



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Geología

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**Caracterización geológica y geoquímica de los cuerpos
mineralizados en el sector Aguada Galleguillos, Atacama,
Chile**

José Enrique Orozco Smith
Copiapó, Chile, 2023



**UNIVERSIDAD
DE ATACAMA**
FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Geología

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**Caracterización geológica y geoquímica de los cuerpos
mineralizados en el sector Aguada Galleguillos, Atacama,
Chile**

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

Profesor guía Dr. Wolfgang Greim.

José Enrique Orozco Smith
Copiapó. Chile, 2023

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre Tatiana y a mi hermano Emilio por apoyarme en cada momento mientras estuve en la universidad y a mi padre Luis que a pesar de la distancia también se mantuvo conmigo.

A Luis Valderrama y a Sergio Ghiglino por darme la oportunidad de acceder a las propiedades mineras y así realizar este trabajo

A mi profesor guía Wolfgang Griem por el apoyo y formación como profesional durante mi estadía en la universidad.

Por último, a mis compañeros de universidad que con el paso del tiempo se volvieron grandes amigos y ahora tenemos el agrado de recordar grandes anécdotas ya sean buenas o malas, pero como dicen las risas no faltaron.

Resumen

El área de estudio se ubica en la cordillera de la Costa de la región de Atacama, a 50 km. aproximadamente de Copiapó. Corresponde a un cuerpo plutónico compuesto principalmente por diorita, cuarzo-diorita y cuarzo-monzodiorita intruido por una serie de cuerpos hipabisales a modo de stocks, sills y diques de composición microgranítica y en menor medida microdioritas y microgabros. El objetivo de este estudio es caracterizar la geología y geoquímica del sector junto con establecer si existe una relación genética entre las zonas mineralizadas presentes en este sector y el depósito Cerro Negro Norte. Los resultados de este estudio permitieron definir diferentes tipos de alteraciones hidrotermales tales como: epidota, magnetita y clorita, propilítica (clorita, epidota y calcita), brechas hidrotermales de cuarzo-turmalina, argílica moderada, silíceas y vuggy sílica. En base a los datos estructurales de diques, vetas y fallas levantados en terreno se definen tres actitudes principales para las estructuras N30W/73NE, N-S/78SE, N28E/75SE. Las estructuras mineralizadas se concentran en los rumbos N05E las cuales corresponden en su mayoría a vetas de cuarzo-calcita con mineralizaciones de sulfuros primarios de Fe y de Cu y óxidos de Fe (pirita, calcopirita y magnetita), mientras que las estructuras N25E presentan mineralización de magnetita masiva. Los resultados de los análisis realizados con el equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X (pXRF) muestran que las anomalías de cobre se reflejan en las vetas de cuarzo ya que estas presentan mineralizaciones de crisocola, pirita y calcopirita. También este análisis arroja que no existe una correlación espacial entre Fe y Cu debido a que estos elementos presentan un índice de correlación negativo. El Cu y Sí presentan un índice de correlación positivo lo que indica que existe una correlación espacial entre estos elementos. El Fe y Sí tienen un índice de correlación negativa, por lo tanto, no existe una relación espacial entre estos elementos. Las alteraciones descritas se relacionan con los eventos mineralizadores del depósito Cerro Negro Norte. Se establece un modelo basado en las observaciones en terreno para el emplazamiento de la Unidad Ígnea Hipabisal, ya que, dicha unidad se compone de múltiples diques y sills del área.

Índice

INTRODUCCIÓN 1	11
1.1 Problemática de investigación	11
1.2 Hipótesis	11
1.3 Objetivos	12
1.4 Ubicación y accesos	13
1.5 Trabajos anteriores.....	15
MARCO TEORÍCO 2.....	16
2.1 Depósitos magmático-hidrotermales.....	16
2.1.1 Componentes del sistema hidrotermal	17
2.1.2 Alteración hidrotermal	18
2.1.3 Yacimientos tipo IOCG	21
2.1.4 Yacimientos IOA	25
MARCO GEOLÓGICO 3	29
3.1 Geología Regional	29
3.2 Geología Local.....	32
METODOLOGÍA DE TRABAJO 4.....	34
4.2 Etapa de Campo	34
4.2.1 Estrategia de muestreo litológico.....	34
4.2.2 Estrategia de muestreo estructural	34
4.2.3 Levantamiento geológico.....	35
4.3 Etapa de gabinete 2	35
4.3.1 Análisis de campo	35
4.3.2 Selección de muestras	36
4.3.3 Análisis de Fluorescencia de Rayos X (pXRF).....	36
RESULTADOS 5.....	37
5.1 Relaciones de campo.....	37
5.1.1 Litologías	37
5.1.2 Alteraciones	42
5.1.3 Mineralización	50
5.2 Geología estructural	54
5.2.1 Descripción de estructuras	54
5.2.2 Análisis estructural.....	54

5.3	Geoquímica	56
5.3.1	Concentraciones geoquímicas mediante gráficos tipo Box plot	57
	DISCUSIONES 6.....	66
	CONCLUSIONES 7	71
	REFERENCIAS 8.....	73

Índice de figuras

Figura 1: Ubicación y accesos a los tres polígonos correspondientes al área de estudio.	14
Figura 2: Diagrama de fase de presión-temperatura del agua en el rango de condiciones de formación de depósitos magmático-hidrotermales. El área sombreada clara muestra el campo de posibles fusiones félsicas. La densidad del agua varía de líquido a alta presión y temperatura relativamente baja a vapor a baja presión. En las condiciones 'A', el agua líquida hervirá y se convertirá en vapor si se reduce la presión. En 'B', el agua líquida no hervirá, pero se volverá cada vez menos densa al disminuir constantemente la presión (Ridley, 2013).	16
Figura 3: Componentes del sistema hidrotermal (Ridley, 2013).	17
Figura 4: Asociaciones de minerales de alteración hidrotermal más comunes en función de la temperatura, presión y pH. 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 (2003).	20
Figura 5: Ubicación espacial y temporal de los principales depósitos IOCG a escala mundial (Groves, 2010).	21
Figura 6: Posición del cinturón IOCG central andino del norte de Chile-sur de Perú respecto al arco magmático Jurásico-Cretácico temprano y una serie de cuencas de trasarco interconectadas a lo largo del borde oriental (Sillitoe, 2003).	22
Figura 7: Zonación vertical de una veta IOCG (Ridley, 2013).	23
Figura 8: Veta IOCG del Jurásico en el arco de La Negra en el norte de Chile indicando posibles fuentes de fluido mineral (Sillitoe, 2003).	24
Figura 9: Perfil esquemático del distrito Candelaria-Punta del Cobre (Ridley, 2013).	25
Figura 10: Modelo propuesto enseñando una nucleación de magnetita (mgt) a modo de microlitos en <i>solución</i> de sílice (naranja) (A), ascenso de burbujas de magnetita a modo de bouyancia (B), posterior ascenso, desarrollo, fusión y acumulación de magnetita primaria, además de exsolución de Fe dentro de los fluidos de alta salinidad (C), formación de fracturas hidráulicas (Durante la acción de fuerzas tectónicas) propician una rápida y eficiente segregación de fluidos ricos en magnetita durante un enfriamiento progresivo. (Knipping et al., 2015).	27
Figura 11: Genesis de depósitos IOA y su link genético con depósitos IOCG (Palma et al., 2020).	28
Figura 12: Mapa que indica la ubicación de los principales depósitos IOCG e IOA entre el Jurásico y el Cretácico temprano de la franja IOCG de la cordillera de la costa. (Palma, 2020).	31

Figura 13: Área de estudio con sus respectivas unidades geológicas en la carta de Copiapó. Modificado de (Arévalo, 2005).	33
Figura 14: Ejemplares pertenecientes a la Unidad ígnea intrusiva, diorita, cuarzo diorita y cuarzo monzo diorita.	37
Figura 15: Ejemplos de miembros pertenecientes a la Unidad ígnea Hipabidal, en la figura A,B y D se observan diques del orden de los 30 cm hasta los 2m de potencia. En la imagen C se aprecian cuerpos hipabisales acomodados a modo de apófisis.....	38
Figura 16: Ejemplar de duna barjanoide que indica la dirección preferencial del viento en dirección suroeste.....	40
Figura 17: Mapa geológico con la ubicación espacial de cada unidad litológica descrita. En amarillo punteado se sitúan los Depósitos Eólicos, amarillo los Depósitos Aluviales no Consolidados.....	41
Figura 18: Ejemplar de diorita afectada por los fluidos hidrotermales presentes en los cuerpos vetiformes mostrando una fuerte silicificación situada en la zona SE del área de estudio.....	42
Figura 19: Diorita perteneciente a la Unidad ígnea Intrusiva que presenta una fuerte epidotización, en el costado derecho se aprecia parte de una veta de magnetita masiva.....	43
Figura 20: Brechas hidrotermales de turmalina, con clastos angulosos y matriz soportada A) Presenta matriz granítica y B) Presenta matriz de rocas silicificadas.....	44
Figura 21: Ejemplar de roca que presenta alteración vuggy sílica, en la figura se pueden apreciar las cavidades originadas por la disolución de feldespatos y anfíboles de la roca de caja.	45
Figura 22: Ejemplar de alteración argílica intermedia donde se aprecia la destrucción textural de la roca de caja.	46
Figura 23: Diorita alterada a clorita, donde dicha alteración actuó sobre los anfíboles de la roca.	47
Figura 24: Ejemplo de oxidación supérgena en una falla del sector, las zonas de color rojizo corresponden a óxidos de hierro, específicamente hematita.....	48
Figura 25: Mapa geológico con la ubicación espacial de cada unidad litológica descrita. En amarillo con puntos se sitúan los Depósitos Eólicos, amarillo los Depósitos Aluviales no Consolidados.....	49
Figura 26: Veta de magnetita con una potencia de 40cm, en contacto con dioritas con una fuerte alteración a epidota.	50
Figura 27: Considerable veta compuesta principalmente de calcita y en menor proporción cuarzo en las paredes, la potencia de la estructura es de 1m.....	51
Figura 28: Ejemplares de Crisocola en vetas del área, A) se presenta en una veta con salbanda y B) se presenta a modo de patina en una veta de cuarzo en contacto con dioritas.	52
Figura 29: Veta de cuarzo con sulfuros primarios Py significa pirita y Cpy es calcopirita	53
Figura 30: Diagrama de rosetas elaborado con un total de 96 datos estructurales, donde se aprecian dos rumos preferenciales N25W Y N05E.	55

Figura 31: Diagrama de concentración de polos elaborado con 107 datos estructurales, dichos datos son planteados en una red estereográfica de Schmidt, el mayor valor de concentración es de 9.35%. Se aprecian tres concentraciones de polos preferentes de los cuales se extraen tres planos principales N30W/73NE, N-S/78SE, N28E/75SE.	55
Figura 32: Mapa que contrasta las estructuras principales de Copiapo con las estructuras levantadas en campo.	56
Figura 33: Box plot de la concentración de Cu en rocas, diques y vetas, se aprecia un valor outlier o atípico en el diagrama de las rocas con un valor de 765ppm.	57
Figura 34: Box plot de la concentración de Fe en rocas, diques y vetas	58
Figura 35: Box plot de la concentración de Al en rocas, diques y vetas, presenta un valor outlier o atípico en el diagrama de las vetas 95036 ppm.....	59
Figura 36: Tabla paragénica para el depósito Cerro Negro Norte. Etapa I, II, III y IV: Ocurrencia de magnetita: M: masiva, D: Diseminada, V: Venillas, B: Brechas, Inc: inclusión. (Salazar, 2020).	67
Figura 37: Mapa del área de estudio, en amarillo con granos: Depósitos Eólicos, amarillo: Depósitos Aluviales no consolidados, naranja: Depósitos Coluviales no Consolidados, rojo: Unidad ígnea Hipabisal, Unidad ígnea Intrusiva.	69
Figura 38: Perfil esquemático de la sección A-A' donde se puede apreciar la intrusión de la Unidad ígnea Hipabisal en color rojo formando diques y estructuras horizontales denominadas apófisis. En color rosa, la Unidad ígnea Intrusiva, en línea punteada roja las fallas de rumbo inferidas, en línea punteada amarilla las vetas inferidas y en línea continua amarilla las vetas medias.....	70

Índice de tablas

Tabla 1: Diagrama de correlación de Pearson para los diques.....	61
Tabla 2: Relaciones de elementos y su índice de correlación de Pearson para los diques.	62
Tabla 3: Matriz de correlación de Pearson para las vetas.....	64
Tabla 4: Relaciones de elementos y su índice de correlación de Pearson para las vetas.	65

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Problemática de investigación

El presente trabajo busca caracterizar la geología del área de estudio situada en el sector de Aguada Galleguillos, en la región de Atacama, comuna de Copiapó. Esta zona forma parte de la Franja Ferrífera Chilena (FFC), situada en la cordillera de la costa, alojando numerosos depósitos jurásicos/cretácicos ricos en Fe-Cu-Au y Fe clasificados como IOCG e IOA respectivamente (Nyström y Henríquez, 1994; Oyarzun et al., 2003; Groves et al., 2010; Bilenker et al., 2016). Se busca establecer una relación genética de estas zonas mineralizadas con el depósito tipo IOA Cerro Negro Norte, que se sitúa al este del área, ya que, no se cuenta con información respecto a la génesis de las mineralizaciones y alteraciones presentes en el área de estudio. Para esto se definirán unidades litológicas, alteraciones, mineralizaciones, geología estructural y finalmente un análisis geoquímico mediante fluorescencia de rayos X (XRF), para así, definir la temporalidad relativa de los eventos mineralizadores y las alteraciones.

1.2 Hipótesis

La presente tesis se basa en la hipótesis de que las estructuras, mineralizaciones y alteraciones presentes en el área de estudio pueden tener una relación genética con el depósito Cerro Negro Norte. A partir del análisis macroscópico y geoquímico de las muestras, sumado a la información recopilada de las estructuras medidas. Se presume una cierta relación genética entre los procesos de alteración y mineralizaciones con los procesos definidos en el depósito Cerro Negro Norte, el que se sitúa a 2 kilómetros al este del área de estudio.

1.3 Objetivos

1.3.1 **Objetivo general**

- Caracterizar las litologías, alteraciones y estructuras presentes en el área de estudio.

1.3.2 **Objetivo específico**

- Definir unidades litológicas y alteraciones existentes en el área.
- Definir la mineralización presente en los cuerpos vetiformes.
- Determinar la geología estructural asociada al área de estudio.
- Cuantificar las orientaciones preferenciales de los cuerpos vetiformes.
- Analizar el comportamiento de los elementos químicos presentes en los cuerpos mineralizados, mediante el equipo portátil de fluorescencia de Rayos X (pXRF).

1.4 Ubicación y accesos

El área de estudio se ubica en la Cordillera de la Costa de la Región de Atacama, a 50 km. aproximadamente de Copiapó. El campamento de la empresa Ghigolino y CIA Ltda. (Figura 1), se encuentra situado en las coordenadas UTM (DATUM WGS 1984-19S) N7.005.988; E368.089. Se asignaron tres áreas de estudio, que llevan por nombre: Resguardo, Resguardo 1 y N-S. Existen múltiples rutas de acceso, en el caso de Resguardo se tienen 2 rutas: La primera ruta es en dirección SE, avanzando 4,56 km. por un camino mixto entre arena y grava, habilitado solo para vehículos doble tracción; la segunda ruta, es siguiendo la ruta de marcada de color rojo (figura. 1), la cual corresponde al camino (de tierra) de salida desde las instalaciones a la ruta C-327. Por dicha ruta, en dirección N, se debe avanzar 8,31 km. hasta llegar a la intersección con la ruta C-309. Luego, se debe virar hacia el SE, y continuar por 6,93 km. hasta llegar al acceso del polígono Resguardo, ubicado a 600 m. al SW de la ruta C-309. Para acceder a Resguardo 1, es exactamente igual al acceso de Resguardo, sólo que, se debe continuar 1,56 km. por la ruta C-309 en dirección SE. Para luego, avanzar por la ladera del cerro 1,18 km. en dirección W, hasta llegar al polígono Resguardo 1. Finalmente, el acceso al área N-S, se debe avanzar 1,63 km. por el camino de acceso del campamento en dirección W, hacia la ruta C-327. Desde allí se debe avanzar 6 km. en dirección S, hasta llegar a una torre de agua de color amarilla perteneciente a CMP, y desviarse hacia dicho camino, para luego avanzar 1,82 km. hasta la concesión.

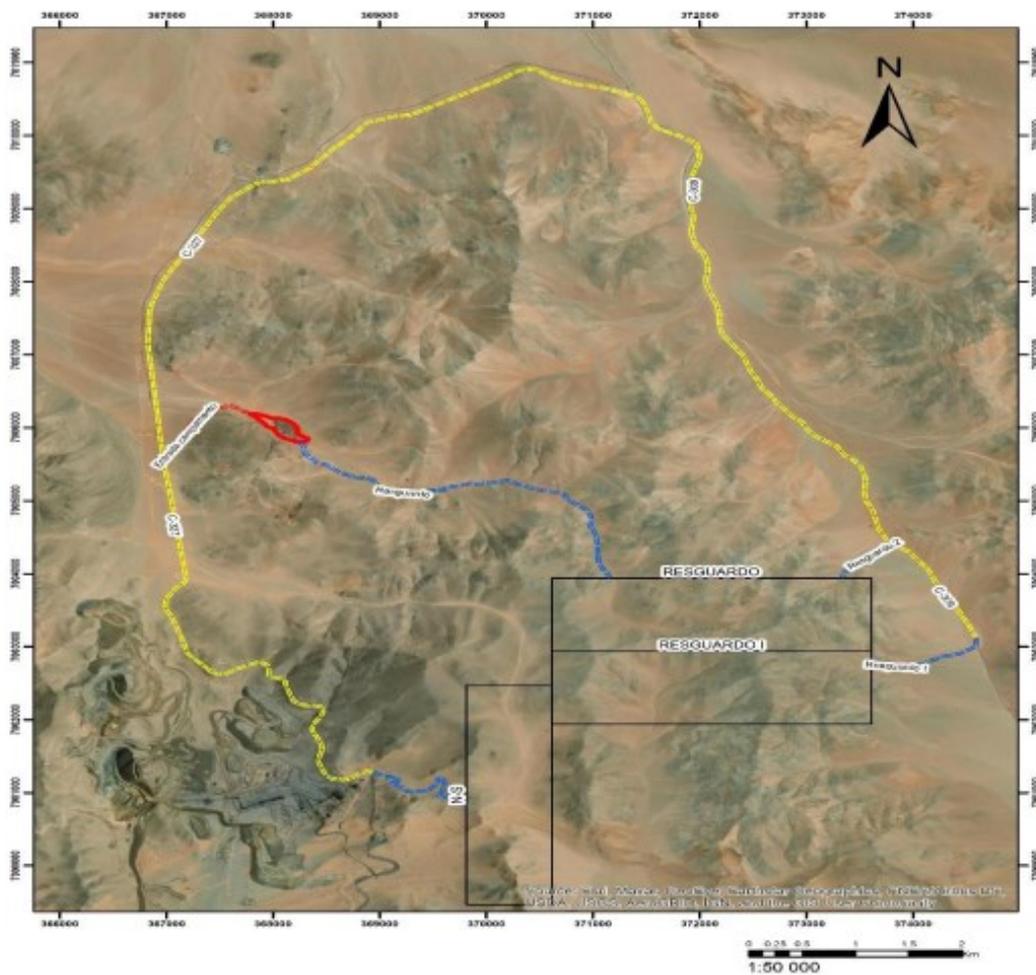


Figura 1: Ubicación y accesos a los tres polígonos correspondientes al área de estudio.

1.5 Trabajos anteriores

- Vivallo et al., (1995) publicaron la geoquímica de las rocas volcánicas y su posible relación con la mineralización de Au en depósitos de la Franja Ferrífera Chilena.
- Sillitoe (2003) generaron un análisis completo de los yacimientos IOCG ubicados en la Franja Ferrífera Chilena de la Cordillera de la Costa.
- Arévalo, C. (2005) Confeccionaron la carta geológica Copiapó a escala 1:100.000.
- Díaz et al., (2006) Confeccionaron yacimientos metalíferos de la carta de Copiapó a escala 1:100.000, entregando información sobre los principales distritos mineros y sus respectivas menas.
- Knipping et al., (2015) estudiaron los elementos traza en magnetitas de depósitos IOA y procesos formadores, para así determinar su origen.
- Barra et al., (2017) brindaron una aproximación del origen de los depósitos IOCG-IOA en base al estudio de isotopos de Re-Os.
- Palma et al., (2020) realizaron una revisión de la geoquímica en magnetitas provenientes de depósitos IOA del norte de Chile y sus implicancias en la mineralización.
- Salazar (2020) estudiaron la geoquímica de elementos traza en magnetita del depósito IOA de Cerro Negro Norte.

2 MARCO TEORÍCO

2.1 Depósitos magmático-hidrotermales

Los depósitos magmático-hidrotermales se forman debido a la actividad hidrotermal asociada a cuerpos intrusivos emplazados en grandes profundidades de la corteza terrestre. Varios estudios indican que los fluidos hidrotermales provenientes del magma y las aguas meteóricas circundantes tienen gran protagonismo en la génesis de estos depósitos. Por otra parte, la tectónica, la mineralogía y las características de la alteración son componentes cruciales para la exploración de estos yacimientos (Edwards, 1986).

Un depósito magmático-hidrotermal es aquel donde los minerales precipitaron a partir de soluciones a altas temperaturas y a diversas condiciones de presión (Figura 2), dichos fluidos pueden presentar diversas salinidades y rangos de temperaturas, las cuales pueden variar desde 100° C hasta temperaturas magmáticas de alrededor de 800°C (Ridley, 2013).

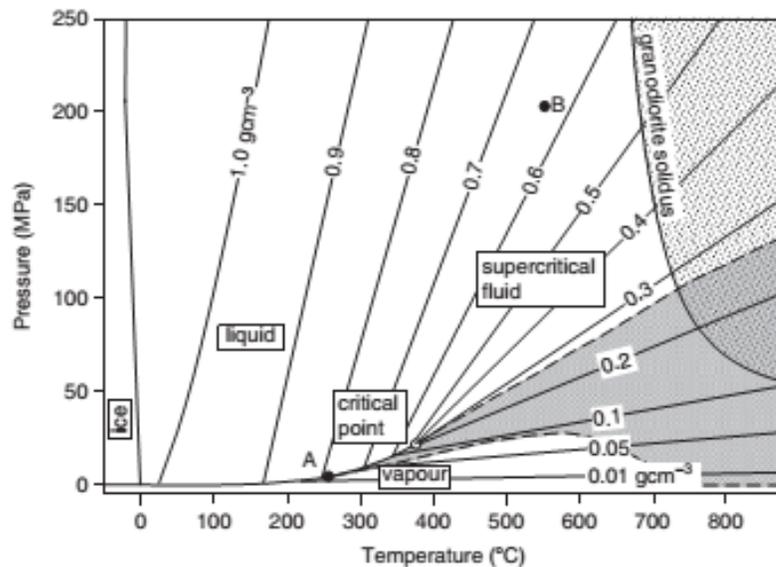


Figura 2: Diagrama de fase de presión-temperatura del agua en el rango de condiciones de formación de depósitos magmático-hidrotermales. El área sombreada clara muestra el campo de posibles fusiones félsicas. La densidad del agua varía de líquido a alta presión y temperatura relativamente baja a vapor a baja presión. En las condiciones 'A', el agua líquida experimentará ebullición y se convertirá en vapor si se

reduce la presión. En 'B', el agua líquida no ebullicará, pero se volverá cada vez menos densa al disminuir constantemente la presión (Ridley, 2013).

Los depósitos magmático-hidrotermales hospedan las mayores concentraciones de metales de interés económico a nivel global (Cu, Au, Zn, Pb, U, Ag, Sn y Mo) (Edwards, 1986).

2.1.1 Componentes del sistema hidrotermal

Se pueden distinguir cinco factores que gatillan la formación de un depósito asociado a un sistema hidrotermal mineralizador (Figura 3) (Ridley, 2013):

1. Fuente y control de la composición del fluido.
2. Fuente de los elementos y minerales disueltos: los elementos y los metales se disuelven en el fluido en la fuente, y durante la trayectoria, por reacción química de la roca por la cual circula el fluido.
3. Vía de migración de fluidos: Puede ser por los poros de la roca o en el caso de rocas cristalinas es más probable que el fluido migre por discontinuidades, ya sean, fracturas, fallas, zonas de contacto. Por lo tanto, las vías de los fluidos son generalmente estructuras.
4. Fuente de energía térmica o mecánica para impulsar la migración de fluidos.
5. Condiciones químicas necesarias para la precipitación de fluidos. En general, la precipitación es el resultado de cambios en la solubilidad del mineral y, por lo tanto, uno o más cambios de temperatura, presión o composición fluida cambiantes.

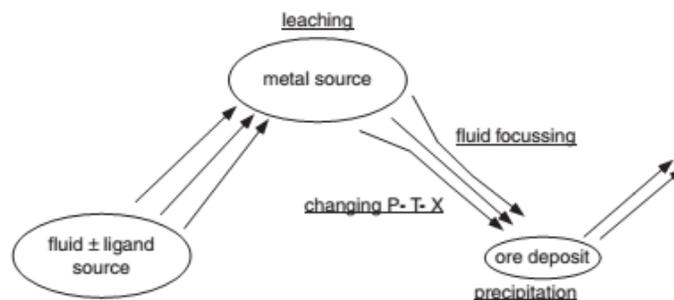


Figura 3: Componentes del sistema hidrotermal (Ridley, 2013).

2.1.2 Alteración hidrotermal

Se entiende como proceso de alteración hidrotermal al intercambio químico ocurrido durante una interacción fluido hidrotermal-roca, lo que conlleva cambios químicos y mineralógicos en la roca expuesta al fluido, provocado por un desequilibrio termodinámico entre ambas fases (Townley, 2001), representado a través de crecimiento, reemplazo, disolución y/o precipitación de minerales en la roca, transformación de sus fases y reacciones de intercambio iónico entre los minerales de la roca y el fluido (Maksaev, 2001). Esta reacción producida entre la roca y el fluido hidrotermal puede ser de distintas intensidades, catalogándose como pervasiva, poco pervasiva o selectiva, indicando un grado de alteración mayor a menor respectivamente y obliterada cuando la roca ha perdido completamente su textura original.

La alteración hidrotermal es un tipo de metamorfismo que incluye la recristalización de la roca a nuevos minerales más estables bajo las condiciones hidrotermales (Maksaev, 2001). Aquí cobra mucha importancia el fluido que afecta a la roca debido a que es el responsable de transportar, mediante los procesos de infiltración o difusión, los constituyentes de las reacciones de intercambio fluido-roca y el calor. Por consiguiente, la alteración implica circulación de fluidos calientes atravesando rocas permeables debido a la presencia de poros interconectados (Maksaev, 2001), por ende, la permeabilidad de la roca juega un rol fundamental. Debido a que la roca y el fluido que circula están en desequilibrio termodinámico, se producen reacciones de intercambio químico irreversible entre ellos; ciertos componentes son extraídos de la roca y agregados al fluido y otros son selectivamente incorporados a la roca, produciendo la transformación mineral.

Se reconocen varios tipos de alteraciones hidrotermales, producto de asociaciones de minerales específicos que comparten características controladas por factores determinados tales como temperatura, composición y pH del fluido, mineralogía de la roca original, presión y el tiempo que tomó llegar a un equilibrio termodinámico, siendo la asociación de los minerales de alteración el reflejo de estos factores. Corbett y Leach, 1998 establecen un gráfico que muestra los minerales que se formarán a ciertas condiciones de presión, temperatura y acidez (Figura 4).

Se presenta a continuación los tipos de asociaciones minerales de alteración más comunes, basado en (Sillitoe 1973, Corbett y Leach 1998, Maksaev 2001, Townley 2001):

- a) Alteración Potásica: Caracterizada por la ocurrencia de feldespato potásico y biotita primaria y secundaria con magnetita diseminada, por acción de un fluido rico en potasio y asociada a la fase hipersalina. Se forma a altas temperaturas (400°C a 650°C) y a condiciones de pH de neutro a alcalino.

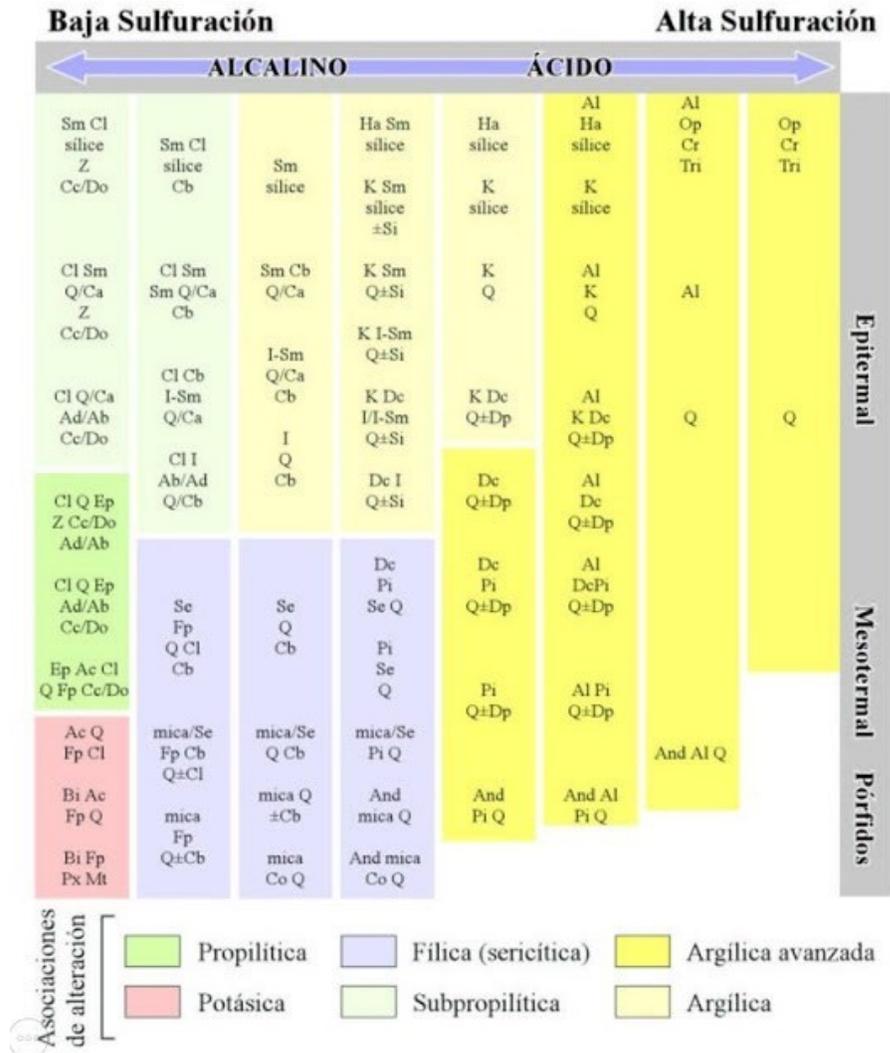
- b) Alteración Propilítica: Se caracteriza por la asociación clorita, epidota, calcita y albita, con y sin pirita, y se produce de forma casi simultánea a la alteración potásica, pero de forma periférica a intrusiones porfídicas. Se forma a una temperatura menor (250°C-425°C), con disminución gradual de la acidez. Ocurrencia de actinolita como zona de alteración propilítica interior.

- c) Alteración Calco-Sódica: También llamada propilítica de alta temperatura; se caracteriza por la ocurrencia de actinolita, albita-oligoclasa-andesina, epidota, magnetita, clorita, escapolita y cuarzo.

- d) Alteración Cuarzo-Sericita (Fílica): Se presenta con cuarzo, sericita y pirita como una sobreimposición tardía a los ensamblajes de alteración potásica y propilítica. Se produce por fluidos ácidos (pH 5-6), de baja temperatura (200°C-300°C) y de baja a moderada salinidad post-ebullición, razón por la que se destruyen los feldespatos y magnetita anterior formando sericita y pirita respectivamente. Incorporación de fluidos meteóricos.

- e) Alteración Argílica: Caracterizada por Caolinita, Montmorillonita, Smectita e Illmenita, producida como una transición entre la alteración potásica y el ambiente epitermal, mostrando destrucción de las texturas. Se forma a temperaturas bajo 200°C, coexistiendo con óxidos de Fe, y pH entre 4 y 5.

f) Alteración Argílica Avanzada: Asociación Dickita, Pirofilita y Alunita. Se produce a condiciones extremadamente ácidas (pH menor a 4) por condensación de vapor. Provocada por un ataque hidrolítico extremo,



rompiendo los fuertes enlaces de aluminio.

Figura 4: Asociaciones de minerales de alteración hidrotermal más comunes en función de la temperatura, presión y pH. Abreviaciones: Ab = albita, Ac = actinolita, Ad = adularia, Al = alunita, And = andalucita, Bi = biotita, Ca = calcitonina, Cb = carbonatos (de Ca, Mg, Mn y/o Fe), Cc = calcita, Cl = clorita, Co = corindón, Cr = cristobalita, De = dickita, Di = diápora, Do = dolomita, Ep = epidota, Fp = feldespatos potásicos, Ha = halloysita, I= illita o illita–esmectita, K = caolinita, Mt = magnetita, Op = ópalo o silice 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 (2003).

2.1.3 Yacimientos tipo IOCG

Los yacimientos tipo IOCG (Iron Oxide-Copper Gold) cuentan con una distribución global a través del espacio y tiempo geológico con edades comprendidas entre el Arcaico al Fanerozoico y se encuentran distribuidos en todos los continentes a excepción de la Antártica (Barton, 2014). (Figura 5)

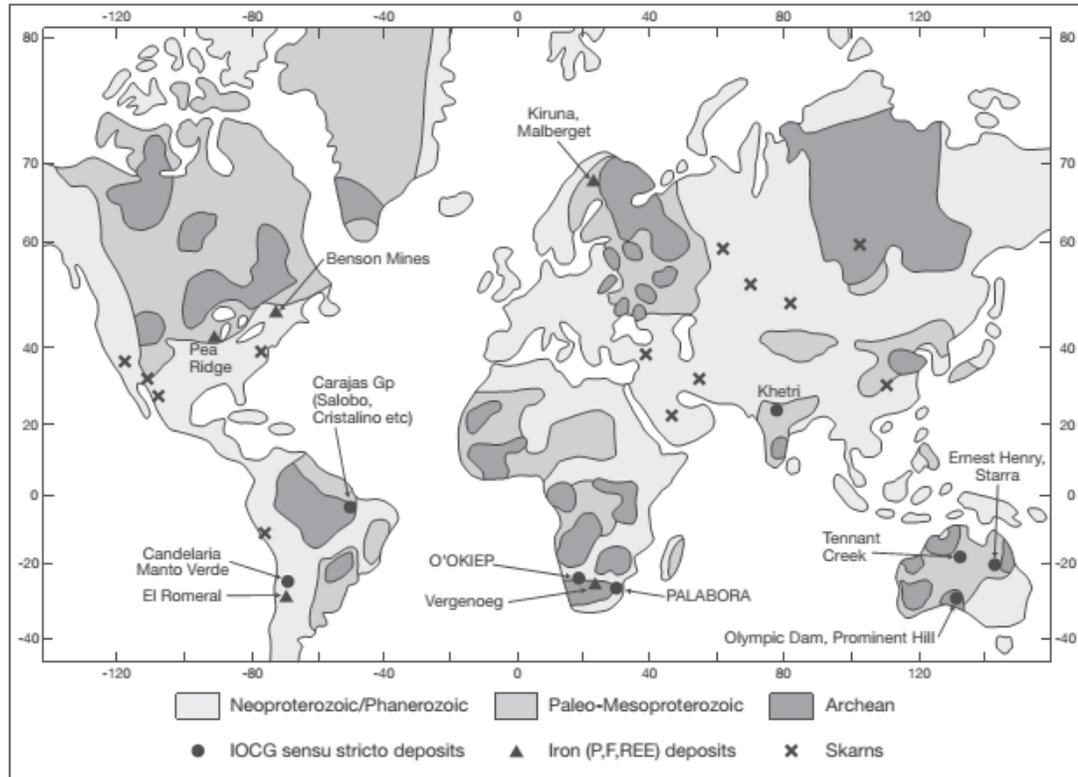


Figura 5: Ubicación espacial y temporal de los principales depósitos IOCG a escala mundial (Groves, 2010).

El modelo genético de los yacimientos tipo IOCG está altamente definido, donde la mineralización consiste en cobre en forma de calcopirita y bornita, oro y óxidos de hierro tales como hematita y magnetita, sumado a contenidos de cobalto, uranio, tierras raras, molibdeno, zinc y plata (Ray y Lefebure, 2000).

Una de las provincias de este tipo de yacimientos mejor desarrolladas se sitúa en la cordillera de la costa en el norte de Chile y sur de Perú, donde estos depósitos se encuentra altamente relacionado a los batolitos mesozoicos y los principales sistemas de

fallas situados paralelos al arco volcánico del Jurásico-Cretácico temprano (Sillitoe, 2003) (Figura 6).

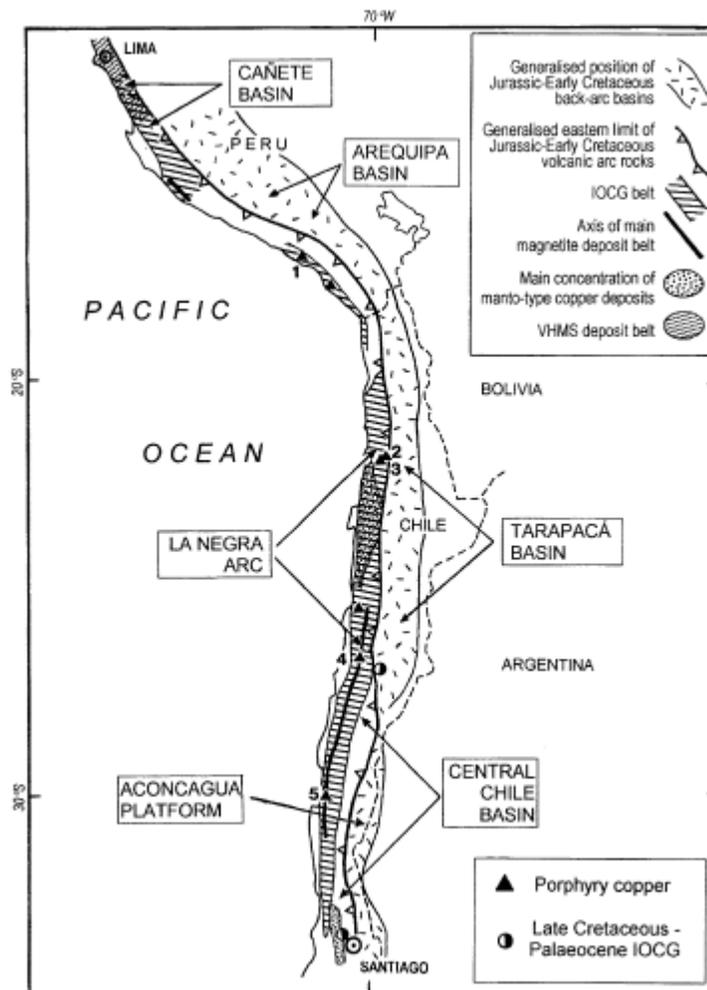


Figura 6: Posición del cinturón IOCG central andino del norte de Chile-sur de Perú respecto al arco magmático Jurásico-Cretácico temprano y una serie de cuencas de trasarco interconectadas a lo largo del borde oriental (Sillitoe, 2003).

Este cinturón o franja incluye depósitos de ocurrencia variada tales como yacimientos tipo vetiformes, mantos, brechas y stockworcks, los cuales se hospedan principalmente en secuencias de rocas volcánicas de composición andesítica-dacítica del Jurásico-Cretácico temprano (Ridley, 2013).

Varios de estos depósitos IOCG se encuentran dentro de extensos volúmenes de roca afectados por alteración hidrotermal del tipo sódica o sódica-cálcica

En estos yacimientos la alteración sódica se caracteriza por la presencia de albita-escapolita generalmente en rocas félsicas y la alteración sódica-cálcica está compuesta por albita-actinolita, diópsido o raramente granate y epidota en rocas máficas. Otro tipo de alteración asociada a estos depósitos es del tipo cálcico, representada por actinolita, diópsido, hornblenda, grunerita y granate (Ridley, 2013). La alteración dentro de los cuerpos minerales se denomina potásica con feldespato potásico en rocas félsicas, biotita en rocas máficas o sericita.

La zonación vertical de los minerales de alteración en unos pocos cientos de metros, a través, y alrededor de un cuerpo mineralizado es característica, por ejemplo, con actinolita en profundidad y clorita en niveles poco profundos, o zonación a través de biotita, sericita y zonas de alteración argílica. Los conjuntos de clorita, sericita-calcita o dolomita-cuarzo y hematita en niveles poco profundos se denominan facies de alteración 'hidrolítica'. Los óxidos de Fe ocurren como magnetita o hematita de forma variable, y en varios depósitos se registra una zonificación vertical, con hematita a poca profundidad dando paso a magnetita a mayor profundidad (Figura 7).

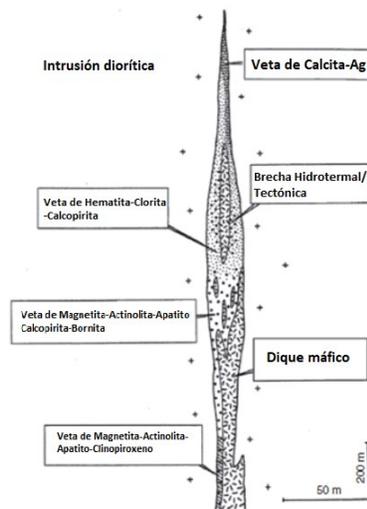


Figura 7: Zonación vertical de una veta de IOCG típica extraído de (Ridley, 2013).

Los depósitos están controlados principalmente por estructuras tectónicas en el ambiente frágil, aunque la deformación dúctil se superpuso localmente con las primeras

etapas de mineralización. Las voluminosas intrusiones toleíticas a calco-alcalinas que albergan u ocurren en las proximidades de los depósitos de IOCG poseen una fuente de manto predominante, carecen de contaminación de la corteza apreciable y están oxidadas, en común con sus secuencias de rocas hospedantes densamente dominadas por los volcanes.

En el norte de Chile, principalmente entre las latitudes 22° y 31° S, la mayoría de los depósitos IOCG están alojados por las rocas volcánicas de la Formación La Negra y sus equivalentes estratigráficos más al sur, así como por los plutones del Jurásico tardío y Cretácico temprano que los intruyen (Figura 8).

Sin embargo, algunos depósitos como Candelaria y Punta del Cobre se relacionan genéticamente a plutones del Cretácico inferior emplazados cerca del contacto entre las secuencias volcánicas del Jurásico tardío-Cretácico inferior (Grupo Punta del Cobre) y las secuencias carbonáticas marinas del Neocomiano (Sillitoe, 2003). (Figura 9)

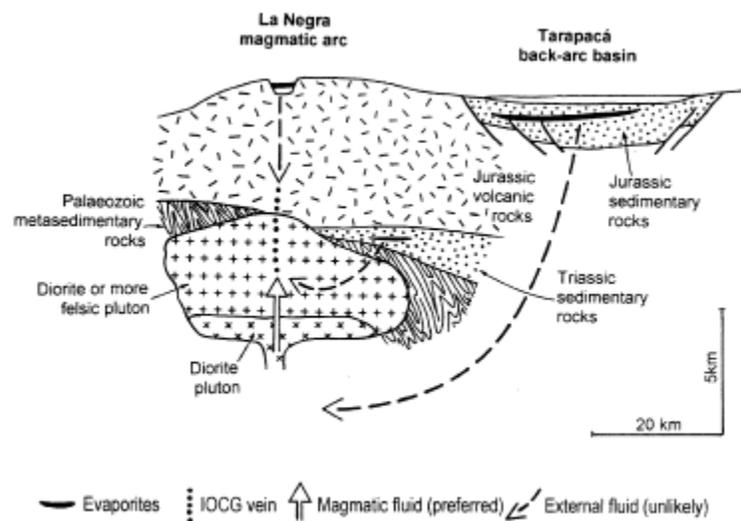


Figura 8: Veta IOCG del Jurásico en el arco de La Negra en el norte de Chile indicando posibles fuentes de fluido mineral (Sillitoe, 2003).

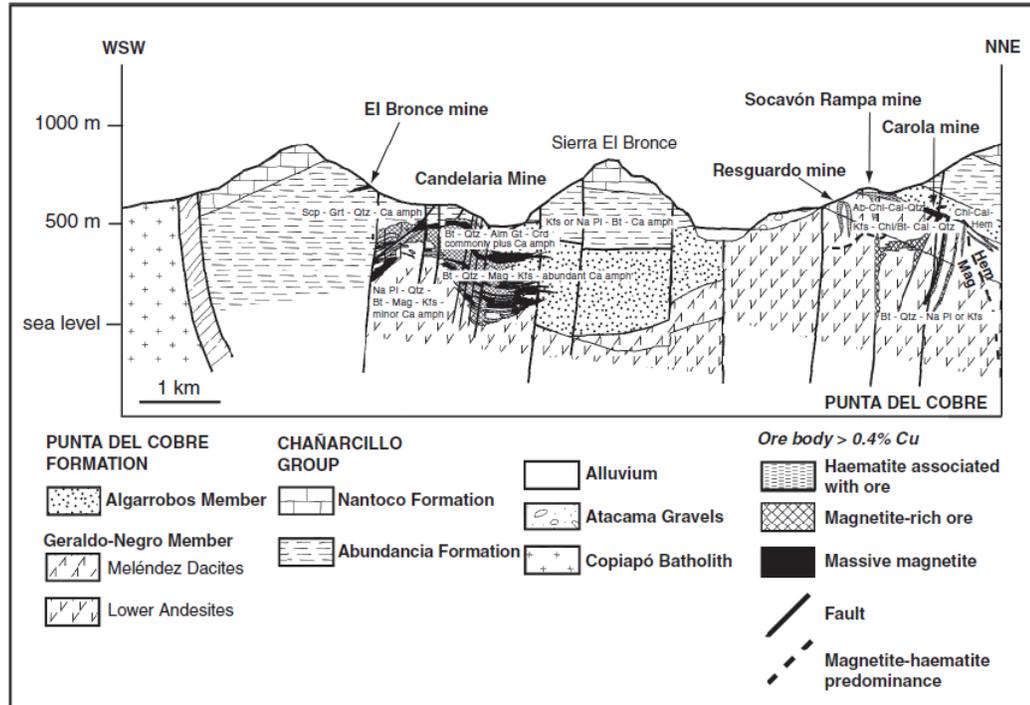


Figura 9: Perfil esquemático del distrito Candelaria-Punta del Cobre (Ridley, 2013).

El origen de los depósitos de IOCG se ha convertido recientemente en un tema de considerable debate, ya que, tanto la salmuera magmática portadora de metales (Hitzman et al. 1992; Pollard 2000) como la salmuera “basinal” externa calentada por intrusiones (Barton y Johnson 1996; Hitzman 2000) son propuestos como fluidos formadores de minerales.

La mayoría de los depósitos tipo IOCG se generaron durante el desarrollo temprano del orógeno andino, cuando la corteza se extendía y atenuaba de manera variable e inusualmente caliente, y el magmatismo era relativamente primitivo además de desarrollarse en regímenes tectónicos tanto extensionales como transtensionales (Sillitoe, 2003).

2.1.4 Yacimientos IOA

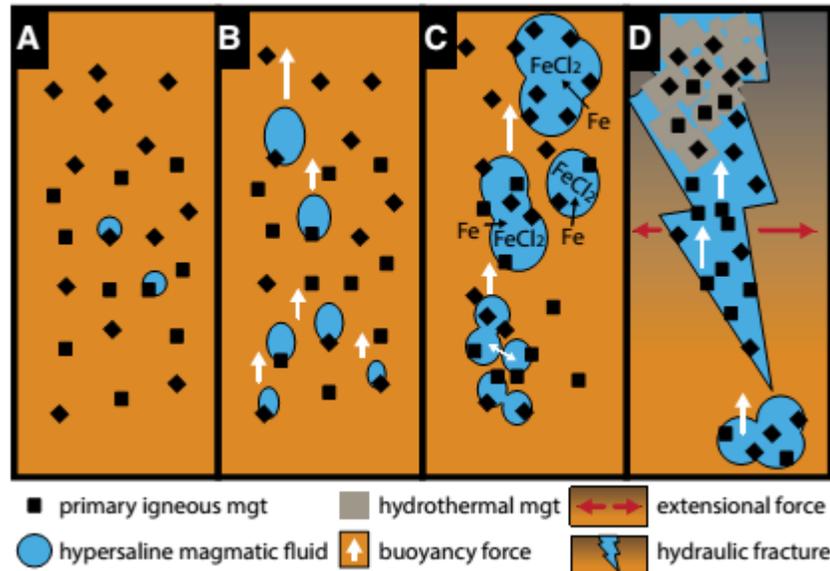
Los depósitos tipo IOA (Iron-Oxide, Apatite) presentan una mineralización principalmente de magnetita masiva, la cual puede corresponder a cuerpos tabulares,

lentiformes o, en algunos casos, vetillas de magnetita en cuerpos intrusivos (Sillitoe, 2003), acompañada por actinolita y apatito en menor cantidad (Vivallo y Henriquez, 1997). En el norte de Chile se hospedan en formaciones volcánicas jurásicas y cretácicas, como la Formación La Negra y Punta del Cobre (Ruiz et al., 1968; Bookstrom, 1977) y, generalmente, se encuentran asociados espacial y temporalmente a cuerpos intrusivos de composición máfica – intermedia (Hitzman, 2000). Es posible encontrar yacimientos IOA alrededor del mundo, en distintos contextos geológicos y edades, habiendo desde edades proterozoicas, y constituyendo los depósitos presentes en la Franja Ferrífera Chilena (FFC) los más jóvenes de este tipo. Esto convierte a la FFC en una zona de estudio única, al encontrarse los depósitos con un mayor grado de preservación en comparación con los otros yacimientos IOA, que presentan altos grados de deformación y alteración, lo que dificulta su estudio.

Existen distintos modelos respecto al origen de los yacimientos de tipo IOA. Ruiz et al. (1965, 1968) proponen un modelo de reemplazo hidrotermal basados en la fuerte alteración hidrotermal observada en estos yacimientos, mientras que Pollard (2001) presenta un modelo de metasomatismo, a partir de una desmezcla de fluidos magmáticos. Espinoza (1990), Nyström y Henriquez (1994), y Naslund et al. (2002) postulan un origen puramente magmático a partir de un fundido rico en Fe, basados en evidencias de terreno, texturales y químicas observadas principalmente en El Laco.

Knipping et al. (2015), a partir de datos de microsonda de alta resolución, junto con pares $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{56}\text{Fe}$ en las magnetitas de Los Colorados proponen un nuevo modelo que incorpora ambas visiones en un modelo magmático – hidrotermal donde la concentración de Fe se realizaría por efecto de flotación de cristales magmáticos de magnetita en burbujas de fluido exseltas desde un magma máfico - intermedio, las cuales al ascender generan una signatura geoquímica en las magnetitas de Los Colorados que varía desde un núcleo magmático a bordes hidrotermales (Figura 10). Este modelo, además de proporcionar un mecanismo alternativo para estos depósitos, permite establecer un posible vínculo genético con los depósitos IOCG, siendo un mismo fluido el responsable de la formación de los sistemas tipo IOA en profundidad y los IOCG en niveles más someros. Si bien existe evidencia analítica y experimental que permite

sustentar el modelo de mineralización de Fe-apatito en yacimientos IOA, y su potencial vínculo con miembros más ricos en Cu y Au (Knipping et al., 2015), se requiere información mineralógica y geoquímica adicional que permita demostrar que los fluidos mineralizadores de tipo IOA tengan el potencial de generar mineralización de tipo



IOCG. (Figura 11)

Figura 10: Modelo propuesto enseñando una nucleación de magnetita (mgt) a modo de microlitos en solución de sílice (naranja) (A), ascenso de burbujas de magnetita a modo de boullancia (B), posterior ascenso, desarrollo, fusión y acumulación de magnetita primaria además de exsolución de Fe dentro de los fluidos de alta salinidad (C), formación de fracturas hidráulicas (Durante la acción de fuerzas tectónicas) propician una rápida y eficiente segregación de fluidos ricos en magnetita durante un enfriamiento progresivo (Knipping et al., 2015).

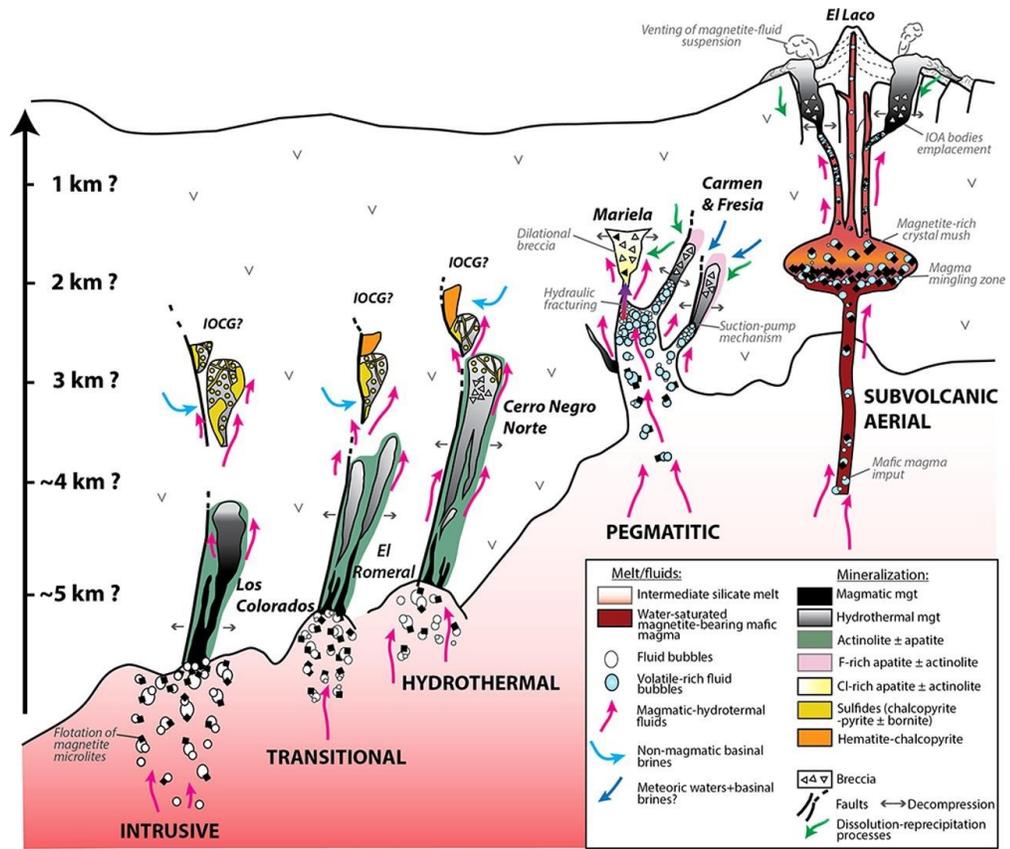


Figura 11: Genesis de depósitos IOA y su link genético con depósitos IOCG (Palma et al., 2020).

3 MARCO GEOLÓGICO

3.1 Geología Regional

La Cordillera de la Costa ubicada en el norte de Chile está compuesta de numerosos complejos plutónicos de composición diorítica a monzodiorítica cuya intrusión está comprendida entre 190 y 100 Ma. (Grocott y Taylor 2002). Estos complejos intruyeron una gruesa capa de rocas volcánicas y volcanoclásticas originadas en un ambiente de intra arco o tras arco, representados por la unidad jurásica La Negra y del Cretácico temprano las formaciones Punta del Cobre y Bandurrias. (Lara and Godoy 1998; Arévalo 2005). La extensa actividad ígnea durante el Jurásico medio e inicios del Cretácico es un rasgo característico que ocurre bajo un margen extensional en respuesta a un retroceso en la placa oceánica (roll-back) y una subducción de tipo mariana de alto ángulo (Mpodosis y Ramos 1990; Grocott y Taylor 2002). A lo largo de la Cordillera de la Costa entre el norte de Chile y el sur de Perú, el tramo oeste del arco Mesozoico y el tras arco aparentemente fue removido por subducción erosión o subducción oblicua.

La Franja Ferrífera Chilena (FFC) (Figura 12) se extiende por más de 600 km a lo largo de la Cordillera de la Costa, desde la región de Atacama (26°S) hasta la región de Coquimbo (31°S), alojando numerosos depósitos de edad mesozoica (jurásica/cretácica) ricos en Fe, los cuales están clasificados como depósitos IOCG o IOA (Nyström y Henríquez, 1994; Oyarzun et al., 2003; Groves et al., 2010; Bilenker et al., 2016). Estos depósitos se encuentran asociados al Sistema de Fallas de Atacama (SFA), que se extiende por más de 1.000 km entre la latitud 20 y 30°S, corresponde a una serie de fallas con concavidad hacia el oeste, compuesta de segmentos con rumbo NNW, N y NNE con zonas de comportamiento frágil y dúctil con movimiento de rumbo sinistral. (Hervé 1987; Scheuber and Andriessen 1990; Brown et al., 1993).

En el caso de la deformación dúctil se registran facies de esquistos verdes hasta anfibolitas en las milonitas asociadas al SFA, formadas a una profundidad inferior a 10 km, estando relacionadas al emplazamiento de los plutones mesozoicos, en la mayoría de casos las fallas se ubican sobre milonitas pre existentes, próximas al contacto con los cuerpos intrusivos (Scheuber y Andriessen 1990; Scheuber et al. 1995; Brown et al. 1993). Entre las latitudes 25 y 27° se origina un cambio en el régimen estructural

pasando de uno de tipo normal a uno transtensivo sinistral a inicio del Cretácico (+/-132 Ma). Luego, a inicios del cretácico tardío se produce un cese en la transtensión, gatillado por la máxima apertura de la cuenca del océano Atlántico, causando una inversión tectónica en la región de la cuenca de tras arco formada durante este periodo. (Grocott and Wilson 1997; Grocott and Taylor 2002; Mpodozis and Ramos 1990; Ladino et al. 1997). Los principales yacimientos ubicados cercanos al área de estudio son: Cerro Negro Norte y Mina Galleguillos. Siendo Cerro Negro Norte un depósito IOA (Iron-Oxide Apatite u óxido de hierro-apatito) emplazado, principalmente, en rocas andesíticas.

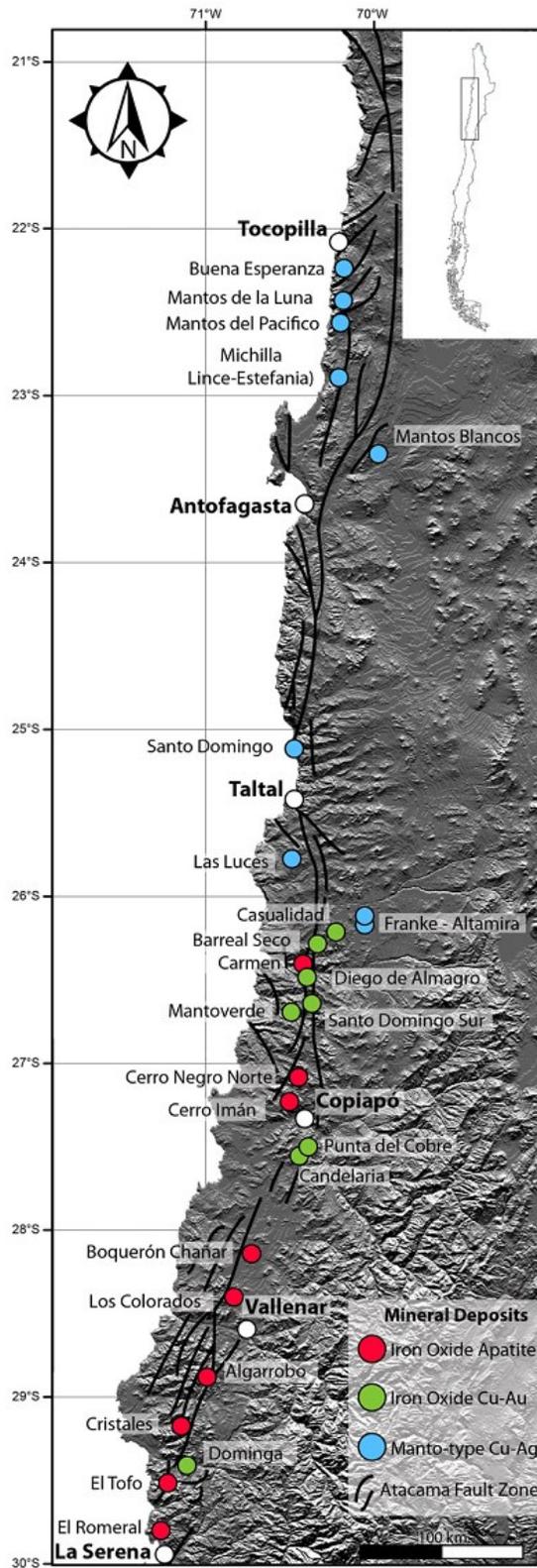


Figura 12: Mapa que indica la ubicación de los principales depósitos IOCG e IOA entre el Jurásico y el Cretácico temprano de la franja IOCG de la cordillera de la Costa. (Palma, 2020).

3.2 Geología Local

El área de estudio se encuentra situada en el Plutón La Borracha (Figura 13), este se encuentra conformado por monzodioritas cuarcíferas y monzonitas cuarcíferas de grano medio a fino y colores rosados a verdosos, con variedades menores a monzogranito. En los afloramientos de la zona norte del plutón se reconocieron facies de dioritas, microdioritas y gabros. Este corresponde a un cuerpo plutónico cuya área expuesta es de 250 km² con forma romboidal, elongado en forma NNW con un eje mayor de 57 km, que se extiende desde su contacto intrusivo con rocas estratificadas, hasta su borde milonitizado en el noroeste, (Lara y Godoy, 1998), límite que constituye a la rama principal del SFA. Hacia el SSW está limitado por la Falla Bandurrias que lo yuxtapone con el plutón La Brea.

Sobreyaciendo a la unidad descrita previamente se sitúan depósitos aluviales que presentan clastos que varían de tamaño grava fina a bloques, de composición polimíctica con clastos de diorita, cuarzo-diorita, cuarzo-monzo diorita, micro granito, micro diorita, micro gabro entre otras. También, depósitos coluviales no consolidados compuestos principalmente por sedimentos tamaño arena media con composición cuarzo-feldespáticas. Finalmente, existen depósitos eólicos compuestos por arenas cuarzo feldespáticas bien seleccionadas que forman dunas barjanoides.

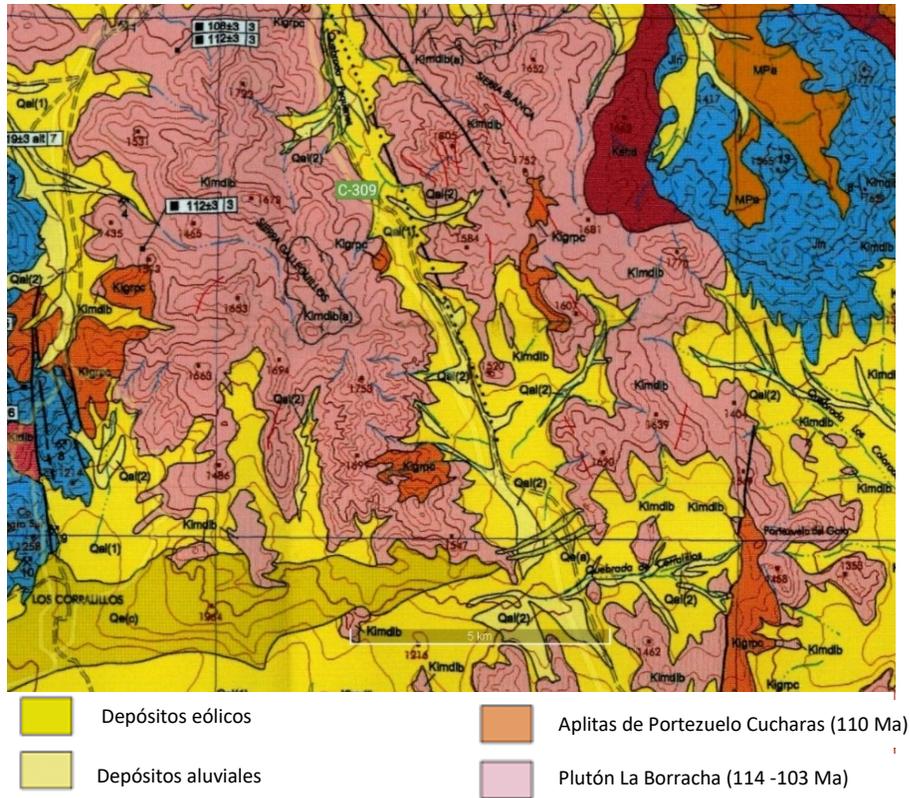


Figura 13: Área de estudio con sus respectivas unidades geológicas en la carta de Copiapó. Modificado de (Arévalo, 2005).

4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

4.1 Etapa de Gabinete 1

Se realizó una completa búsqueda y recopilación de bibliografía proveniente de revistas científicas, congresos, memorias, tesis y mapas geológicos que contienen información relevante sobre la geología del sector, como también sobre las metodologías para determinar cinemáticas mediante el análisis de estructuras principales y secundarias. También, se realizó un análisis de la base de mapeo mediante imágenes satelitales y el software ArcGIS en busca de posibles zonas de interés que ayudaron a idear rutas para cada día en terreno.

4.2 Etapa de Campo

Esta etapa consta de una salida de campo con una duración de 30 días donde se llevó a cabo de un levantamiento geológico del sector con énfasis en reconocer las litologías, mineralizaciones y la geología estructural del sector.

4.2.1 Estrategia de muestreo litológico

Se idearon rutas para cada día de terreno que contienen lugares de interés de estudio, con la finalidad de obtener la mayor cantidad de información representativa sobre el área de estudio. Teniendo como finalidad realizar un levantamiento litológico y estructural utilizando la siguiente metodología: Primero se anotan las coordenadas del punto, se toman muestras de rocas realizando un análisis macroscópico definiendo tipo de roca, textura, mineralogía y posible mineralización, luego, se codifica para un posterior análisis, obteniendo un total de 61 muestras.

4.2.2 Estrategia de muestreo estructural

La toma de datos estructurales fue con brújula Brunton en notación tipo americano (rumbo/buzamiento y dirección de inclinación), en el caso de estructuras

planares y *Trend/Plunge* tales como estrías de falla, espejos de falla, fibras recristalizadas, entre otros. En caso de que el punto cumpla con los siguiente: Una estructura principal, una secundaria, lineaciones y el mismo tipo de relleno se puede inferir que estas son sintectónicas permitiendo determinar su cinemática mediante el análisis de sus indicadores cinemáticos, para así, determinar si el movimiento es dextral, sinistral, normal o inverso. Finalmente se realiza un esquema que describa el afloramiento de manera detallada indicando las litologías, estructuras, alteraciones, mineralizaciones, contactos y una descripción del afloramiento.

4.2.3 Levantamiento geológico

Este mapa consiste en ir plasmando de manera digital mediante el software ArcGIS 10.5 con una escala de 1:10.000 toda la información recopilada día a día, con la finalidad de tener una mejor visualización del avance, la recopilación de datos y empezar a definir de manera preliminar las unidades, zonas de mineralización, ubicación de estructuras, alteraciones que conforman al área de estudio.

4.3 Etapa de gabinete 2

4.3.1 Análisis de campo

Se procedió a organizar toda la información recopilada en el trabajo de campo. Primero se analiza a nivel macro las muestras obtenidas en terreno y se seleccionan las muestras para realizar análisis de fluorescencia de rayos x.

Para la clasificación visual de rocas intrusivas se utilizó el diagrama de Streckeisen (1986) y para rocas volcánicas el triángulo de Streckeisen (1980), además de complementar con el desarrollo de cristales, tamaño, % de minerales.

4.3.2 Selección de muestras

La metodología empleada para seleccionar las muestras es el siguiente: En base a las rocas recopiladas en el transcurso de la etapa de campo se analiza su ubicación con el mapa del área de estudio, con la finalidad de encontrar la muestra apta para el análisis, luego, se procede a reducir el tamaño de la muestra.

4.3.3 Análisis de Fluorescencia de Rayos X (pXRF)

Las 28 muestras seleccionadas fueron sometidas a análisis de fluorescencia de Rayos x el que indica la cantidad en ppm de cada elemento presente en la roca, con la finalidad de someter estos resultados a un análisis estadístico, para comparar el comportamiento de los compuestos presentes en las distintas unidades (rocas, diques y vetas).

5 RESULTADOS

5.1 Relaciones de campo

5.1.1 Litologías

5.1.1.1 Unidad Ígnea Intrusiva.

Unidad compuesta de un cuerpo intrusivo cuya extensión comprende la totalidad del área de estudio, su composición consta de diorita, cuarzo-diorítica y cuarzo-monzo diorita (Figura 14) de acuerdo a Streckeisen (1979) con presencia de cuarzo 0-15%, feldespato potásico 0-15% y plagioclasa 80-85% de tamaño medio a muy grueso (1-7 mm). Presenta cuarzo secundario proveniente de los múltiples cuerpos vetiformes encontrados en el área de estudio. Esta unidad fue intruida por la unidad ígnea hipabisal. Cuenta con múltiples intrusiones de cuerpos hipabisales en toda su extensión (Figura 17).



Figura 14: Afloramientos pertenecientes a la Unidad Ígnea Intrusiva, diorita, cuarzo diorita y cuarzo monzo diorita

5.1.1.2 Unidad Ígnea Hipabisal.

Unidad compuesta de diques y apófisis que se conforma principalmente por microgranitos con presencia de cuarzo anhedral, plagioclasa, feldespato potásico, biotita y hornblenda de tamaño medio (2-0.005 mm) de acuerdo a IUGS, presenta meteorización química por redox afectando a biotita y hornblenda. Los porcentajes normalizados son: 20% de cuarzo, 20% de plagioclasa y 60% de feldespato potásico. Y en menor cantidad micro dioritas y micro gabros de tamaño medio- grueso (0.05-3mm) con cuarzo +/- 0 -2%, plagioclasa +/- 98-100%, +/-hornblenda. Con un índice de color (IC) leucocrático (IC=5%) para las microdioritas y, melanocrático (IC=70%) para el micro gabro (Figura 15). En base a la relación de corte entre los múltiples cuerpos distribuidos en la zona se puede establecer una temporalidad relativa donde los microgranitos fueron los primeros en emplazarse, seguido de los microdioritas y los microgabros (Figura 17).

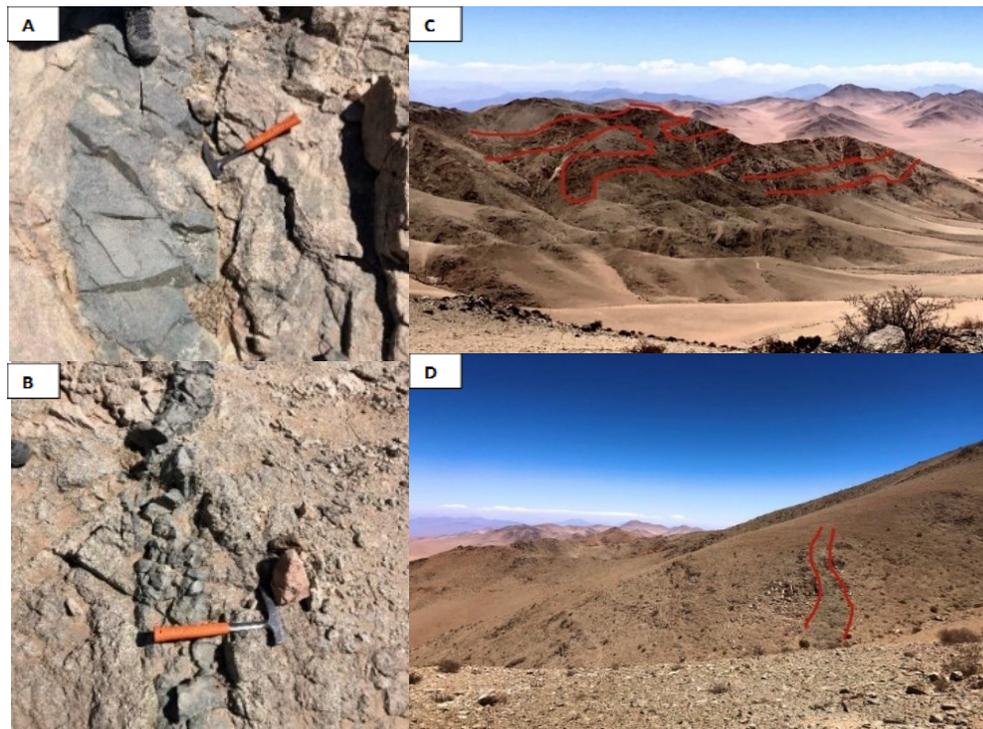


Figura 15: Ejemplos de afloramientos pertenecientes a la Unidad ígnea hipabisal, en la figura A, B, C y D se observan diques del orden de los 30 cm hasta los 2m de potencia.

5.1.1.3 Depósitos aluviales no consolidados

Estos depósitos presentan clastos que varían de tamaño grava fina a bloques, de composición polimíctica con clastos de diorita, cuarzo-diorita, cuarzo-monzo diorita, micro granito, micro diorita, micro gabro entre otras. Los clastos presentan un grado de redondez entre sub anguloso a anguloso, con mala selección, inversos en una matriz arena con alto contenido de cuarzo. Este tipo de depósito se asocia a zonas de drenaje esporádico. La unidad está en contacto erosivo con las unidades ígnea hipabisal e intrusiva (Figura 17).

5.1.1.4 Depósitos coluviales no consolidados

Estos depósitos están compuestos principalmente por sedimentos tamaño arena media con composición cuarzo-feldespáticas, en menor cantidad existen clastos de composición de diorita, cuarzo-diorita, cuarzo-monzo diorita, micro granito, micro diorita, micro gabro. Además, estos depósitos se desarrollan en taludes, como escombros de falda y quebradas cortas de gran pendiente. La unidad sobreyace mediante contacto erosivo con las unidades ígnea hipabisal e intrusiva, respecto a la unidad de depósitos aluviales no consolidados y los eólicos donde no se aprecia ningún tipo de contacto, ya que, ambos depósitos son sin-genéticos. (Figura 17)

5.1.1.5 Depósitos eólicos

Estos depósitos están compuestos por arenas cuarzo feldespáticas bien seleccionadas, no consolidadas, de grano grueso a fino y de madurez textural buena, el tipo transporte que presentan es por acción eólica formando dunas barjanoides (Figura 16), lo que indica una dirección del viento preferencial hacia el este. La unidad se sitúa al suroeste del área de estudio (Figura 17).



Figura 16: Duna barjanoide que indica la dirección preferencial del viento en dirección suroeste.

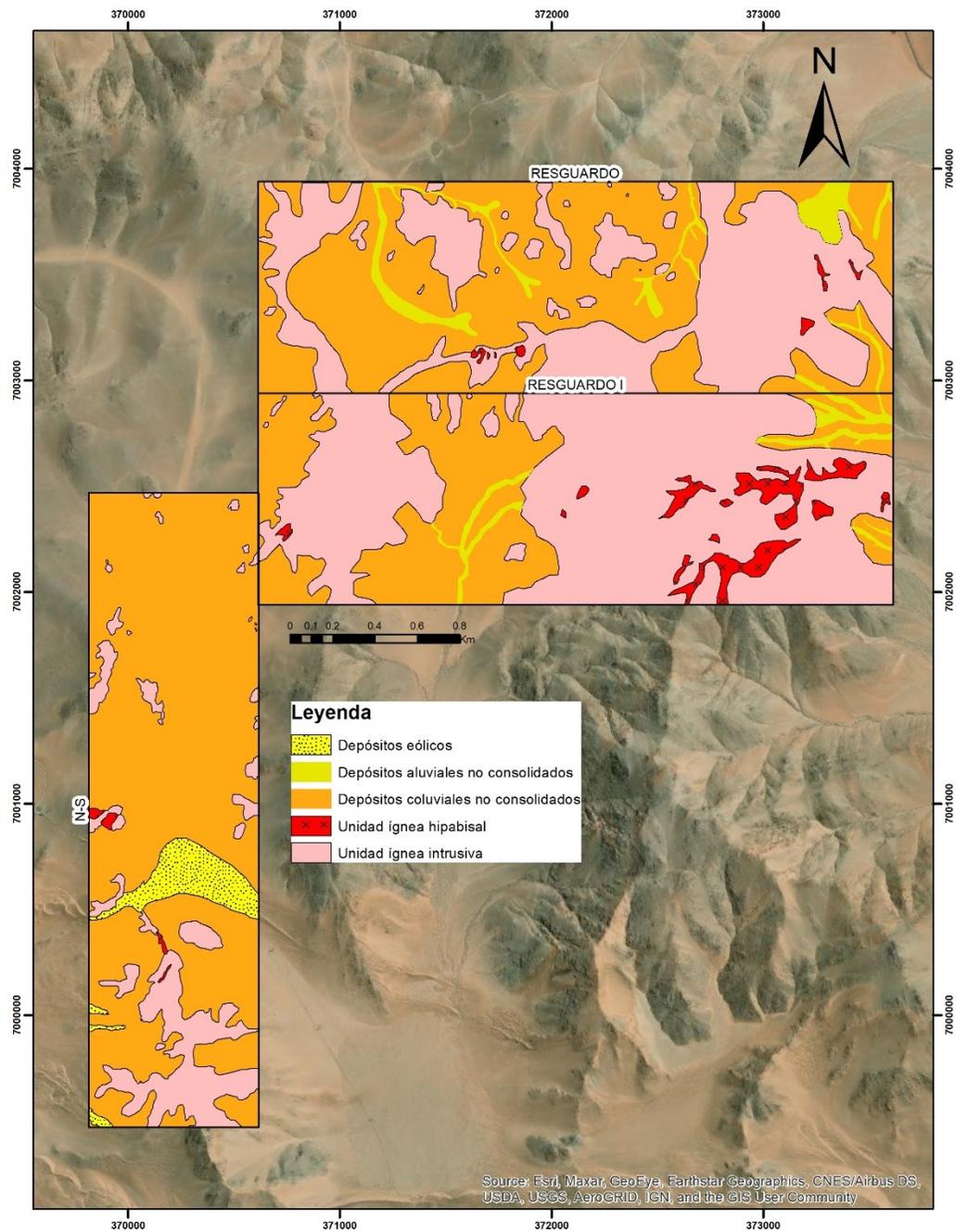


Figura 17: Mapa geológico con la ubicación espacial de cada unidad litológica descrita. En amarillo con puntos se sitúan los Depósitos Eólicos, amarillo los Depósitos Aluviales no Consolidados.

5.1.2 Alteraciones

5.1.2.1 Silicificación

Se trata de un reemplazo de la roca original por un agregado, generalmente de grano fino, de textura masiva (Figura 18). Posee un gran control estructural, ya que, se asocia a la presencia de vetas de cuarzo. Esta alteración se encuentra afectada a las rocas dioríticas y cuarzo-dioríticas.



Figura 18: Afloramiento de diorita afectada por los fluidos hidrotermales presentes en los cuerpos vetiformes mostrando una fuerte silicificación situada en la zona SE del área de estudio.

5.1.2.2 Epidotización

Se encuentra principalmente relacionada a rocas ígneas intrusivas de composición diorítica, su modo de ocurrencia es en vetillas menores a 5 cm, también, de manera diseminada en determinadas áreas y como halo de alteración en vetas potentes de magnetita. Está muy relacionada espacialmente con la magnetita y la clorita (Figura 19).



Figura 19: Diorita perteneciente a la Unidad Ígnea Intrusiva que presenta una fuerte epidotización a modo de halo, en el costado derecho se aprecia parte de una veta de magnetita masiva.

5.1.2.3 Turmalinización

Esta alteración se encuentra emplazada en vetillas <5 cm, y como Brecha hidrotermal en microgranitos perteneciente a la Unidad ígnea hipabisal. Dicho cuerpo de brecha presenta clastos de composición monomíctica de tamaños de 0.2 a 5 cm, subangulosos a angulosos, matriz soportada de turmalina y fábrica isotrópica (Figura 20). Existe otro afloramiento de brecha hidrotermal compuesto de cuarzo-turmalina situada al sur del área de estudio. Estas brechas indican fracturamiento hidráulico de la roca de caja.



Figura 20: Brechas hidrotermales de turmalina, con clastos angulosos y matriz soportada. A) Presenta clastos granítica y B) Presenta clastos de rocas silicificadas.

5.1.2.4 Vuggy-Sílica

Se encuentra asociada a fluidos de una temperatura de 350°C y pH muy ácidos (1- 3.5), que obliteran la roca hospedante y disuelve los minerales que la compone (a excepción del cuarzo), dejando una textura oquerosa. Se ubica en la parte centro - sur del polígono N-S, afectando a la Unidad Ígnea Intrusiva. (Figura 21)



Figura 21: Ejemplar de roca que presenta alteración vuggy sílica, en la figura se pueden apreciar las cavidades originadas por la disolución de feldespatos y anfíboles de la roca de caja.

5.1.2.5 Argílica moderada

Alteración asociada a fluidos de baja temperatura y de pH ácido (3-6). Al entrar en contacto con la roca de caja, oblitera las plagioclasas, bajando el grado de cohesión de los minerales, provocando que se disgregue al contacto con la mano (Figura 22).



Figura 22: Afloramiento de alteración argílica moderada donde se aprecia la destrucción textural de la roca de caja.

5.1.2.6 Cloritización

Esta alteración afecta principalmente a anfíboles, tales como la hornblenda, logrando su completa destrucción y recristalización a clorita. Se encuentra afectando a la Unidad Ígnea Intrusiva y se encuentra asociada con magnetita y epidota (Figura 23).

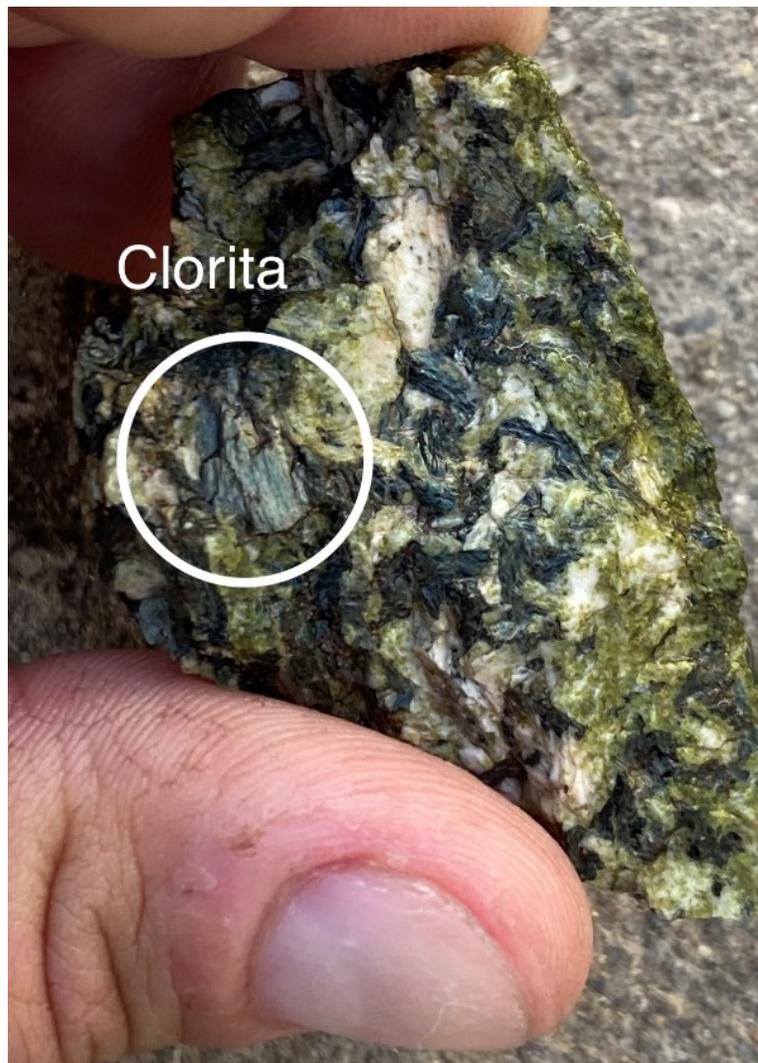


Figura 23: Diorita alterada a clorita, donde dicha alteración afectó a los anfíboles de la roca.

5.1.2.7 Oxidación supérgena.

Alteración ubicada principalmente en los cuerpos vetiformes de composición cuarcífera y de carbonatos, y en menor parte en fallas de la zona, llegando a formar siderita (FeCO_3) y óxidos de hierro (hematita, goethita y jarosita) (Figura 24).



Figura 24: Ejemplo de oxidación supérgena en una falla del sector, las zonas de color rojizo corresponden a óxidos de hierro, específicamente hematita.

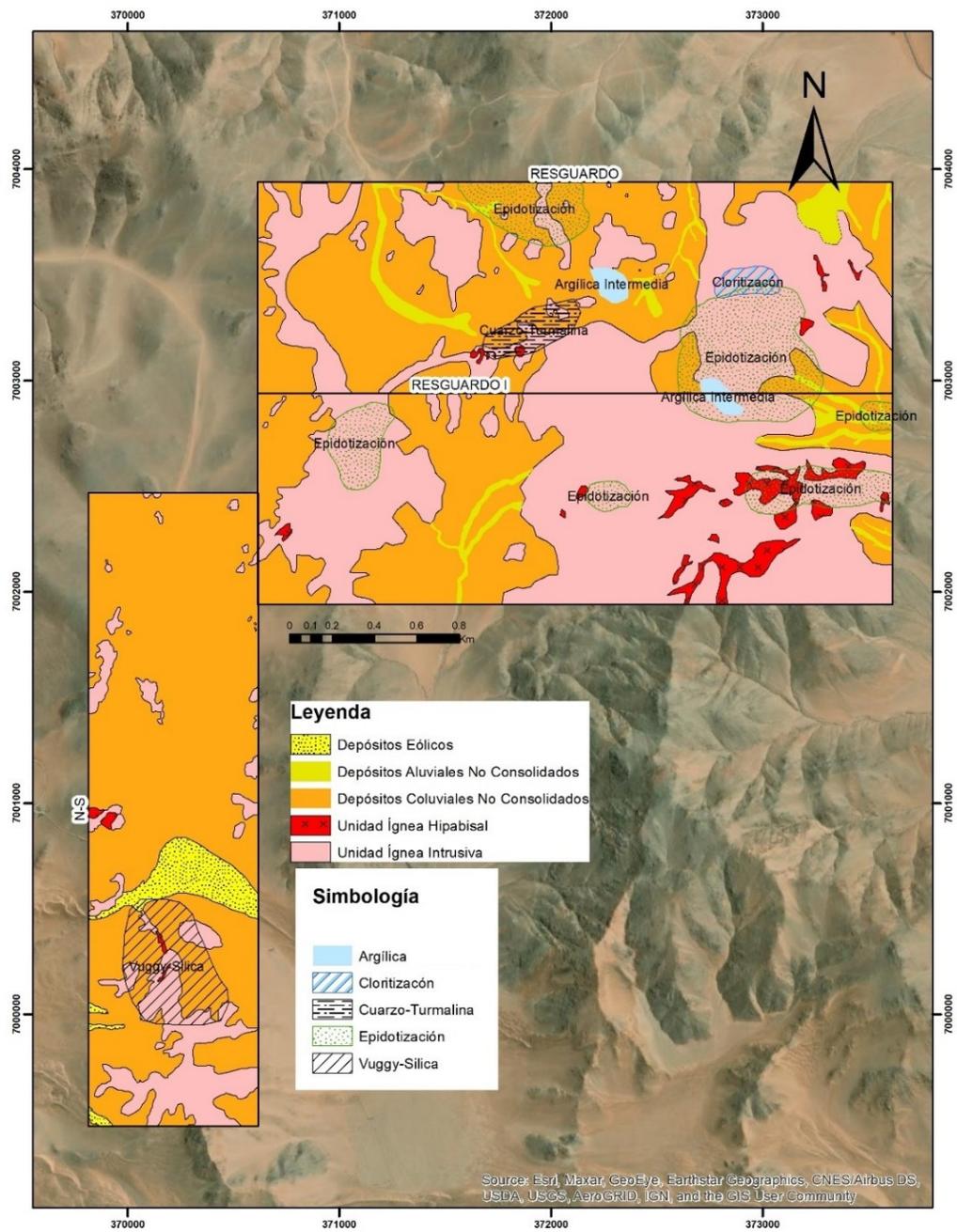


Figura 25: Mapa geológico con la ubicación espacial de cada unidad litológica y zonas de alteración descritas.

5.1.3 Mineralización

Se han observado distintas zonas mineralizadas en las áreas de estudio, incluyendo. Las zonas mineralizadas están compuestas por: Óxidos de hierro (hematita, y magnetita), Carbonatos (calcita, siderita y malaquita), Silicatos de Cu (crisocola), Óxidos de Mn (pirolusita), Sulfuros de Fe (pirita) y de sulfuros de Fe-Cu (calcopirita). La mineralización ocurre principalmente en vetas de cuarzo-calcita cuyas potencias varían entre 0.05m y 3m.

5.1.3.1 Óxidos de Fe

Son el producto de la oxidación de minerales con contenido de Fe principalmente hospedados en vetas que varían su potencia desde los 3 cm hasta 1.5m. Compuestos, principalmente, de magnetita ubicada en el sector centro de Resguardo y Resguardo 1, con ocurrencia mineral en vetillas (Figura 26).



Figura 26: Veta de magnetita con una potencia de 40cm, hospedada en diorita con fuerte alteración a epidota.

5.1.3.2 Carbonatos

El mineral más abundante, es la calcita, que se encuentra en cuerpos vetiformes, desde 0.05 hasta 2m de potencia (Figura 27) en la parte oeste de Resguardo, generalmente asociada con cuarzo secundario. La siderita se encuentra en casi toda la extensión de las concesiones, asociada generalmente a calcita y óxidos de Fe (hematita, jarosita). Para el caso de la malaquita, se encuentra asociada a vetas de cuarzo-calcita, teniendo una abundancia muy por debajo al 1%.



Figura 27: Considerable veta compuesta principalmente de calcita y en menor proporción cuarzo en las paredes, la potencia de la estructura es de 1m.

5.1.3.3 Óxidos de Cu y Silicatos de Cu

Se encuentran asociados a las vetas compuestas de cuarzo-calcita-óxidos de Fe de ocurrencia disseminada. El mineral predominante es crisocola, su presencia es en las vetas con orientación N-S, NE y NW. Dichos silicatos y óxidos ocurren junto a cuarzo y calcita (Figura 28).

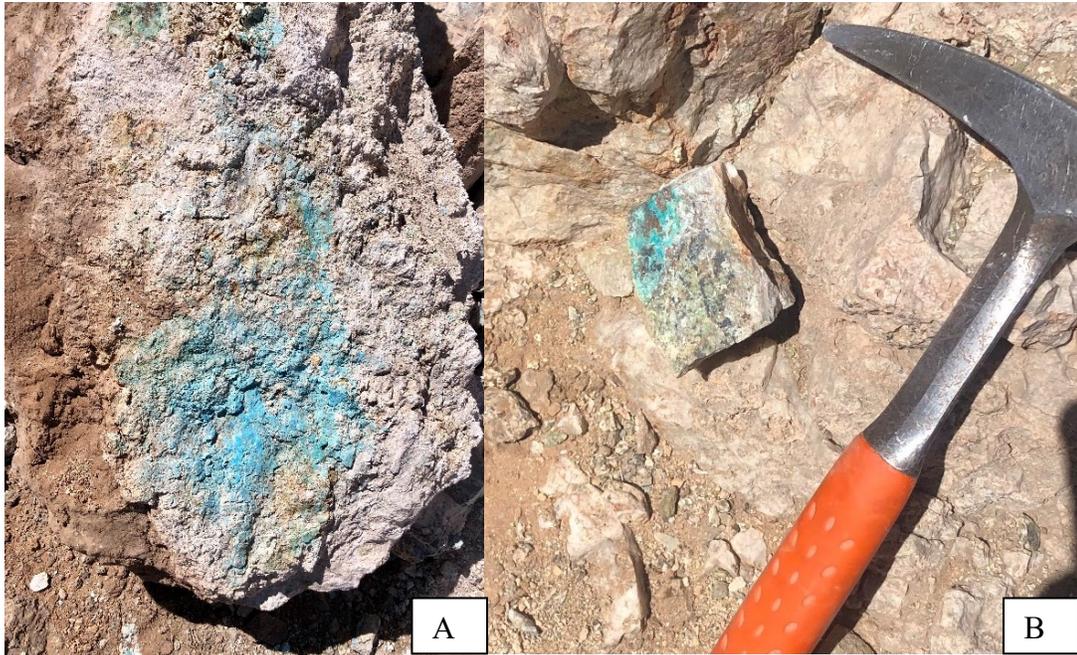


Figura 28: Muestras de crisocola en vetas, A) veta con salbanda y B) pátina de crisocola en una veta de cuarzo en contacto con dioritas.

5.1.3.4 Pirolusita

Su fórmula química es $Mn^{4+}O_2$ y corresponde a dióxido de manganeso. La pirolusita es un mineral opaco de color entre negro y gris oscuro, con brillo metálico y raya negra a negra azulina. Se ubica principalmente en rocas con alteración argílica, de hábito dendrítico y con ocurrencia disseminada.

5.1.3.5 Sulfuros primarios (de Fe y Cu-Fe)

Se encuentran ubicados en las vetas de cuarzo-calcita, siendo el cuarzo, el mineral espacialmente asociado a ambos sulfuros. La calcopirita se encuentra oxidada y, ocasionalmente, con halos de oxidación. El modo de ocurrencia de ambos minerales es diseminado en los halos de alteración y, en el caso de la pirita, en hábito piritoedro (Figura 29).

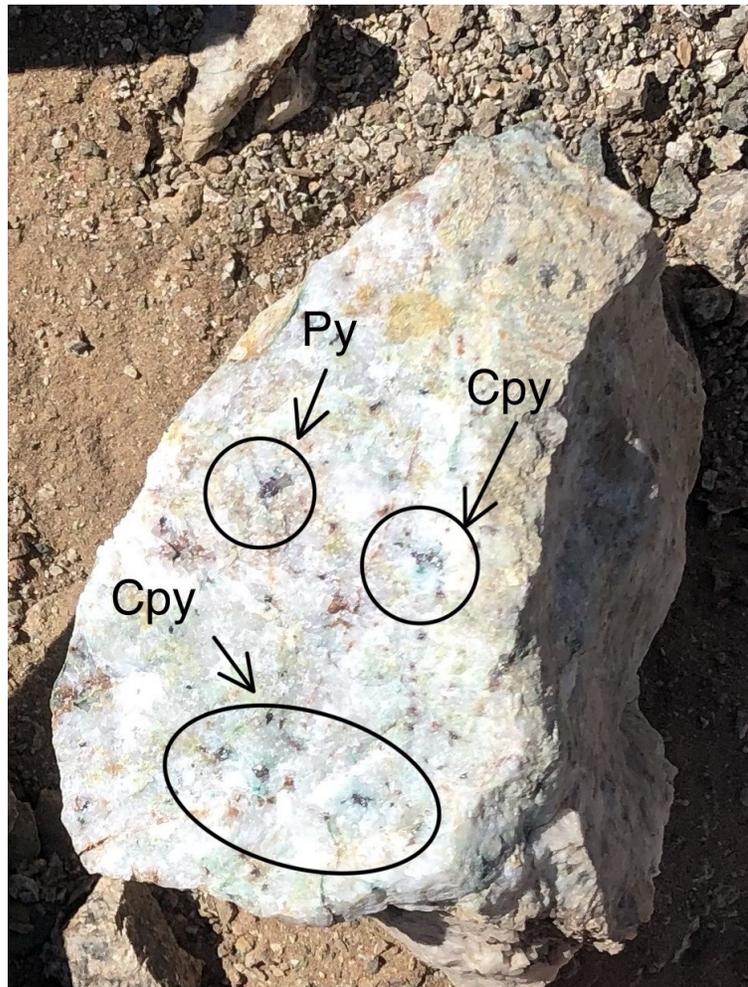


Figura 29: Veta de cuarzo con pirita (Py) y calcopirita (Cpy).

5.2 Geología estructural

5.2.1 Descripción de estructuras

Las estructuras medidas en la zona de estudio corresponden a vetas ya sea de cuarzo, cuarzo calcita, magnetita masiva, brechas hidrotermales, fallas con mineralización de óxidos de Cu y diques (Figura 32).

5.2.2 Análisis estructural

Respecto a las estructuras estudiadas en terreno, se logró obtener la actitud de 107 estructuras correspondientes a vetas, vetillas, diques y planos de falla. Se utilizó un diagrama de roseta para visualizar de mejor manera la distribución de los rumbos preferenciales, donde destacan 2 tendencias principales: la primera corresponde a N05°E la que fue definida mediante 20 estructuras, el segundo es N25°W y se definió en base a 17 estructuras. En el caso del diagrama de concentración de polos (Figura 31) se aprecian tres estructuras preferenciales: La primera que cuenta con un 10% de concentración y tiene una actitud de N-S/78°E con un polo (P1) de actitud (Trend/plunge) 90/12, la segunda cuenta con una concentración entre 8-9% y tiene una actitud de N30W/73NE con un polo (P2) 60/17, finalmente la tercera estructura cuenta con una concentración entre 8-9% y tiene actitud N28E/75SE con un polo (P3) 118/15. El rumbo preferencial de la mineralización de magnetita es N30E, para los sulfuros de Fe-Cu primarios el rumbo es de N-S y en menor medida N25E, al igual que para los óxidos de Fe-Cu.

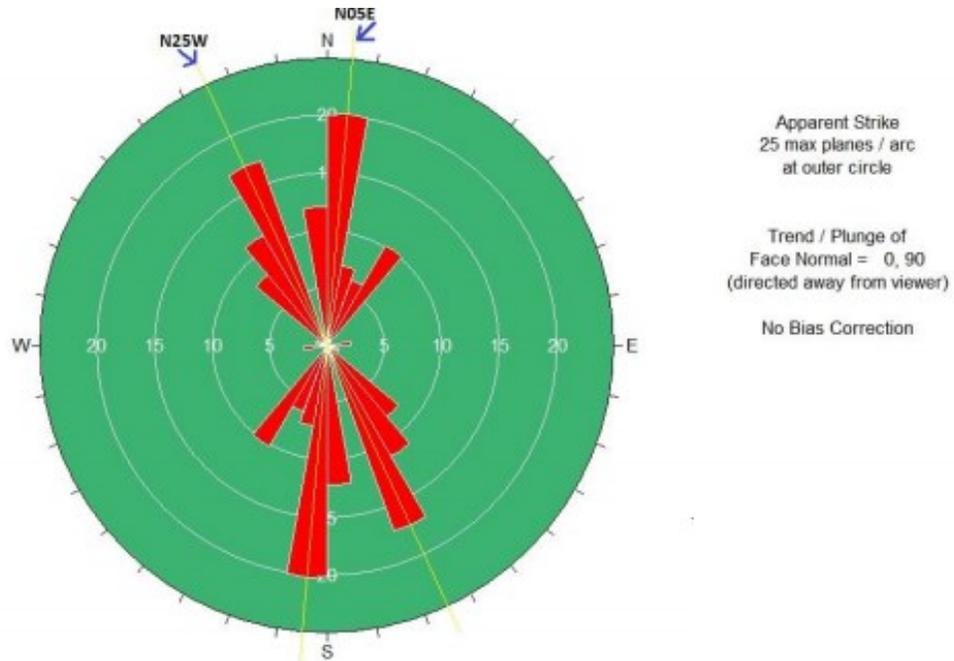


Figura 30: Diagrama de rosetas elaborado con un total de 107 datos estructurales, donde se aprecian dos rumos preferenciales N25W Y N05E.

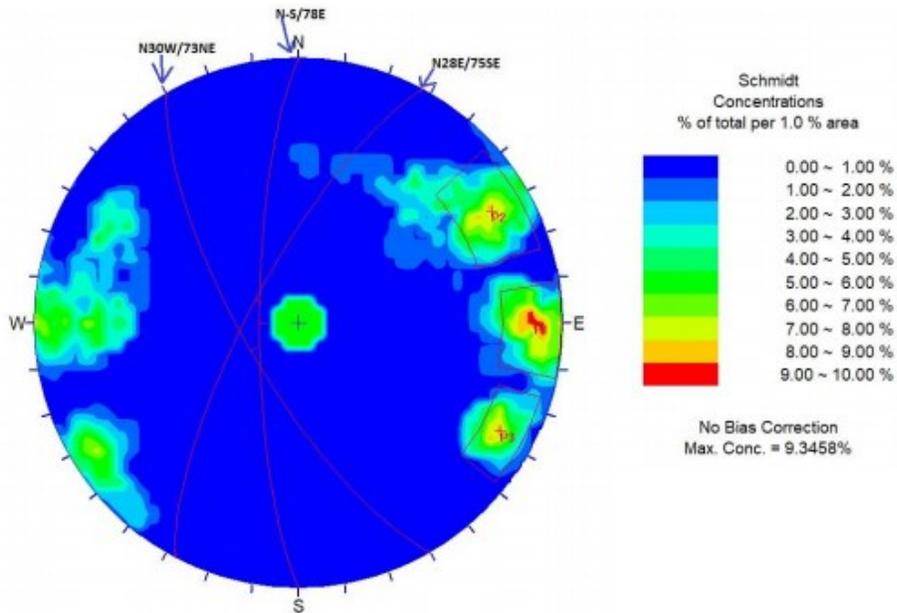


Figura 31: Diagrama de concentración de polos elaborado con 107 datos estructurales, dichos datos son ploteados en una red estereográfica de Schmidt, el mayor valor de concentración es de 9.35%. Se aprecian tres concentraciones de polos preferentes de los cuales se extraen tres planos principales N30W/73NE, N-S/78SE, N28E/75SE.

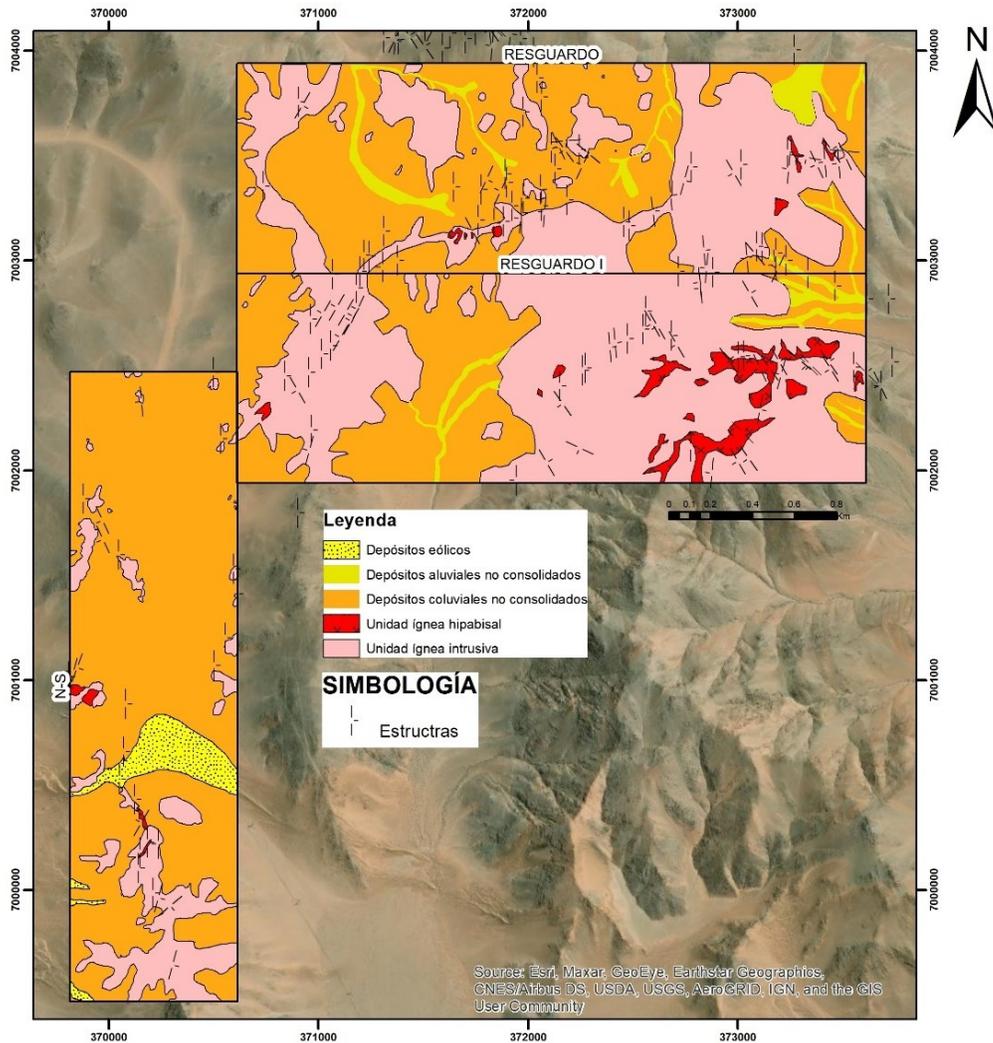


Figura 32: Mapa que compara las estructuras principales según... con las estructuras levantadas en campo.

5.3 Geoquímica

El análisis geoquímico de las 28 muestras seleccionadas corresponde a rocas intrusivas, rocas hipabisales como diques y cuerpos vetiformes, además de una muestra correspondiente a una estructura tipo brecha hidrotermal, localizada al sureste del área de estudio.

5.3.1 Concentraciones geoquímicas mediante gráficos tipo Box plot

- Cobre

Para el box plot de la concentración en ppm de cobre en rocas, diques y vetas, la gráfica indica que el 50% de los valores están comprendidos entre Q1 y Q3, es decir, entre 38.5 y 296.5 ppm para las rocas, 14 y 149 ppm para los diques y 32.75 y 3360.75 ppm para las vetas, con un rango inter cuartil de 258, 135 y 3328 ppm respectivamente. La media presenta valores de 181, 75.78 y 1347.63 ppm y la mediana presenta valores de 57.5, 36 y 379.5 ppm respectivamente. Ya que, en los tres casos la concentración de datos se encuentra bajo la mediana, los datos presentan asimetría positiva (Figura 33).

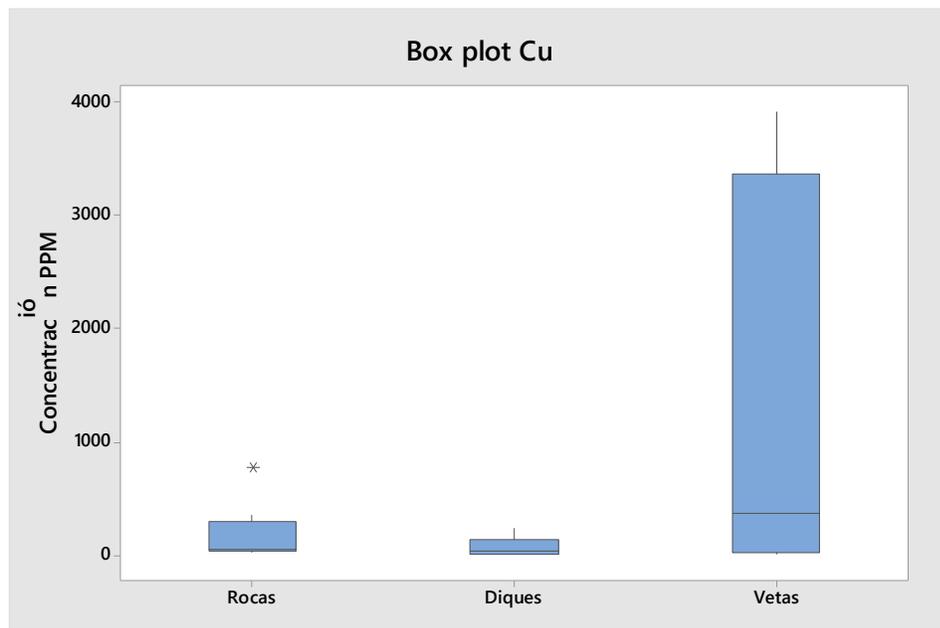


Figura 33: Box plot de la concentración de Cu en rocas, diques y vetas, se aprecia un valor outlier o atípico en el diagrama de las rocas con un valor de 765ppm.

El límite superior en el caso de las rocas corresponde a 361, los diques 244 y para las vetas 3914 ppm. El límite inferior presenta concentraciones de 22 ppm en las rocas, 10 ppm en los diques y 16 ppm en las vetas. Respecto al valor atípico que se aprecia en el box plot de las rocas presenta un valor de 765 ppm que corresponde a la muestra SG-M36, dicha muestra está próxima a una veta de cuarzo y calcita con óxidos de Cu, lo que pudo influir en dicha anomalía.

- Hierro

Para el box plot de la concentración de hierro en rocas, diques y vetas, la gráfica indica que el 50% de los valores están comprendidos entre Q1 y Q3, es decir, entre 13380.5 y 53248.5 ppm para las rocas, 4080 y 37439 ppm para los diques y 1859 y 25902.5 ppm para las vetas, con un rango inter cuartil de 39868, 33359 y 24043.5 respectivamente. La media presenta valores de 34525.2, 19715.3 y 12881.6 y la mediana presenta valores de 34938, 19284 y 2830 ppm respectivamente. En el caso de los diques y las vetas se observa una asimetría positiva, ya que, la mayor concentración de datos se encuentra bajo la mediana. Respecto a las rocas se aprecia una asimetría negativa ya que los datos se concentran sobre la mediana (Figura 34).

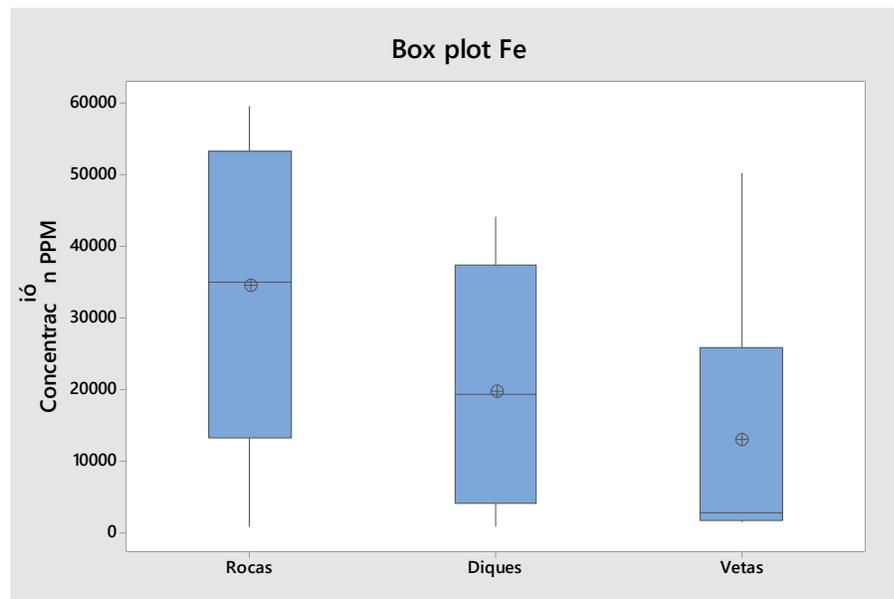


Figura 34: Box plot de la concentración de Fe en rocas, diques y vetas.

El límite superior en el caso de las rocas corresponde a 59615, los diques 44126 y para las vetas 50152 ppm. El límite inferior presenta concentraciones de 840 ppm en las rocas, 914 ppm en los diques y 1445 ppm en las vetas.

- Aluminio

Para el box plot de la concentración de Aluminio en rocas, diques y vetas, la gráfica indica que el 50% de los valores están comprendido entre Q1 y Q3, es decir, entre 41763 y 78452 para las rocas, 23401 y 66525 para los diques y 3345.5 y 24717 para las vetas, con un rango inter cuartil de 36689, 43124 y 21401.5 respectivamente. La media presenta valores de 58086.9, 48289.7 y 19866.4 y la mediana presenta valores de 61480, 57123 y 8800. (Figura 35)

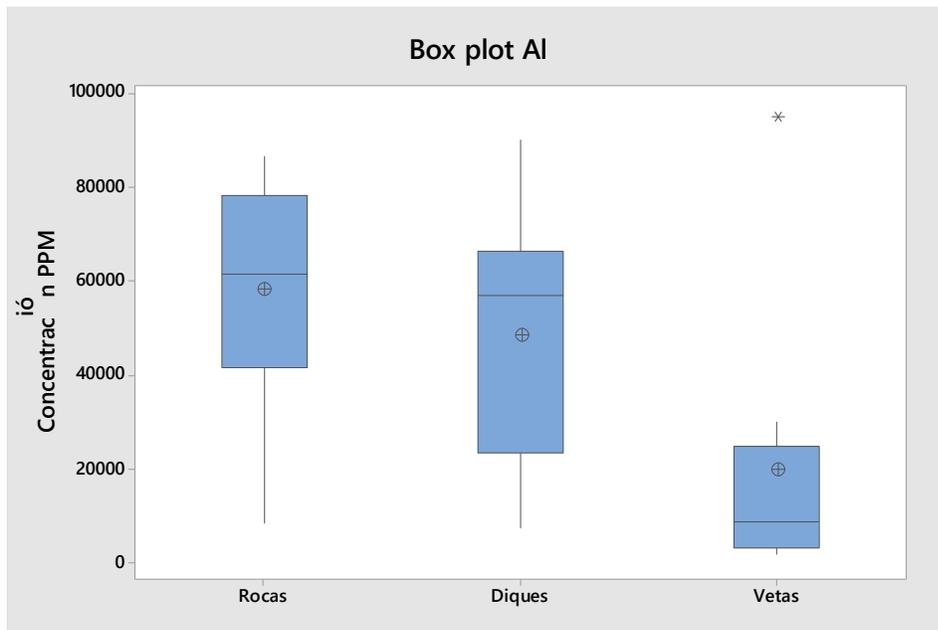


Figura 35: Box plot de la concentración de Al en rocas, diques y vetas, presenta un valor outlier o atípico en el diagrama de las vetas 95036 ppm.

El límite superior o upper whisker en el caso de las rocas corresponde a 59615, los diques 44126 y para las vetas 50152 ppm. El límite inferior o lower whisker presenta concentraciones de 840 ppm en las rocas, 914 ppm en los diques y 1445 ppm en las vetas. Respecto al valor atípico u outlier de 95036 ppm en las vetas que corresponde a la muestra SG-M3 compuesta por cuarzo, calcita, óxidos de Fe, óxidos de Cu, carbonatos de Cu, óxido de Mn y sulfuros de Cu.

5.3.2 Matriz de correlación de Pearson.

Esta matriz se elaboró para mostrar de manera gráfica la correlación de todos los elementos presentes en las muestras, cuando los valores de las variables X e Y son directamente proporcionales existe correlación positiva, caso contrario si estos valores son indirectamente proporcionales existe correlación negativa. Se estableció que los elementos que presenten un valor mayor a 0.5 presentarán correlación positiva y aquellos cuyo valor sea menor a -0.5 presentarán correlación negativa.

- Diques

El cobre con el hierro presenta un índice de correlación de -0.513 pudiendo inferir que existe una relación inversa entre estos elementos, además la relación hierro-sílice presenta un índice de -0.126. Por el contrario, la relación cobre-sílice presenta un índice de correlación de 0.588 de esto se infiere que dichos elementos presentan una relación espacial (Tabla 1).

Respecto a las vetas los mayores índices positivos son Cr-Ni con 0.976, S-V con 0.884, As-S con 0.873, Zr-Th con 0.840, Fe-Mn con 0.831, Mn-Sr con 0.831, Mg-Ni con 0.827, Mg-Cr con 0.824. Cabe mencionar que la relación Cu-Si y Fe-Mn presentan índices de 0.588 y 0.683. En los índices de correlación negativa los mejores índices son Cu-Y, Si-As, Cu-Ti con valores de -0.867, -0.815 y 0.777 respectivamente (Tabla 2).

	O	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	As	Sr	Y	Zr	Hg	Th	Le
Mg	1																					
Al	0.221	1																				
Si	0.000	0.012	1																			
P	-0.225	0.301	-0.146	1																		
S	0.080	-0.175	-0.710	0.362	1																	
K	-0.294	0.308	0.308	0.287	-0.187	1																
Ca	0.051	-0.340	-0.701	-0.193	0.436	-0.284	1															
Ti	0.076	0.699	-0.402	0.646	0.504	0.211	0.008	1														
V	0.355	0.167	-0.644	0.258	0.884	-0.259	0.391	0.691	1													
Cr	0.824	0.118	-0.180	0.001	0.100	-0.137	0.210	0.097	0.231	1												
Mn	0.524	0.675	0.022	-0.271	-0.294	0.130	0.161	0.322	0.125	0.394	1											
Fe	0.683	0.775	-0.126	-0.039	0.079	0.108	-0.008	0.569	0.474	0.449	0.831	1										
Ni	0.827	0.154	-0.281	0.083	0.219	-0.213	0.165	0.178	0.337	0.976	0.308	0.467	1									
Cu	-0.110	-0.715	0.588	-0.482	-0.312	0.150	-0.042	-0.777	-0.497	-0.154	-0.298	-0.513	-0.286	1								
As	0.246	-0.171	-0.815	0.296	0.873	-0.178	0.570	0.344	0.731	0.383	-0.190	0.142	0.490	-0.349	1							
Sr	0.400	0.661	-0.155	-0.005	0.049	0.173	0.163	0.647	0.419	0.392	0.831	0.753	0.336	-0.432	-0.020	1						
Y	0.154	0.624	-0.457	0.760	0.366	0.098	-0.103	0.766	0.428	0.334	0.103	0.409	0.461	-0.867	0.464	0.284	1					
Zr	-0.513	0.229	-0.026	0.436	-0.154	0.520	-0.438	0.139	-0.367	-0.176	-0.332	-0.263	-0.122	-0.255	-0.074	-0.188	0.442	1				
Hg	0.517	0.593	0.271	0.080	-0.072	0.276	-0.453	0.473	0.218	0.456	0.505	0.627	0.441	-0.215	-0.183	0.716	0.289	0.063	1			
Th	-0.537	0.091	-0.284	0.102	-0.010	0.194	-0.220	0.085	-0.191	-0.269	-0.330	-0.293	-0.194	-0.293	-0.010	-0.111	0.258	0.840	0.002	1		
Le	-0.410	-0.498	-0.603	0.001	0.344	-0.499	0.306	-0.216	0.050	-0.200	-0.652	-0.598	-0.091	-0.157	0.398	-0.526	0.066	0.284	-0.602	0.572	1	

Correlación	Leyenda
-1, -0.4	
-0.4, 0.4	
0.4, 1	

Tabla 1: Diagrama de correlación de Pearson para los diques.

Relación	Correlación positiva	Relación	correlacion negativa
Cr-Ni	0.976	Cu-Y	-0.867
S-V	0.884	Si-As	-0.815
As-S	0.873	Cu-Ti	-0.777
Zr-Th	0.840	Cu-Al	-0.715
Fe-Mn	0.831	Si-S	-0.710
Mn-Sr	0.831	Si-Ca	-0.701
Mg-Ni	0.827	Mn-Le	-0.652
Mg-Cr	0.824	Si-V	-0.644
Fe-Al	0.775	Si-Le	-0.603
Ti-Y	0.766	Hg-Le	-0.602
P-Y	0.760	Fe-Le	-0.598
Fe-Sr	0.753	Mg-Th	-0.537
As-V	0.731	Sr-Le	-0.526
Sr-Hg	0.716	Mg-Zr	-0.513
Al-Ti	0.699	Fe-Cu	-0.513
Ti-V	0.691		
Fe-Mg	0.683		
Al-Mn	0.675		
Al-Sr	0.661		
Ti-Sr	0.647		
Ti-P	0.646		
Fe-Hg	0.627		
Al-Y	0.624		
Al-Hg	0.593		
Cu-Si	0.588		
Le-Th	0.572		
Ca-As	0.570		
Ti-Fe	0.569		
Mg-Mn	0.524		
K-Zr	0.520		
Mg-Hg	0.517		
Mn-Hg	0.505		
Ti-S	0.504		

Tabla 2: Relaciones de elementos y su índice de correlación de Pearson para los diques.

- Vetas

El cobre con el hierro presenta un índice de correlación de -0.408 pudiendo inferir que no existe una relación espacial entre estos elementos, además la relación hierro-sílice presenta un índice de -0.41. Por el contrario, la relación cobre-sílice presenta un índice de correlación de 0.671 de esto se infiere que dichos elementos presentan una relación espacial y que el hierro con el cobre pueden originarse en etapas distintas de mineralización. (Tabla 3)

Respecto a las vetas la matriz de correlación los mayores índices positivos son As-Hg, Fe-Ni, Ca-Mn, Fe-K y Sr-Ni con índices de 0.945, 0.835, 0.819, 0.790, 0.785. cabe mencionar que la relación Cu-Si y Fe-Mn presentan índices de 0.671 y 0.521. En los índices de correlación negativa los mejores representantes son Si-Ca, Si-Mn y Si-Ni con valores de -0.934, -0.843 y 0.775 respectivamente. (Tabla 4).

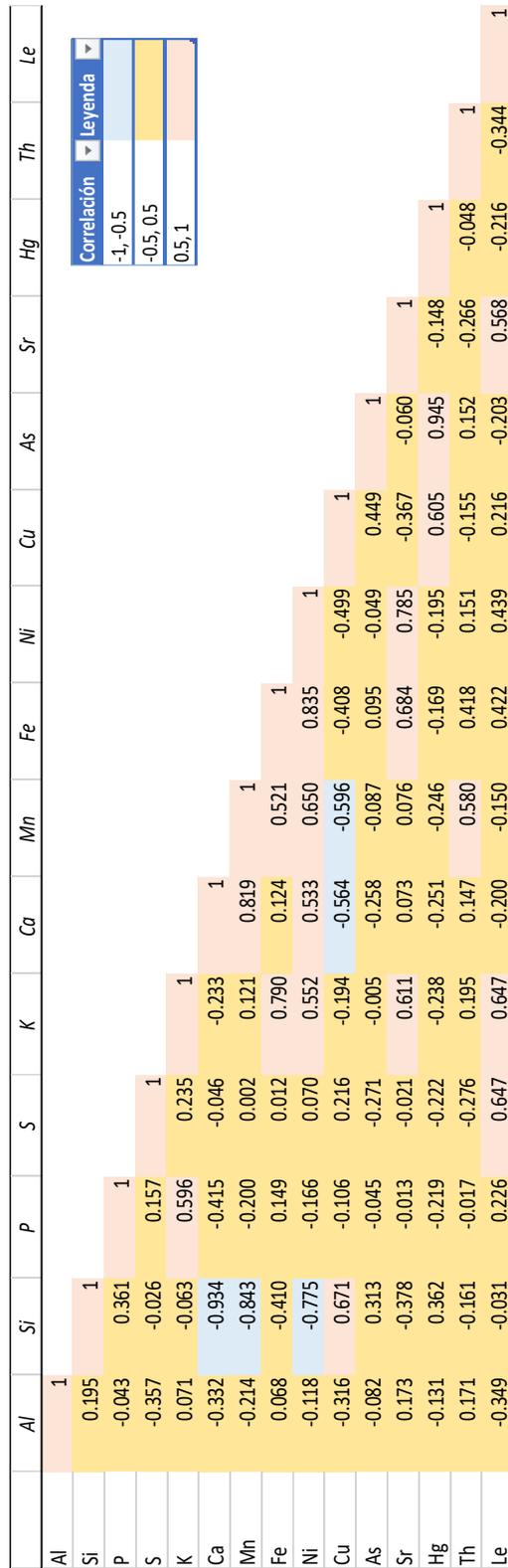


Figura 3: Matriz de correlación de Pearson para las vetas.

Relación ▼	Correlación positiva ▼	Relación ▼	Correlación negativa ▼
As-Hg	0.945	Si-Ca	-0.934
Fe-Ni	0.835	Si-Mn	-0.843
Ca-Mn	0.819	Si-Ni	-0.775
Fe-K	0.790	Cu-Mn	-0.596
Sr-Ni	0.785	Cu-Ca	-0.564
Fe-Sr	0.684		
Cu-Si	0.671		
Ni-Mg	0.650		
Le-S	0.647		
Le-K	0.647		
Sr-K	0.611		
Hg-Cu	0.605		
K-P	0.596		
Mg-Th	0.580		
Le-Sr	0.568		
Ni-K	0.552		
Ni.Ca	0.533		
Fe-Mn	0.521		

Tabla 4: Relaciones de elementos y su índice de correlación de Pearson para las vetas.

6 DISCUSIONES

Respecto a la Unidad Ígnea Intrusiva descrita en este trabajo podría correlacionarse con el Plutón La Borracha (Grocott et al., 1994) ya que presenta bastantes similitudes petrográficas, por ejemplo, la unidad cuenta con dioritas, cuarzo-dioritas y cuarzo monzo-dioritas concordando con las unidades descritas en la Carta Copiapó (Arévalo, 2005), pudiendo asociarle una edad de 114-103 Ma. Por otra parte, la Unidad Ígnea Hipabisal puede correlacionarse con los microgranitos y las Aplitas del Portezuelo Cucharas (Arévalo, 1995) ya que, dicha unidad presenta diques y apófisis (Figura 38) compuestos principalmente por microgranitos y, en menor cantidad microdioritas y microgabros, pudiendo asociarle una edad de 110 Ma. En la Carta de Copiapó las rocas del Portezuelo Cucharas se sitúan fuera del área de estudio, se plantea que esta unidad aflora en el área de estudio y corresponde a la Unidad Ígnea Hipabisal ya que, las litologías y el emplazamiento son concordantes con la descripción de Arévalo (1995) (Figura 36).

En el caso de las alteraciones presentes en el área, las con mayor presencia son óxidos de Fe (siderita, hematita, goethita) jarosita, epidota y clorita presentes de manera diseminada en la roca de caja. En menor ocurrencia existe la presencia de alteraciones como la silícea, brechas hidrotermales de cuarzo-turmalina, vuggy-sílica y argílica intermedia. Dichas alteraciones se pueden agrupar según su paragénesis, con el fin poder describirlas de mejor manera. La alteración conformada por epidota, magnetita y clorita, está asociada a una temperatura mayor de fluido mayor que la alteración propilítica. La alteración clorita-epidota compuesta por clorita, epidota, calcita y albita, se forma en un rango de temperatura de 250°C-425°C y con un pH alcalino. Las brechas hidrotermales de cuarzo turmalina, son brechas con clastos angulosos y matriz soportada indicador de fracturamiento hidráulico de la roca de caja. La alteración argílica moderada asociada a fluidos de baja temperatura y de pH ácido que al entrar en contacto con la roca de caja obliteran a las plagioclasas provocando una disminución en la cohesión de la roca. Silicificación y alteración vuggy sílica se tratan como un conjunto, ya que, se sitúan en el mismo sector, siendo la alteración vuggy sílica indicador de un ambiente de baja temperatura y alta acidez que genera la disolución de los minerales de

la roca exceptuando el cuarzo lo cual produce que la roca presente cavidades. Finalmente, la oxidación supérgena se origina por fluidos supérgenos que actúan en los cuerpos vetiformes de composición cuarcifera y carbonatos originando siderita, hematita, goethita y jarosita. Esta información, contrastada con el artículo de Salazar (2020), permiten correlacionar las alteraciones de la siguiente manera: la alteración epidota-magnetita-clorita, las brechas hidrotermales de cuarzo-turmalina y propilítica pertenecen al evento hidrotermal principal, por otra parte, la alteración argílica moderada, silicificación, alteración vuggy sílica y oxidación supérgena corresponden a eventos más superficiales. A partir de lo anterior se puede inferir una relación genética con el depósito Cerro Negro Norte (Figura 36).

Mineralogy	Main Fe oxide event	Main hydrothermal event				Supergene event
		Stage I	Stage II: Ca-Na	Stage III: Qz-tm	Stage IV: Propylitic	
Magnetite	M	M	V	D		M
Hematite	I II	III	D IV	D	V	
Pyrite	Inc		D V		V	
Chalcocopyrite	Inc		D V		V	
Pyrrhotite	Inc		Inc			
Bornite			D			
Digenite						R
Covellite						R
Gold			?	Inc/D	?	
Cu carbonates					V/D	
Actinolite	M	M	V			
Apatite	D/M		V			
Scapolite			V/D			
Albite			V/M			
Epidote			V		V/D	
Biotite						
Quartz			V	B	V/D	
Tourmaline				B		
K-feldspar				B		
Sericite	Inc		V/D	R		
Titanite	--		V/D	V/D		
Chlorite	Inc				V	
Calcite				B	V	
Rutile	Inc				D	
Jarosite						M
Goethite						M

Figura 36: Tabla paragénica para el depósito Cerro Negro Norte. Etapa I, II, III y IV: Ocurrencia de magnetita: M: masiva, D: Diseminada, V: Venillas, B: Brechas, Inc: inclusión (Salazar, 2020).

Las mineralizaciones presentes en el área se desarrollan principalmente en cuerpos vetiformes, donde se puede apreciar mineralizaciones de magnetita masiva con mayor presencia en la zona oeste del polígono Resguardo y Resguardo 1. Al este de Resguardo 1 se localizan mineralizaciones de sulfuros primarios de Fe y Cu alojados en

vetas de cuarzo o cuarzo-calcita. Los óxidos de Fe y Cu se sitúan en el norte y al este de Resguardo. Las vetas que contienen tanto a los sulfuros, como a los óxidos se componen de cuarzo en las paredes y en el interior de calcita, infiriendo que primero se originó la precipitación de cuarzo y luego de calcita. Principalmente en las vetas de cuarzo se alojan los sulfuros primarios y en las cuarzo-calcita se alojan sulfuros primarios y óxidos.

Según los resultados provenientes de los datos estructurales levantados en campo, los rumbos preferentes de las estructuras medidas siendo N05°E y N25°W con movimiento de rumbo sinistral determinado por los indicadores cinemáticos presentes. Además, el manteo preferente es de 75°, siendo este clasificado como de alto ángulo. Estos rumbos concuerdan con los descritos para el Sistema de Fallas de Atacama siendo estos principalmente NNW, N, NNE con componente de rumbo sinistral. (Hervé 1987; Scheuber and Andriessen 1990; Brown et al., 1993). Las estructuras mineralizadoras se concentran en los rumbos N05°E, que corresponden en su mayoría a vetas de cuarzo-calcita con mineralizaciones de sulfuros primarios y óxidos de Fe y de Cu y para las estructuras N25°E, presentando mineralización de magnetita masiva.

Los datos geoquímicos arrojan que las anomalías de cobre presentes en las muestras analizadas son mayores en las vetas ya que estas contienen minerales tales como pirita, calcopirita y crisocola, en el caso de las anomalías de Fe la mayor anomalía se presenta en las rocas. El Cu y el Fe presentan una correlación negativa evidenciado en las mineralizaciones de las vetas de magnetita donde la presencia de cobre a modo de crisocola y calcopirita es muy ínfima, evidenciado de manera gráfica (Figura 37), en donde las vetas con alto contenido de Fe (magnetita) se localizan principalmente en la zona este de Resguardo y Resguardo 1. Por el contrario, las vetas con mayor cantidad de sulfuros primarios y óxidos de Cu se sitúan en la parte oeste de las zonas mencionadas anteriormente. Por otra parte, la relación Cu-Si presenta correlación positiva, plasmado en la composición de las vetas de cuarzo que alojan sulfuros primarios y óxidos de Cu como pirita, calcopirita y crisocola. La relación Fe-Si presenta correlación negativa, lo

que indica que estos elementos presentan una relación inversa, evidenciado por la composición de las vetas donde las que presentan alto contenido de Fe están compuestas en su mayoría de magnetita masiva y para las vetas que contienen Si, su composición principal es cuarzo esto sugiere que el Fe está desacoplado temporal y espacialmente del Si.

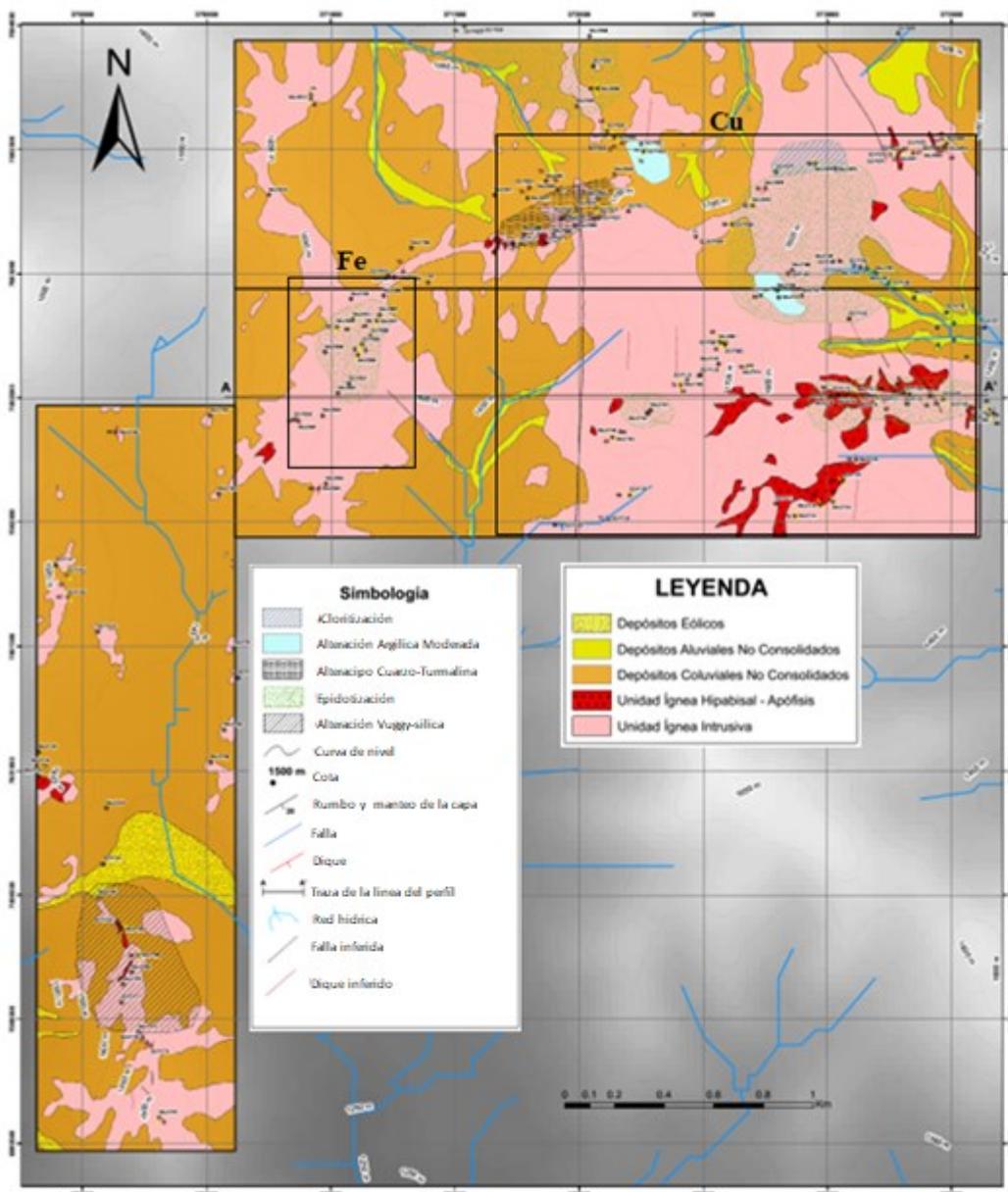


Figura 37: Mapa del área de estudio, en amarillo con granos: Depósitos Eólicos, amarillo: Depósitos Aluviales no consolidados, naranja: Depósitos Coluviales no Consolidados, rojo: Unidad Ígnea Hipabisal, Unidad Ígnea Intrusiva.

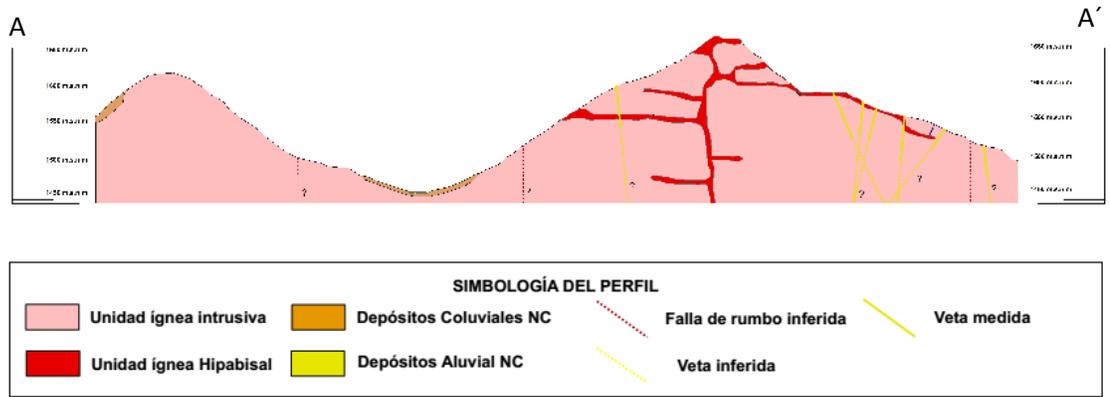


Figura 38: Perfil esquemático de la sección A-A' donde se puede apreciar la intrusión de la Unidad Ígnea Hipabisal en color rojo formando diques y estructuras horizontales correspondientes a apófisis. En color rosa, la Unidad Ígnea Intrusiva, en línea punteada roja las fallas de rumbo inferidas, en línea punteada amarilla las vetas inferidas y en línea continua amarilla las vetas medias.

7 CONCLUSIONES

En base a los datos obtenidos en campo y los análisis de resultados se pueden determinar las siguientes conclusiones.

- Las unidades geológicas definidas en este trabajo se relacionan con las unidades descritas en la literatura (Plutón la Borracha y aplitas del Portezuelo Cucharas), lo cual permite asignar una edad aproximada de 120-100 Ma a las unidades intrusivas en base a la edad establecida al plutón la borracha.
- Se reconocieron las siguientes alteraciones en el área de estudio. Alteraciones hipógenas siendo estas: calco sódico (Epidota, Magnetita y clorita), propilítica (clorita, epidota, calcita y calcita), brechas hidrotermales de cuarzo turmalina. Alteraciones: argílica moderada, silicificación y vuggy silica. Las alteraciones descritas se relacionan con los eventos de alteración del depósito Cerro Negro Norte.
- Las estructuras mineralizadoras presentan un rumbo preferencial de N05E y N25E. Las primeras corresponden a vetas de cuarzo-calcita con mineralizaciones de sulfuros primarios y óxidos de Fe-Cu, y las segundas corresponden a vetas de magnetita masiva.
- Los box plot arrojan que las anomalías de cobre presentes en las muestras analizadas son mayores en las vetas ya que estas contienen minerales tales como pirita, calcopirita y crisocola.
- La geoquímica en base a (pXRF) arroja que existe una relación inversa entre Fe-Cu, debido a que presenta un índice de correlación negativo. El Cu-Si presentan un índice de correlación positivo lo que indica que existe una relación espacial entre ellos ejemplificado en las vetas con presencia de cuarzo cuyas mineralizaciones eran crisocola, pirita y calcopirita. El Fe-Si tienen un índice de correlación negativa por

lo tanto existe una relacion inversa en entre estos evidenciado en la composición de las vetas de magnetita que no contaban con presencia de cuarzo.

- Se establece un modelo basado en las observaciones en terreno para el emplazamiento para la Unidad Ígnea Hipabisal, ya que, dicha unidad se compone de múltiples diques y sills del área planteando que las mineralizaciones y alteraciones corresponden a las descritas para un yacimiento tipo IOA debido a la proximidad del área con el yacimiento cerro negro norte.

8 REFERENCIAS

- Anthony E. Williams-Jones, Christoph A. Heinrich; 100th Anniversary Special Paper: Vapor Transport of Metals and the Formation of Magmatic-Hydrothermal Ore Deposits. *Economic Geology* 2005; 100 (7): 1287–1312.
- Arévalo, C. 1995. Mapa Geológico de la Hoja Copiapó, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y minería. Documentos de Trabajo, No. 8, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Arévalo, C. 2005. Carta Copiapó, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, serie Geología básica, No. 91, 53 p. 1 mapa escala 1:100.000.
- Barton M. D., Johnson D. A. (1996). Evaporitic-source model for igneous-related Feoxide (REE–Cu–Au–U) mineralization. *Geology* 24, pp. 259-262.
- Bilenker, L.D., Simon, A.C., Reich, M., Lundstrom, C.C., Gajos, N., Bindeman, I., Barra, F., and Munizaga, R., 2016, Fe-O stable isotope pairs elucidate a high-temperature origin of Chilean iron oxide-apatite deposits: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.177, p.94-104.
- Brown M, Díaz F, Grocott J (1993) Displacement history of the Atacama fault system 2500±S–2700±S, northern Chile. *Geol Soc Am Bull* 105:1165–1174.
- Corbett, G. & Leach, T. (1998). Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization. *Society of Economic Geologist*, Special Publication Number 6: 237.
- David I. Groves, Frank P. Bierlein, Lawrence D. Meinert, Murray W. Hitzman; Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) Deposits through Earth History: Implications for Origin, Lithospheric Setting, and Distinction from Other Epigenetic Iron Oxide Deposits. *Economic Geology* 2010; 105 (3): 641–654.
- Díaz, A.; Lledó, H.; Vivallo, W. 2006. Yacimientos metalíferos de la Carta Copiapó, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie de Recursos Minerales y Energéticos, No. 26, 35p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

- Espinoza, S. 1990. The Atacama-Coquimbo Ferriferous Belt, Northern Chile. En *Stratabound ore deposits in the Andes*. Springer Berlin Heidelberg: 353-364.
- Fernando Barra, Martin Reich, David Selby, Paula Rojas, Adam Simon, Eduardo Salazar, Gisella Palma, Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach, *Ore Geology Reviews*, Volume 81, Part 1, 2017, Pages 62-78, ISSN 0169-1368.
- Gisella Palma, Fernando Barra, Martin Reich, Adam C. Simon, Rurik Romero, A review of magnetite geochemistry of Chilean iron oxide-apatite (IOA) deposits and its implications for ore-forming processes, *Ore Geology Reviews*, Volume 126, 2020, 103748, ISSN 0169-1368.
- Grocott J, Taylor GK (2002) Magmatic arc fault systems, deformation partitioning and emplacement of granitic complexes in the Coastal Cordillera, northern Chilean Andes (2530 ϕ S to 2700 ϕ S). *J Geol Soc Lond* 159:425–442.
- Grocott J, Wilson J (1997) Ascent and emplacement of granitic plutonic complexes in subduction-related extensional environments. In: Holness MB (ed) *Deformation-enhanced fluid transport in the Earth's crust and mantle*. Chapman and Hall, London, pp 173–195.
- Groves DI, Vielreicher NM (2001) The Phalaborwa (Palabora) carbonatite-hosted magnetitecopper sulfide deposit, South Africa: an end-member of the iron-oxide copper-gold-rare earth element deposit group? *Miner Deposita* 36:189–194.
- Hervé A. M (1987) Movimiento sinistral en el Cretácico Inferior de la zona de falla Atacama al norte de Paposo (24S), Chile. *Rev Geol Chile* 31:37–42.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N., and Einaudi, M.T., (1992). Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-AuREE) deposits: *Precambrian Research* 58, 241-287.
- Hitzman, Murray W. 2000. *Iron Oxide-Cu-Au Deposits: What, Where, When and Why*. En Porter, T.M (Editor) *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*, Australian Mineral Foundation, Adelaide: 9 – 25.

- Knipping JL, Bilenker LD, Simon AC, Reich M, Barra F, Deditius AP, Wälle M, Heinrich CA, Holtz F, Munizaga R (2015b) Trace elements in magnetite from massive iron oxide-apatite deposits indicate a combined formation by igneous and magmatic-hydrothermal processes. *Geochim Cosmochim Acta* 171:15–38.
- MaksaeV, V. (2001). Alteración Hidrotermal. *GL 54A: Metalogénesis* (82-95 pp.). Universidad de Chile, facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.
- Naslund, H. R., et al. 2002. Magmatic iron ores and associated mineralization: Examples from the Chilean High Andes and Coastal Cordillera. *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective 2*: 207-226.
- Nyström JO, Henríquez F (1994) Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden: Ore textures and magnetite geochemistry. *Econ Geol* 89:820–839.
- Nyström, Jan Olov; HENRIQUEZ, Fernando. 1994. Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden; ore textures and magnetite geochemistry. *Economic Geology* 89(4): 820-839.
- Pollard, P.J., (2000). Evidence of a magmatic fluid and metal source for Fe-oxide Cu-Au mineralization. In Porter, T.M. (ed.), *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & related deposits: A global perspective*, Australian Mineral Foundation, Adelaide, 27-41.
- Pollard, Peter J. 2001. Sodic (–calcic) alteration in Fe-oxide–Cu–Au districts: an origin via unmixing of magmatic H₂O–CO₂–NaCl±CaCl₂–KCl fluids. *Mineralium Deposita* 36(1): 93- 100.
- Ray, G., Lefebure, D., (2000). A Synopsis of Iron Oxide±Cu±Au±P±REE Deposits of the Candelaria-Kiruna-Olimpic Dam Family, pp. 267-271, in: *Geological Fieldwork 1999*, BC Ministry of Energy and Mines, Paper 2000-.
- Ridley, J. (2013). Hydrothermal ore deposits I: Magmatic and orogenic environments. In *Ore Deposit Geology* (pp. 92-240). Cambridge: Cambridge University Press.
- RUIZ, C., et al. 1968. Genesis of the Chilean iron ore deposits of Mesozoic age. *Rep 23rd International Geological Congress* 7: 323-338.

- Ruiz, Carlos; AGUIRRE, Luis. 1965. Geología y yacimientos metalíferos de Chile: Maps. Instituto de Investigaciones Geológicas. 305 p.
- Salazar E (2017) Geoquímica de magnetitas como indicador petrogenético del depósito Cerro Negro Norte, Copiapó, Chile. MSc thesis, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Salazar, E., Barra, F., Reich, M. et al. Trace element geochemistry of magnetite from the Cerro Negro Norte iron oxide–apatite deposit, northern Chile. *Miner Deposita* 55, 409–428 (2020).
- Scheuber E, Andriessen PAM (1990) The kinematic and geodynamic significance of the Atacama Fault Zone, northern Chile. *J Struct Geol* 12:243–257.
- Townley, B. (2001). Metalogénesis: Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos. *Geología Económica* (44 pp.). Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Vivallo, W.; Henríquez, F. 1977. Relación genética entre los yacimientos estratoligados de Cu ('Tipo Manto'), de Cu-Fe±Au y de hierro del tipo Kiruna. En Congreso Geológico Chileno. 1189-1193.
- Yue Wang, Xiangkun Zhu, Chao Tang, Jingwen Mao, Zhaoshan Chang, Discriminate between magmatic- and magmatic-hydrothermal ore deposits using Fe isotopes, *Ore Geology Reviews*, Volume 130, 2021, 103946, ISSN 0169-1368.

Anexos

1. Resumen de los puntos tomados en terreno.

Punto	Descripción	Tipo	Alteración
SG-P001	SG-M1 Dique microdiorítico Actitud: N25E/75SE	DIQUE	
SG-P002	SG-M2 Dique microdiorítico Actitud: N25E/75NW	DIQUE	
SG-P003	SG-M3 Veta de Qz/Calcita/Ox Fe/Ox Cu/Carb Cu/Ox de Mn/Sulf de Cu NDA	VETA	Ox Fe
SG-P004	Dique microgranítico Horizontal	DIQUE	
SG-P005	SG-M5 Roca intrusiva Diorita con alteración de clorita en Hbl (leve)	ROCA	Chl
SG-P006	Roca intrusiva Diorita con alteración de clorita en Hbl (muy leve)	ROCA	Chl
SG-P007	Dique microgranítico Horizontal	DIQUE	
SG-P008	Roca intrusiva Cuarzo-Diorita con alteración de clorita en Hbl (leve) y Silicificación (leve)	ROCA	Chl - Silica
SG-P009	SG-M8 Dique microgranítico Actitud 1: N-S/75W y Actitud 2: N30E/74NW	DIQUE	
SG-P010	Roca intrusiva diorítica - Excavación con Bulldozer D10	ROCA	
SG-P011	Veta de Qz/Magnetita/Hematita/Epidota Actitud: N25E/78NW	VETA	Ox Fe - Epd
SG-P012	Veta de Magnetita/Epidota (poca potencia) Actitud: N30E/85NW	VETA	Epd
SG-P013	SG-M10 Veta de Qz/Crisocola NDA	VETA	
SG-P014	Veta de Qz/Calcita/Ox Fe/Ox Mn/Carb Fe Actitud: N30E/70SE FD1	VETA	Ox Fe
SG-P015	Punto de Control Oficina ID2	PC	
SG-P016	Punto de Control Mina	PC	
SG-P017	Time=2021-01-13 14:26:52 hematita		Ox Fe
SG-P018	Time=2021-01-13 14:54:54 veta de óxidos		Ox Fe
SG-P019	Time=2021-01-13 15:08:03 veta fina de Fe		Ox Fe
SG-P020	Time=2021-01-13 15:20:50 veta óxidos		Ox Fe
SG-P021	Punto de control ID4	PC	
SG-P022	Veta de Qz/Calcita/Ox Cu NDA	VETA	
SG-P023	SG-M12 Roca ígnea Diorita con alteración a Clorita leve en Hbl. Se extrae SG-M12	ROCA	Chl
SG-P024	Veta de Brecha Hidrotermal de Turmalina emplazada en microgranito Actitud: N05E/85NW. Se extrae SG-M13	VETA	Turmalina
SG-P025	Contacto entre Brecha Hidrotermal y Cuarzo-Monzodiorita NDA	CONTACTO	Turmalina

SG-P026	Roca ígnea Cuarzo Diorita. Se extrae muestra SG-M15.	ROCA	
SG-P027	Contacto entre Cuarzo Diorita y Micro granito NDA. Se extraen muestras SG-M16 y SG-M17.	CONTACTO	
SG-P028	Veta Qz/Calcita/Ox Fe/Ox Cu/Ox Mn NDA	VETA	Ox Fe
SG-P029	Veta Qz/Calcita/Ox Fe/Ox Cu/Ox Mn NDA	VETA	Ox Fe
SG-P030	Dique Microgranítico con silicificación Actitud: N05E/85NW	DIQUE	Silica
SG-P031	SG-M19 Dique mcrogabroico Actitud: N25E/64SE	DIQUE	
SG-P032	Dique microgranítico NDA cortado por Veta de Qz Actitud: N05E/85SE	DIQUE	
SG-P033	Veta de Qz/Ox Mn Actitud: N35W/76NE	VETA	
SG-P034	Roca intrusiva Diorita	ROCA	
SG-P035	Roca intrusiva Diorita con alteración a Epidota (leve) diseminada	ROCA	Epd
SG-P036	Veta Qz/Calcita Actitud: N05E/64NW	VETA	
SG-P037	Roca intrusiva Diorita con alteración a Epidota (leve) diseminada	ROCA	Epd
SG-P038	Punto de Control Calicata con orientación E-W	PC	
SG-P039	Roca intrusiva Diorita con alteración a Epidota (leve) diseminada	ROCA	Epd
SG-P040	Veta de Qz/Calcita/Ox Fe/Sericita NDA	VETA	Ox Fe
SG-P041	Punto de Control ID4	PC	
SG-P042	Veta de Carb Fe/Ox Fe Actitud 1: N33W/82NE; Actitud 2: N68W/51SW; Actitud 3: N45W/59SW; Fallas 1: N55W/49SW Falla 2: N65W/71NW	VETA	Ox Fe
SG-P043	Roca intrusiva Diorita con alteración de Clorita en Hbl (moderada) y Epidota (leve) diseminada	ROCA	Chl - Epd
SG-P044	Dique microgabroico Actitud: N28E/55SE. Poca potencia. Se extrae muestra SG-M25	DIQUE	
SG-P045	Roca intrusiva Diorítica con alteración a Epidota (leve) diseminada	ROCA	Epd
SG-P046	Veta de Qz/Calcita/epidota y alteración argílica intermedia (caolinita). NDA	VETA	Epd - Argílica Intermedia
SG-P047	Veta de Epidota Actitud: N35E/68SE	VETA	Epd
SG-P048	Veta de Qz/Calcita Actitud: N05E/52SE	VETA	
SG-P049	SG-M27 Veta de Qz/Calcita/Ox Fe Actitud: N45W/45SW	VETA	Ox Fe
SG-P050	Veta de Oz/Calcita/Ox Fe Actitud: N86E/51SE; estría 56/176	VETA	Ox Fe
SG-P051	Veta de Qz/Calcita/Ox Fe Actitud: N60W/57SW; estría 52/120	VETA	Ox Fe
SG-P052	Veta de Qz/Calcita/Ox Fe Actitud: N45W/55SW	VETA	Ox Fe

SG-P053	Veta de Qz/Calcita/Ox Fe Actitud: N45W/55SW; estría 50/20	VETA	Ox Fe
SG-P054	Veta de Qz/Calcita/Ox Fe Actitud: N5W/50SW ; estría 4/155	VETA	Ox Fe
SG-P055	Veta de Qz/Calcita NDA	VETA	
SG-P056	Punto de control ID5Tarde	PC	
SG-P057	Veta de Qz/Calcita/Ox Cu/Carb Cu Actitud: N05E/72SE	VETA	
SG-P058	Veta de Calcita/Carb Cu Actitud: N02E/85SE	VETA	
SG-P059	Veta de Calcita/Ox Fe/Carb Fe con Brecha de falla Actitud 1: N25W/62SW; Actitud 2: N55W/ 85NE	VETA	Ox Fe
SG-P060	Veta de Calcita/Ox Fe/Carb Fe Actitud: N36W/ 37SW	VETA	Ox Fe
SG-P061	Veta de Calcita/Ox Fe/Carb Fe Actitud: N85E/87SE	VETA	Ox Fe
SG-P062	Contacto de Veta de Calcita/Ox Fe y Diorita Actitud: N50W/ 50SW	CONTACTO	Ox Fe
SG-P063	Veta Qz/Calcita/Ox Fe/Sulf Cu con alteración Argílica intermedia (Caolinita) Actitud 1: N25E/76NW; Actitud N05E/75NW	VETA	Ox Fe - Argílica Intermedia
SG-P064	Veta de Calcedonia/Ox Fe Actitud: N-S	VETA	Ox Fe
SG-P065	Punto de control ID7	PC	
SG-P066	Vetas: Qz: Actitud1: N25W/68SW; Qz/Calcita/Malaquita Actitud 2: N30W/65NE; Qz/Calcita/Malaquita Actitud 3: N05W/64SW	VETA	
SG-P067	Dique Microgranítico Actitud: N35W/60NE. Se extrae muestra SG-M30.	DIQUE	
SG-P068	Veta Calcita/Ox Fe/Carb Fe Actitud: N85W/34SW. Se extrae muestra SG-M31.	VETA	Ox Fe
SG-P069	Dique Microgabroico Actitud: N05W/64SW. Se extra muestra SG-M32	DIQUE	
SG-P070	Veta de Qz/Calcita/Ox Fe Actitud: N05W/67SW	VETA	Ox Fe
SG-P071	Vetas de Qz/Calcita Actitud 1: N25W/64SW; Actitud 2: N70W/75NE	VETA	
SG-P072	Veta de Qz/Calcita/Ox Fe Actitud: N80W/53SW	VETA	Ox Fe
SG-P073	Dique Microgranítico Horizontal con patinas de Turmalinas. Se extrae muestra SG-M33	DIQUE	Turmalina
SG-P074	Dique Microgranítico Actitud: N05E/80NW. Se extrae muestra SG-M34	DIQUE	
SG-P075	Roca intrusiva SG-M35 con alteración de actinolita en Hbl (moderada) y epidota (leve). Se extrae muestra SG-M35	ROCA	Ac - Epd
SG-P076	Veta Qz/Calcita/Ox Fe/Carb Cu Actitud: N30W/70SW. Se extrae muestra SG-M36	VETA	Ox Fe

SG-P077	Roca intrusiva Diorita con alteración a epidota (leve) diseminada y Actinolita en Hbl (moderada)	ROCA	Act - Epd
SG-P078	Dique microgabroico con Calcopirita Actitud: N15E/56SE. Se extrae muestra SG-M37	DIQUE	
SG-P079	Veta de magnetita (2 cm de potencia) Actitud: N05W/82NE. Se extrae muestra SG-M38	VETA	
SG-P080	Veta de Qz/Calcita Actitud: N07W/88NE. Se encuentra granate con epidota.	VETA	Epd
SG-P081	Veta de magnetita (10m longitud x 1.2 ancho). Actitud: N30W/85SW. Se extrae muestra SG-M39	VETA	
SG-P082	Veta de Qz/Calcita (20cm ancho) Actitud: N01E/61SE	VETA	
SG-P083	Veta de Magnetita Actitud: N30W/81SW	VETA	
SG-P084	Dique coritizado pervasivo (4m potencia) con alteración a epidota (leve) diseminada y Actinolita en Hbl (moderada) Actitud: N-S /85E	DIQUE	Chl - Epd - Act
SG-P085	Punto de Control ID8	PC	
SG-P086	Roca intrusiva Cuarzo-Diorita. Se extrae muestra SG-M40	ROCA	
SG-P087	Roca intrusiva Cuarzo-Diorita	ROCA	
SG-P088	Veta de magnetita Actitud: N30E/68NW paralelo a Dique Microdiorítico (20cm de potencia)	VETA	
SG-P089	Vetas de Magnetita Actitud 1: N30E/70SE y Actitud 2: N30W/68NE en Roca de caja Diorita	VETA	
SG-P090	Veta de Magnetita Actitud: N30E/70NW en Roca de caja Diorita	VETA	
SG-P091	Roca intrusiva Diorita con alteración Epidota (leve) diseminada	ROCA	Epd
SG-P092	Roca intrusiva diorita con calcedonia en el sector	ROCA	
SG-P093	Roca intrusiva Diorita	ROCA	
SG-P094	Roca intrusiva Diorita con leve magnetismo en Hbl.	ROCA	
SG-P095	Diques microdiorita Actitud 1: N35E/66NW; microgabro Actitud 2: N15E/79NW. Se extraen muestras SG-M41 y SG-M42	DIQUE	
SG-P096	Roca intrusiva cuarzo-monzodiorita. Se extrae muestra SG-M43	ROCA	
SG-P097	Dique SG-M44 Actitud: N30W/85SW. Se extrae muestra SG-M44	DIQUE	
SG-P098	Roca intrusiva Diorita con alteración de Epidota (leve) diseminada. Se extrae muestra SG-M45	ROCA	Epd
SG-P099	Veta de Magnetita Actitud: N30E/75NW en Roca de Caja Diorita	VETA	
SG-P100	Punto de Control FD8 polígono Resguardo Occidente	PC	
SG-P101	Punto de control ID11	PC	

SG-P102	Roca intrusiva diorítica con alteración de Epidota (leve) diseminada	ROCA	Epd
SG-P103	Diques microgranítico Actitud 1: N01E/88NW y Microdiorítico Actitud 2: N30E/88NW	DIQUE	
SG-P104	Veta de Calcita Actitud: N45W/85NE	VETA	
SG-P105	Veta de Calcita Actitud: N25W/74SW y Dique microdiorítico con Ox Fe y Carbonatos Actitud 2: N45W/85NE	VETA	Ox Fe
SG-P106	Dique microdiorítico Horizontal en Roca de caja Diorítica. Se extrae muestra SG-M46	DIQUE	
SG-P107	Veta Calcedonia/Epidota (8-10cm de Potencia) Actitud: N35W/84NE	VETA	Epd
SG-P108	Dique Microdiorítico Actitud: N32W/58SW	DIQUE	
SG-P109	Veta de Calcita (20cm de potencia) Actitud: N50W/80NE	VETA	
SG-P110	Dique microgranítico Actitud: N45W/64SW. Se extrae muestra SG-M47	DIQUE	
SG-P111	Dique microgranítico Actitud: N45W/63SW	DIQUE	
SG-P112	Dique Cuarzo-Diorítico Actitud: N30W/85NE	DIQUE	
SG-P113	Veta de Qz/Calcita Actitud: N15E/ 85NW cortado por Falla N60E/85NW emplazado en microgranito. Se extrae muestra SG-M48	VETA	
SG-P114	Veta Qz/Calcita/Ox Fe (leve) Actitud: N35W/67SW	VETA	Ox Fe
SG-P115	Veta Qz/Calcita Actitud: N25W/76SW	VETA	
SG-P116	Dique microgranítico Horizontal.	DIQUE	
SG-P117	Roca intrusiva Diorita con vetillas de Magnetitas/Epidota.	ROCA	Epd
SG-P118	Veta de Qz/Calcita/Sulf Cu/Ox Fe/Ox Cu Actitud: N35W/81NE y Veta de Qz/Calcita/Ox Fe Actitud 2: N60W/85NE. Se extrae muestra SG-M49	VETA	Ox Fe
SG-P119	Veta de Qz/Calcita/Carb Cu Actitud: N30W/70SW	VETA	
SG-P120	Punto de control Roca intrusiva Diorita	PC	
SG-P121	Dique microgranítico Horizontal	DIQUE	
SG-P122	Veta de Qz/Calcita (15 cm potencia) Actitud: N05E/79NW	VETA	
SG-P123	Vetas de Qz/Calcita Actitud 1: N30W/80SW; Actitud 2: N40W/70SW	VETA	
SG-P124	Veta de Qz/Calcita/Carb Cu/Ox Fe (1.5m potencia) Actitud: N35W/73SW	VETA	Ox Fe
SG-P125	Veta de Qz/Calcita/Ox Cu/Sulf Cu (10cm de potencia) Actitud: N45W/84NE	VETA	
SG-P126	Dique microdiorítico Actitud: N10E/78SE	DIQUE	
SG-P127	Veta Qz/Calcita/Ox Fe Actitud: N28W/75NE ID16	VETA	Ox Fe

SG-P128	Veta de calcedonia actitud: N-S/83E en Roca intrusiva Diorita	VETA	
SG-P129	Veta de calcedonia/calcita (10 cm de potencia) en Diorita Actitud: N05W/64NE	VETA	
SG-P130	Veta de calcedonia/calcita/hematita actitud: N05W/74NE	VETA	Ox Fe
SG-P131	Roca intrusiva diorítica con alteración a epidota (leve) diseminada y Chl en Hbl (moderada)	ROCA	Epd - Chl
SG-P132	Veta de Qz/Ox Fe/Ox Cu Actitud: N-S/70E	VETA	Ox Fe
SG-P133	Veta de Qz/calcopirita/Ox Fe/Ox Cu Actitud: N-S/61E Se extrae muestra SG-M50	VETA	Ox Fe
SG-P134	Vetas de Qz/calcita/Ox Fe/Ox Cu/sulf Cu Actitud 1: N35W/83SW y Actitud 2: N05E85NW. Se extraen muestras SG-M51.1 y SG-M51.2	VETA	Ox Fe
SG-P135	Falla Actitud: N30W72NE y Pirca abandonada	FALLA	
SG-P136	Veta de Ox Fe/carb Fe Actitud: N65W/50NE	VETA	Ox Fe
SG-P137	Veta de Qz/Ox Fe/Ox Cu/sulf Cu Actitud: N-S/80W. Se extrae muestra SG-M52	VETA	Ox Fe
SG-P138	Punto de Control FD12	PC	
SG-P139	Roca intrusiva Diorita ID13	ROCA	
SG-P140	Dique microgranítico Actitud: N05W/35SW	DIQUE	
SG-P141	Roca intrusiva Diorita	ROCA	
SG-P142	Veta de Qz/Ox Fe Actitud: N25W/53SW	VETA	Ox Fe
SG-P143	Veta de Qz/Ox Fe Actitud: N25W/65SW	VETA	Ox Fe
SG-P144	Roca intrusiva Diorítica con Dique microgranítico Horizontal	ROCA	
SG-P145	Contacto entre dos Diques paralelos microdiorítico y microgranítico Actitud: N15E/86NW. Se extrae muestra SG-M53.1 y SG-M53.2	CONTACTO	
SG-P146	Veta de Turmalina/Calcita N20E en Dique microgranítico	VETA	Turmalina
SG-P147	Punto de control FD13	PC	
SG-P148	Roca intrusiva Diorítica ID14	ROCA	
SG-P149	Contacto entre Roca intrusiva Diorítica y Dique microgranítico Actitud: N-S/30E	CONTACTO	
SG-P150	Veta de Qz/Ox Fe/Ox Cu/sulf Cu Actitud: N-S/61E	VETA	Ox Fe
SG-P151	Veta de Qz/Ox Fe Actitud: N30E/80NW	VETA	Ox Fe
SG-P152	Veta de Qz/Ox Fe con alteración argílica intermedia en roca intrusiva diorítica actitud: N30E	VETA	Ox Fe - Argilica Intermedia
SG-P153	Veta de Qz/Ox Fe con alteración argílica intermedia en roca intrusiva diorítica actitud: N30E	VETA	OxFe - Argilica Intermedia

SG-P154	Veta de Qz/Ox Fe con alteración argílica intermedia en Roca intrusiva Diorítica Actitud: N30E/80NW	VETA	OxFe - ARGILICA Intermedia
SG-P155	Dique Microdiorítico Actitud: N-S	DIQUE	
SG-P156	SG-M56 Veta de Qz/Calcita/Ox Fe/Ox Cu/Carb Cu/Carb Fe (3m de potencia) 3 orientaciones: Actitud 1: N30E/70NW; Actitud 2: N-S/80W con estría 6/206; Actitud 3: N30W/78SW. 20m. Al Este se encuentra Veta de igual tamaño con la misma mineralización.	VETA	Ox Fe
SG-P157	Punto de control ID17	PC	
SG-P158	Roca intrusiva monzodiorita. Se extrae muestra SG-M57	ROCA	
SG-P159	Roca intrusiva monzodiorita	ROCA	
SG-P160	Roca intrusiva monzodiorita	ROCA	
SG-P161	Roca intrusiva monzodiorita	ROCA	
SG-P162	Roca intrusiva monzodiorita con alteración de actinolita en Hbl (leve).	ROCA	Act
SG-P163	Roca intrusiva diorita	ROCA	
SG-P164	Punto de control ID18	PC	
SG-P165	Roca ígnea diorita con alteración vuggy-silica. Se extraen dos muestras SG-M58.1 y SG-M58.2	ROCA	Vuggy
SG-P166	Veta de Qz/Calcita/Ox Fe/Ox Cu/Sulf Cu con alteración vuggy-silica NDA	VETA	Ox Fe - Vuggy
SG-P167	Veta Qz/Calcita/Ox Cu actitud: N10E/70NW con estría 31/220. Se extrae muestra SG-M60	VETA	
SG-P168	Brecha hidrotermal Actitud: N-S/80W. Se extrae muestra SG-M61	VETA	Turmalina
SG-P169	Roca intrusiva diorita	ROCA	
SG-P170	Roca extrusiva andesita (<2m de potencia) Actitud 1: N-S/65E; dique microgranítico Actitud 2: N70W/90NN	ROCA	
SG-P171	Roca intrusiva diorita	ROCA	
SG-P172	Roca intrusiva diorita con alteración Vuggy-silica y argílica intermedia moderada	ROCA	Vuggy-silica Intermedia
SG-P173	Dique Microdiorítico Actitud: N15E/70SE	DIQUE	
SG-P174	Dique microdiorítico Actitud: N50E con Ox Fe	DIQUE	Ox Fe
SG-P175	Veta de Ox Fe (Hematita/goethita) Actitud: N15E/70SE en Roca intrusiva Diorita	VETA	Ox Fe
SG-P176	Punto de Control ID24	PC	
SG-P177	Roca ígnea Diorita con alteración de Epidota (leve) y Actinolita diseminada	ROCA	Epd - Act
SG-P178	Roca ígnea Diorita con alteración de Epidota (moderada) y Actinolita (leve)	ROCA	Epd - Act
SG-P179	Punto de Control Estrato de "carbón" vegetal	PC	

SG-P180	Punto de Control Estrato de carbón vegetal	PC	
SG-P181	Roca ígnea diorita con alteración de epidota leve diseminada y en vetilla (N30W/75NE) paralelas	ROCA	Epd
SG-P182	Dique microgranítico N25E/29NW	DIQUE	
SG-P183	Dique microdiorítico N05W/72SW y 10m al SW otro dique paralelo	DIQUE	Epd
SG-P184	Falla de Rumbo Sinestral Actitud: N89E/55NW o E-W/55N o 270/55	FALLA	
SG-P185	Falla Actitud: N70E/70NW 250/70	FALLA	
SG-P186	Vetilla de turmalina/epidota actitud: N40W/71SW 20cm de potencia. Roca de Caja Cuarzo-Diorita de anfibola	VETA	Turmalina - Epd
SG-P187	Dique Microdiorítico 2 m de potencia Actitud: N05W/80SW 8M al W Dique paralelo 3m de potencia	DIQUE	Epd
SG-P188	Dique Microdiorítico Actitud: N05W/71NE	DIQUE	Epd
SG-P189	Dique micro diorítico potencia: 30 cm Actitud: N05E/75NW	DIQUE	Epd
SG-P190	Veta Qz/Calcita/Carb Fe/Sulf Cu/Carb Cu/Au y alteración argílica "avanzada" en caja Actitud/N05W/71SW	VETA	Argílica Intermedia
SG-P191	Veta Qz/Calcita/Carb Fe/Sulf Cu/Carb Cu/Au y alteración argílica "avanzada" en caja Actitud/N05W/71SW	VETA	Argílica Intermedia
SG-P192	Roca Ígnea Diorita con alteración de Epidota (moderada) diseminada con alto contenido en Hbl	ROCA	Epd
SG-P193	Dique Micro diorítico Actitud: N30W/80NE	DIQUE	Epd

2. Resumen de datos geoquímicos (pXRF) para rocas.

info	M5-R	M12-R	M25-R	M35-R	M36-R	M45-R	M57-R	M58-R	M62-R
Unidades	PPM								
Mg	14635	22576	22451	33208	0	27698	3159	3973	28090
Al	80162	35485	76742	54123	8421	48041	86581	71747	61480
Si	237834	177075	114405	224290	354242	186948	259455	248281	192949
P	15112	1701	1675	567	508	3703	1669	2240	1368
S	3663	3977	5805	5060	3362	9334	1334	2419	3936
K	3882	2635	0	0	122	2408	26291	2548	246
Ca	60683	67356	30201	59860	4577	73841	31574	20527	64529
Ti	5899	6240	3463	4280	490	5658	5863	3343	4161
V	176	310	506	231	0	348	88	108	233
Cr	85	166	0	91	0	157	62	36	310
Mn	501	1080	103	227	56	551	264	68	343
Fe	32110	51978	54519	34938	840	49966	20366	6395	59615
Co	122	114	154	129	0	0	61	0	207
Ni	29	57	66	56	8	41	9	8	83
Cu	38	361	61	22	765	54	40	103	0
Zn	25	36	0	14	0	17	28	14	12
As	10	7	20	6	3	13	5	6	18
Rb	20	13	0	0	0	19	90	4	2
Sr	580	222	283	259	3	401	572	49	439
Y	30	51	64	15	0	36	15	7	21
Zr	114	52	132	37	8	1626	774	375	147
Mo	4	0	5	5	10	0	19	3	0
Hg	7	10	12	9	6	9	6	5	8
Pb	5	18	5	3	0	5	11	0	4
Th	20	26	36	29	19	12	16	18	14
LE	544246	628444	689268	582542	626559	589086	560272	637701	581776

3. Resumen de datos geoquímicos (pXRF) para diques.

info	M2-D	M8-D	M19-D	M32-D	M34-D	M41-D	M44-D	M51-D	M53.1-D
Unidades	PPM								
Mg	4464	5522	10745	19441	30172	13075	3129	14545	0
Al	60245	7277	35216	71331	57123	90015	61719	11586	40095
Si	264106	182728	59612	217375	185977	217920	278195	350649	156440
P	2898	369	2054	643	1382	696	2021	253	877
S	3396	1495	67815	1832	11391	888	2031	2869	2723
K	738	486	0	0	1403	9163	43947	105	0
Ca	12238	127127	96410	24812	62147	58317	14635	6175	33444
Ti	4826	0	6484	2668	3873	6201	4125	253	2215
V	103	0	716	175	261	314	0	79	0
Cr	0	45	65	60	421	43	28	33	0
Mn	86	283	41	470	577	921	270	38	0
Fe	8220	1657	21856	39145	35733	44126	19284	6503	914
Ni	16	13	40	36	120	17	14	17	18
Cu	15	175	10	26	40	13	123	244	36
As	4	6	12	6	8	3	5	3	5
Sr	52	6	205	53	432	751	187	3	39
Y	20	3	19	15	20	12	15	0	14
Zr	205	2	85	99	123	33	393	0	417
Hg	6	4	6	6	8	8	7	7	6
Th	18	11	24	17	16	20	33	12	62
Le	637724	672787	698166	620950	608628	556235	568748	606604	762668

4. Resumen de datos geoquímicos (pXRF) para VETAS.

info	M3-V	M10-V	M22-V	M27-V	M28-V	M38-V	M49-V	M50-V	M56-V
Unidades	PPM								
Al	95036	3232	2001	19481	8800	30013	6145	10631	3459
Si	320424	342397	15278	143727	314062	124242	351068	379390	65159
P	444	271	0	897	648	637	2042	279	204
S	965	3013	0	3656	6731	3178	3303	1862	6868
K	308	0	0	1543	1023	1835	1130	159	45
Ca	4480	24132	393060	165275	10663	108917	16564	4884	308496
Mn	49	0	1230	1603	28	410	34	0	988
Fe	1846	3287	5571	50152	2830	46234	2697	1445	1872
Ni	7	9	23	29	12	39	7	10	21
Cu	16	2310	0	41	3711	53	706	3914	30
As	6	3	6	22	3	12	10	57	3
Sr	49	7	42	72	3	576	5	4	59
Hg	4	4	11	13	10	12	3	183	8
Th	20	14	22	33	18	11	13	16	10
Le	572696	617345	582127	609841	647628	657340	611746	594130	612570