sillitoe (2003) y Tornos et al. (2005), entre otros, sostiene que los fluidos mineralizadores son producto de la exsolución magmática y que dan lugar a una zonación similar a la de los pórfidos cupríferos. La segunda hipótesis plantea que los fluidos son derivados de cuencas ricas en evaporitas y que las rocas ígneas solo actúan como fuentes de calor (Barton y Johnson, 2000). En esta segunda teoría los metales son transportados a través de salmueras de intracuenca.

A pesar de que la asociación de óxidos de hierro (magnetita/hematita) con sulfuros de cobre y oro se encuentran en muchos estilos de mineralización, se incluyen dentro de este estilo, los depósitos que reúnen otras características tales como:

- a) la asociación con una alteración alcalino-cálcica que incluye proporciones muy variables de clinoanfíboles férricos y/o hedenbergita, albita, feldespato K o biotita.
- b) la relación con zonas de cizalla transcrustales o rocas magmáticas de composición diversa.
- c) la presencia de una serie de elementos característicos que incluye U, tierras raras, Co, Ni o Mo.
- d) la presencia de cantidades significativas de minerales ricos en elementos volátiles tales como P, F o B.
- e) la relación con fluidos hipersalinos de alta temperatura (a veces con CO₂) equilibrados con rocas profundas.
- f) la asociación en mismo distrito de depósitos de magnetita apatito (tipo Kiruna), depósitos de óxidos de hierro (cobre-oro) y depósitos de cobre-oro pobres en óxidos de Fe.

Este tipo de depósitos se presenta en una variedad de ambientes tectónicos con edades que van desde el Proterozoico hasta el Cretácico.

Diversos autores han propuesto la existencia de un vínculo genético entre los sistemas IOCG e IOA, y señalan que, en muchos casos, estos dos tipos de depósitos son claramente parte del mismo sistema hidrotermal. De acuerdo con estos estudios, los depósitos IOA representarían la raíz profunda y estéril en Cu(-Au) de algunos sistemas IOCG formados en niveles más someros de la corteza. (Espinoza et al., 1996; Naslund et al., 2002; Sillitoe, 2003; Barton, 2013, 2014, 2015; Nold et al., 2014; Knipping et al., 2015; Bilenker et al., 2016).

Modelos Alternativos Basados en las Principales Fuentes de Fluidos

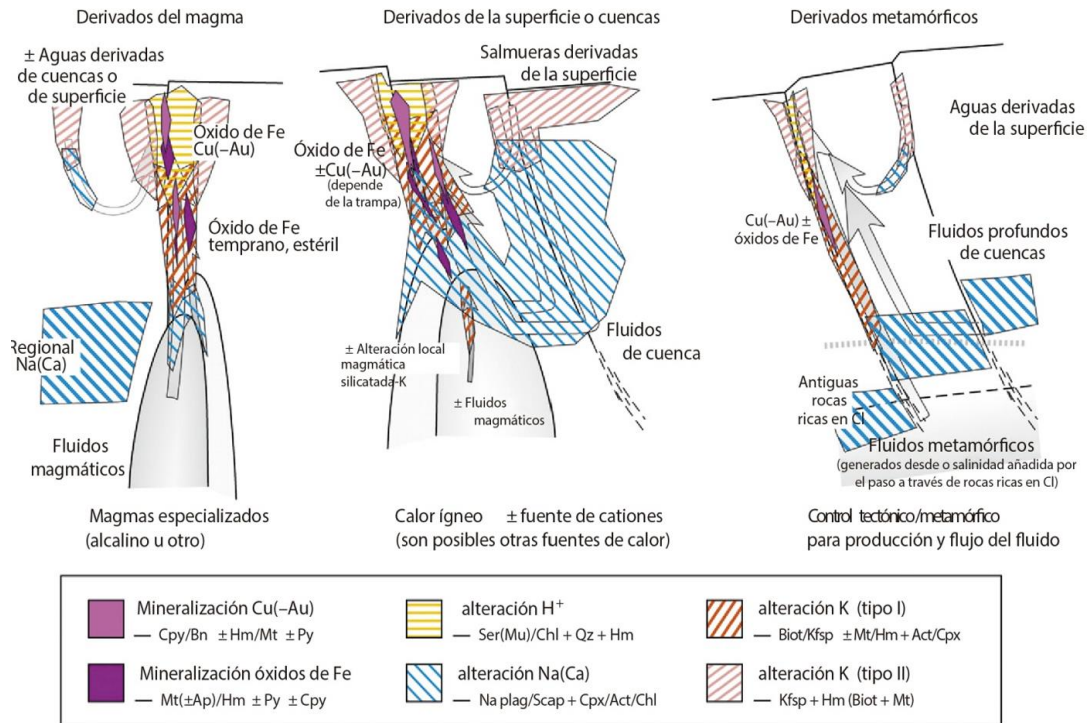


Figura N°5: Arquitecturas y orígenes hidrotermales alternativos para sistemas IOCG ilustrando posibles fuentes de fluidos, recorridos del flujo hidrotermal, y distribución de alteraciones y menas (Figura modificada de Barton, 2014).

El proceso de preparación de la roca encajonante para su posterior mineralización (inyección de Cu – Au), inicia con una fuerte interacción con fluidos ricos en Na y Ca a temperaturas altas (> 600 °C), que evolucionan a fluidos ricos en Ca y Fe por una disminución del espectro de temperatura, para concluir el proceso de la formación de un IOCG de acuerdo a su definición.

La zonación del centro hacia afuera está dada por: alteración sódica-cálcica se puede localizar en el rango de 5 a 10 kilómetros de profundidad con temperaturas cercanas a los 600° C, la alteración potásica es más afín, que con lleva cuerpos de magnetita, con temperaturas que oscilan entre 200° C a < 400°C que se consideran de baja temperatura, conforme la temperatura va decreciendo se observa la alteración

propilítica y al final se observa vetas epitermales con temperaturas menores de 100°C.

Estudio de nuevos datos han brindado nuevo conocimiento sobre la evolución de los depósitos IOA del Cretácico del Cinturón de Hierro chileno y el depósito Plioceno El Lago en el Altiplano chileno del norte de Chile. Estos depósitos fueron formados y posteriormente modificados por diferentes procesos en variadas condiciones, las cuales se registran en las microtexturas y la geoquímica de la magnetita.

Además de la profundidad de formación, los depósitos IOA andinos están controlados fundamentalmente por: (i) el enfriamiento, reflejado en la geoquímica y microtexturas de elementos traza de magnetita, que también dependen de la fuente y tasa de flujo de los fluidos hidrotermales e incluso de la infiltración de aguas meteóricas o salmueras de cuenca; y (ii) descompresión, relacionada con la presencia de estructuras y fallas, lo que implica clasificar los depósitos IOA en subtipos (Palma et al., 2020).

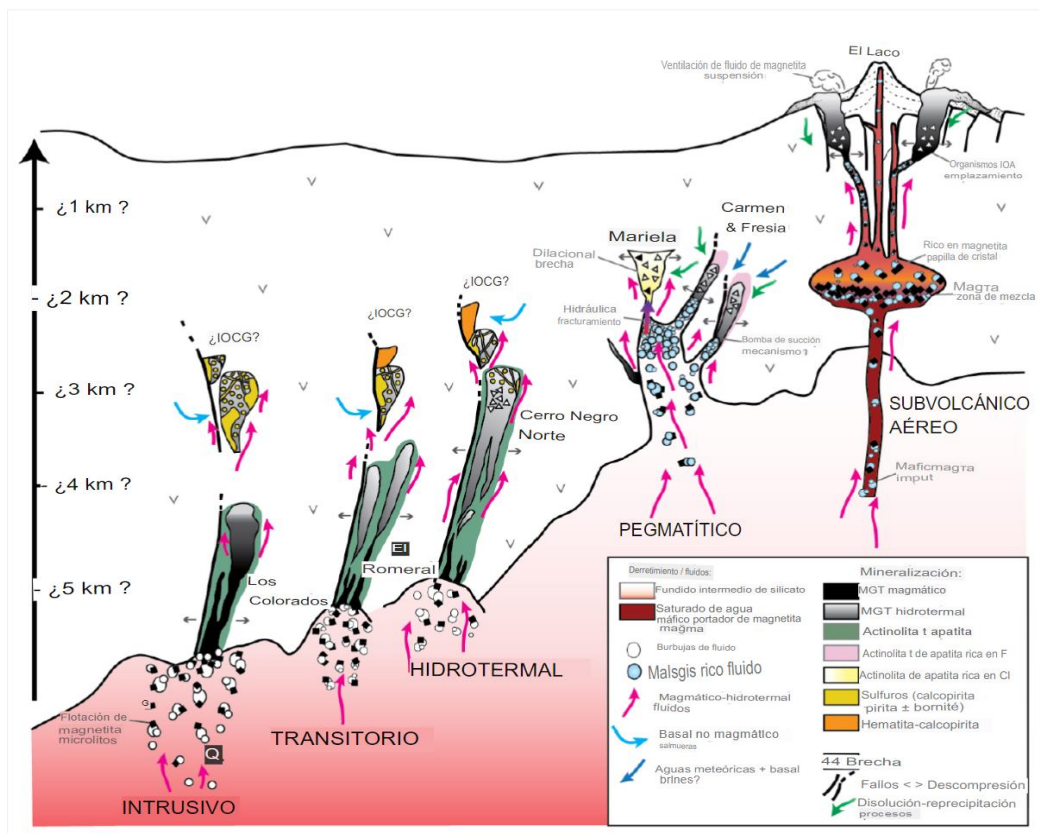


Figura N°6: Clasificación genética a distintas profundidades de yacimientos IOA en Chile extraído de Palma et al., (2020).

Knipping et al. (2015a,b), plantearon un modelo mediante el cual la magnetita ortomagmática se transportaría inicialmente a través de burbujas hipersalidas, generando cristales de magnetita que más tarde serían sobrecrecidos por magnetita hidrotermal.

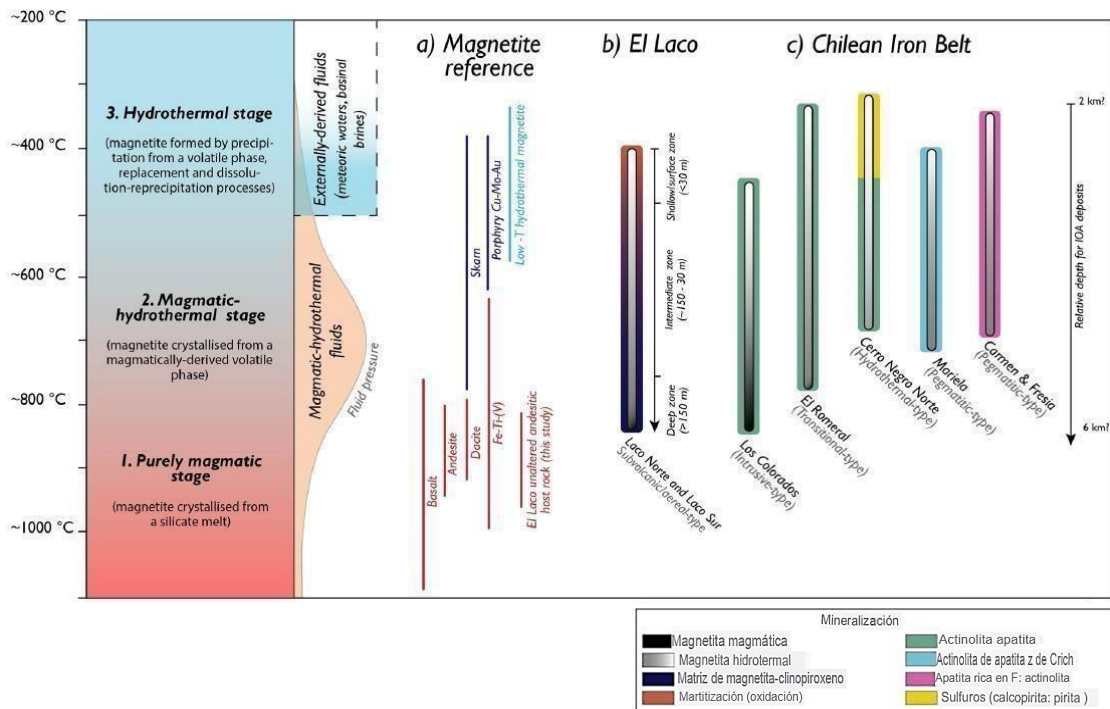


Figura N°7: Etapas de mineralización magmáticos e hidrotermales de la evolución termal de depósitos IOA andinos, magmática, magmática-hidrotermal, hidrotermal. Extraído Palma et al., (2020).

2.4.1 Yacimientos IOCG-IOA en Chile

En Chile, este tipo de yacimiento se distribuye, principalmente, en la Cordillera de la Costa, entre los 22° y 30° S, como una franja continua que se superpone con la bien definida Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa, se extiende en dirección norte-sur, paralela a la actual línea de costa. La franja presenta

un variado conjunto de depósitos metalíferos, entre ellos pórfidos cupríferos, depósitos de óxido de Fe-Cu-Au (IOCG's), depósitos de óxido de Fe-apatito y depósitos estratoligados (Maksaev, 2007).

Las edades de la génesis de los depósitos están entre los 132 y 97 Ma. Las rocas que conforman el segmento son principalmente rocas plutónicas (gabrogranito) y volcánicas (andesitas) cuyas edades se extienden desde el Jurásico al Cretácico Inferior. Este conjunto de rocas ígneas ha sido interpretado como un arco magmático desarrollado sobre un basamento de rocas pre-jurásicas, en respuesta a la implantación del sistema de subducción al comienzo del Jurásico (Vivallo, 2009).

El principal rasgo estructural de este segmento de la Cordillera de la Costa lo constituye el sistema de fallas de Atacama (SFA), con una orientación principalmente N-S y ramificaciones NO-SE a NNO-SSE que se extiende por más de 1.000 km, está dividida en 3 segmentos, Salar del Carmen, Paposos y El Salado (Brown et al., 1993), afecta a rocas jurásicas como a las cretácicas.

Constituye una provincia metalogénica, la cual es relevante para los tipos de depósitos mencionados anteriormente que son considerados en este estudio, estando constituida por abundantes yacimientos del tipo magnetita-apatita, yacimientos de óxidos de hierro- cobre-oro, mesotermiales de oro u oro cobre, pórfidos cupríferos y yacimientos estratoligados de cobre (Vivallo, 2009).

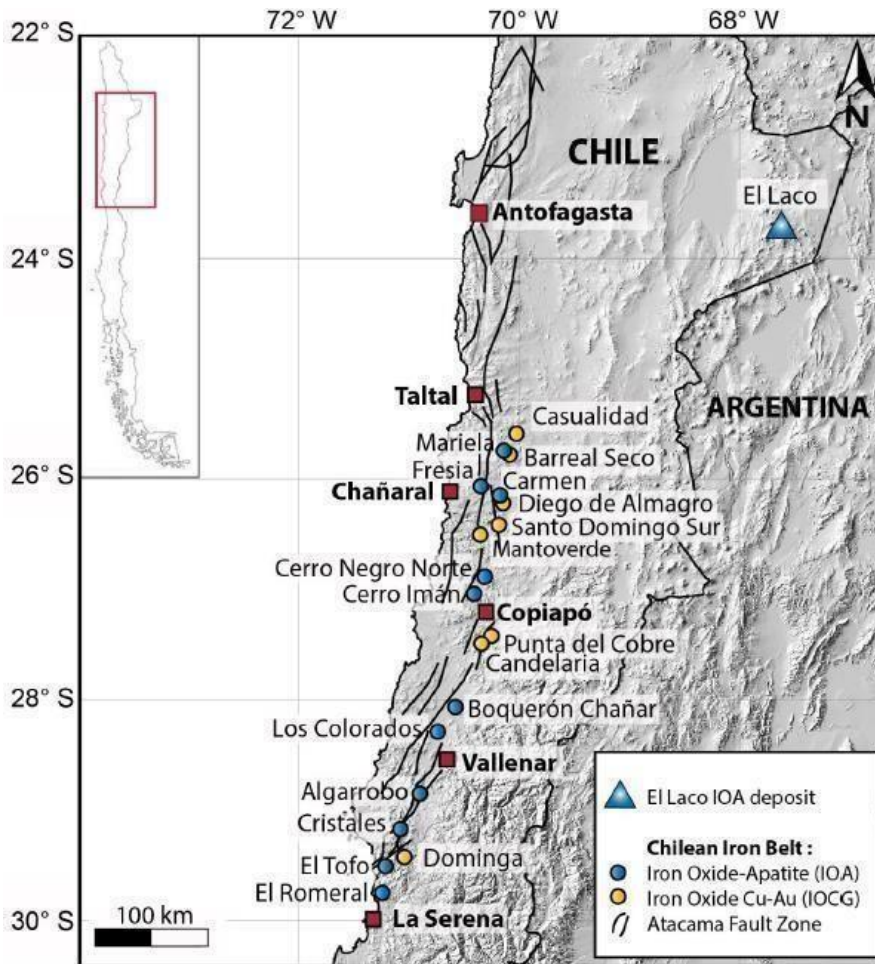


Figura N°8: Distribución de yacimientos tipo IOCG e IOA en Chile. Extraído de Barra et al., (2017).

Los procesos que llevaron a la acumulación masiva de hierro en la Franja Ferrífera Chilena es una configuración tectónica convergente, con magmatismo de arco de composición intermedia a félsica, es controversial, por ejemplo, Nyström y Henríquez (1994) postularon que la mineralización de magnetita en los depósitos tipo IOA del Cretácico se originó producto de la segregación de un fundido rico en hierro desde un magma parental andesítico, modelo que también es propuesto por estos autores para el yacimiento de El Lago (Plioceno) en el Altiplano de Chile. Otros autores han invocado un origen estrictamente hidrotermal para estos depósitos, el cual puede involucrar tanto fluidos salinos de origen no-magmático (salmueras de cuenca) que lixivian Fe de plutones dioríticos y reemplazan metasomáticamente las

secuencias volcánicas, o fluidos ricos en Fe derivados directamente de un magma (Menard, 1995; Barton y Johnson, 1996; Rhodes y Oreskes, 1999; Rhodes et al., 1999; Sillitoe y Burrows, 2002; Pollard, 2001).

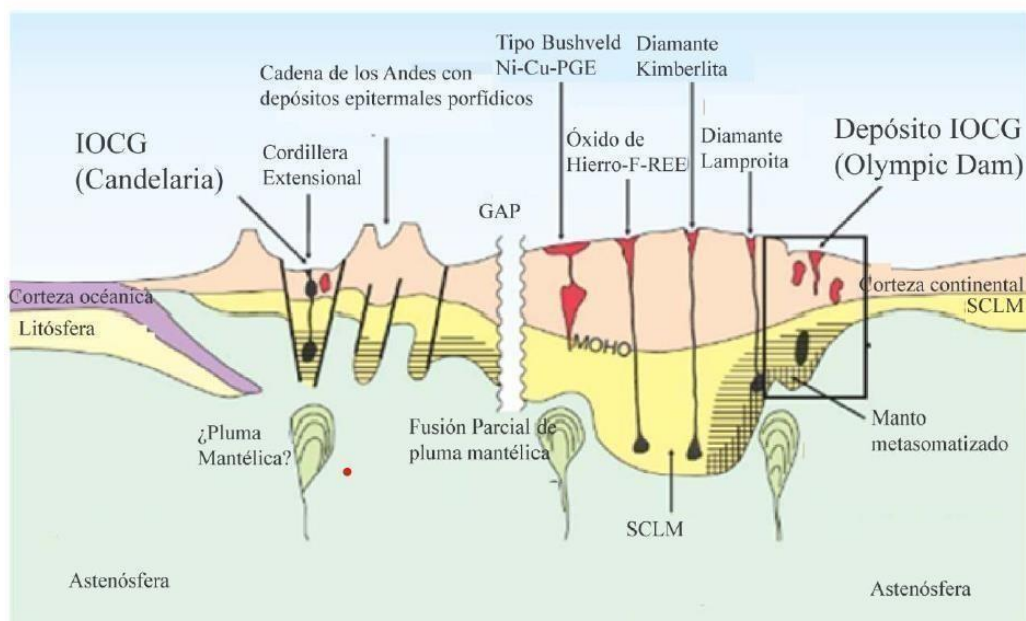


Figura N°9: Esquema de depósitos IOCG en distintos ambientes tectónicos. Extraído de Groves et al., (2010).

Los IOCG andinos presentan una conexión espacial con batolitos dioríticos a granodioríticos del Cretácico Inferior, sin embargo, aún no está claro si existe una relación genética entre el magmatismo y la mineralización (Sillitoe, 2003).

Los IOCG andinos se han clasificado en aquellos dominados por magnetita (tipo Candelaria) o dominados por hematita (tipo Manto verde) (Chen, 2013). En la región es de gran relevancia el distrito Punta del Cobre, el cual incluye a mina Candelaria como también a un grupo de pequeña a mediana minería. Los recursos geológicos estimados de dicho distrito son del orden de 700 a 800 millones de toneladas métricas (Mt) al 1,0% de Cu. El mineral se presenta en vetas, brechas, cuerpos alargados y en cuerpos de reemplazo que son concordantes con la estratificación. Los yacimientos están albergados principalmente por rocas volcánicas y

volcanoclásticas de la Formación Punta del Cobre y, en algunos lugares, también en intercalaciones con la zona suprayacente del Grupo Chañarcillo del Cretácico Inferior (Marschik y Fontboté, 2001)

La mayoría de los yacimientos más grandes en el distrito están ubicados en fallas frágiles con tendencia noroeste. En Candelaria el mineral de Cu hipógeno presente es calcopirita. El mineral Cu-Au se caracteriza por abundante magnetita y/o hematita y concentraciones localmente elevadas de Ag, Zn, Mo y tierras raras. El mineral se aloja principalmente en zonas con biotita - feldespato potásico ± anfíbol cálcico ± alteración epidota (Marschik y Fontboté, 2001).

En el distrito de Punta del Cobre, el mineral en las partes más profundas de los depósitos se asocia de manera similar, mientras que en los niveles someros se presenta en zonas de alteración biotita-feldespato potásico, o albíta-clorita ± calcita. La mineralización en Candelaria-Punta del Cobre tuvo lugar en condiciones relativamente oxidadas manifestadas por la formación de hematita especular. En partes del distrito, el reemplazo pseudomórfico de hematita especular temprana por magnetita (mushketovita) durante la formación principal de óxido de hierro, lo cual marca un cambio hacia condiciones más reducidas o temperaturas más altas. La mayor parte de la magnetita probablemente se formó a temperaturas de alrededor de 500° a 600°C. La etapa principal de sulfuro siguió con la formación de pirita y calcopirita a temperaturas de >470° a 328°C. La posterior martización de la magnetita apunta a una disminución de la temperatura. El enfriamiento del sistema hidrotermal también está indicado por las temperaturas de homogeneización de <236°C de las inclusiones de fluidos salinos en la última etapa de la calcita.

Dentro de las características hidrotermales de los yacimientos IOCG se encuentran una fuerte alteración sódica y potásica con menor desarrollo de alteración sericítica y silícica (Marschik y Fontboté, 2001).

2.5 Yacimientos epitermales

El ambiente epitermal, tal como indica la propia etimología de este término, se halla a escasa profundidad en referencia a la superficie terrestre y, en concreto, define la parte superior de los sistemas hidrotermales naturales. En la actualidad, los depósitos epitermales se cuentan entre las tipologías de depósitos minerales de mayor interés, tanto a nivel económico como científico. Dicho interés se debe principalmente al hecho que estos yacimientos son portadores principales de oro y plata, además de otros elementos, como Zn, Pb, Cu, Cd, As, Sb, Bi, Se, Te, Ga, Ge, In, Tl, Mo y Sn (Camprubí, 2006).

Se considera que las condiciones de formación de la mayoría de los yacimientos epitermales comprenden temperaturas entre <150 y $\sim 300^{\circ}\text{C}$ (y eventualmente mayores), y a profundidades desde la superficie hasta 1 ó 2 km, con presiones de hasta varios centenares de bares (Sillitoe, 1988).

La estructura, la litología y la composición de los fluidos influyen en la permeabilidad de los ambientes de formación de minerales (Sillitoe, 1993b). Los yacimientos se encuentran en vetas de buzamiento pronunciado (1–10 m de ancho) y enjambres de vetas, stockworks y, con menor frecuencia, vetas de bajo ángulo (por ejemplo Comstock, El Indio, Hishikari, Lepanto, Mejjicana, Round Mountain, Tayoltita) (Cooke & Simmons, 2000).

Los depósitos epitermales se presentan en muchos países como Japón, Indonesia, Chile y el oeste de EEUU, los que se encuentran en el “anillo de fuego” del Pacífico, que corresponde al área de volcanismo que rodea al Océano Pacífico desde Asia del Sur hasta el oeste de Sudamérica. La mayoría de estos depósitos son del Cretácico o más jóvenes (Sillitoe, 1993). Se conocen depósitos más antiguos, como los depósitos paleozoicos del cinturón plegado de Tasmania al este de Australia (White et al., 1995). Dado que los márgenes de las placas son regiones de levantamiento y erosión,

los depósitos epitermales generalmente tienen un bajo potencial de conservación, ya que son formados a poca profundidad.

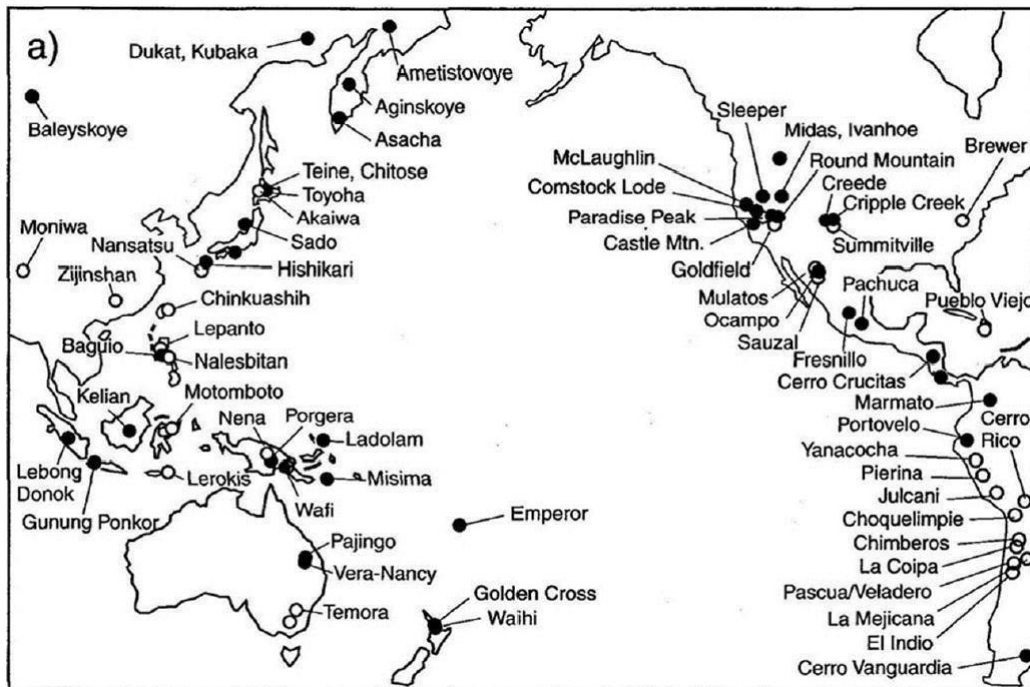


Figura N°10: Distribución espacial de depósitos epitermales. Extraído de Hedenquist et al., 2000)

De esta forma, las mineralizaciones pueden diferenciarse según tres tipos de control (Sillitoe, 1993):

- a) Control estructural: vetas masivas o bien individualizadas (ejemplo El Indio, Chile, o Pachuca-Real del Monte, México), “enjambres de vetas” (ejemplo Hishikari, Japón), en stockwork (ejemplo McLaughlin, E.U.A., o Chinkuashih, Taiwan), y vetas de bajo ángulo asociadas a fallas anulares (ejemplo Emperor, Fiji).
- b) Control hidrotermal: brechas hidrotermales (ejemplo Kerimenge, Papúa-Nueva Guinea), y cuerpos de sílice residual (típicos de AS, ejemplo Kasuga, Japón).

- c) Control litológico: disseminaciones bajo acuitardos en ignimbritas o rocas sedimentarias clásticas (ejemplo Round Mountain, E.U.A.), reemplazamientos ligados a contrastes de permeabilidad o de reactividad en el caso de rocas huésped calcáreas (ejemplo Taxco y San Francisco del Oro, México), y disseminaciones en brechas de diatrema (ejemplo Montana Tunnels, E.U.A.).

La mineralización puede formarse a partir de fluidos químicamente distintos. Se encuentran los de “baja sulfuración (BS)”, son reducidos y tienen un pH cercano a neutro, los de “intermedia sulfuración” y los fluidos de “alta sulfuración (AS)”, son más oxidados y ácidos. Los términos de alta y baja sulfuración fueron introducidos por Hedenquist (1987) y se refieren al estado de oxidación del azufre.

En ambos tipos de depósitos (BS y AS) los fluidos circulan hacia la superficie a través de fracturas en las rocas y la mineralización a menudo se presenta en esos conductos (mineralización controlada estructuralmente), pero también pueden circular por niveles de rocas permeables y eventualmente mineralizar ciertos estratos.

Los depósitos de oro de BS pueden contener cantidades económicas de Ag y cantidades menores de Pb, Zn y Cu, mientras los de sistemas auríferos de AS a menudo producen cantidades económicas de Cu y algo de Ag. Los depósitos pueden resultar con distintas anomalías geoquímicas, dependiendo de la mineralización involucrada. Los sistemas de BS tienden a ser más ricos en Zn y Pb, más bajos en Cu y con razones Ag/Au más altas. Los de AS pueden ser más ricos en As y Cu con razones Au/Ag más bajas.

Epitermales de Baja Sulfuración

Epitermales de Alta Sulfuración

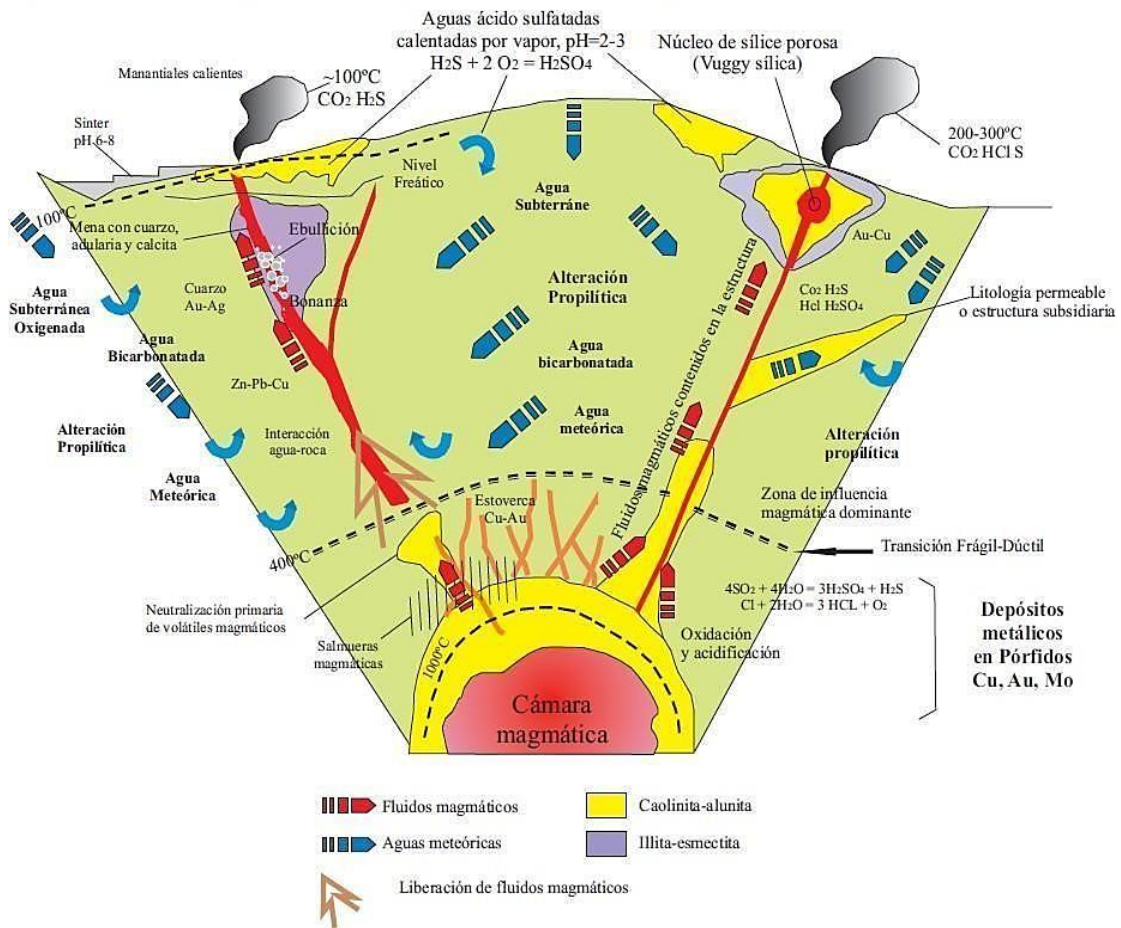


Figura N°11: Esquema comparativo de la estructura, procesos, tipos de alteración, volátiles liberados, temperatura, pH, tipos de fluidos y reacciones involucradas en la formación de los depósitos epitermales de baja y alta sulfuración.

Los depósitos de baja sulfuración están afiliados a una amplia gama de tipos de roca, desde alcalinas hasta calco-alcalinas (Sillitoe, 1993), los fluidos generalmente forman vetas de relleno con metales preciosos o series de vetas/vetillas más finas, denominadas “stockwork”. La mineralización aurífera en depósitos de baja sulfuración se asocia comúnmente con cuarzo y adularia más calcita o sericita como principales minerales de ganga. Las asociaciones de alteración en la roca caja incluyen illita, clorita, albita, epidota, zeolita y piritita, además de cuarzo, adularia y calcita. Estos minerales reflejan el pH casi neutro y la composición reducida del fluido mineralizante. La intensidad de la alteración depende en gran medida de la

existencia de una roca huésped reactiva, comúnmente volcánica, así como de la porosidad y permeabilidad.

Un subconjunto del estilo de baja sulfuración tiene una asociación de estado de sulfuración intermedia con pirita-tetraedrita/tennantita-calcopirita y esfalerita con bajo contenido de Fe. Los depósitos del estado de sulfuración intermedia son ricos en Ag y en metales base en comparación con los miembros extremos de los depósitos de baja sulfuración ricos en Au, lo que probablemente refleja variaciones en la salinidad de los fluidos hidrotermales.

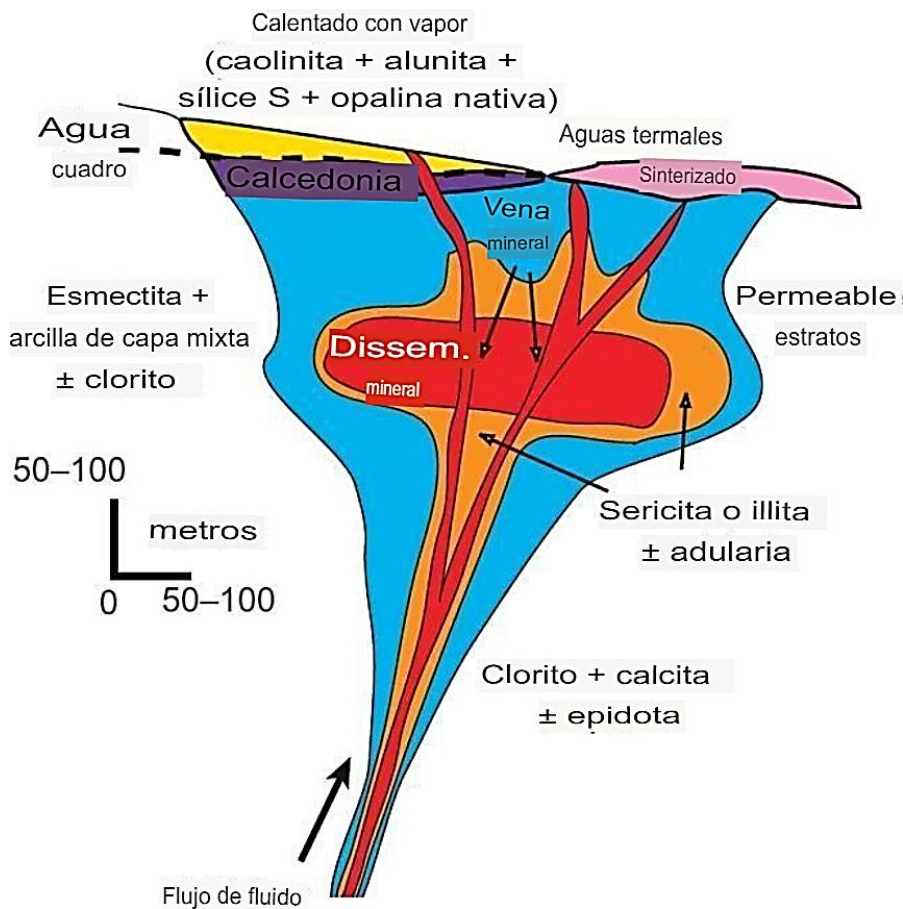


Figura N°12: Sección transversal idealizada de un depósito epitermal de baja sulfuración que muestra la distribución de alteraciones. Extraído de Tosdal et al., (2009)

Los fluidos de alta sulfuración, más calientes y ácidos penetran más en las rocas encajantes originando cuerpos mineralizados vetiformes, pero también diseminación en las rocas. La mineralización de mena es representada por pirita, enargita/luzonita, calcosina, covelina, bornita, oro; calcopirita, esfalerita, tetrahedrita/tenantita, galena, marcasita, arsenopirita, sulfosales de plata, telururos incluyendo goldfieldita. Dos tipos de menas están presentes comúnmente: enargita-pirita masiva y/o cuarzo-alunita-oro.

El estilo de alta sulfuración de un depósito epitermal se forma en una posición de transición entre la superficie y una intrusión superficial en desgasificación, en lugares asociados con depósitos de tipo pórfido. Los cuerpos mineralizados comúnmente se ubican proximales a los conductos volcánicos y están alojados por conductos estructurales o litologías permeables. Existe evidencia clara de una relación espacial y, en algunos casos, genética entre este tipo de depósitos y depósitos de pórfido subyacentes o adyacentes (Hedenquist, 2000).

La mineralogía de alteración es representada por cuarzo, caolinita/dickita, alunita, baritina, hematita; sericita/illita, arcillas amorfas y sílice, pirofilita, andalusita, diásporo, corindón, turmalina, dumortierita, topacio, zunyita, jarosita, sulfatos de Al-P y azufre nativo. La alteración argílica avanzada es característica y puede ser arealmente extensa y prominente visualmente. El cuarzo se presenta como reemplazos de grano fino y característicamente como sílice oqueroso, residual en rocas con lixiviación ácida. Las rocas meteorizadas pueden contener abundante limonita (jarosita-goethitahematita), generalmente en una masa fundamental de caolinita y cuarzo. Son comunes las vetas de alunita supérgena de grano fino y nódulos.

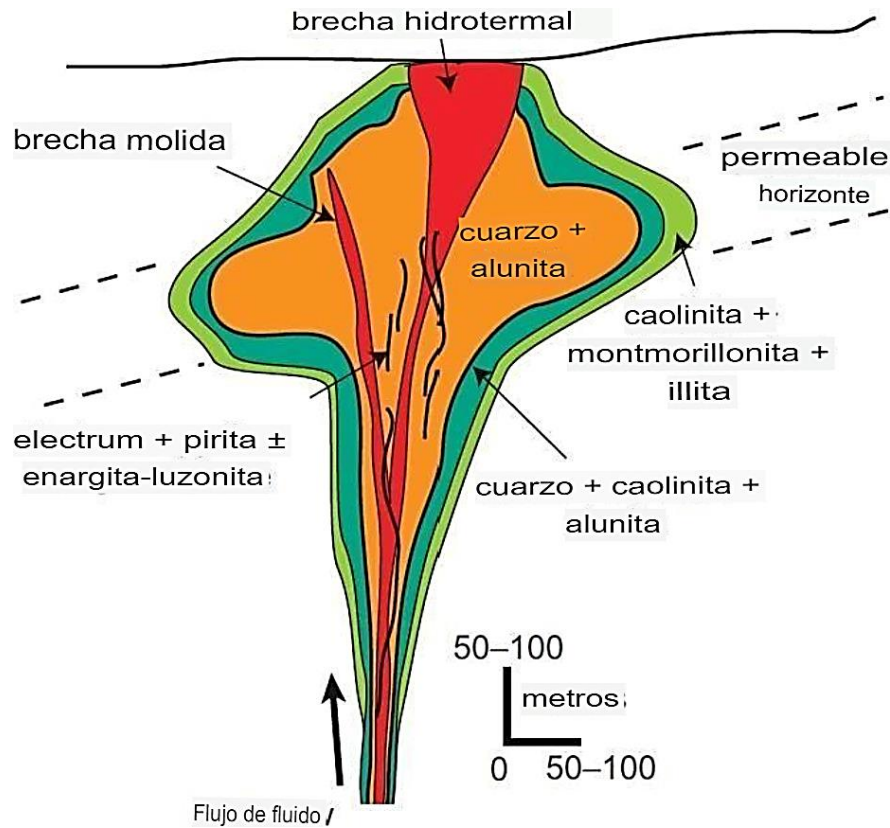


Figura N° 13: Sección transversal idealizada de un depósito epitermal de alta sulfuración, que muestra la distribución de alteraciones. Extraído de Tosdal et al., (2009).

2.5.1 Yacimientos epitermales en Chile

En Chile se presentan ambos tipos de depósitos, epitermales auríferos de baja sulfuración y de alta sulfuración, siendo estos últimos los yacimientos de mayor importancia económica, Los depósitos de baja sulfuración se distribuyen en la región occidental más antigua de la Precordillera, con edades del Cretácico medio al Eoceno temprano.

En el distrito patagónico del sur de Chile los depósitos de baja sulfuración, tipo veta

FachinalChile Chico ocurren en tobas de flujo de ceniza del Jurásico (Sillitoe, 1991). Por el contrario, los principales depósitos de alta sulfidación se concentran en dos cinturones angostos dentro de los Andes centrales (Maricunga y El Indio-Pascua), excepto los depósitos de El Guanaco y Choquelimpie.

Dado el modo de subducción de las placas existe una relación estrechamente entre espacio-temporalidad similar con los depósitos tipo pórfido de cobre. Los depósitos chilenos epitermales de baja y alta sulfidación están asociados con los regímenes regionales de subducción oblicua transtensional y normal débilmente compresiva (Kojima, 2003).

La Franja de Maricunga, es una provincia aurífera la cual alberga una serie de depósitos como es mencionado anteriormente se encuentran depósitos tipo epitermales de oro, plata y cobre de alta sulfuración (HS) y estilo pórfido. Los yacimientos más importantes son La Coipa (Au-Ag HS epitermal), La Pepa (Au-Ag HS epitermal), El Hueso/ADLF (Reemplazo de Au), Marte/Lobo, Refugio (pórfido/epitermal Au).

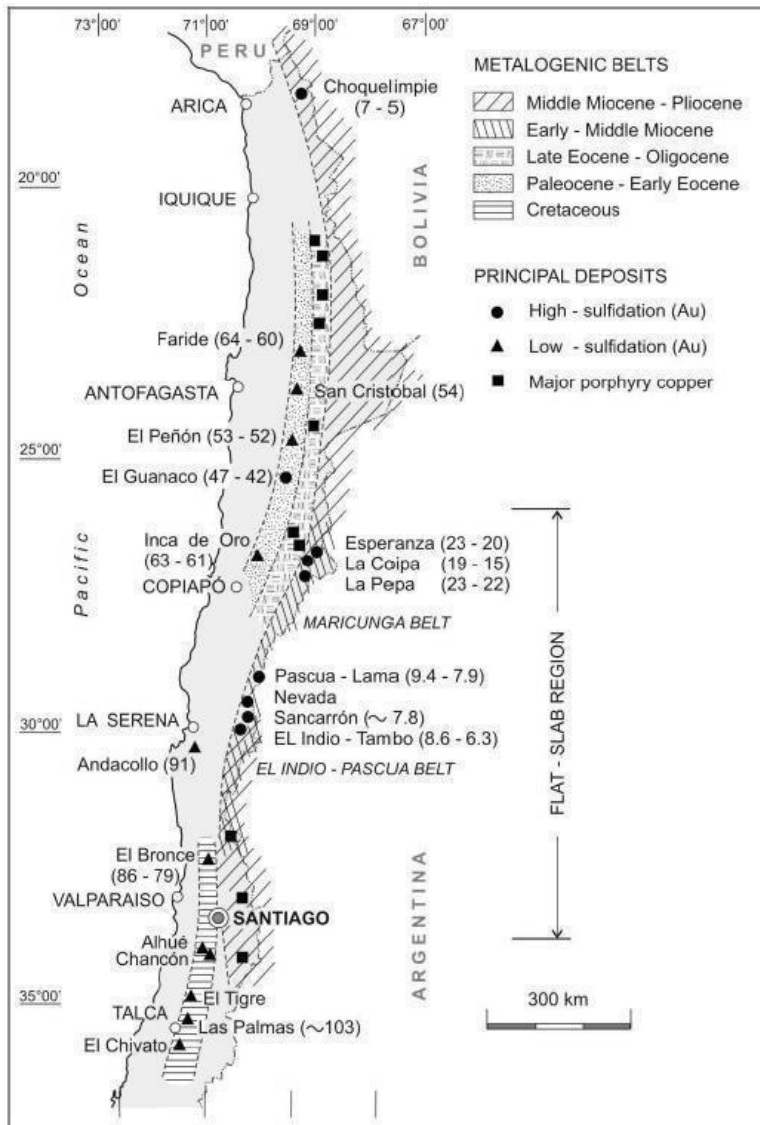


Figura N°14: Distribución espacial de epitermales de alta sulfidación y baja sulfidación en Chile. Extraído de Kojima y Campos (2011).

Las rocas triásicas que constituyen la roca huésped de la mineralización epitermal de Au- Ag de algunos yacimientos de la Franja de Maricunga (Esperanza, Coipa Norte, Can Can, La Coipa), se encuentran afectadas por fallas inversas de rumbo variable, pero con tendencia NNE-SSW.

Un ejemplo de alta sulfidación es el depósito El Indio, ubicado en los Andes de la IV región de Coquimbo, a una altitud >4000 m. El basamento de la zona está

formado por intrusiones granodioríticas y rocas volcánicas calco-alcalinas del Triásico, limitadas al este por la falla inversa Baños del Toro (Kojima 2016). Este tipo de depósito que se encuentran en la franja Maricunga están asociados a domos de dacita del Mioceno, y están representados por los depósitos Esperanza, La Coipa y La Pepa. En el distrito de Refugio y Aldebarán, los depósitos ocurren localmente en las proximidades de depósitos tipo pórfido (Muntean y Einaudi, 2001).

Por otro lado, un ejemplo de epitermales de baja sulfidación es El Peñón, el depósito consiste en vetas con tendencia NS- o NE-, que están alojadas en secuencias volcánicas del Paleoceno al Eoceno de composiciones dacíticas a riolíticas (Warren et al., 2004). Las vetas contienen electrum calcopirita, galena, esfalerita, acantita, tetraedrita, sulfosales y haluros de Ag. La alteración hidrotermal del depósito se caracteriza por una asociación mineral de pH casi neutro de cuarzo, adularia, albita, illita, calcita, clorita y esmectita.

2.6 Oxidación y enriquecimiento supérgeno

El proceso supérgeno comienza cuando un depósito con mineralización hipógena se expone a condiciones oxidantes, generando un perfil supérgeno ideal, encontrando en superficie una zona de gossan o capa lixiviada, una zona oxidada y una zona de sulfuros, estas son detalladas a continuación.

La formación de gossan/capa lixiviada comienza cuando los conjuntos de minerales y sus rocas asociadas se encuentran en la interfaz entre el nivel freático y la zona superficial suprayacente. Esta es, en esencia, la transición de un entorno reductor a uno oxidante (Taylor, 2011). A medida que los ensamblajes de mena pasan del nivel freático a la superficie a través de la meteorización, existen numerosos factores que contribuyen a la exposición final de la superficie. Las influencias son una combinación compleja e interactiva de efectos químicos, físicos y cinéticos (Blain y Andrew, 1977).

La presencia de sulfuros da como resultado la generación de ácido sulfúrico y/o sulfato férrico, ambos poderosos agentes oxidantes.

En este contexto, el ácido disuelve grandes volúmenes de hierro que reprecipita localmente como "óxidos de hierro" y convierte las rocas de las paredes locales en diversas combinaciones de arcillas pálidas y óxidos de hierro. Si las rocas de la pared están compuestas de aluminosilicatos pobres en hierro (feldespato dominante), los componentes de arcilla de baja temperatura probablemente dominarán, con cantidades variables de "óxidos de hierro" de color marrón rojizo anaranjado que se producen como manchas y precipitados a lo largo de zonas permeables como grietas, juntas y fallas. Por el contrario, si las rocas de la pared están dominadas por componentes ferromagnesianos (biotita, anfíbol y piroxeno), el resultado final será el "óxido de hierro" dominante y claramente más "oxidado" en apariencia.

El enriquecimiento supérgeno de cobre genera depósitos minerales en ambientes asociados a alta meteorización química en profundidades de hasta varios cientos de metros. Este mecanismo se desarrolla a escala geológica, y es viable siempre y cuando exista alzamiento por procesos tectónicos o isostáticos. Este proceso puede darse en un amplio espectro de condiciones climáticas y en general se desarrolla bajo la influencia de agua subterránea de carácter meteórico, donde juega un rol importante el nivel freático, el cual debe ser relativamente profundo para un mejor y rápido desarrollo de la mineralización secundaria. La tasa de alzamiento facilita el asentamiento del nivel freático a mayor profundidad, siendo éste un mecanismo clave en la formación de un mayor grado de mineralización en la zona de enriquecimiento secundario (Sillitoe, 2005).

Bajo el efecto del alzamiento tectónico, disminución del nivel freático y erosión, los depósitos minerales que fueron formados en profundidad, a alta presión y temperatura, son expuestos en superficie, donde el equilibrio se ve afectado por las nuevas condiciones de baja temperatura, baja presión y alta fugacidad de oxígeno.

De esta forma, la mineralogía hipógena es alterada por la oxidación y lixiviación, generando depósitos con mayor concentración mineral, aumentando la ley del yacimiento hasta 4-5 veces de la ley primaria (Reich y Vasconcelos, 2015).

Los principales modelos de enriquecimiento supérgeno involucran a los sulfuros hipógenos de Fe (ejemplo: pirita) y Fe-Cu (ejemplo: calcopirita, bornita) como los principales responsables de la generación de ácido y componentes de metales disueltos, la pirita es con mucho, el sulfuro más abundante, generando cantidades importantes de ácido sulfúrico (Chávez, 2000).

Esto se realiza a través de procesos graduales de hidrólisis y oxidación que llevan a la generación de sulfato, en conjunto con la obtención de iones de cobre Cu^{+2} a través de la ruptura de la calcopirita o bornita. La migración vertical en profundidad de las soluciones ácidas resulta en la estratificación del perfil supérgeno, con una zona de lixiviación hacia el techo que sobreyace a la zona de mineralización oxidada de cobre (zona de oxidados verdes). Bajo esta zona, el cobre en solución y el sulfato son reducidos para formar sulfuros secundarios, usualmente bajo el nivel freático (Taylor, 2011).

La zona oxidada está compuesta por minerales de cobre incluyendo óxidos, sulfatos, hidrox-cloruros, carbonatos, silicatos, cobre nativo. Los principales minerales de cobre que se pueden encontrar en esta zona corresponden a cuprita, tenorita, brocantita, chalcantita, antlerita, malaquita, azurita, atacamita, turquesa, cobre nativo, crisocola, entre muchos otros. Por otra parte, la zona enriquecida está compuesta principalmente por calcosina y covelina.

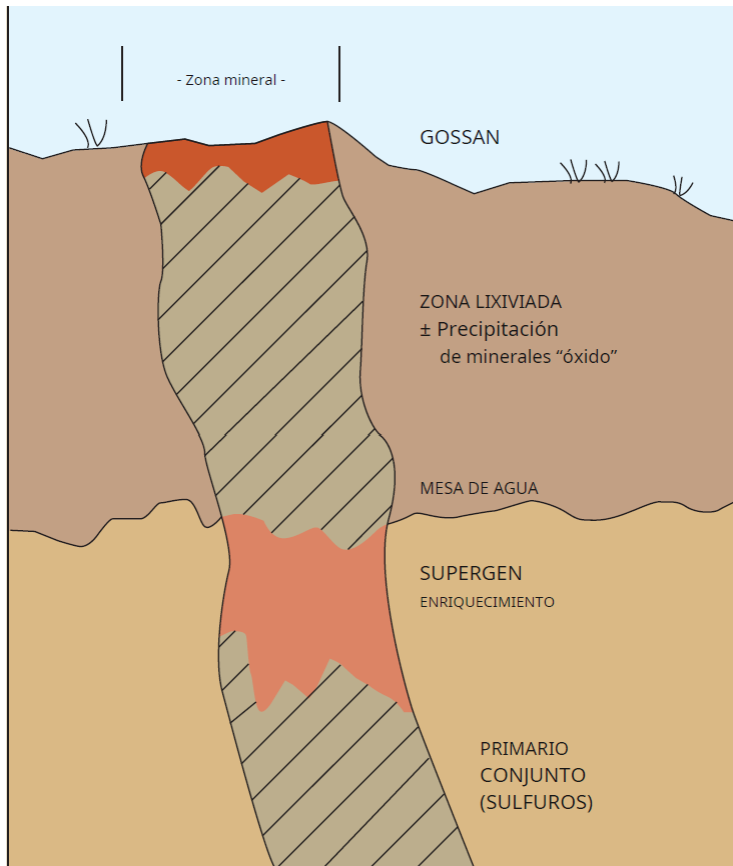


Figura N°15: Perfil esquemático de oxidación supérgena. Extraído de Taylor (2011).

CAPÍTULO III: MARCO GEOLÓGICO

La zona de mineralización y alteraciones hidrotermales que se observan en mina San Antonio se encuentran presentes en el segmento este de la cordillera de la costa, en la región de Atacama, en el extremo occidental de la carta Copiapó, por la traza principal nornoreste del Sistema de Falla de Atacama (SFA). Esta estructura separa una franja occidental formada por plutones de edad jurásica superior a cretácica inferior baja (155- 125 Ma), de otra oriental compuesta por plutones de edad cretácica inferior alta (123-103 Ma). La geología del área en estudio consiste por un Plutón del cretácico inferior denominado Diorita la brea definida por Arévalo (2005).

3.1 Marco geológico regional

Posteriormente a la separación de Laurasia de Gondwana durante el Jurásico Inferior se generó una nueva anomalía calórica ubicada más al sur, la que fragmentó el supercontinente de Gondwana (Cox, 1988), constituyendo durante el Pliensbachiano el centro dispersor del Karoo, a partir del cual se inició la separación entre el Gondwana Occidental y el Oriental, abriendo el Océano Índico (Duncan et al., 1997). Este evento, ocurrido entre los 183 y 179 Ma (Jourdan et al., 2005), tuvo una fuerte impronta en los procesos del margen pacífico de América del Sur.

Luego de la fase de rifting del triásico-jurásico temprano, el inicio de la subducción y las primeras evidencias del arco magmático activo se observa aproximadamente a los 183 Ma y se los puede asociar al inicio de la separación entre Gondwana occidental y oriental (Mpodozis y Ramos A., 2008).

El predominio de condiciones extensionales, ya descrita en modelos tectónicos previos tales como el de Aubouin (1973) y Mpodozis (1989) estaría ligada según

(Ramos, 1999) a un retroceso de la trinchera oceánica que sería responsable de la subducción tipo mariana asociada a extensión que caracteriza a la mayor parte del margen Andino durante ese período. Los depósitos están ubicados al este de las ramas principales cercanas a la zona de la falla de Atacama, que se extiende por más de 1.000 km a lo largo de la Costa chilena. Este es un sistema de fallas de deslizamiento de rumbo de arco paralelo que ha estado activo al menos desde la época jurásica (Brown et al., 1993; Dallmeyer et al., 1996; Scheuber et al., 1995; Scheuber & Andriessen, 1990) este sistema de fallas y cuenca de intraarco posterior relacionadas implican un ajuste extensional general (antes de 130 Ma) en la Cordillera Costera de Copiapó, los sistemas de fallas de arco magmático extensionales a transtensionales (sistemas de Fallas de Atacama) se vincularon cinemáticamente al emplazamiento de rocas plutónicas entre 120 y 93 Ma (Dallmeyer et al., (1996); Godoy et al, 1997; Lara y Godoy, 1998; Arévalo, 1999; Grocott y Taylor, 2002), controlando la mineralización de muchos de los depósitos de la franja del Cretácico (Bookstrom, 1977; Espinoza, 1990; Ménard, 1995; Thiele y Pincheira Núñez, 1987). También en el dominio de la Cordillera de la Costa se encuentra la faja ferrífera principal, cuyos yacimientos de magnetita con anfíbola y apatita “tipo Kiruna” se emplazaron en torno a los 120-110 millones de años atrás. Esto, en coincidencia casi perfecta con la edad de los principales yacimientos cupríferos tipo manto e IOCG de la misma Cordillera. Se tiene, por una parte, yacimientos cupríferos tipo manto asociados a una alteración hidrotermal oxidante, y depósitos ferríferos de mayor temperatura con magnetita y anfíbola. Los depósitos IOCG se sitúan a medio camino entre ambos, compartiendo tanto la mineralización cuprífera como la presencia de magnetita anfíbola.

El Cinturón de Hierro de Chile es parte de uno de los principales cinturones IOCG del mundo; se encuentra a lo largo del arco Mesozoico del norte de Chile y el sur de Perú. Los depósitos están alojados en el Batolito Costero y rocas supracrustales relacionadas (principalmente volcánicas) (Sillitoe 2003).

Entre los 26° a 31°S, la franja metalogénica está representado por los yacimientos de Fe (magnetita – apatito) hospedados en rocas volcánicas del Cretácico Inferior en sectores aledaños a intrusivos dioríticos a granodioríticos del Albiano. Estos depósitos ferríferos están dentro del dominio del segmento meridional del Sistema de Falla de Atacama. Ej. Cerro Imán (Vivallo et al., 1994), Cerro Negro (Vivallo et al., 1993), Bandurrias, Boquerón Chañar, Algarrobo (Montecinos, 1983), El Tofo, Romeral (Bookstrom, 1977).

Existen indicios menores de mineralización de cobre y de oro ligados al mismo contexto, particularmente en la periferia de los cuerpos ferríferos. En la misma zona donde se presentan los yacimientos de Fe-apatito existen también yacimientos de óxido de Fe (CuAu) como Candelaria y Manto Verde (Vila et al., 1996) y otros menores del distrito Punta del Cobre (Marschik y Fonbote, 1996).

En contraste, las rocas plutónicas generalmente albergan vetas algo más simples, más pequeñas, pero localmente económicas que exhiben una zonificación sistemática desde alteración argílica avanzada superficial o distal hasta estilos de alteración de Na(-Ca) proximales más profundos.

3.2 Marco geológico local

El área de estudio se encuentra dentro del batolito de Copiapó, el que está compuesto por varios plutones, predominantemente dioríticos, granodioríticos y cuarzo monzonítico (adamelítico) en su composición. Localmente, estos plutones están separados por contactos tectónicos. Según Tilling (1976), las fases magmáticas félsicas generalmente intruyen a las máficas. Las edades $40 \text{ Ar}/39\text{Ar}$ y K–Ar disponibles para el Batolito de Copiapó oscilan entre 119 y 97 Ma. El batolito intruyó rocas sedimentarias marinas y volcánicas del Jurásico y Cretácico con capas locales que contienen evaporitas (Marschik y Fontboté 2001).

Los plutones granitoides del batolito de Copiapó intruyeron los depósitos del back-arc, causando una extensa aureola metamórfica de contacto (Tilling, 1962, 1963, 1976) que corresponde a Diorita la Brea (Arévalo, 2005), el plutón ocupa una gran extensión de terreno entre la traza principal del sistema de fallas de Atacama y el límite oriental de la Cordillera de la Costa.

Diorita La Brea corresponde al cuerpo plutónico con mayor superficie expuesta en esta región. Al norte, limita con la Falla Bandurrias de tendencia noroeste, donde está en contacto con el plutón más joven de La Borracha (Dallmeyer et al., 1996), precisamente en el margen occidental del plutón, presenta rocas miloníticas de facies de esquistos verdes sinplutónico expuestas a lo largo del sistema de fallas de Atacama, donde la deformación puede enmascarar la evidencia de desplazamientos por inmersión relacionados con el emplazamiento a altas temperaturas. Mientras que, al sur y al este, el límite es el contacto intrusivo con rocas estratificadas cretácicas (Grupo Chañarillo), hacia el oeste limita con volcanitas de la Formación La Negra, y con el Plutón Sierra Atacama (Carta Los Loros; Arévalo, 2005).

Las dioritas son de grano grueso y están formadas por un agregado isótropo de plagioclasa con ferromagnesianos y granos de cuarzo y biotita intersticial. En afloramientos centrales y hacia el borde suroriental (Carta Los Loros; Arévalo, 2005) del plutón, se han distinguido facies porfídicas de microdioritas y microdioritas cuarcíferas de piroxeno y hornblenda.

Mina San Antonio se encuentra dentro del distrito Jesús María, el que contiene zonas de estratos con alteración argílica avanzada alojadas en rocas volcanoclásticas. El área de alteración argílica avanzada se superpone estructuralmente a una mineralización más profunda de magnetita-apatita-actinolita y de cobre intermedio; estos están cortados por diques intraminerales (127 Ma; circón U-Pb) (Kreiner, 2011).

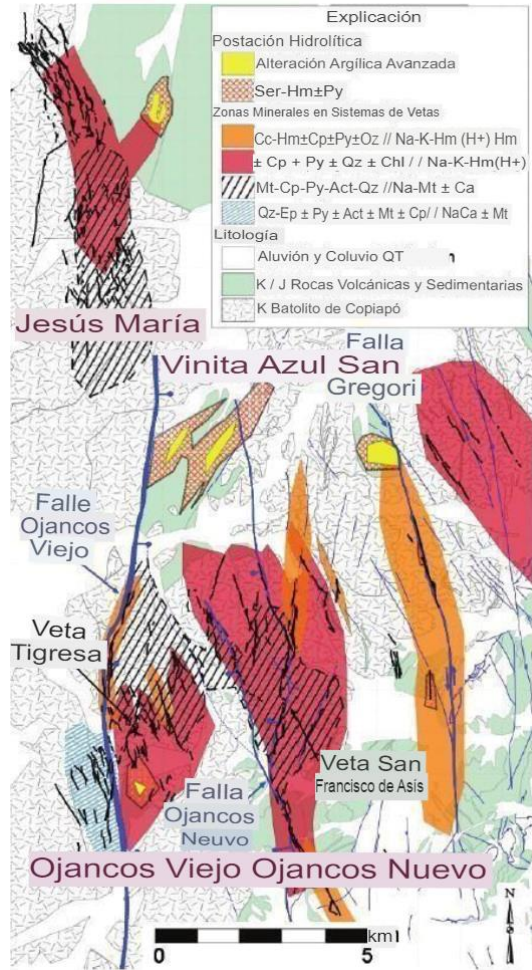


Figura N°16: Mapa de ubicación y zonificación de vetas. Las zonas de vetas dominadas por Mt con alteración de Na-Mt en el núcleo están envueltas por vetas dominadas por Hm con Na-KHm(H+) alteración. Mapa base compilado de Arevalo (1999) y Tilling (1963) y modificado por Barton et al. 2011.

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

Para la realización del presente trabajo, se dividieron las tareas en 3 partes, las que son nombradas como etapa pre-terreno, segunda etapa de terreno y una tercera, con análisis químicos e interpretación de resultados. A continuación, estas serán detalladas.

4.1 Etapa de pre-terreno

Principalmente esta etapa constó de una exhaustiva recopilación de información, tanto local como distrital. Se buscó información de la mineralización más abundante encontrada en mina San Antonio, la que consistió en oro y óxidos de cobre, se fotointerpretó el área y también en esta etapa se organizó lo que es clave obtener para la siguiente etapa, como es la elaboración de una base para mapeo.

4.1.1 Revisión bibliográfica

En esta etapa se realizó una profunda recopilación de información, a través de estudios, tesis, informes, mapas y cartas geológicas del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, mediante esta recopilación, se reunieron los antecedentes de la geología del distrito Jesús María, con énfasis en su geología económica, como yacimientos cercanos a mina San Antonio. Asimismo, se revisó información sobre metalogénesis de depósitos epitermales e IOCG, artículos y estudios científicos relacionados a concentraciones oro dentro de Chile como también en otras partes del mundo. Se recopiló información sobre métodos de muestreo, identificando dicho método que sea óptimo para la recopilación de muestras a tomar para realización análisis para la generación de una nueva metodología con oro.

4.1.2 Elaboración de base de mapeo

Se confeccionó un mapa base con escala 1:1500 en el programa Arc Map10.5. datum WGS84, zona 19S. La Imagen satelital utilizada para la confección del mapa base se obtuvo de SAS Planet 15.1. Se empleó la topografía superficial de mina San Antonio.

4.1.3 Fotointerpretación

Antes de realizar las salidas a terreno, como etapa de gabinete, se realizó una fotointerpretación del área de estudio. Mediante esta, se obtuvo un mapa fotointerpretado, el cual se empleó para la definición de zonas de interés para cartografiar en terreno, como son los accesos, topografía, contactos litológicos, fallas regionales y diques, todo según características y/o contrastes presentes en la imagen.

4.2 Etapa de terreno

Como segunda etapa, con objetivos claros a realizar en terreno obtenido a través de lecturas como etapa de gabinete, en esta etapa se realizó todo lo que es clave para un buen mapeo de mina San Antonio, en esta etapa ya se tenía claridad ante como se debe etiquetar en terreno (muestras y fotos), mapear área local y aledaña a mina de estudio (alteraciones, mineralización, estructuras), también lo importante que son los implementos que se requieren en terreno para que la realización tenga los resultados esperados.

Se visitó Mina San Antonio, con dicho acuerdo con Sr. Armando Arias, identificando de forma generalizada el área, se identificó el acceso y se visitó labor principal subterránea. Se levantó un estudio geológico de interior mina, exterior mina y zonas aledañas, realizado esto en un periodo de 15 días. Primero se efectuó el estudio en

interior mina, enfatizando éste en estructura principal, alteraciones y mineralizaciones. Luego se procedió al estudio de exterior mina y solas aleñadas.

Para el caso de muestreo, como se mencionó anteriormente se realizó en interior mina y en zona superficial. En interior mina se muestrearon zonas mineralizadas como es en veta y en pared, se recolectaron en bolsas de muestras con tamaño 45x60 cm. De forma sistemática el muestro fue realizado en toda la labor (misma cota), con apoyo del personal encargado, se utilizó cuña y martillo geológico, luego de la obtención de dichas muestras estas fueron guardadas y cerradas con el fin de evitar contaminación.

En el caso particular de obtención de oro, se utilizó el método “Chip Sampling” con el cual se pondrá en práctica metodología (factible o no factible) para la determinación de este elemento utilizando equipo XRF.

A continuación, se presentarán de manera detallada los aspectos que se consideraron para la definición de litología, mineralización, alteración y estructuras geológicas realizadas en terreno.

4.2.1 Litología

En esta sección se realizó una rotulación específica para cada muestra, con el fin de que sea ordenado y no exista confusión a la hora de ser analizadas, dado esto, en terreno se identificó la roca de caja, la cual se rotulo acorde al tipo de roca que correspondía, como se ejemplifica a continuación en tabla N°2.

PUNTO	TIPO DE ROCA	COORDENADA N	COORDENADA E	OBSERVACION
Pto 2	Intrusiva	6.965.789	363.412	Roca de caja
Pto 4	Intrusiva	6.965.865	363.460	Roca de caja con alteración clorita-epidota
Pto 5	Intrusiva	6.965.930	363.426	Roca de caja

Tabla N°2: Ejemplos de rotulación de muestras extraídas de en mina San Antonio y zonas aledañas, confección propia.

Se recolectaron un total de 18 muestras, sacando rocas frescas de distintos puntos para ser analizadas petrográficamente de forma macroscópica como microscópica. A partir de esto se definió la unidad principal de roca de caja presente en el área de estudio.

4.2.2 Mineralización

Para este caso, se recolectaron 20 muestras las que fueron extraídas de interior mina, en veta 1, se realizó un muestro mediante el método definido como “chip sampling”, con objetivo de realizar una descripción detallada en 3 zonas principales de la veta (caja techo, cuerpo de veta y caja piso). En terreno se clasificó macroscópicamente la mineralización, rotulando y describiendo lo observado, modo de ocurrencia y asociación mineralógica, como se ejemplifica en tabla N°3. Las muestras extraídas fueron descritas macroscópicamente, para luego seleccionar aquellas muestras adecuadas para su empleo en la confección de secciones delgadas y/o pulidos, para su posterior descripción microscópica.

PUNTO	COOR N	COOR E	MIN MENA	ABREVIATURA
Pto 1	6.965.904	363.543	Oro	Au

MODO DE OCURRENCIA	MINERALIZACION GANGA	INTENSIDAD	OBS
Diseminado - Fino	Cuarzo	Moderado	Secundario Oqueroso
	Hematita	Intenso	Habito terroso
	Jarosita	Moderado	Habito terroso
	Goetita	Moderado	Habito terroso

Tabla N°3: Ejemplo de rotulación y descripción de muestras extraída de en mina San Antonio, describiendo mineralización de mena y ganga, confección propia.

4.2.3 Alteración

Las alteraciones fueron muestreadas en veta principal, en ambos costados de la veta, lo que consistió en obtener muestra en 3 partes de la esta, caja techo, cuerpo de la veta, caja piso. luego se sacaron muestras de las paredes (todo obtenido en interior mina), todo fue realizado con apoyo de mineros que se encuentran trabajando la mina, luego en zona superficial se obtuvieron muestras de lo que fue identificado como roca de caja, la que presentaba alteraciones hidrotermales con distintas intensidades.

Para cada zona se recolectaron 5 muestras por zona, obteniendo un total de 30 muestras, estas fueron analizadas petrográficamente tanto macroscópicamente como también microscópicamente.

Las alteraciones fueron descritas en función del porcentaje de roca afectada, utilizando intensidad leve, moderado e intenso. También se detalla a su asociación mineralógica como se observa en tabla N°4.

PUNTO	COOR N	COOR E	ALTERACIÓN	INTENSIDAD	OBSERVACIÓN
Punto 34	6.966.002	363.449	Argílica	Leve	Se encuentra alterando un 8% de roca diorita.
Punto 15	7.001.536	405.131	Epidota- clorita	Moderado	Afecta un 40% de muestra Rx- 15
Punto 8	6.966.011	363.498	Silicificación	Intenso	Sílice masiva, rocas completamente reemplazadas 96%.

Tabla N°4: Ejemplo de alteraciones con intensidad y observaciones.

4.2.4 Estructura

Se tomaron los datos estructurales con brújula Brunton, empleando la notación círculo completo, luego en superficie, también se identificaron estructuras, vetas, fallas y diques, las que fueron descritas de forma detallada como se observa en tabla N°4, de igual forma las mediciones fueron tomadas con notación círculo completo. Los datos fueron anotados ordenadamente en libreta de campo para luego ser ingresados estos datos y analizados en software y obtener patrones dominantes, en tabla N°5 se ejemplifica rotulación de datos estructurales.

PUNTO	COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE	DATO ESTRUCTURAL	OBSERVACION
Pto 2.1	6.966.034	363.499	275/42	Plano estructural de veta
Pto 3	6.966.011	363.493	283/41	Plano estructural de veta
Pto 6	6.965.865	363.411	220/70	Plano estructural de dique

Tabla N°5: Rotulación de datos estructurales presentes en mina San Antonio y zonas aledañas, confección propia.

4.2.5 Fotografías

Se capturaron evidencias presentes en sector mina, y sectores aledaños, presentando un código al igual que el muestro, para que estas no presenten confusión al momento de ser utilizadas, estas son guardadas con código como se muestra en tabla N°5.

CÓDIGO	PRIMER DÍGITO	SEGUNDO DÍGITO	TERCER DÍGITO
VET-12:05-(03-04)	VET: Veta	12:05: Hora sacada	(03-04): Fecha
LIT-12:05-(03-04)	LIT: Litología	12:05: Hora sacada	(03-04): Fecha
ALT-12:05-(03-04)	ALT: Alteración	12:05: Hora sacada	(03-04): Fecha
MIN-12:05-(03-04)	MIN: Mineralización	12:05: Hora sacada	(03-04): Fecha

Tabla N°6: Opciones y desglose de modo de codificar las fotografías realizadas en mina San Antonio, confección propia.

4.3 Etapa post-terreno

4.3.1 Descripción

Se realizó una descripción de muestras macroscópicamente utilizando lupa de mano, rayador, imán y ácido clorhídrico las que fueron recolectadas en terreno, muestras de interior mina, zona superficial y zona aledañas. Esta descripción se realiza en terreno y también de forma posterior.

4.3.2 Datos estructurales

Datos estructurales tomados en terreno, de estructuras como fallas, diques y vetas, son ordenados y organizados en planilla Excel, para ser introducidos en software Dips realizando diagramas de roseta, el que indicará patrones de orientaciones en dichos datos.

4.3.3 Microscopia óptica

Se escogieron 11 muestras para confección de cortes transparentes y cortes pulidos. Es importante mencionar que no fue posible confeccionar cortes transparentes- pulidos para aquellas muestras que tenían alto grado de alteración muy poco compactas.

Se realizó una caracterización microscópica a través del estudio de texturas y paragénesis mineral en los cortes transparentes y pulidos de las muestras seleccionadas, esto se realiza mediante microscopía óptica de polarización con luz

transmitida y reflejada. Esta caracterización se llevó a cabo en el Laboratorio de Microscopía del Departamento de Geología de la Universidad de Atacama con microscopio modelo DM1750 M, marca Leica. De manera paralela, se tomaron fotomicrografías mediante una cámara acoplada al microscopio.

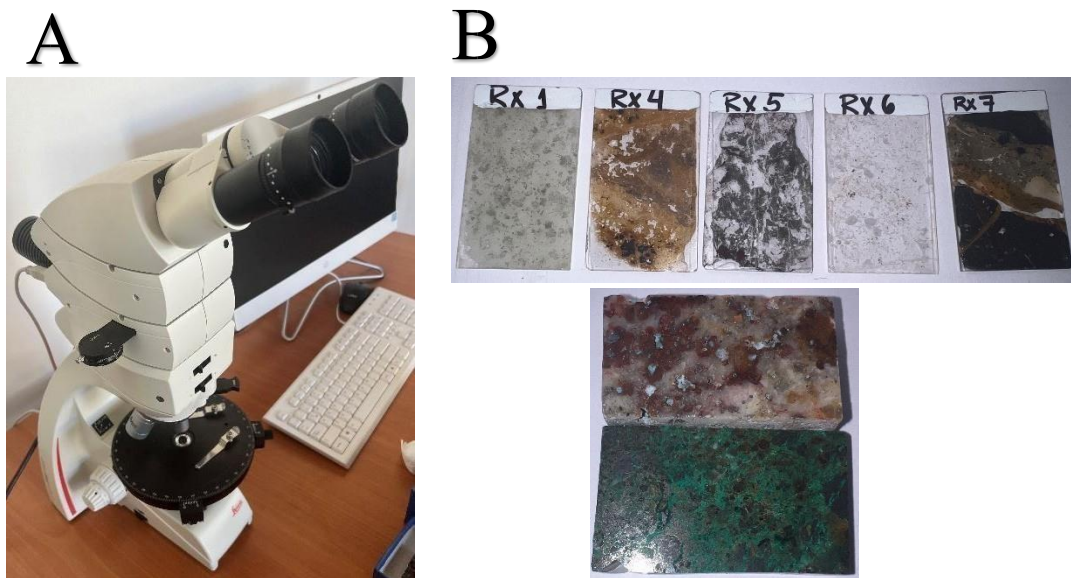


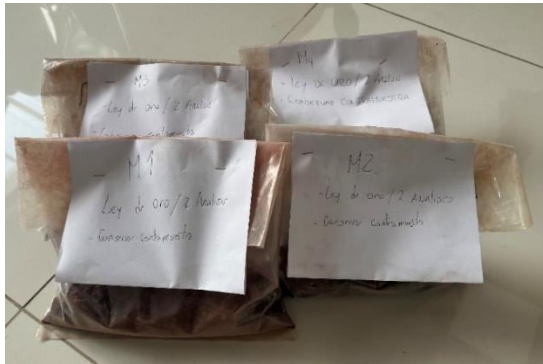
Figura N°17: A) Microscopio modelo DM1750, ubicado en departamento de Geología, de Universidad de Atacama. B) Cortes transparentes y cortes de pulido.

4.3.4 Generación de metodologías estandarizada para la determinación de leyes de oro

En esta etapa se enviaron a analizar las muestras obtenidas en terreno, se cuenta para la prospección geológica análisis de cortes transparentes, cortes de pulido, adicional a la información entregada por el propietario, la que consiste en leyes de producción obtenida por reportes de compra y venta emitida por Enami.

Para el caso de la generación de metodología estandarizada, se inició con envío de 4 muestras con 5 kg a laboratorio Geolaquim, estas fueron codificadas como M₁, M₂, M₃ y M₄, para obtener contramuestras (rechazo) y sus respectivas leyes. De esta forma. Las leyes entregadas por el laboratorio se emplearon como referencia comparativa para los resultados obtenidos mediante el XRF.

A



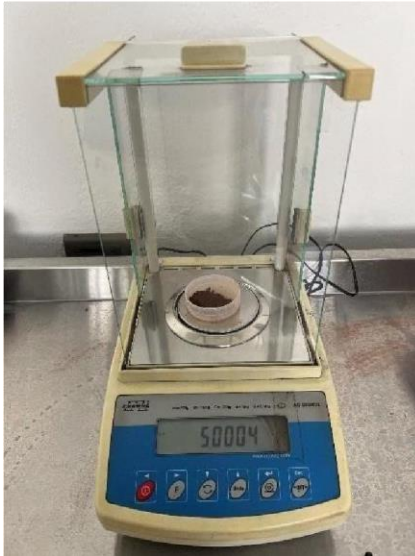
B



Figura N°18: A) Muestras enviadas a análisis para obtención de leyes de oro y contramuestra. B) Contramuestra obtenida de laboratorio Geolaquim.

Para cada contramuestra se obtienen 3 muestras, estas son pesadas en balanza Radwag AS 220/C/2. El peso de cada muestra varía dentro del rango de 5,0000 a 5,0100 gr. Estas fueron guardadas en bolsas de 6x10 cm. codificadas como M_x Peso_z (x= 1, 2 o 3; z= A, B o C). Todas las muestras son analizadas por métodos artesanales, con muestra pulverizada y adición de 10 ml de agua. A corresponde a que la muestra se analizará con el “cacho”, B se analizará en canaleta con 10° de inclinación y C con 5° de inclinación.

A



B



Figura N°19: A) Balanza Radwag AS 220/C/2, ubicada en el departamento de Geología, Universidad de Atacama. B) Muestreo de M1 con sus 3 respectivos pesos para A, B y C.

Para las muestras A, que corresponde al “cacho” se agrega la muestra pulverizada con 10 ml de agua, se realizaron por 10 segundos movimientos hacia los lados, luego se le dan X golpes en la parte delantera, este procedimiento es realizado 5 veces, se escurría un porcentaje de agua, se volvían agregar 4 ml más de agua y se realizaba un 6to procedimiento, esta agua era removida, quedando material sedimentado, se procede a medir dicho contenido lo que aproximadamente correspondían a 10 cm, de esto se saca el 40% del contenido de la parte final denominada como “la colita”, este material es introducido en un recipiente de aluminio, para luego ser secados.

Para las muestras B y C, se utiliza un vaso de precipitado para mezclar la muestra (5 gr) con 10 ml de agua, esta mezcla se deja caer por una canaleta, para el caso de B la inclinación corresponde a 10°, la mezcla fluía a través de un largo de 126 cm, sacando el 40% del total, este contenido al igual que en A eran introducidos en recipientes de aluminio. En C, se realizó el mismo procedimiento cambiando solo

los grados de inclinación de la canaleta utilizada. Para la obtención del material de la canaleta se utiliza pincel y agua, para remover todo el contenido.

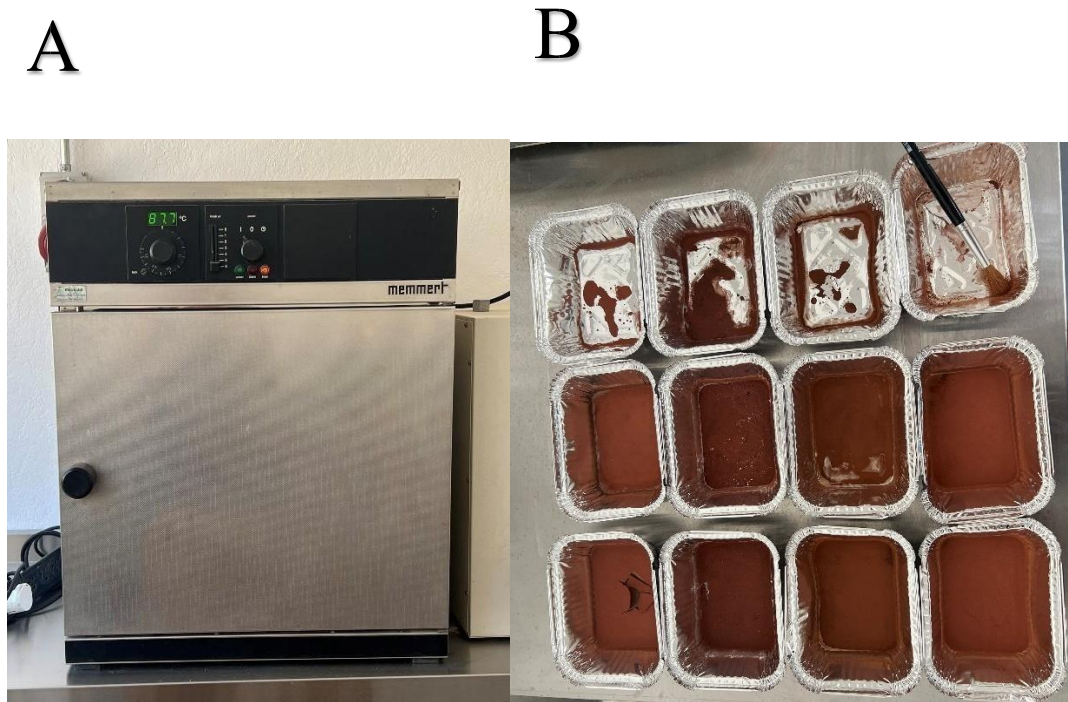


Figura N°20: A) Horno Memmert utilizado para el secado de las muestras, ubicado en departamento de geología, Universidad de Atacama. B) Muestras secadas para M1, M2, M3 y M4, A, B y C.

Las muestras fueron secadas durante 10 horas en horno Memmert a 100°C, luego de realizado el secado, estas son extraídas del recipiente de aluminio, son pesadas y guardadas en nuevas bolsas con su correspondiente etiquetado (este procedimiento se realiza en todas las muestras), como último paso, para cada muestra se realiza un análisis de fluorescencia de rayos X con equipo Bruker, modelo Titan S1, este análisis entrega un resultado cuantitativo de elementos, los que serán detallados en apartado 6.

4.3.5 Realización de mapas

Con software ArcGis 10.5 se realizó mapa digital, en donde se ingresa toda la información generada y obtenida en terreno, litología, mineralización, alteraciones, estructuras y sus respectivos datos (rumbos y manteos).

CAPITULO V: RESULTADOS

Los resultados obtenidos se lograron a través de análisis microscópicos y macroscópicos que en los siguientes apartados se describirán en detalle las unidades litológicas, mineralización, alteraciones y geología estructural de mina San Antonio y áreas aledañas. A partir de la campaña de mapeo geológico llevada a cabo en el presente estudio, se elaboró mapa geológico mostrado en figura N°54, detallando distribución espacial de resultados obtenidos.

5.1 Unidades litológicas

Diorita

Cuerpo intrusivo que está emplazado en toda el área de estudio, correspondiendo al Plutón Diorita la breca, desde el punto de vista textural se observa que sus tamaños de cristales varían pasando de cristales medios a gruesos, roca fanerítica, su índice de color varia de leucocrático a mesocrático. Desde el punto de vista mineralógico, la roca se constituye con un 1 a un 3% de cuarzo, 62 a 76% de plagioclasa y 15 a 30% de máficos, puede presentar hasta un 1% de feldespatos potásicos, contiene leve magnetismo. Presenta tonalidades verdosas dado su alteración con contenido de epidota y clorita, y este porcentaje de alteración varia en el área de leve a intenso.

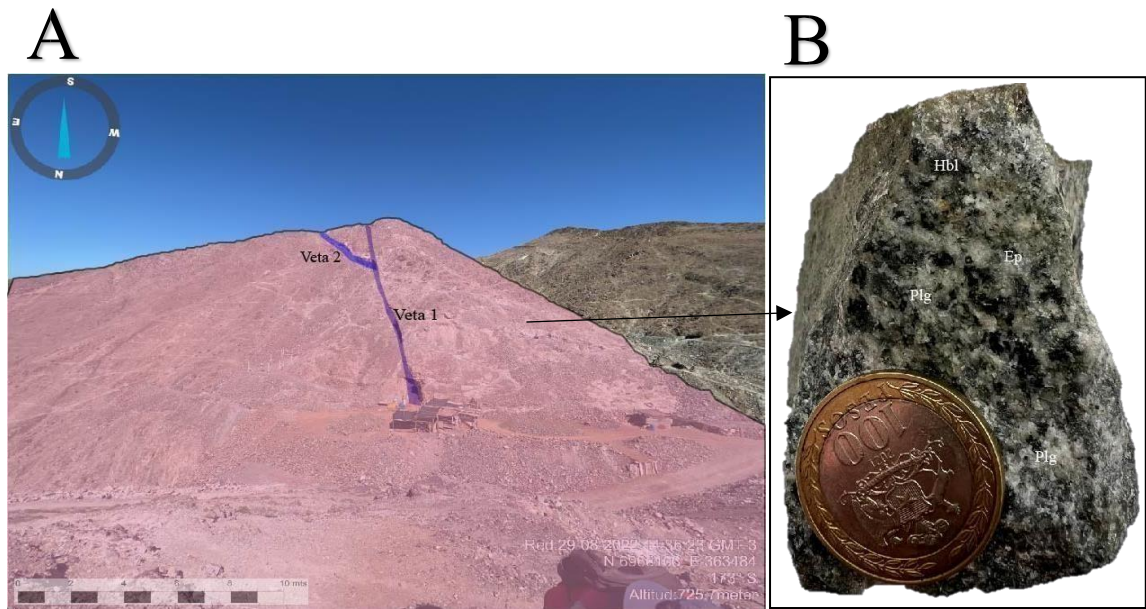


Figura N°21: A) distribución de cuerpo diorítico y vetas mineralizadas de mina San Antonio, veta 1 y veta 2. B) muestra de mano de roca de caja definida como diorita, extraída de área presentada en A.

A partir del estudio microscópico de sección delgada de roca de caja, se determinó que su textura es holocristalina, la distribución de tamaños en sus cristales es definida como equigranular, plagioclasas (1- 4mm), con escaso desarrollo de caras en los cristales, plagioclasas subhedrales, cuarzos anhedrales y hornblendas subhedrales. Alteraciones como clorita y epidota se encuentran afectando a plagioclasas y hornblendas, en donde su intensidad es moderada a intensa.

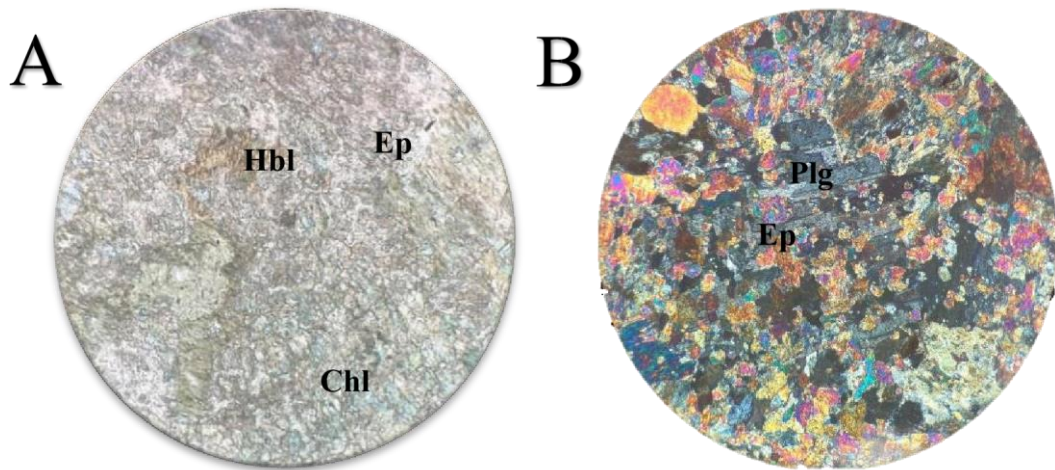


Figura N°22: A) fotomicrografía de roca de caja Luz Polarizada Plana (LPP) B) fotomicrografía en Nícoles Cruzados (NX). Plg: Plagioclasas; Ep: Epidota; Chl: Clorita; Ser: Sericita.

Dique Microdiorítico porfídico

Cuerpos intrusivos hipabisales tabulares, con potencia de 7 a 20mt., holocristalino, inequigranular, con textura porfídica, plagioclasas crecidas inmersas en masa fundamental verdosa dada la alteración de epidota y clorita, contiene un 75% de plagioclasas, un 4% de cuarzo y un 21% de máficos principalmente hornblenda. Plagioclasas se encuentran alteradas a epidota con intensidad leve a moderada, y clorita alterando a máficos con intensidad moderada. Se encuentra intruyendo cuerpo diorítico. Estos cuerpos exhiben una orientación N-NW.

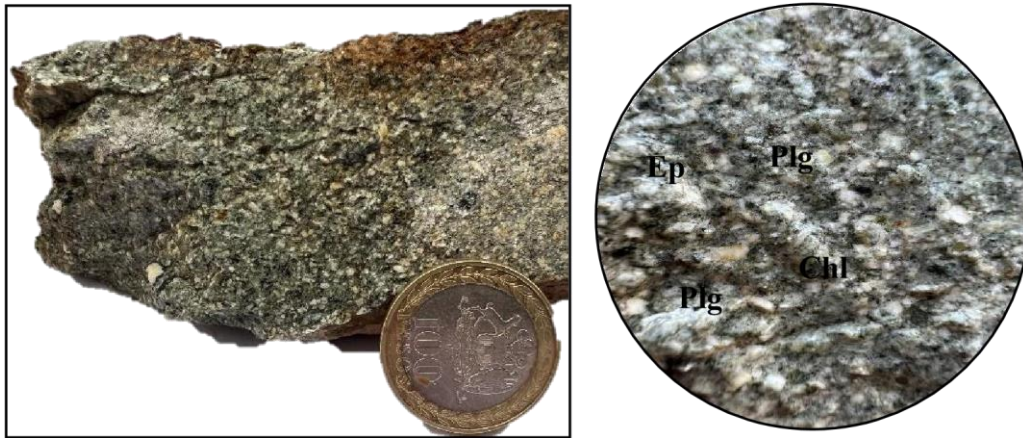


Figura N°23: Muestra de mano de dique microdiorítico porfídico.



Figura N°24: Afloramientos de diques microdioríticos porfídicos (rojos) intruyendo unidad diorítica (rosado).

Diques de microdiorita

Corresponde a cuerpos tabulares con menor espesor variando de 1 a 5 mts. que intruye cuerpo diorítico, muestra de mano holocristalina, equigranular de grano

fino presentan un índice de color oscuro verdoso (mesocrático), con un 36% de máficos, 60% de plagioclasas y menos de un 4% de cuarzo. Estos cuerpos se presentan en cercanías a vetas mineralizadas.

En microscopio se observan plagioclasas con tamaño 0,3 – 1 mm. con textura subhedral a euhedral, cloritas alterando a plagioclasas como también en vetillas. Se observa gran cantidad de arcillas. Estos cuerpos exhiben una orientación N-NE.

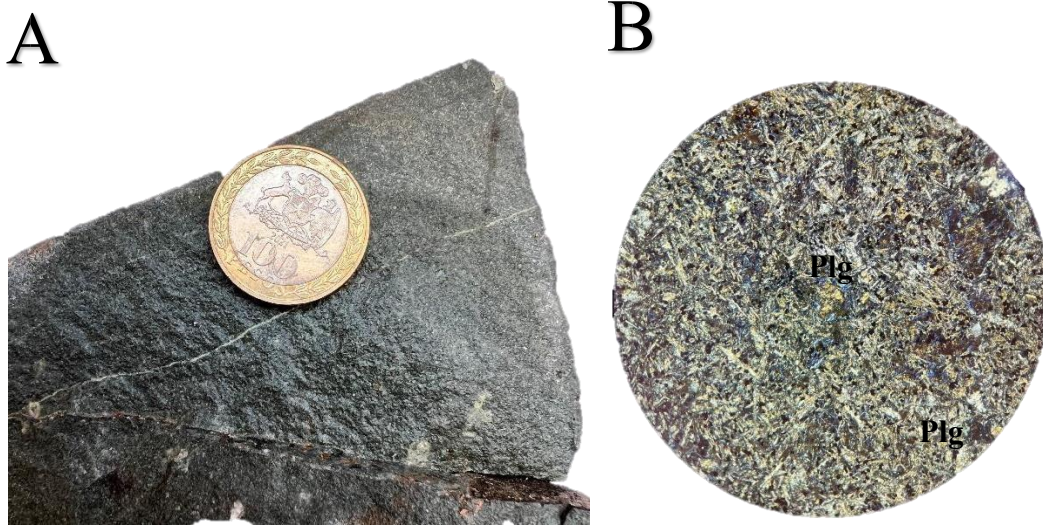


Figura N°25: A) Muestra de mano de dique microdiorita. B) Fotomicrografía de dique microdiorita.

5.2 Mineralización

La mineralización con interés económico presente en mina San Antonio corresponde a vetas con contenido de oro fino y cuerpo con óxidos de cobre como atacamita, brochantita y crisocola, acompañado de magnetita. A continuación, las vetas serán descritas detalladamente.

Es definida como:

a) Veta 1 presenta mineralización de oro fino con cuarzo, en asociación de hematita terrosa como halo de alteración con zonas argilizadas, presenta gran cantidad de *fault gouge*, alunita supérgena, óxidos de hierro (mayormente jarosita) en la zona más lejana al centro de la veta, las intensidades varían de leve a intenso. La veta va variando su potencia, aproximadamente de 40 cm a 2 metros, identificándose 3 zonas, como se observa en figura N°26. Estas zonas son analizadas y descritas macroscópica y microscópicamente en el apartado 5.3. En figura N°27 se muestra un perfil esquemático con idealización y proyección de la veta. La ley obtenida por laboratorio para tal veta es 0,81 ppm.

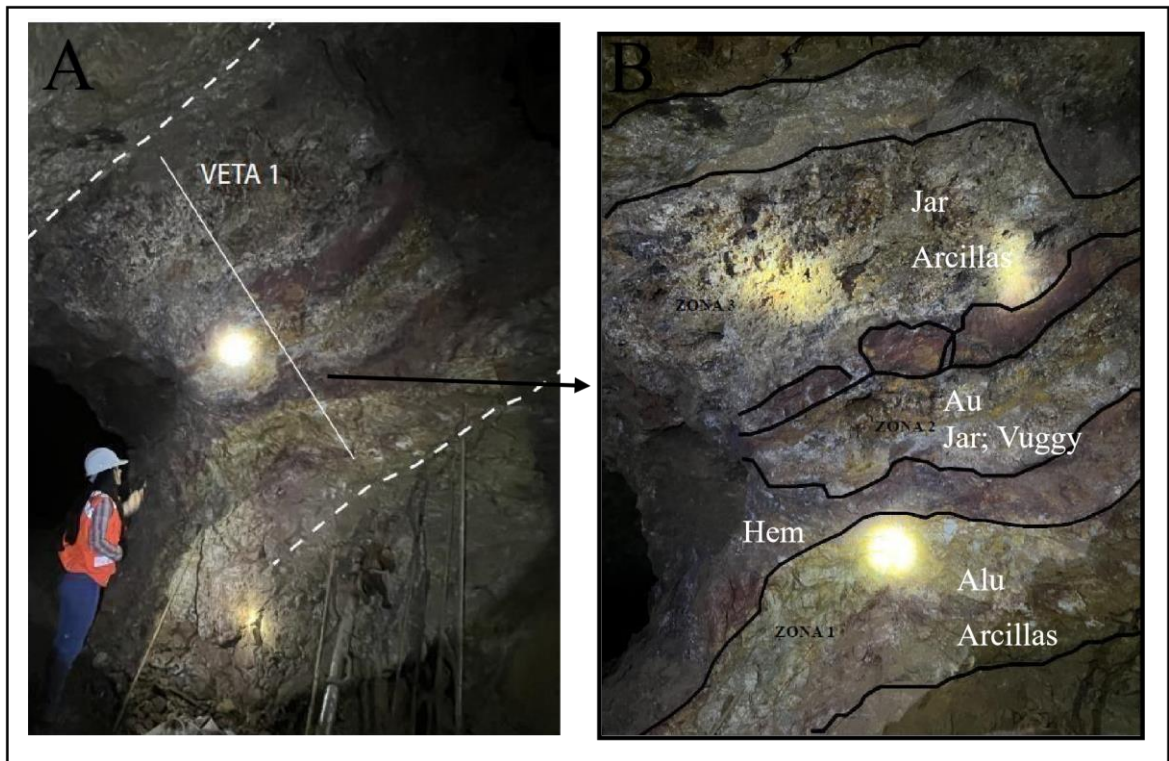


Figura N°26: A) Veta 1 con zonaciones de óxidos de hierro; B) Zoom a zonas características en veta 1.

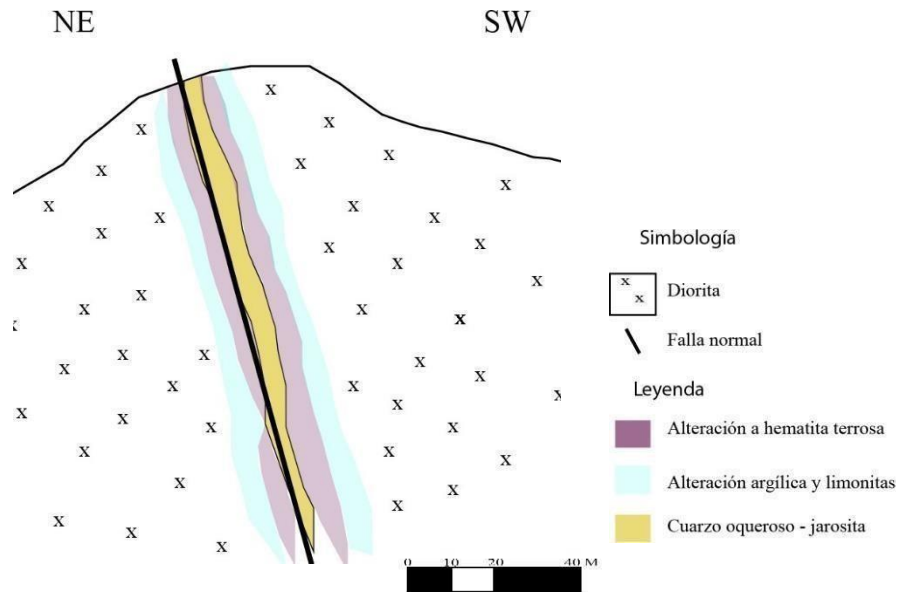


Figura N°27: Esquema de veta 1, con alteraciones y mineralización. Confección propia.

b) Veta 2 presenta un patrón característico, encontrando una zona central de cuarzo oqueroso con hematita especular, como halo intermitente la presencia de hematita terrosa y más lejano al centro de la veta se identifica argilización intensa como se identifican en figura N°28. La veta exhibe una potencia que varía entre 1 a 1.5 metros. Cabe destacar que la mineralización de oro se encuentra tanto en zona central como en la porción de hematita terrosa. En la figura N°29 se muestra un perfil esquemático con idealización y proyección de la veta. Esta veta tuvo una ley obtenida de 3,96 ppm.

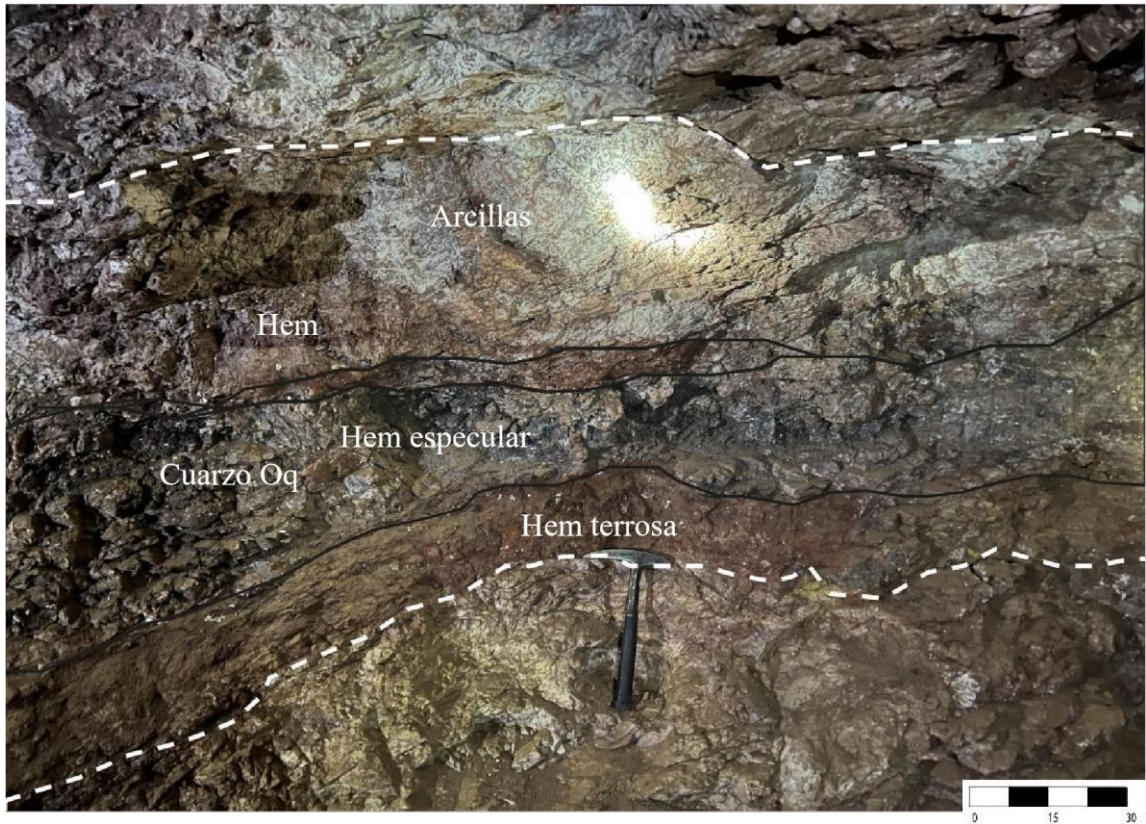


Figura N°28: Veta 2 con zonaciones de óxidos de hierro (hematita) y argilización.

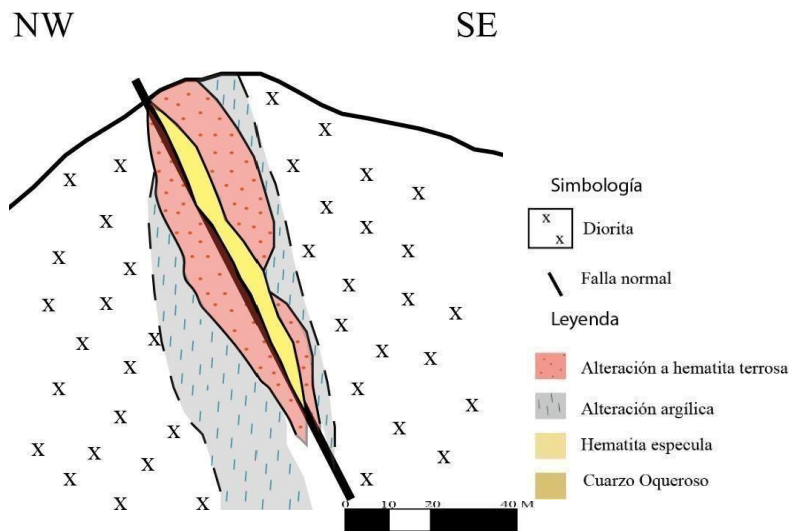


Figura N°29: Esquema de veta 2, con alteraciones y mineralización. Confección propia.

c) La veta 3 se encuentra con mineralización de oro, con leyes de 5,03 ppm, gran concentración de óxidos de hierro, hematita especular, goethita, cuarzo y un área argilizada, como se observa en la figura N°30. La potencia varía entre 80 cm a 1,30 m. No se observa contenido con óxidos de cobre. En este caso, existe localmente un desarrollo de calcita, tanto en vetillas milimétricas como masiva y leve magnetización.

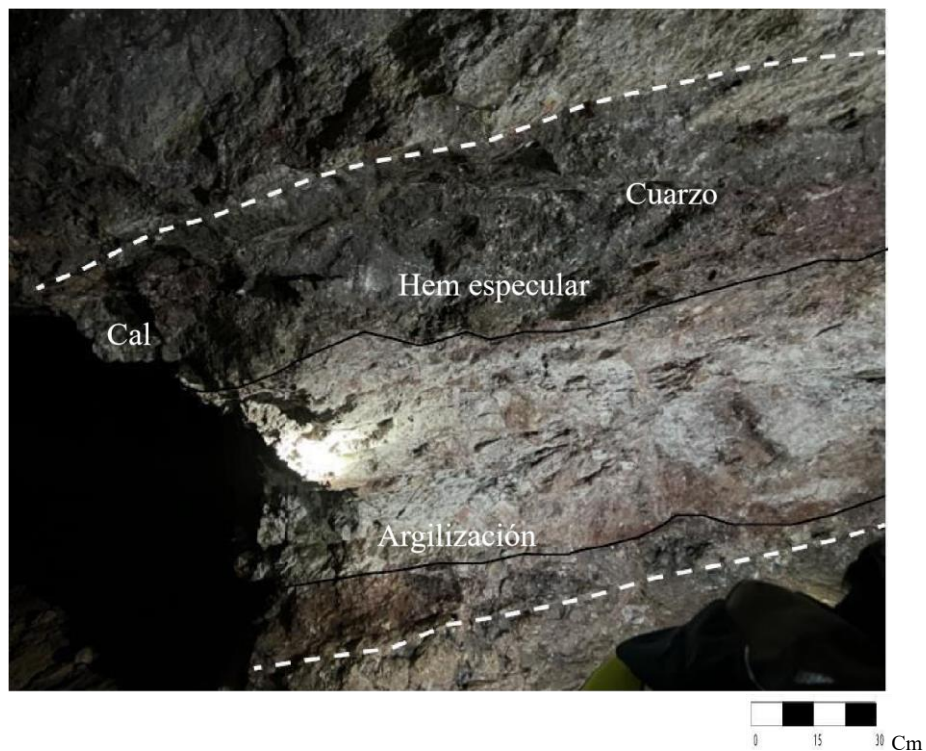


Figura N°30: Veta 3 con mineralización de oro y presencia de óxidos de hierro.

d) La 4ta veta presenta una potencia de 50 a 80 cm de potencia, identificándose hematita terrosa, goethita, cuarzo oqueroso y baja concentración de óxidos de cobre. Esta veta presenta vetillas milimétricas de sílice, siguiendo la orientación de la veta. La ley obtenida para esta veta es de 2,24 ppm. No es relevante la concentración de magnetita y calcita.

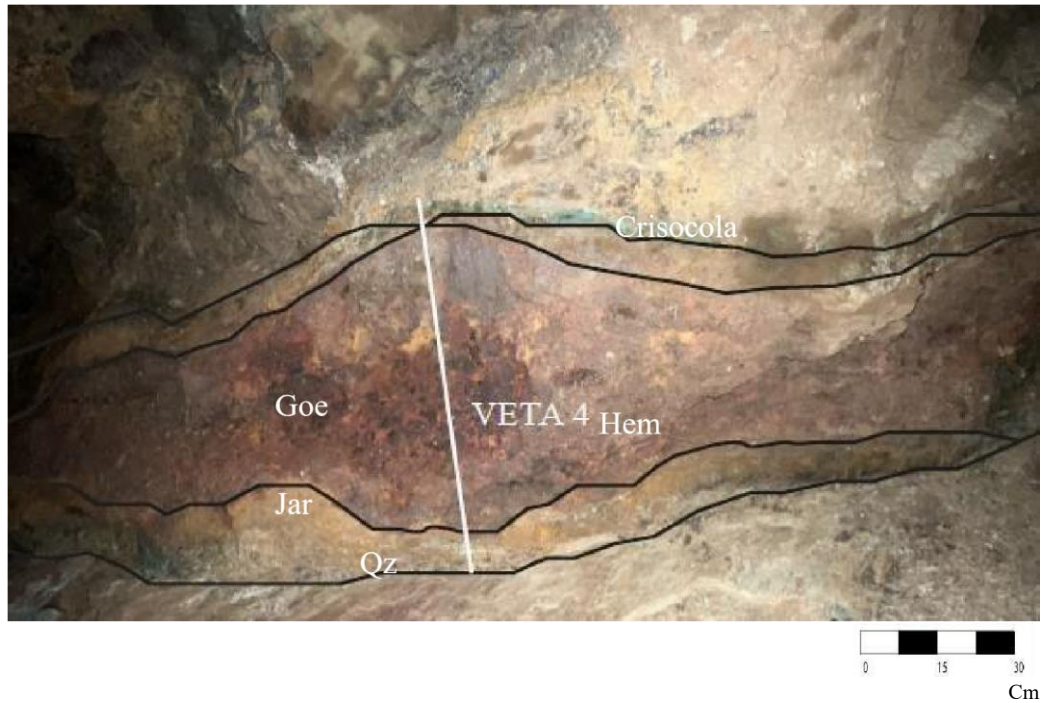


Figura N°31: Veta 4 con mineralización de oro, óxidos de hierro y cobre. Qz: cuarzo; Hem: hematita; Goe: goetitha; Jar: jarosita.

5.2.1 Mineralización de oro

El oro presente se encuentra con tamaño fino, acompañado de minerales de ganga como cuarzo, jarosita, hematita y arcillas, ciertas zonas son más compactas y otras más blandas dado el grado de alteración, en zona 2 y 3 (presentes en veta 1) se concentra dicho mineral de interés (Figura N°32). El magnetismo en esta área es nulo o muy leve, no se observan óxidos de cobre. Se identifican dos patrones característicos de vetas que presentan oro, una asociación es de oro, sílice y hematita especular, por otro lado, una segunda asociación es de oro, cuarzo oqueroso, óxidos de hierro (hematita terrosa y jarosita) como se observa en figura N°33. Estas vetas se encuentran esquematizadas en apartado anterior.

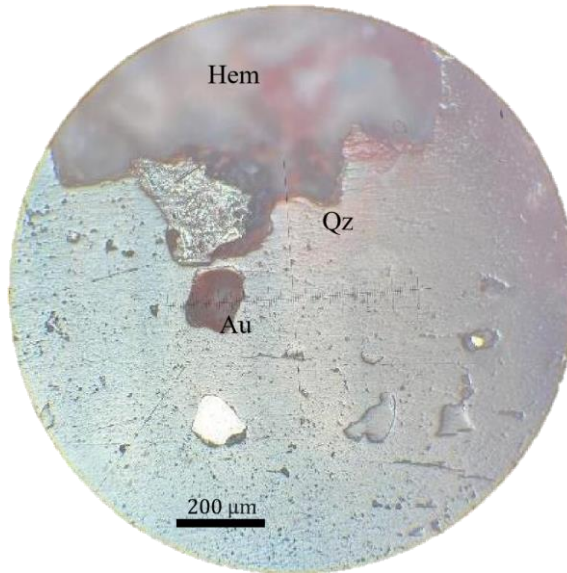


Figura N°32: Fotomicrografía de muestra veta 1, mineralización de oro con ganga de cuarzo, burbuja rellena de óxidos de hierro, aumento x40.

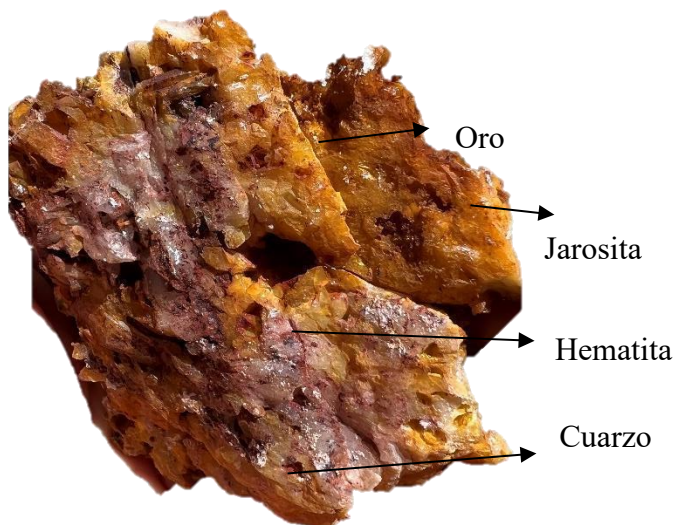


Figura N°33: Muestra de mano que contiene oro en asociación con cuarzo y óxidos de hierro, extraída de veta1

5.2.2 Óxidos de cobre

Los óxidos de cobre encontrados en mina San Antonio son crisocola, ± atacamita, ± brochantita, ± “óxidos negros”. La ocurrencia de la mineralización es a través de vetillas y diseminado, la cual se encuentra acompañada de magnetita con brillo metálico, escasa calcopirita y/o óxidos de hierro, la magnetita presenta un fuerte magnetismo. Las leyes van de 2,6 a 4,8% de cobre total.

La mineralización de cobre exhibe una mayor concentración en la parte basal de las estructuras mineralizadas, variando también en distintas proporciones los óxidos, y su asociación de minerales. En la figura N°36 se identifica atacamita y menor cantidad de crisocola con contenidos importantes de magnetita y puntuales concentraciones de calcopirita. En la figura N°38, se puede apreciar que el contenido de crisocola es más abundante que atacamita y la presencia de magnetita es baja a leve. No se observa calcopirita y se encuentran presentes óxidos de cobre “negros”. En la figura N°34 se observan dos fotomicrografía (A y B), las cuales son del mismo corte pulido, pero diferentes vistas, pudiendo identificarse una asociación mineral de brochantita, magnetita, pirita y goethita.

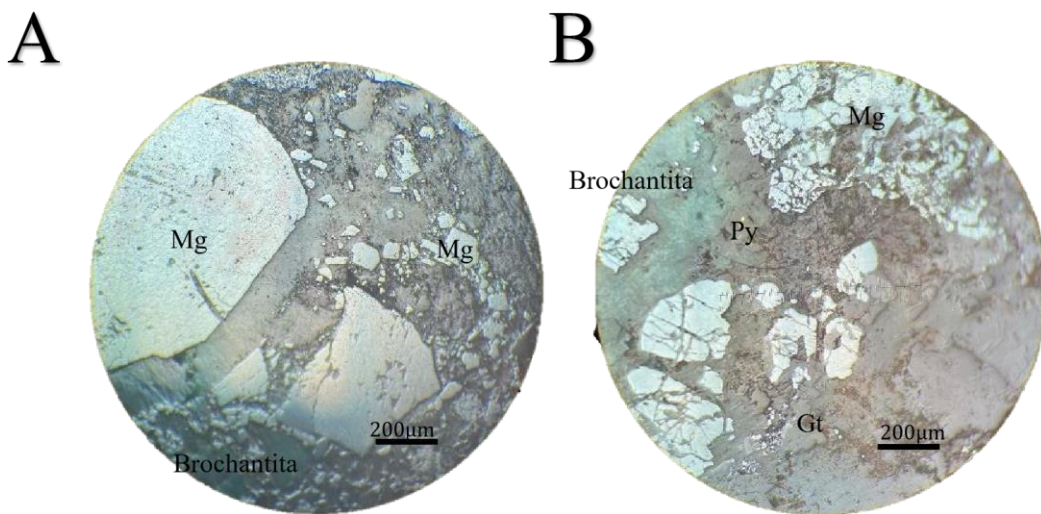


Figura N°34: Fotomicrografía de pulido, muestra de base de veta 1, magnetita con óxidos de cobre. Aumento 10x.

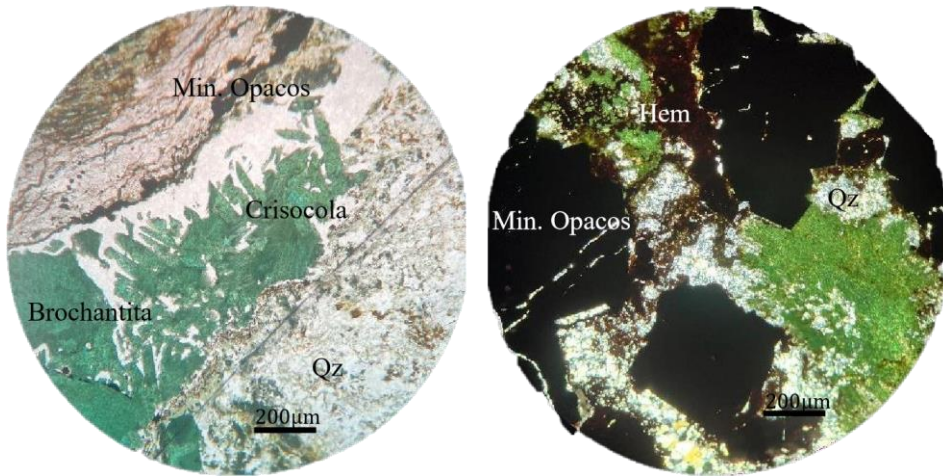


Figura N°35: Fotomicrografía de muestra de veta 1, crisocola, brochantita, hematita y minerales opacos. Aumento x10.

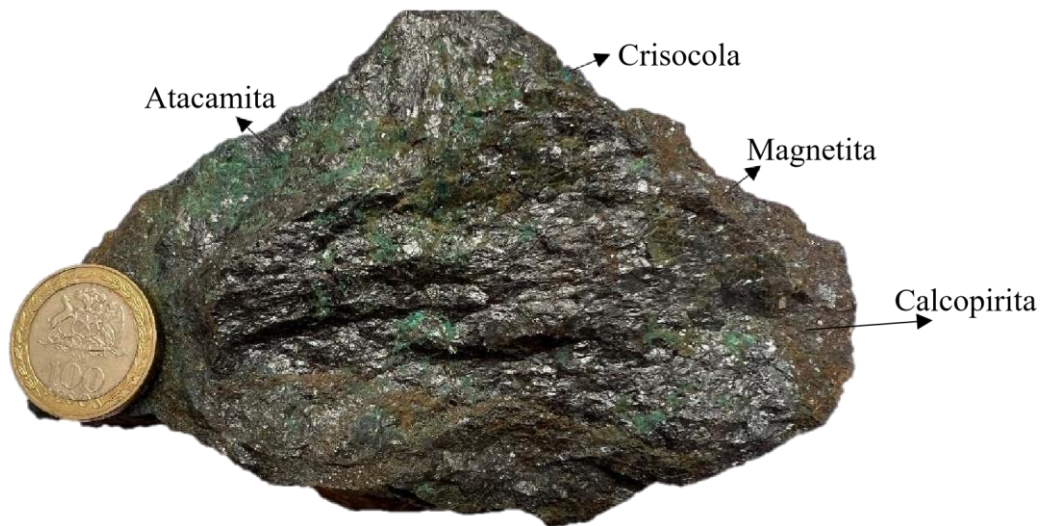


Figura N°36: Mineralización de óxidos de cobre (crisocola y atacamita), se encuentra magnetita y en menor cantidad calcopirita.

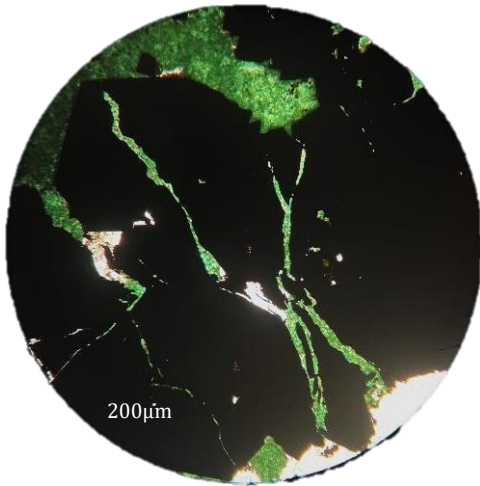


Figura N°37: Fotomicrografía de brochantita cortando minerales opacos.

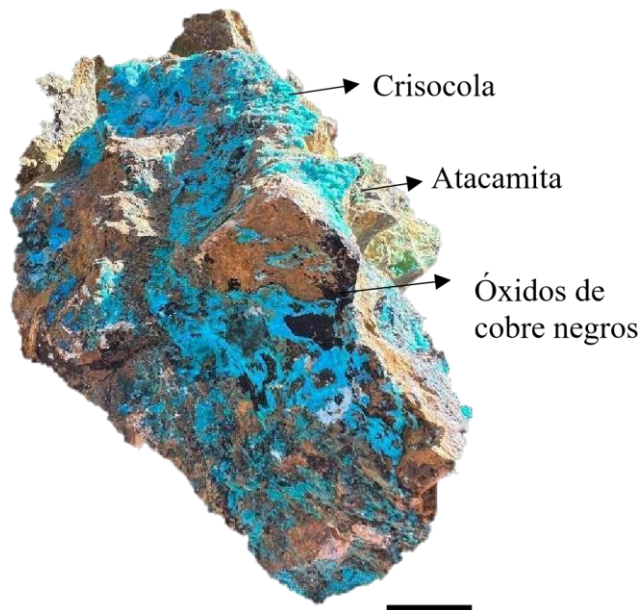


Figura N°38: Muestra de mano con crisocola, óxidos de negros de cobre y atacamita, leve magnetita.

5.3 Alteraciones hidrotermales

Las alteraciones que se identifican en el área de estudio con muestras de mano, tanto en interior mina, exterior mina y zonas aledañas son epidota, clorita, calcita, alunita, sílice, limonitas (jarosita, hematita y goetita), arcillas, cuarzo oqueroso. A continuación, se describen las alteraciones presentes en cada veta y alteraciones presentes en áreas aledañas con mapeo superficial, detallando intensidad y asociación mineralógica como se observaron en terreno, en muestras de mano y en microscopio.

5.3.1 Alteraciones veta 1

En veta 1 las alteraciones son detalladas en tres áreas, como se observa en la figura N°29 área caja piso, caja techo y zona central, en esta veta las alteraciones presentes son óxidos de hierro como hematita, jarosita, goethita, también se encuentra sílice, arcillas y alteración vuggy sílica. A continuación, se describen áreas mencionadas con sus respectivas alteraciones.

Roca de caja piso

Zona representada por jarosita, hematita, arcillas, yeso y alunita. Se logra identificar que la roca de caja afectada por la alteración corresponde a diorita. En la figura N°39 se observan pequeños relictos de roca de caja rodeados por la misma roca afectada por alteración. Para este caso, la jarosita se encuentra de forma masiva, al igual que hematita terrosa. Se identifica además un desarrollo de alteración argílica, la cual consiste fundamentalmente en arcillas, las cuales se desarrollan localmente, asociadas a planos de falla.

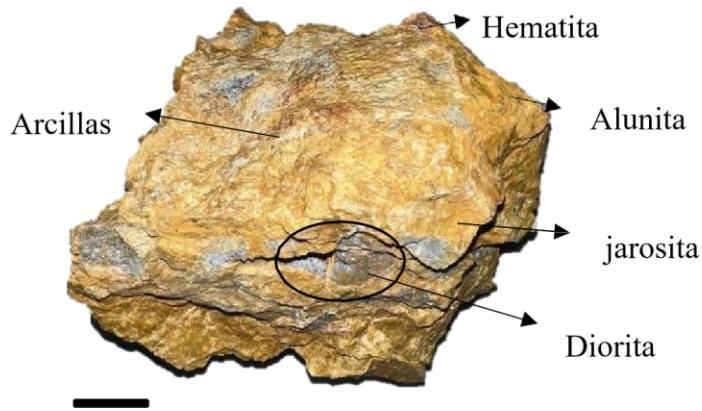


Figura N°39: Muestra de mano de zona 1 (extraída de veta 1), presencia de jarosita, hematita, alunita y arcillas blancas.

Fotomicrografías de caja piso muestra su composición de plagioclasas (0,3- 1mm) con hábito tabular, no se logran identificar maclas, estas plagioclasas se presentan alteradas a arcillas y sericita, con gran intensidad. Por otra parte, se encuentra la formación de cuarzo secundario (1-5 mm) en forma de vetillas. Tanto masa microlítica (compuesta mayormente de plagioclasas) como vetillas de cuarzo se encuentran cortados por hematita y jarosita, identificando su posterioridad, como se observa en figura N°40 A y B.

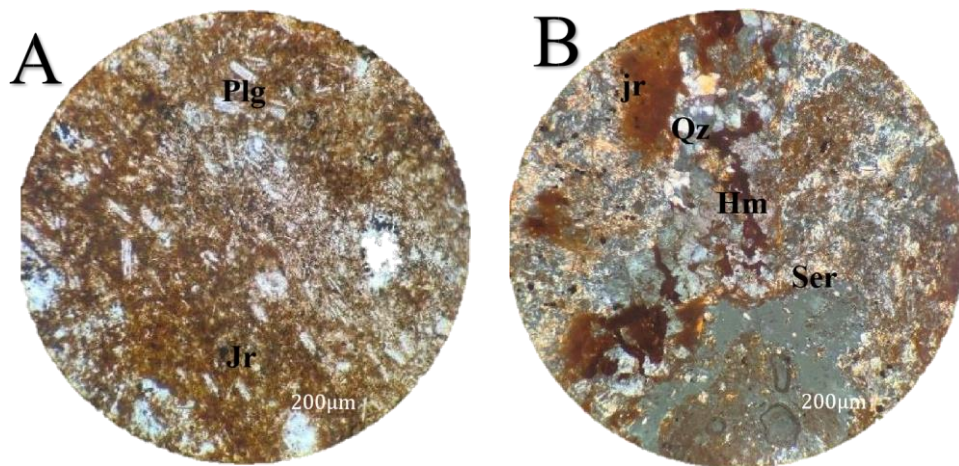


Figura N°40: A) fotomicrografía de zona 1 en Luz Polarizada Plana (LPP) B) fotomicrografía en Nícoles Cruzados (NX). Plg: Plagioclasas; Qz: Cuarzo; Ser: Sericita; Hm: Hematita; Jr: Jarosita.

Roca de zona central

Se caracteriza por la presencia de óxidos de hierro (hematita y goethita), vetillas milimétricas de cuarzo. En este caso, no puede identificarse cuál es la roca de caja, debido a que su textura y mineralogía se encuentra totalmente obliterada por la alteración. Los óxidos de hierro presentan gran intensidad de alteración en esta zona, con modo de ocurrencia masiva. Localmente, se observa el desarrollo de vetillas de cuarzo, las cuales no presentan una dirección preferencial, definiéndose como polidireccionales. Esta zona presenta leve magnetismo.

En la figura N°41 se observa una muestra de mano con gran concentración de hematita, goethita y baja presencia de arcillas.



Figura N°41: Muestra de mano de zona central (extraída de veta 1), presencia de hematita, goethita y arcillas blancas.

Fotomicrografía de zona central en figura N°42, en donde se identifican cuarzos secundarios subhedrales, variando su tamaño de 0,5 a 2mm, presencia de feldespato potásico con tamaños de hasta 6mm, el que es alterado por clorita y epidota. Cristales fibrosos con tamaño menor a 1mm corresponden a actinolita, su concentración es baja, se puede también observar hematita en distintas áreas del corte.

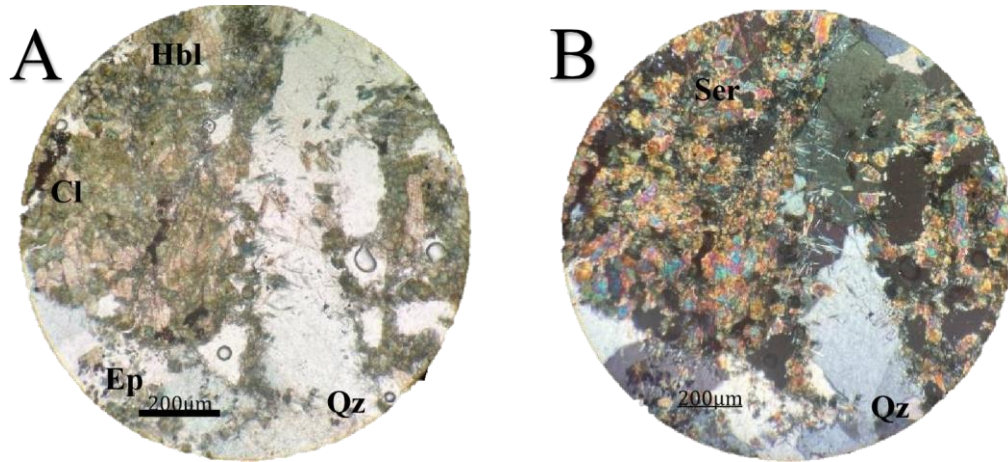


Figura N°42: A) fotomicrografía de zona 2 en Luz Polarizada Plana (LPP) B) fotomicrografía en Nícoles Cruzados (NX).

Roca caja techo

La tercera muestra analizada de veta 1 corresponde mayormente a cuarzos con textura mosaico, con tamaño variado de cristales de 0,5 a 6 mm y en menor concentración feldespatos potásicos alterados con arcillas y cloritas, presentando baja birrefringencia y colores de interferencia bajos.

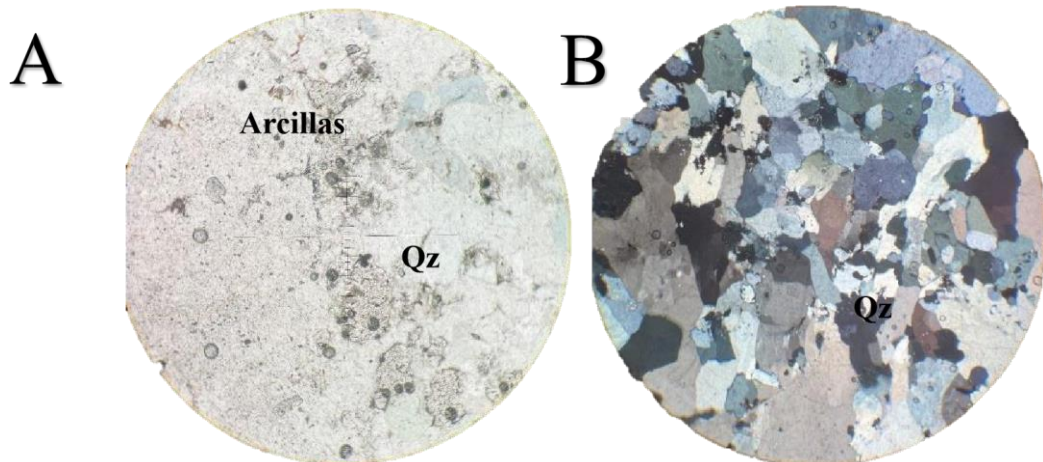


Figura N°43: A) fotomicrografía de caja techo en Luz Polarizada Plana (LPP) B) fotomicrografía en Nícoles Cruzados (NX).

Alteración argílica avanzada

Se presentan en interior mina. Este se encuentra en 3 de las vetas presentes, en veta 1, en forma de cuarzo oqueroso, el cual es acompañado de alunita. Estos a la vez son acompañados con óxidos de hierro, en las 3 vetas la presencia de óxidos de hierros es recurrente a diferencia de la alunita. En veta 4 no se presenta dicha alteración.

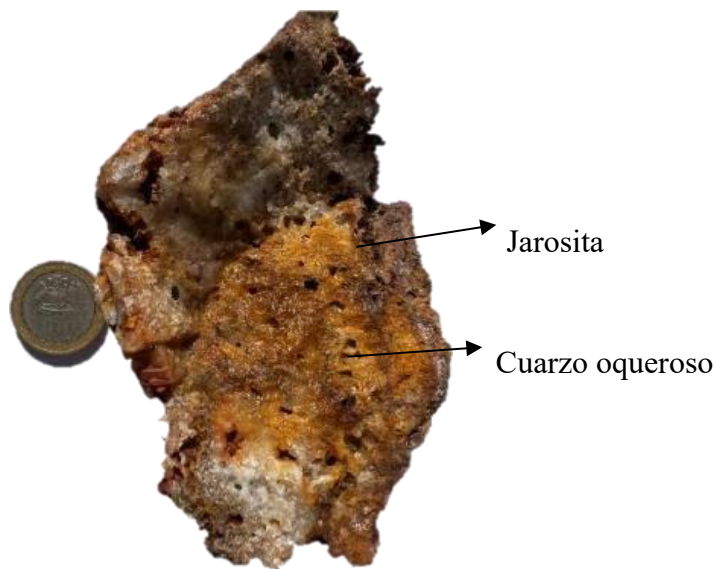


Figura N°44: Muestra de mano con cuarzo oqueroso y óxidos de hierro. Extraída de veta 1.

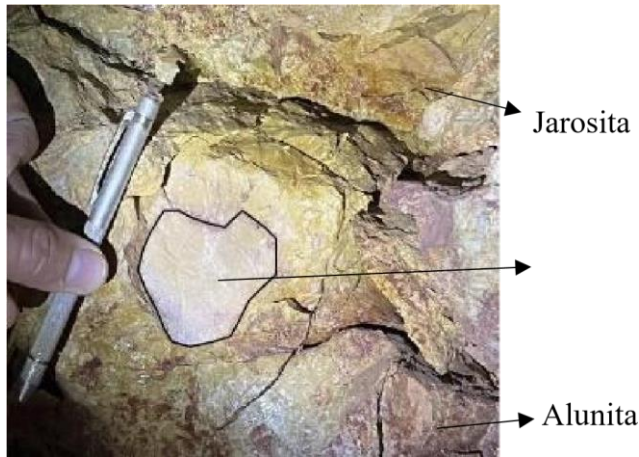


Figura N°45: Muestra de mano con alunita supérgeno, acompañado con hematita y jarosita. Extraída de veta 1.

5.3.2 Alteraciones veta 2

En veta 2 las alteraciones presentan un patrón característico con una zona central de cuarzo con hematita especular, como se mencionó anteriormente presenta un halo intermitente de hematita terrosa, y una zona argilizada con gran intensidad alejada de la zona central. A continuación, se detallan alteraciones mencionadas.

Alteración de hematita

Se identifica hematita especular como también hematita terrosa. Este óxido se encuentra asociado a cuarzo, goethita y jarosita en esta veta. La hematita especular se observa en vetillas y diseminado, la potencia de estas vetillas son centimétricas. En figura N°46 se registra muestra de mano con hematita especular con porcentaje visual de un 20%-30%. Hematita especular también se identifica en veta 3

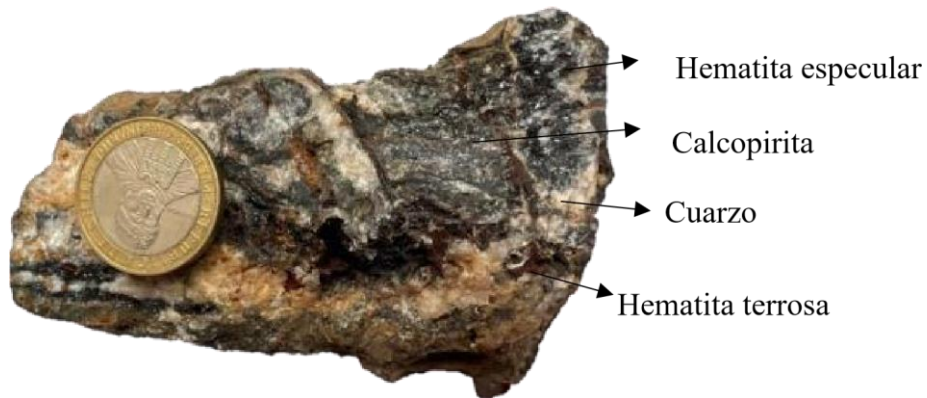


Figura N°46: Muestra de mano con hematita especular, cuarzo, calcopirita y hematita terrosa.

Alteración argílica

Se presenta en veta 2 y 3, y en exterior mina, abarca pequeñas zonas hacia el NW de mina San Antonio, afectando a rocas del intrusivo diorítico, ocurriendo con gran intensidad. Estas corresponden a arcillas blancas. En interior mina en ambas vetas se presenta con menor intensidad de alteración en comparación a zonas encontradas en exterior mina.

5.3.3 Alteraciones veta 3

Las alteraciones presentes en veta 3 corresponden a cuarzo con hematita especular (descritas anteriormente), calcita y argilización (en comparación con veta 2 la argilización presenta una mayor potencia). La presencia de calcita es característica de esta veta

Alteración de calcita

Calcita se encuentra asociada con óxidos de cobre (crisocola y brochantita), magnetita (con magnetismo de moderado a intenso), micas, actinolita y bajo contenido de jarosita. La calcita se encuentra cristalizada como también de forma masiva. En figura N°47 se observa calcita con magnetita y brochantita, y en figura N°48 se observa con microscopio calcita en contacto con dique microdiorítico.

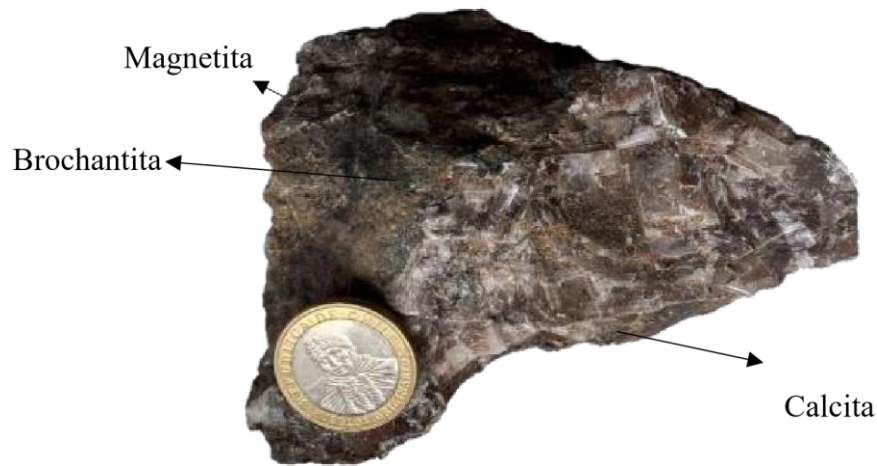


Figura N°47: Muestra de mano con presencia de calcita, magnetita y óxidos de cobre.

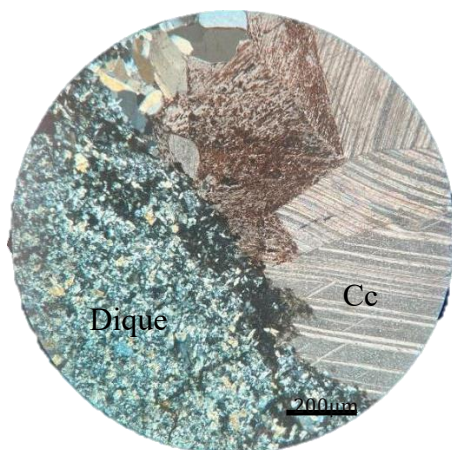


Figura N°48: Fotomicrografía de calcita en contacto con dique microdiorítico, zoom 10x.

5.3.4 Alteraciones veta 4

En veta 4 las alteraciones presentes se caracterizan por óxidos de hierro y cuarzo, como se mencionó anteriormente los óxidos de hierro tanto hematita, jarosita, goethita se encuentran en las 4 vetas, con distintos porcentajes en su concentración, al igual que el cuarzo, estos serán descritos a continuación.

Alteración de óxidos de hierro

Se identifica hematita, jarosita y goethita, todas con distintos porcentajes de concentración, se encuentran en las 4 vetas del área en estudio, en veta 1 se cuantifica en mayor proporción jarosita y hematita terrosa. En veta 2 El grado de intensidad de esta alteración es moderada a intensa. Existen zonas compuestas completamente por óxidos de hierro. Los óxidos de hierro se encuentran con distintos grados de dureza, y se presentan también en exterior mina. En zonas aledañas a mina en estudio. En figura N°49 se observa muestra de mano con óxidos de hierro extraída de veta 4.

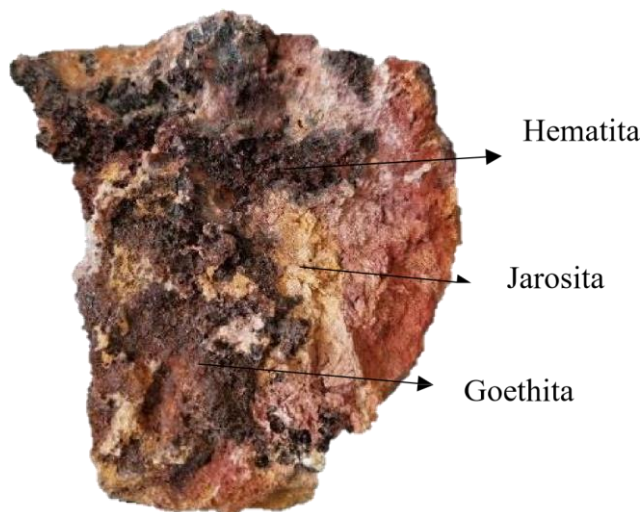


Figura N°49: Muestra de mano de óxidos de hierro, extraída de veta 4.

Alteración de sílice

La sílice se presenta en toda el área de estudio, tanto en interior mina y en exterior, en forma de vetillas polidireccionales, masivo y cristalizado con sistema hexagonal. Las vetillas no sobrepasan potencias de 15 cm, en figura N°50 se evidencia cristalización de sílice acompañado de óxidos de hierro.

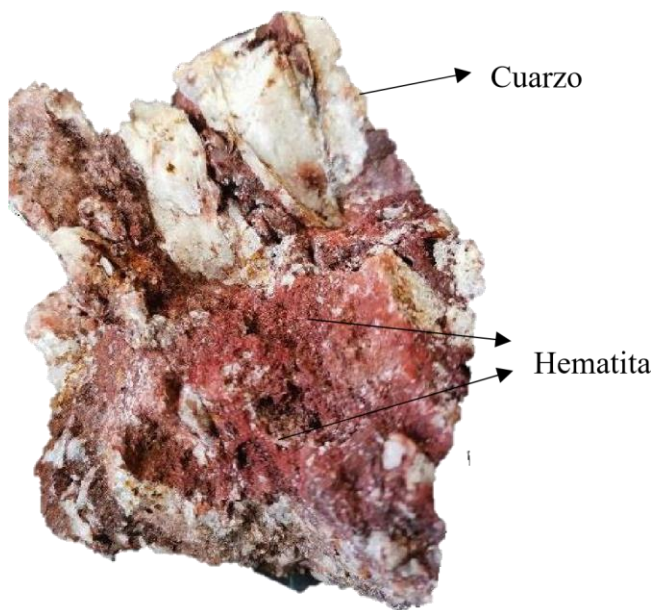


Figura N°50: Muestra con cristalización de cuarzo y óxidos de hierro.

Adicionales a las descripciones ya realizadas correspondientes a cada veta, se logra identificar actinolita, clorita y epidota, estas no son asociadas a alguna veta dado que la presencia de epidota se encuentra mayormente caracterizada en roca de caja, al igual que clorita. Por otra parte, la actinolita está asociada con la mineralización de magnetita y óxidos de cobre, no vetas.

Alteración de actinolita

La actinolita presente se encuentra en interior mina con habito fibroso, está asociada con óxidos como brochantita, atacamita, crisocola y magnetita. No se

observa macroscópicamente calcita, pero en muestras si reacciona a HCL. En figura N°51 se observa actinolita, crisocola y baja concentración de óxidos de hierro (hematita).

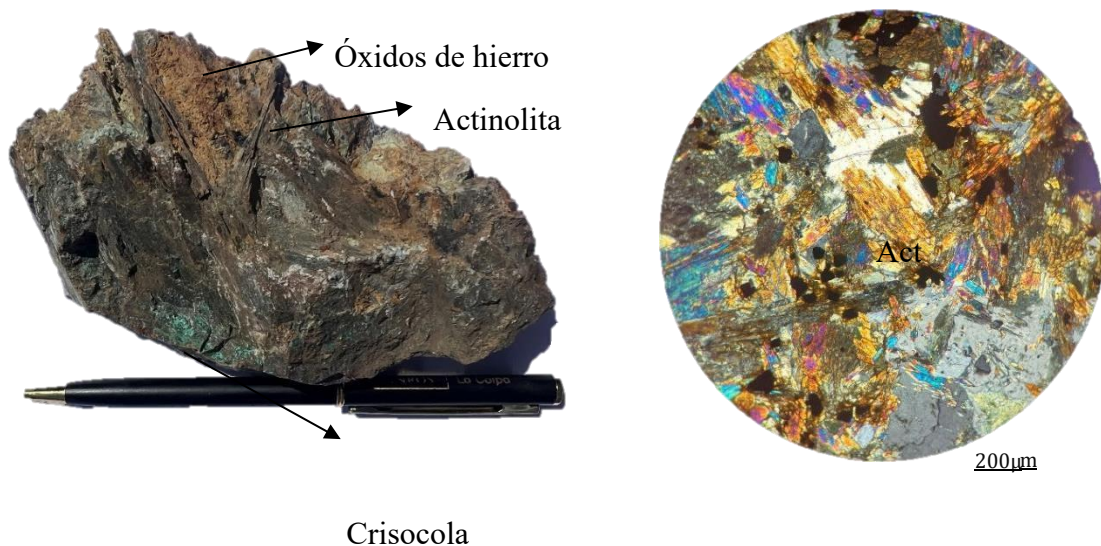


Figura N°51: A) Muestra de mano con actinolita, óxidos de hierro y cobre. B) Fotomicrografía extraída de interior mina. Con zoom 10x.

Alteración de clorita-epidota

Se presentan con variación en sus intensidades, encontrando zonas con intensidad leve, moderada hasta intensa, en roca de caja diorítica se identifican epidotas alterando a feldespatos y por otro lado cloritas alterando a máficos, también se encuentra presente tal alteración en diques microdioríticos porfídicos, en interior mina se identifica en fotomicrografías realizadas en veta 1 zona central.

5.4 Levantamiento geológico mina interior

Como se ha descrito anteriormente en apartado mineralización, las menas encontradas son oro y óxidos de cobre. El oro se encuentra principalmente en vetas,

donde la mejor ley recae en veta 3, para los óxidos de cobre, como lo es la crisocola, se encuentra mayormente en forma diseminada, lo que es la atacamita y brochantita se encuentra cristalizada y asociada a magnetita.

En el caso de las alteraciones se encuentran óxidos de hierro, calcitización, actinolitización, eptotización, cloritización, silicificación y alteración argílica avanzada.

Presentan distintas intensidades, modo de ocurrencia y concentración. En figura N°52 se observa mapa con mineralización y alteraciones presentes en interior mina.

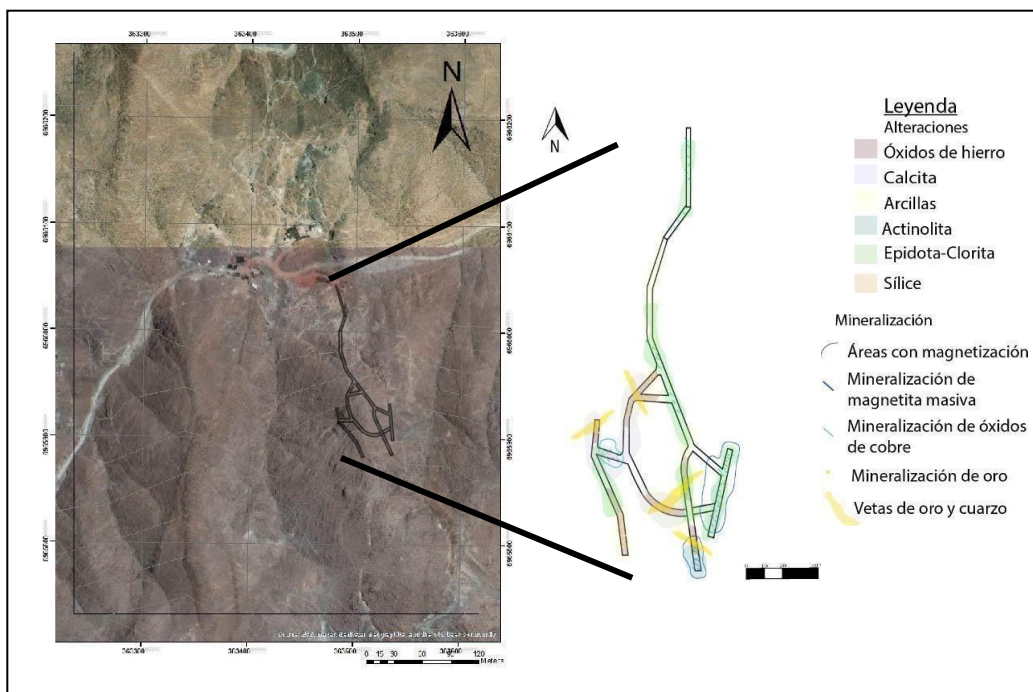


Figura N°52: Mapa con mineralización y alteraciones presentes en interior mina. Elaboración propia.

5.5 Estructuras

Se pueden identificar 2 sistemas estructurales importantes en el área de estudio, estructuras NNW-SSE y NE-SW. Siendo éstos, planos de fallas, vetas y diques, los diques microdioríticos tienen su tendencia N-NE, en cambio los diques

microdioríticos con textura porfídica tendencia N-NW. Se identifica que diques N-NW son cortados por diques N-NE, observándose en zona SW del área de estudio. Vetas presentes en mina San Antonio también presentan un control estructural similar a lo definido en exterior mina, se precisan 4 vetas en donde 2 de ellas presentan control NE y las otras 2 NW. Veta 1 se define con control N30E;41NW, veta 2 N16W;29SW, veta 3 N11E;25NW y veta 4 N19W;11NE.

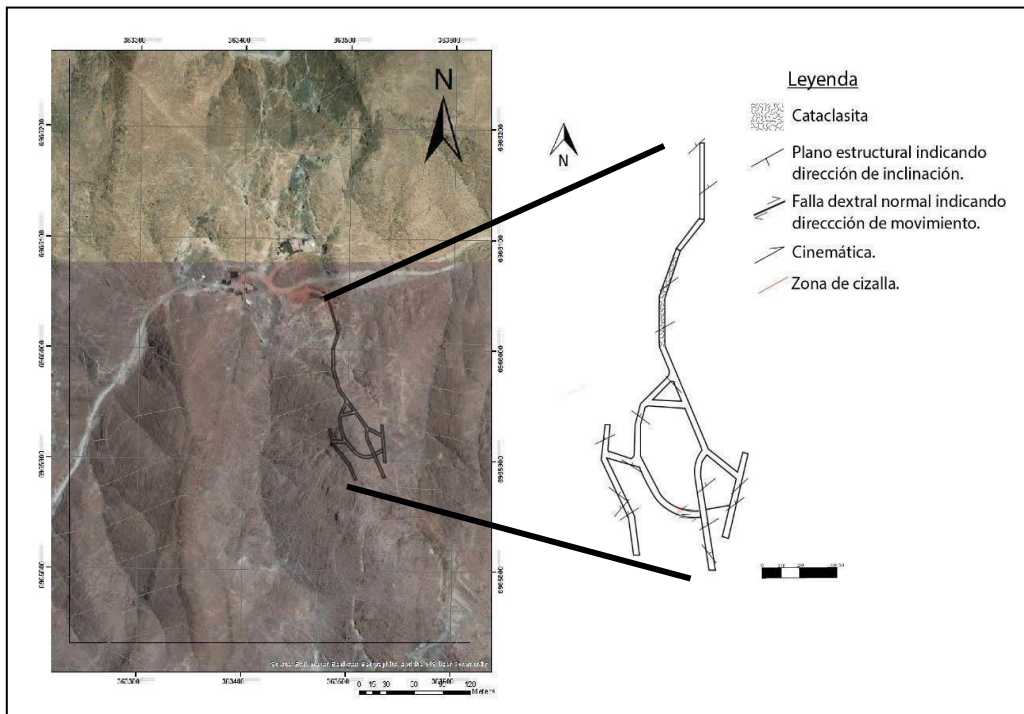


Figura N°53: Mapa estructural en interior mina. Elaboración propia.

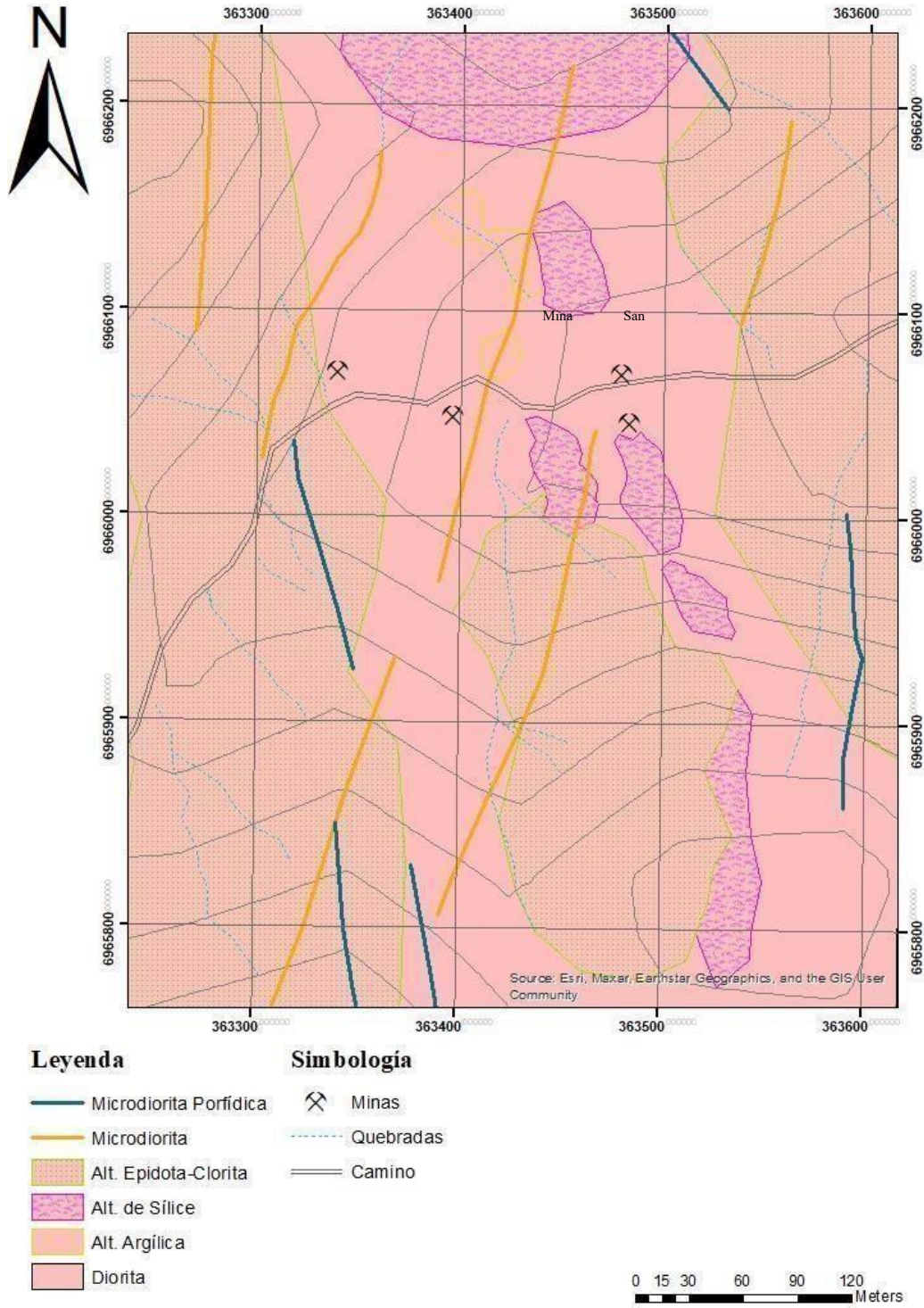


Figura N°54: Mapa geológico de área de estudio y mina San Antonio.

VI ANALISIS GEOQUIMICOS REALIZADOS MEDIANTE XRF

A continuación, se detallan leyes de oro obtenidas por laboratorio de muestras conseguidas de las 4 vetas descritas en mina San Antonio y también análisis de fluorescencia de rayos X a contramuestras, aplicándoles a cada una de ellas 3 metodologías distintas, la primera metodología realizada en contramuestras es el “cacho”, segunda utilizando una canaleta con 10° de inclinación y en la tercera metodología se utiliza misma canaleta, pero con 5° grados de inclinación. Cabe recalcar que estas muestras fueron obtenidas y analizadas con enfoque principal en oro. A continuación, se detalla el mineral de interés mencionado como también análisis de cobre y hierro.

6.1 Elementos de interés Oro

Los primeros resultados geoquímicos corresponden a leyes obtenidas de cada veta, correspondiendo a:

Las leyes obtenidas de oro entregadas por laboratorio (ppm).

Veta 1	0,81
Veta 2	3,96
Veta 3	5,03
Veta 4	2,24

Los resultados con análisis XRF para la muestra veta 2 con las tres metodologías corresponden a:

A	0%
---	----

B	0,001- 0,002%
C	0%
Veta 2	0%

Los resultados con análisis XRF para la muestra veta 3 con las tres metodologías corresponden a:

A	0,001%
B	0,001%
C	0%
M 2	0%

Los resultados con análisis XRF para la muestra veta 4 con las tres metodologías corresponden a:

A	0%
B	0%
C	0%
M 3	0%

Los resultados con análisis XRF para la muestra veta 1 con las tres metodologías corresponden a:

A	0%
B	0%
C	0,001; 0,005%
M 4	0,002%

Como se mencionó anteriormente se realiza análisis de fluorescencia de rayos X a contramuestras entregadas de laboratorio, realizando en total 32 análisis. A continuación, en la tabla N°7 detalla los elementos analizados.

	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	S	Cl	K2O	CaO	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co
3713	0,000	1,811	20,643	0,198	0,361	0,195	0,793	1,109	0,420	0,092	0,079	0,046	28,423	0,000
3715	0,000	1,640	17,914	0,175	0,340	0,112	0,664	0,910	0,514	0,078	0,037	0,000	49,081	0,088
3716	0,000	1,349	2,643	0,115	0,228	0,131	0,118	0,665	0,000	0,114	0,000	0,091	46,008	0,173
3717	2,492	1,445	2,830	0,150	0,318	0,131	0,127	0,691	0,031	0,160	0,027	0,093	47,281	0,329
3718	0,000	1,134	12,348	0,209	0,380	0,177	0,048	0,496	0,000	0,057	0,057	0,101	41,113	0,044
3720	0,000	1,390	34,097	0,272	0,335	0,150	0,527	0,469	0,299	0,029	0,059	0,035	20,302	0,000
3721	0,000	1,280	34,314	0,138	0,264	0,118	0,491	0,468	0,254	0,008	0,036	0,041	20,911	0,000
3722	0,000	2,430	16,802	0,184	0,669	0,617	0,630	1,410	0,365	0,087	0,083	0,056	31,835	0,000
3724	0,000	1,785	2,782	0,108	0,219	0,289	0,139	0,679	0,000	0,115	0,000	0,101	47,450	0,364
3725	0,000	1,592	2,736	0,296	0,449	0,239	0,188	0,560	0,001	0,172	0,031	0,000	88,411	0,241
3726	2,288	1,724	3,026	0,122	0,215	0,263	0,151	0,672	0,000	0,112	0,000	0,102	47,588	0,419
3727	0,000	0,637	15,204	0,130	0,270	0,395	0,070	0,541	0,000	0,023	0,002	0,100	37,981	0,000
3728	0,000	0,658	16,158	0,127	0,271	0,292	0,061	0,532	0,000	0,006	0,000	0,097	38,122	0,004
3729	1,831	10,502	43,632	0,871	0,118	0,216	1,536	3,045	1,618	0,029	0,000	0,605	8,034	0,011
3730	0,000	1,583	31,749	0,242	0,532	0,467	0,675	0,762	0,252	0,031	0,073	0,037	20,413	0,000
3731	0,000	1,441	32,475	0,137	0,437	0,537	0,679	0,769	0,224	0,013	0,043	0,044	20,543	0,000
3732	0,000	1,789	20,856	0,229	0,422	0,383	0,856	1,205	0,420	0,096	0,073	0,056	29,532	0,000
3733	2,095	1,811	3,426	0,158	0,376	0,292	0,167	0,749	0,062	0,179	0,025	0,088	47,355	0,398
3734	3,143	1,653	3,360	0,099	0,306	0,205	0,145	0,726	0,000	0,126	0,000	0,105	47,426	0,402
3735	0,000	1,482	3,263	0,107	0,305	0,264	0,135	0,737	0,000	0,126	0,000	0,102	46,845	0,292
3736	0,000	1,079	16,822	0,199	0,393	0,300	0,067	0,543	0,000	0,052	0,046	0,100	38,910	0,069
3737	0,000	0,881	17,264	0,105	0,351	0,222	0,053	0,611	0,000	0,010	0,000	0,106	38,735	0,028
3738	0,000	1,667	32,274	0,246	0,390	0,365	0,690	0,572	0,269	0,034	0,078	0,040	21,573	0,000
3739	0,000	1,646	32,323	0,262	0,392	0,363	0,654	0,554	0,275	0,035	0,075	0,039	21,181	0,000
3740	0,000	1,775	35,267	0,149	0,205	0,044	0,769	0,445	0,241	0,024	0,060	0,046	21,279	0,000
3741	1,672	1,581	27,931	0,155	0,226	0,084	0,619	0,391	0,196	0,013	0,030	0,032	16,466	0,000
3742	3,097	1,106	20,059	0,242	0,311	0,068	0,072	0,427	0,000	0,047	0,046	0,095	38,318	0,135
3743	0,000	0,660	20,213	0,134	0,227	0,037	0,051	0,430	0,000	0,008	0,000	0,112	37,845	0,078
3744	2,434	1,163	3,811	0,097	0,140	0,016	0,121	0,540	0,000	0,123	0,000	0,101	46,575	0,297
3745	0,000	1,387	4,165	0,122	0,182	0,000	0,140	0,577	0,000	0,137	0,000	0,102	47,415	0,278
3746	0,000	2,381	24,756	0,170	0,176	0,102	0,902	1,089	0,443	0,092	0,080	0,057	29,661	0,000
3747	0,000	2,198	24,660	0,123	0,207	0,136	0,902	1,073	0,433	0,068	0,037	0,063	29,548	0,000

	Ni	Cu	Zn	As	Se	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Rh	Pd	Ag
3713	0,009	0,096	0,002	0,000	0,002	0,006	0,000	0,000	0,004	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000
3715	0,000	0,104	0,000	0,000	0,002	0,012	0,005	0,000	0,003	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000
3716	0,000	1,015	0,002	0,000	0,005	0,027	0,000	0,000	0,000	0,000	0,053	0,000	0,000	0,000
3717	0,027	0,935	0,001	0,000	0,003	0,026	0,000	0,000	0,003	0,000	0,047	0,000	0,000	0,000
3718	0,019	0,079	0,003	0,000	0,000	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,042	0,000	0,000	0,000
3720	0,012	0,015	0,003	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,003	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000
3721	0,003	0,011	0,003	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,002	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000
3722	0,007	0,139	0,010	0,000	0,003	0,008	0,000	0,000	0,005	0,000	0,013	0,000	0,000	0,000
3724	0,014	0,957	0,006	0,000	0,003	0,026	0,000	0,000	0,002	0,000	0,048	0,000	0,000	0,000
3725	0,001	0,806	0,000	0,000	0,003	0,034	0,005	0,000	0,000	0,000	0,041	0,000	0,000	0,002
3726	0,025	0,909	0,004	0,000	0,003	0,026	0,000	0,000	0,000	0,000	0,048	0,000	0,000	0,000
3727	0,000	0,090	0,003	0,000	0,000	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,048	0,000	0,000	0,000
3728	0,013	0,091	0,004	0,000	0,000	0,013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,044	0,000	0,000	0,000
3729	0,002	0,069	0,004	0,006	0,000	0,017	0,036	0,005	0,026	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000
3730	0,007	0,010	0,005	0,000	0,001	0,003	0,000	0,000	0,002	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
3731	0,009	0,011	0,006	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,002	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
3732	0,011	0,092	0,002	0,000	0,003	0,006	0,000	0,000	0,005	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000
3733	0,024	1,003	0,002	0,000	0,004	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000	0,053	0,000	0,000	0,000
3734	0,018	0,958	0,004	0,000	0,002	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000	0,051	0,000	0,000	0,000
3735	0,022	0,989	0,002	0,000	0,004	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000	0,052	0,000	0,000	0,000
3736	0,021	0,087	0,002	0,000	0,000	0,013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,042	0,000	0,000	0,000
3737	0,020	0,092	0,004	0,000	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,043	0,000	0,000	0,000
3738	0,012	0,012	0,003	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,002	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
3739	0,012	0,012	0,003	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,003	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
3740	0,010	0,012	0,002	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
3741	0,007	0,010	0,002	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3742	0,014	0,092	0,002	0,000	0,002	0,013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,043	0,000	0,000	0,000
3743	0,017	0,094	0,002	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,042	0,000	0,000	0,000
3744	0,014	1,065	0,001	0,000	0,005	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000	0,058	0,000	0,000	0,000
3745	0,016	1,048	0,000	0,000	0,003	0,024	0,000	0,000	0,002	0,000	0,054	0,000	0,000	0,000
3746	0,016	0,103	0,002	0,000	0,003	0,007	0,000	0,000	0,005	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000
3747	0,010	0,099	0,002	0,000	0,003	0,007	0,000	0,000	0,005	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000

	Cd	Sn	Sb	Ba	La	Ce	Hf	Ta	W	Pt	Au	Hg	Tl	Pb
3713	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,020
3715	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009
3716	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,086
3717	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,077
3718	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,052
3720	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,013
3721	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,010
3722	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,028
3724	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,080
3725	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,029	0,020
3726	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,078
3727	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,048
3728	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,048
3729	0,000	0,002	0,000	0,062	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,005
3730	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,009
3731	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,010
3732	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,021
3733	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,071
3734	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,071
3735	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,071
3736	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,044
3737	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,044
3738	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012
3739	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009
3740	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011
3741	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008
3742	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,046
3743	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,049
3744	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,073
3745	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,074
3746	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,024
3747	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,022

	Bi	Th	U
3713	0,013	0,000	0,000
3715	0,013	0,000	0,004
3716	0,070	0,000	0,000
3717	0,063	0,000	0,000
3718	0,041	0,000	0,000
3720	0,007	0,000	0,000
3721	0,004	0,000	0,000
3722	0,015	0,000	0,000
3724	0,068	0,000	0,000
3725	0,000	0,003	0,000
3726	0,061	0,000	0,000
3727	0,037	0,000	0,000
3728	0,034	0,000	0,000
3729	0,000	0,000	0,000
3730	0,005	0,000	0,000
3731	0,005	0,000	0,000
3732	0,012	0,000	0,000
3733	0,060	0,000	0,000
3734	0,059	0,000	0,000
3735	0,062	0,000	0,000
3736	0,035	0,000	0,000
3737	0,030	0,000	0,000
3738	0,007	0,000	0,000
3739	0,005	0,000	0,000
3740	0,006	0,000	0,000
3741	0,003	0,000	0,000
3742	0,032	0,000	0,000
3743	0,032	0,000	0,000
3744	0,068	0,000	0,000
3745	0,064	0,000	0,000
3746	0,012	0,000	0,001
3747	0,014	0,000	0,000

Tabla N°7: Elementos analizados por equipo de fluorescencia de rayos X a 32 contramuestras.

Se realiza un estudio estadístico básico como se muestra en la tabla N°7, entregando media, mediana, mínimo y máximo.

Variable	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3
Au	32	0	0,000469	0,000180	0,001016	0,000000	0,000000	0,000000	0,001000
Variable	Máximo								
Au	0,005000								

Tabla N°8: Estadística descriptiva para Au. de contramuestras.

Las concentraciones entregadas por fluorescencia de rayos X para el oro son muy bajas, el rango varía entre 0,001-0,005. El histograma de la figura N°55 muestra que la mayor cantidad de datos se encuentran en 0 – 0,001.

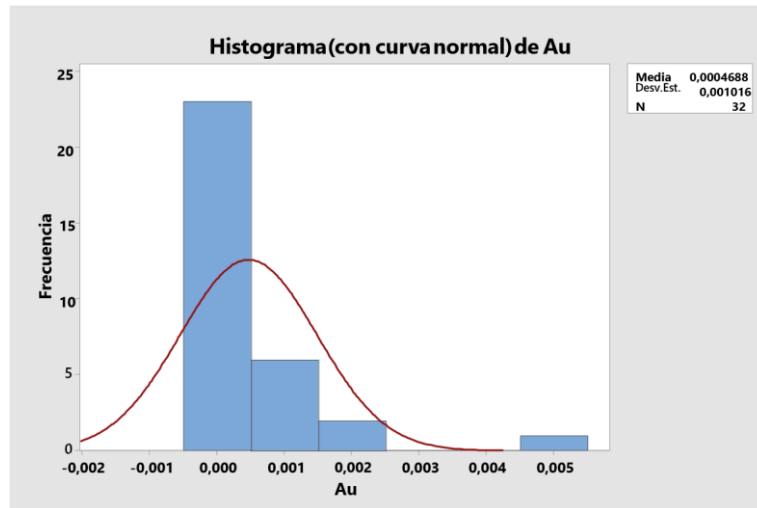


Figura N°55: Histograma de frecuencia de datos de Au.

Dado el análisis del oro, como se mencionó anteriormente, se realiza análisis para elementos como cobre y hierro que son los segundos principales presentes en la mina, se recalca que estos análisis XRF son de contramuestras a las que se les realizaron 3 metodologías sistematizadas para obtención de resultados.

6.2 Elemento de interés Cobre

El cobre como se menciona en apartado 5.2.2 está presente y es definido como mineral de interés, su asociación es con hierro, el análisis de XRF no recae específicamente en la determinación de este elemento, de igual forma en vetas 1 al 4 se logra identificar concentración de Cu.

Variable	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Cu	32	0	0,3470	0,0758	0,4291	0,0100	0,0285	0,0930	0,9285	1,0650

Tabla N°9: Estadística descriptiva para Cu. de contramuestras.

Se observa que de los 32 análisis la media es 0,34%, teniendo como un máximo de 1,06%, como fue mencionado anteriormente estos análisis no recaen específicamente en Cu, por eso su baja concentración.

En histograma se muestra que 13 datos presentan concentraciones entre 0,075-0,225% y 5 muestras están dentro de la mayor concentración para este caso, en el rango de 0,975- 1,125%

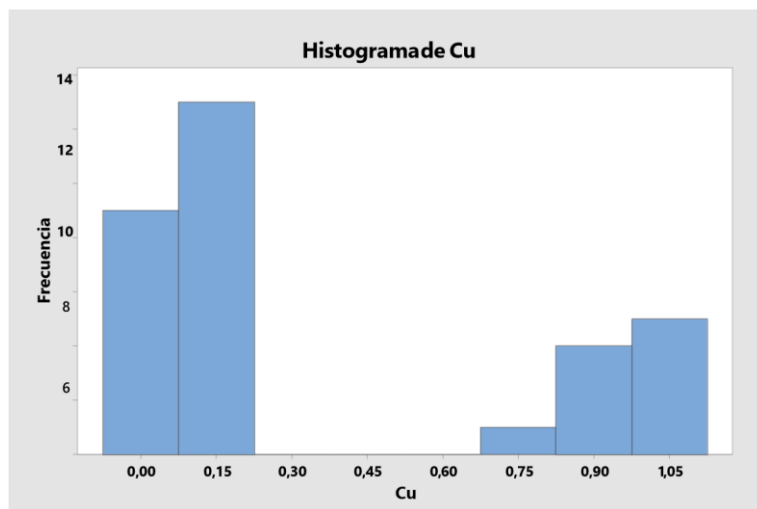


Figura N°56: Histograma de frecuencia de datos de Cu.

6.3 Elemento de interés Hierro

Como se menciona anteriormente, las concentraciones de estos elementos no eran prioridad, pero el caso de Fe sus concentraciones son mayores y representativas. definiéndolo como un tercer mineral de interés.

Variable	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Fe	32	0	36,01	2,67	15,08	8,03	21,35	38,05	47,17	88,41

Tabla N°10: Estadística descriptiva para Cu. de contramuestras.

Las concentraciones de este elemento son mayores, por ejemplo, la media de los 32 análisis es de un 36,01%, 1 dato presenta un 88,41%, 10 datos se encuentran dentro del rango con mayor concentración de 45-55% por último, 1 dato presenta entre un 5-15%.

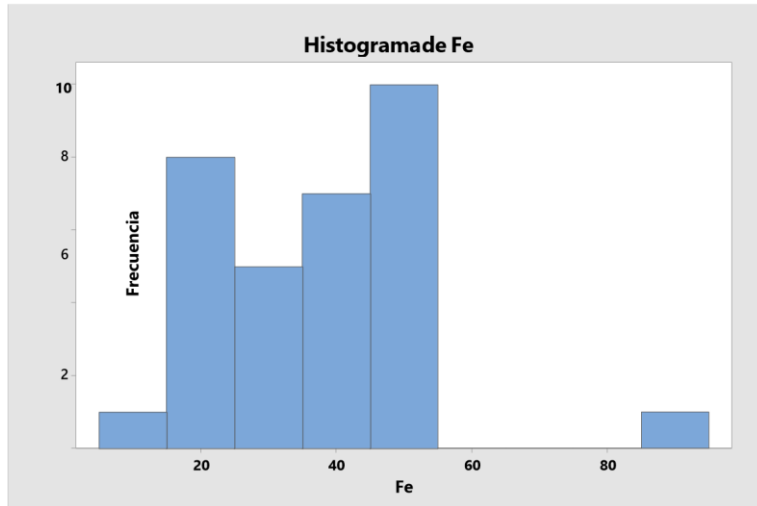


Figura N°57: Histograma de frecuencia de datos de Fe.

VII POTENCIAL ECONOMICO

Como se mencionó anteriormente, existen 4 vetas con mineralización de oro, las cuales se analizaron en laboratorio GEOLAQUIM, entregando solo leyes de Au, estas vetas presentan control; veta 1 N30E, veta 2 N16W, veta 3 N11E y veta 4 N19W.

Veta 1	0,81ppm
Veta 2	3,96ppm
Veta 3	5,03ppm
Veta 4	2,24ppm

Se realiza una estimación de mineral inferida para todas las vetas, con una profundidad de 10 mt inferida, dado que no existen mayores estudios a profundidad para tener valores exactos. Para cada veta se toma una densidad teórica de 2,6 t/m³, dada la ausencia de un valor preciso, este valor es utilizado en cálculos de estimación de minerales en la industria minera porque es un valor típico para la densidad promedio de muchos minerales y rocas en la naturaleza.

Para la veta 1 se tiene una corrida de 120 m, una profundidad inferida de 10 m y una potencia promedio de 1.5m. Por otro lado, la veta 2 tiene una corrida de 50 m, y se toma una potencia de 1,2 m, para veta 3 se tiene una corrida de 80 m, y una potencia de 1 m. y para veta 4, se tiene una corrida de 30 m, y una potencia de veta de 0,6 m.

Estimacion mineral vetas Au								
	ley Au (ppm)	Corrida (mt)	Potencia (mt)	Profundidad (mt)	Densidad (ton/m3)	Tonelaje (ton)	Fino Au (gr)	Fino Au (Oz)
Veta 1	0,81	100	1,5	10	2,6	3900	3159	111,4
Veta 2	3,96	50	1,2	10	2,6	1560	6177,6	217
Veta 3	5,03	80	1	10	2,6	2080	10462,4	369
Veta 4	2,24	30	0,6	10	2,6	468	1048,32	36
					Total	8008	20847,32	733,4

Tabla N°11: Estimación de tonelaje para las 4 vetas de oro definidas en mina San Antonio.

Realizados los cálculos, el tonelaje inferido mínimo de Au es de 733 Oz, donde en veta 3 se genera el mayor tonelaje de 369 Oz. No se realizan análisis para otros minerales de interés como lo es el Cu y Fe, ya que no hay análisis realizados a cuerpo mineral con Fe y Cu.

VIII DISCUSIONES

La investigación y el estudio de los depósitos minerales son de suma importancia en geología económica, los depósitos epitermales e IOCG han sido objeto de interés creciente debido a su importancia económica y génesis geológica. El informe realizado tuvo como misión efectuar una caracterización geológica en mina San Antonio y áreas aledañas, como también la generación de una metodología para la obtención de oro con análisis de fluorescencia de rayos X.

La evolución geológica del área de estudio con edad del Cretácico inferior es definido por el cuerpo intrusivo dominante “La Brea”, definido como roca de caja de composición diorítica con edad del Cretácico inferior. Tal cuerpo ocupa una gran extensión de terreno, entre la traza principal del Sistema de Falla de Atacama y el límite oriental de la cordillera de la costa (Arévalo, 2005). Mina San Antonio se encuentra aproximadamente 13 Km al SW de la ciudad de Copiapó, un área caracterizada por la concentración de Au, Fe y Cu.

El ambiente tectónico está dominado por control estructural NNE-SSW y NNW-SSE, como lo son los diques microdioríticos y microdioríticos porfídicos, con orientación NNE y N-NW.

El primer evento hidrotermal generado en mina San Antonio da a la generación de minerales ricos en Fe. correspondiendo a un pulso de gran temperatura para la generación de magnetita, se identifica un segundo evento mineralizador caracterizado por la concentración de Cu, zonas de debilidad favorece a la depositación de dicho mineral, correspondiendo a óxidos como crisocola (en patinas en paredes de la labor), atacamita y brochantita de forma diseminada con magnetita, encontrando leyes de 2,7% de cobre total, interpretada como zona de óxidos de cobre.

Un tercer evento mineralizador es asociado al emplazamiento de vetas de oro, identificándose 4 vetas con tal mineralización, dichas vetas se formaron como resultado de zonas con debilidad estructural, en roca de caja y cuerpo con grandes concentraciones de Fe y Cu. Este ascenso de fluidos también genero alteraciones

características en cada veta, como lo es la presencia de alunita, sílice oqueroso, hematita especular, limonitas arcillas, cuarzo y pirita.

Se logra reconocer a escala macroscópica baja concentración de calcopirita y pirita, no es definida y detallada en capítulos anteriores. Su baja concentración en zona de óxidos de cobre infiere que a mayor profundidad del depósito la presencia de minerales hipógenos se expondrá en mayor proporción, como es descrito en el perfil de Townley (2001).

El sistema de fallas de Atacama controlaba tanto el emplazamiento de los plutones del Jurásico Superior como el Cretácico Inferior (e.g. Grocott & Taylor, 2002; Arévalo et al., 2006) y el desarrollo de depósitos de óxido de hierro-cobre-oro (IOCG), como Manto verde y Candelaria cuya mineralización se encuentra alojada en brechas o litologías específicas emplazadas en sistemas de fallas NNW (del Real, 2018). Para mina San Antonio existen ensamblajes de alteración características logrando definir el depósito de tipo IOCG, como lo es la presencia de calcita, actinolita, epidota, clorita y baja concentración de calcopirita. Sin embargo, las vetas de oro con limonitas, en algunos casos zonas de alteración argílica, argílica avanzada y propilitica, característica de yacimientos tipo epitermales junto con las tendencias estructurales mineralizadas NNW-NNE, se postula que la mineralización de hierro-cobre en mina San Antonio es de tipo IOCG a la cual se le sobreimpuso un evento mineralizador tipo epitermal de alta sulfuración. Adicionalmente el análisis XRF (Fluorescencia de rayos X) es una técnica analítica utilizada para la determinación elemental de una muestra sólida o en polvo (Marguá, E. et al., 2011). Esta técnica se basa de que cuando se bombardea una muestra con rayos X de alta energía, los átomos de la muestra pueden ser excitados y emiten fluorescencia característica en forma de rayos X secundarios. La realización de la separación del oro a través de las tres metodologías no obtuvo los resultados esperados, en las tres metodologías la detección del oro fue nula a baja bajo el análisis XRF.

Como se menciona en el apartado VI, las metodologías utilizadas fueron con movimientos sistemáticos y utilización de distintos objetos, el primero fue con el método artesanal más utilizado en pequeña minería para la separación del oro,

denominado “cacho”, esta metodología no sirvió ya que el análisis XRF no detecto oro en 3 de las 4 vetas, el resultado fue nulo y en la restante fue 0,001, justificando estos resultados con la baja experiencia en utilización del cacho, en la cantidad de muestra utilizada (5 gr) y el tipo de movimiento realizado. Para el caso de la canaleta con 10° la separación del oro tampoco fue eficaz ya que en 2 de las 4 vetas el resultado fue nulo y en 2 de ellas se obtuvo 0,001%, para este caso, el resultado negativo recae en la baja cantidad de muestra utilizada y el cómo se añade esta mezcla a la canaleta. Para la tercera metodología se obtiene en una veta una concentración de un 0,005%, para este caso también las razones de la baja obtención de oro con XRF recae en la baja cantidad de muestra utilizada y la forma en que se integra la mezcla a la canaleta.

Para todos los casos se realizó y analizo una muestra de cada metodología para cada veta, realizando un análisis no representativo, a la vez no es factible la generación de una estadística descriptiva, ya que el análisis y resultados no son viables.

VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Mina San Antonio se encuentra hospedada en cuerpo diorítico, perteneciente a Plutón la Brea, el que es intruído por cuerpos tabulares de composición microdiorítica y cuerpos con textura porfídica, estos presentan un patrón característico en área de estudio, diques microdioríticos presenta orientación NNE, en cambio diques microdioríticos porfídicos NNW.

Las vetas que presentan mayor ley de Au es la veta 2 y 3, con 5,03 y 3,96 ppm, todas las vetas se encuentran con hematita, jarosita y goethita, las concentraciones varían en cada veta, como también la concentración de sílice.

En cota actual trabajada se ha generado una zona enriquecida, encontrando óxidos de cobre, como atacamita, crisocola y brochantita, acompañado de magnetita, calcita y baja concentración de calcopirita. A mayor profundidad (en nivel inferior) la concentración de calcita es mayor y desfavorable en la extracción de óxidos de Cu. Existe una asociación característica de óxidos de Cu con Fe, que corresponde a atacamita y brochantita con magnetita, encontrándose en gran parte del nivel principal. Zona de caracol (nivel inferior) es blanco de exploración dado los cruces de vetas y por la concentración de oro grueso.

En nivel principal se encuentran veta 1 y 4, bajo caracol se encuentran vetas 2 y 3, dado los análisis geoquímicos con XRF se comparan todas las vetas mencionadas, identificándose que en veta 2 y 3 la concentración de SiO₂ aumentan en un doble llegando al triple de lo que presentan vetas 1 y 4. Como también la concentración de Fe, en veta 1 y 4 duplica su concentración a vetas 2 y 3. Para el caso de Cu, en vetas 2 y 3 las concentraciones son bajo el 0,1% y para vetas 1 y 4 presentan 0,5%.

Las concentraciones entregadas por fluorescencia de rayos X para el oro son muy bajas, las comparaciones de análisis tanto de leyes entregadas por laboratorio como

los de fluorescencia de rayos X, no son demostrativas dado que la cantidad de muestras analizadas son insuficientes para obtener resultados concretos.

La metodología empleada para la separación mecánica no fue adecuada para la concentración del oro hasta niveles detectables para el equipo XRF.

No se logra identificar zonas con concentraciones importantes de sulfuros hasta cota trabajada, la mineralización observada es muy baja para ser definidos como mineral con interés económico, se observan sulfuros primarios del tipo pirita y calcopirita (como es mencionado en apartado anterior) en nivel bajo inferior, no se encuentran sulfuros secundarios, pero no se descarta tal enriquecimiento a mayor profundidad, como también la de sulfuros primarios.

La mineralización encontrada está controlada por fallas donde sus mateos son menores a 45°, estos planos son los encargados y utilizados como canalizadores de la mineralización y favorables ante la circulación de aguas meteóricas, vetas 1 y 3 presentan rumbos NE 11 y 30°, vetas 2 y 4 rumbo NW 15 y 16°.

A través de los estudios petrográficos y geoquímicos realizados en Mina San Antonio, fue posible observar la ocurrencia de eventos de mineralización y alteración sobreimpuestos, donde se identificaron 3 eventos de mineralización y alteración de tipo magmático- hidrotermal y uno de tipo supérgeno.

El evento 1 se caracteriza por magnetita y actinolita, lo que es una asociación característica de depósitos IOCG, pudiendo corresponder a la parte más profunda y magmática del sistema, la precipitación de sulfuros (calcopirita y pirita) incluyéndolos a este primer evento. Con posterioridad, la asociación de óxidos de cobre, a través de procesos de lixiviación, ante la generación de atacamita, crisocola y brochantita. El evento 2 se define por las vetas de oro con alteraciones de cuarzo oqueroso, limonitas y arcillas. El pH del fluido corresponde a un pH neutro a ácido debido a que la sílice necesita un ambiente más ácido para su precipitación. En resumen, lo anterior indica que el fluido que generó este evento es de origen magmático-hidrotermal.

El último evento corresponde a una alteración supérgena, se caracteriza por la presencia de minerales oxidados como hematita roja, jarosita y goethita. Estos

minerales se encuentran dentro de la labor por lo que es posible que fluidos meteóricos sólo ingresaran unas pocas decenas de metros de profundidad. Dadas las características presentes, el depósito es definido como IOCG magnetita, calcopirita, alteraciones calco-sódicas; propilítica, con vetas tipo epitermales de alta sulfuración cortando este depósito.

RECOMENDACIONES

Se propone retomar explotación en frente de avance del túnel de ingreso a la mina, con labores con dirección N20°W. Dado que se identifica falla subvertical con concentraciones de cobre a lo largo del plano de falla expuesto.

De acuerdo con el modelo de mineralización propuesto se recomienda realizar una campaña de sondajes con finalidad en la exploración y busca de idealización de perfil con mineralización de sulfuros a mayor profundidad, hasta la fecha la concentración de sulfuros no han generado un modelo con interés económico. Se recomienda la realización de 2 sondajes, uno a 40 mts de veta 1 con 20° de inclinación, un segundo sondaje a 15 mts de veta 3 con 90° de inclinación.

Se sugiere seguir la explotación de vetas 2 y 3, encontradas bajo el caracol (nivel inferior), estas vetas al sur en la labor generan un cruce, seguir en profundidad estas vetas analizar e identificar sus leyes.

En cuanto a los óxidos de cobre no se sugiere explotación en nivel inferior (zona caracol) dada la gran concentración de calcita.

Se recomienda realizar análisis de leyes para cada veta con mínimo 6 muestras de cada una, con metodología *chip sampling*, para que los resultados sean representativos, al igual que con análisis de XRF, se recomienda evaluar otros métodos de separación mecánica (para realización de metodología), como por ejemplo el método de centrifugación. A la vez con mayores análisis XRF se podrá determinar elementos panthfinder que sirvan como blancos en la exploración y seguimiento de vetas.

BIBLIOGRAFIA

Arévalo, C., Grocott, J., Martin, W., Taylor, G., (2006). Structural setting of the Candelaria Fe Oxide Cu-Au deposit, *Economic Geology* 101(4):819-841.

Barton, M.D., Johnson, D.A., (1996). Evaporitic source model for igneous-related Fe oxide (REE-Cu-Au-U) mineralization. *Geology* 24, 259-262

Corbett, G. J., & Leach, T. M. (1998). *Southwest Pacific Rim gold-copper systems: structure, alteration, and mineralization* (Vol. 6, pp. 69-82). Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists.

Cox, K.G. 1988. The Karoo Province. En MacDougall, J.D. (ed.) *Continental flood basalts*, Kluwer Academic 239-271, Dordrecht. *Geología Económica* (44 pp.). Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Curo Quispe, F. W. (2019). Diseño de parámetros de voladura en rocas mineralizadas con alteración hidrotermal tipo filica potásica en yacimientos tipo pórfido de cobre mina Cuajone-2018.

Del Rey, A., Deckart, K., Arriagada, C., & Martínez, F. (2016). Resolving the paradigm of the late Paleozoic–Triassic Chilean magmatism: Isotopic approach. *Gondwana Research*, 37, 172-181.

Giggenbach, W.F. (1997). The Origin and Evolution of Fluids in MagmaticHydrothermal Systems. En: *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, Tercera Edición, Hubert L. Barnes (ed.), John Wiley and Sons Inc. Publication, 737-796.

Groves, D.; Bierlein, F.; Meinert L. & Hitzman, M. (2010). Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) Deposits through Earth History: Implications for Origin, Lithosperic Setting, and Distinction from Other Epigenetic Iron Oxide Deposits. *Economic Geology*. 105: 641- 654.

Kouzmanov, K., & Pokrovski, G. S. (2012). Hydrothermal controls on metal distribution in porphyry Cu (-Mo-Au) systems.

Kojima, S., Astudillo, J., Rojo, J., Tristá, D. and Hayashi, K. (2003) Ore mineralogy, fluid inclusion, and stable isotopic characteristics of stratiform copper deposits in the coastal Cordillera of northern Chile. *Miner. Deposita*, 38, 208–216.

Kreiner, D. C., & Barton, M. D. (2011). High-level alteration in iron-oxide (-Cu-Au)(‘IOCG’) vein systems, examples near Copiapó Chile. In Proceedings of the 11th biennial meeting: society for geology applied to ore deposits (pp. 497-499).

Loyola, N., Barra, F., Gatica, A., Reich, M., Salazar, E., & Palma, E. (2015). Mineralización y alteración hidrotermal del depósito IOCG Diego de Almagro, III Región de Atacama, Chile. In XIV Congreso Geológico Chileno. Actas.

Maksaev V., 2003. GL 54 A. Metalogénesis. Capítulo 8. Alteraciones Hidrotermales. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Departamento de Geología.

Marguí, E., González-Fernández, O., Hidalgo, M., Pardini, G., & Queralt, I. (2011). Aplicación de la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos-X en el estudio de la dispersión de metales en áreas mineras. *Boletín Geológico y Minero*, 122(2), 273286.

Marschik R, Fontboté L (2001) The Candelaria-Punta del Cobre iron-oxide Cu-Au(Zn- Ag) deposits, Chile. *Econ Geol* 96:1799-1826.

Marschik R, Sollner F (2006) Early Cretaceous U Pb zircon ages for the Copiapó plutonic complex and implications for the IOCG mineralization at Candelaria, Atacama Region, Chile. *Miner Deposita* 41:735-801.

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

Meyer, C. y Hemley, J. (1967). Wall Rock Alteration. In: Barnes H.L. ed *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 1st ed Holt, Rinehart and. Winston Inc New York (E.E.U.U), pp. 166-235.

Mpodozis, C., & Ramos, V. (2008). Tectónica jurásica en Argentina y Chile: extensión, subducción oblicua, rifting, deriva y colisiones. *Tectónica jurásica en Argentina y Chile: extensión, subducción oblicua, rifting, deriva y colisiones*, 481–497.

Muntean, J.L. and Einaudi, M.T. (2001) Porphyry-epithermal transition: Maricunga Belt, Northern Chile. *Econ. Geol.*, 96, 743-772.

Ortiz, J. M., & Emery, X. (2004). Categorización de recursos y reservas mineras. In *1st International Conference on Mining Innovation MININ* (pp. 198-208).

Palma, G., Barra, F., Reich, M., Simon, A. C., & Romero, R. (2020). A review of magnetite geochemistry of Chilean iron oxide-apatite (IOA) deposits and its implications for ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*, 126, 103748.

Reed, M.H. (1997). Hydrothermal Alteration and Its Relationship to Ore Fluid Composition. En: *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, Tercera Edición, Hubert L. Barnes (ed.), John Wiley and Sons Inc. Publication, 303-366.

Rhys, D.A., St. Jean, N., Lagos, R., Emmons, D., Schroer, G., and Friedman, R., in press, *Geology of Round Mountain, Nevada: A giant low-sulfidation epithermal gold deposit*: Society of Economic Geologists Special Publication.

Richards, J. P., & Mumin, A. H. (2013). Magmatic-hydrothermal processes within an evolving Earth: Iron oxide-copper-gold and porphyry Cu±Mo±Au deposits. *Geology*, 41(7), 767-770.

Seward, T. M., Williams-Jones, A. E., & Migdisov, A. A. (2014). 13.2–The chemistry of metal transport and deposition by ore-forming hydrothermal fluids. *Treatise on geochemistry*, 13, 29-57.

Sillitoe, R. (1972). A Plate Tectonic Model for the Origin of Porphyry Copper Deposits. *Economic Geology*; 67 (2): 184–197

Sillitoe RH (2003) Iron oxide copper-gold deposits: an Andean view. *Miner Deposita* 38:787-812.

Sillitoe, R. H. (2005). Supergene oxidized and enriched porphyry copper and related deposits.

Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., & Tasa, D. (2005). *Earth: an introduction to physical geology* (p. 744). Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall.

Taylor, R. (2011). Gossans and leached cappings: field assessment. Springer Science & Business Media.

Townley, B. (2001). Metalogénesis: Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos.

Vivallo, W. (2009, November). Yacimientos de óxidos de hierro-cobre-oro en Chile. In XII Congreso Geológico Chileno: s11_060.

Williams, P.; Barton, M.; Johnson, D.; Fontboté, L.; De Haller, A.; Mark, G.; Oliver, N. & Marschik, R. (2005). Iron Oxide Copper-Gold deposits: Geology, space-time distribution and possible modes of origin. *Economic Geology*.371-405.