



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**METALOGÉNESIS Y GEOQUÍMICA DE LAS VETAS DE MAGNETITA DEL
SECTOR JESÚS MARÍA, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE.**

Chantal Denise Muriel Labbé Gramajo

Copiapó, Chile 2024



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**METALOGÉNESIS Y GEOQUÍMICA DE LAS VETAS DE MAGNETITA DEL
SECTOR JESÚS MARÍA, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE.**

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

Profesor guía: Dr. Karl Riveros Jensen

Chantal Denise Muriel Labbé Gramajo

Copiapó, Chile 2024

El presente trabajo se desarrolló en el marco del proyecto FIC-FNDR 2019 “Núcleo de investigación del Cobalto y Tierras Raras” financiado con recursos del Gobierno Regional de Atacama y sus Fondos para la innovación y Competitividad (FIC).



Dedicatoria

*Para mi papá y mamá,
muchas gracias por todo.*

Agradecimientos

Primeramente, quiero agradecer a mis padres que siempre me apoyaron en lo que he querido hacer y han tenido paciencia para este ciclo universitario, a mi hermana que siempre ha estado ahí en todas y sé que siempre puedo confiar en ella, a nuestro perrito Harry que descansa en paz.

A mi profesor guía Dr. Karl Riveros que me presento con esta idea para hacer la tesis y sin él no habría tenido un tema claro.

A mis amigos que hice en la universidad apenas llegué y que han estado presentes desde ese entonces: Javi, Mauri, Seba, Dani y Feña. A mis amigos del movimiento F que me fui encontrando en el camino y que me aportaron experiencias que jamás habría podido tener sin haberlos conocido. A mis compañeros y amigos de mapeo 3: Kazhyr's, Ian y Seba, que hicieron de esta tesis una experiencia muchísimo más llevadera. También quiero agradecer a Ayleen que fue un apoyo inmenso en todo esto y espero poder continuar en su vida por mucho tiempo más.

A mis amigas de Iquique: Pilar, Feña, Anita, Titi, Maca Figaro, Maca Camejo y Gabi, que, a pesar de estar lejos, nos mantuvimos cerca y nuestra amistad aún perdura como lo fue en el colegio. Y a Cindy, que siempre ha sido la mejor amiga con la que podría contar y ha estado conmigo en las buenas y en las malas.

Por último, quiero agradecer y dedicar esta tesis a mi gatita Báltica, que me acompañó en los últimos años de mi carrera y estuvo para mí cuando más la necesitaba, sé que ahora me cuidas desde donde sea que estes y que siempre te tendré conmigo en mi corazón. Te amo Baltiquita, siempre estás en mi día a día.

Índice

Resumen.....	1
Capítulo 1: Introducción	2
1.1 Contexto de la investigación.....	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Objetivo general.....	3
1.4 Objetivos específicos	3
1.5 Área de estudio, ubicación y accesos.....	3
Capítulo 2: Marco teórico	5
2.1 Cobalto, vanadio, titanio, níquel y tierras raras	5
2.1.1 Vanadio	6
2.1.2 Titanio	7
2.1.3 Níquel.....	7
2.2 Depósitos tipo IOCG.....	7
2.3 Depósitos tipo IOA	10
2.4 Geología regional.....	12
2.5 Configuración estructural.....	12
2.6 Geología local	13
2.6.1 Mineralización	13
2.6.2 Alteración.....	14
Capítulo 3: Metodología	15
3.1 Etapa pre-terreno.....	15
3.2 Etapa de terreno	17
3.3 Etapa de gabinete	17
Capítulo 4: Resultados	19
4.1 Litología.....	19
4.1.1 Diorita	19
4.1.2 Tonalita	20
4.1.3 Diques	21
4.2 Alteración.....	24
4.2.1 Alteración a epidota	24
4.2.2 Alteración clorítica.....	24
4.2.3 Alteración argílica.....	25
4.2.3 Alteración a limonitas	25
4.3 Mineralización	27

4.4.1 Vetas de magnetita.....	27
4.4 Geología Estructural	29
4.4.1 Vetas de magnetitas	29
4.4.2 Fallas	29
4.4.3 Diques	31
4.5 Geoquímica de los elementos estratégicos.....	33
4.5.1 Correlación de elementos.....	39
4.6 Análisis químico-mineralógicos de alta resolución mediante SEM-EDS.....	43
4.6.1 Muestra A2P66.1	43
4.6.2 Muestra A2P107	45
4.6.3 Muestra P6-3.....	47
Capítulo 5: Discusión.....	52
5.1 Contexto regional de quebrada Jesús María	52
5.2 Implicancias mineralógicas.....	52
5.3 Análisis e interpretación geoquímica del área de estudio	53
5.4 Análisis de gráficos binarios	53
5.5 Análisis estructural.....	55
5.6 Implicancias de los resultados SEM-EDS	57
Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones	60
ANEXOS	69

Resumen

Esta tesis se desarrolló con recursos del proyecto FIC – FNDR 2019 del Gobierno Regional de Atacama y tiene como objetivo la evaluación del potencial económico de las vetas de magnetita en el distrito Quebrada Jesús María, en la región de Atacama, Copiapó. El sector por estudiar se encuentra ubicado aproximadamente a 7.4 km al sur de la Universidad de Atacama, viajando por Panamericana Norte (ruta 5). Este sector se caracteriza por sus abundantes depósitos vetiformes mineralizados con oro nativo, crisocola y magnetita, siendo estos emplazados en rocas de composición diorítica y tonalíticas. En este estudio se realizó un trabajo de mapeo geológico donde fueron recolectadas un total de 47 muestras de magnetita, hematita, diques y rocas de caja, a las cuales se les realizaron una serie de análisis petrográficos mediante microscopía óptica, geoquímicos a través de fluorescencia de rayos X (XRF), donde finalmente 3 muestras de interés fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS). Los resultados indican que además de los elementos convencionales (Cu-Fe-Au) ocurren interesantes concentraciones de Co, Ni, Ti y REE, al interior de las vetas de magnetita del sector. También se hizo un análisis estructural con el fin de relacionar las vetas y diques del sector y correlacionarlos con el Sistema de Falla de Atacama. Los resultados geoquímicos del XRF indicaron un promedio de 0.172% peso en Ti, 0.099% peso en V, 0.267% peso en Co y 0.062% peso en Ni. Además, sectores específicos (muestra P6-3) presentaron valores elevados de U (0.072% peso) y Th (0.591% peso) asociados al Cu. Todos estos resultados son porcentajes más elevados al común en la corteza terrestre por lo que tienen un potencial económico que debe ser estudiado más a fondo. El área del estudio presenta apatito y actinolita como principales minerales de alteración, especialmente en el sector norte, sugiriendo la ocurrencia de sistemas mineralizados tipo “Iron Oxide Apatite” (IOA) con una transición hacia el sur a un sistema de tipo “Iron Copper and Gold” (IOCG), dándose como principal alteración limonitas de manera intensa en la parte centro y sur del área. Las vetas de magnetita estudiadas en el sector presentan, en general, una medición de N45W, compatibles con debilidades estructurales correspondientes a fracturas de tipo tensional (T), según el modelo de Riedel (1929). Finalmente, se sugiere realizar un mayor muestreo en las zonas mineralizadas y un

estudio estructural detallado para descifrar con mayor precisión el potencial económico de estos elementos estratégicos no convencionales, así como su control estructural.

Capítulo 1: Introducción

1.1 Contexto de la investigación

El presente proyecto se llevó a cabo en el distrito minero “Quebrada Jesús María”, comuna de Copiapó, durante el primer semestre del año 2021 hasta junio de 2022, en el marco del proyecto FIC – FNDR 2019 del Gobierno Regional de Atacama “Núcleo de investigación del Cobalto y Tierras Raras”.

La intención del estudio es establecer la metalogénesis de las distintas vetas de magnetita del sector y determinar la ocurrencia de elementos estratégicos no convencionales.

La zona de estudio y sus alrededores presenta un gran potencial económico debido al ambiente geológico del margen andino chileno. Esta región geológica es propicia para la formación de grandes depósitos minerales, como los pórfidos cupríferos, los depósitos de hierro, cobre y oro (IOCG) y los yacimientos de óxidos de hierro y apatito (IOA), así como diversos tipos de vetas polimetálicas. En el sector estudiado, la extracción se centra en grandes cantidades de oro y cobre, que se encuentran alojados en estructuras vetiformes. Sin embargo, no existe mayor beneficio económico de vetas de magnetita, ni tampoco de los elementos no convencionales hospedados en estas mismas, desconociéndose su potencial económico. Adicionalmente, ocurren minerales de alteración que podrían hospedar elementos de interés, como por ejemplo apatito enriquecido en elementos de tierras raras, entre otros (Vivallo et, al. 1995).

En el norte de Chile, la Franja Ferrífera Principal se extiende desde Taltal (25°S) hasta La Serena (31°S). Allí los depósitos IOA e IOCG muestran una abundancia característica de magnetita y/o hematita siguiendo un fuerte control estructural y suelen estar asociados a batolitos (Sellés, et al. 2015). Lacassie et al., 2016, llevaron a cabo un muestreo regional de zonas con mineralización y alteración hidrotermal en la provincia metalogénica de la Cordillera de la Costa, abarcando las regiones de Atacama y Coquimbo. Los resultados de este estudio determinaron una impronta de primer orden por presencia de Ni-Co.

El distrito minero “Quebrada Jesús María” es un sector que actualmente se encuentra en producción. Los metales principales que son explotados son: Au, Cu y Fe; estos recursos muestran un control estructural evidente, ya que la mayoría de los depósitos se presentan en vetas que además hospedan importantes concentraciones de hematita y/o magnetita.

Con el fin de identificar y cuantificar elementos estratégicos no convencionales (Co, Ni, Ti, V), los cuales podrían estar asociados a las vetas de magnetita se llevan a cabo una serie de estudios geológicos y químico-mineralógicos de alta resolución. De esta forma, se podrá identificar y cuantificar el potencial económico de los mismos, lo que a su vez puede impulsar la iniciativa de nuevos proyectos geológicos o mineros en esta región.

1.2 Objetivos

1.3 Objetivo general

- Evaluar el potencial económico de vetas de magnetita y sus elementos estratégicos asociados en el distrito Jesús María.

1.4 Objetivos específicos

- Definir y caracterizar unidades litológicas y zonas de alteración en el distrito.
- Identificar y cuantificar elementos estratégicos en vetas de magnetita (Co, V, Ti, Ni) y tierras raras (REE).
- Correlacionar genéticamente el Sistema de Fallas de Atacama (SFA) con las vetas y diques del sector.

1.5 Área de estudio, ubicación y accesos

El área de estudio está situada en la comuna de Copiapó, perteneciente a la provincia de Copiapó, en la región de Atacama, Chile. Para llegar a esta zona desde la Universidad de Atacama (sede Copiapó), se debe tomar la Panamericana Norte (Ruta-5, Avenida Copayapu) en dirección sur, recorriendo aproximadamente 7.4 kilómetros. Luego, se debe tomar un desvío hacia el suroeste por la ruta C-402, continuando unos 2,3 kilómetros hasta ingresar a la quebrada Jesús María. El área designada para el estudio corresponde a un polígono con dimensiones aproximadas de 3,5 kilómetros de largo por 1,5 kilómetros de ancho, ubicado al suroeste de la ciudad de Copiapó (ver Fig. 1.1).

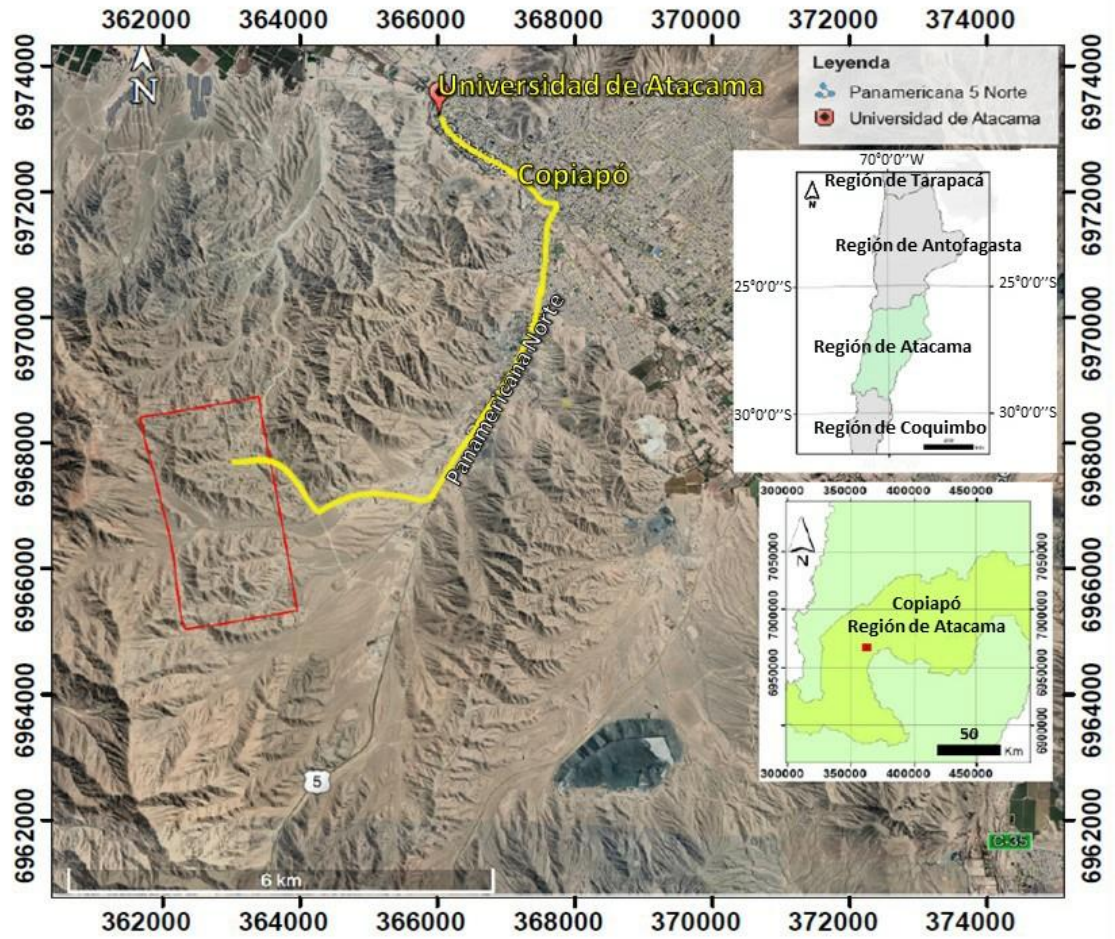


Fig. 1.1: Ubicación del sector del área de estudio con sus respectivas vías de acceso y zona de estudio designada, representada por el polígono rojo. Hacia el NE se encuentra la ciudad de Copiapó. (Extraída y modificada de Google Earth).

Capítulo 2: Marco teórico

2.1 Cobalto, vanadio, titanio, níquel y tierras raras

El cobalto es un elemento metálico representado por el símbolo “Co”. Según la clasificación de Goldschmid, el cobalto se clasifica como un elemento siderófilo debido a su afinidad geoquímica con otros elementos metálicos como lo son el Cu, Ni, Fe, Ti, V, etc. Normalmente se encuentra asociado a estos elementos en la naturaleza. Esto conlleva que su producción se lleva a cabo como un subproducto de la minería del cobre o níquel. Generalmente es recuperado durante el procesamiento de sulfuros u óxidos de Cu, sulfuros de níquel o laterita (Chong. Hu, 2012).

En la corteza terrestre, la concentración promedio de cobalto es de 25 ppm (Mason, 1959; Smith, 2001). Los mayores depósitos de cobalto provienen principalmente de los depósitos de la República Democrática del Congo, siendo responsables de más del 50% de la producción mundial de cobalto, como lo muestra la Tabla 1.1 que detalla la producción y reservas globales de cobalto. Estos depósitos, clasificados como de tipo Cu-Co, se encuentran alojados de manera estratificada en rocas sedimentarias siliciclásticas o carbonatadas (Mudd et al. 2013; Hitzman et al. 2017).

En Chile los depósitos que albergan cobalto pueden desarrollarse en fases de mineralización en zonas hipógenas (primarias), como en procesos de enriquecimiento secundario (similar al enriquecimiento secundario del cobre). Los principales depósitos se encuentran en la Franja Ferrífera Chilena del Cretácico temprano, entre la región de Atacama y Coquimbo, en la Cordillera de la Costa. Estos yacimientos se encuentran hospedados en rocas metamórficas de edad paleozoica, en rocas volcánicas, intrusivas y sedimentarias (en menor medida) con edades Cretácico Inferior. Estos depósitos se ven afectados por el Sistema de Falla de Atacama (SFA) (Townley et al., 2017). Los yacimientos en esta zona son de origen hidrotermal y están asociados a las intrusiones de dioritas del Cretácico Superior, que se observan distribuidas a lo largo del territorio chileno.

Tabla 1.1. Producción y reserva de cobalto a nivel mundial en toneladas (modificado de: U.S. Department of Interior, U.S. Geological Survey. 2018):

País	Producción (ton)	Reserva (ton)
Estados Unidos	640	38.000
Australia	5.030	1.200.000
Canadá	3.870	250.000
China	3.100	80.000
Congo (Kinshasa)	73.000	3.400.000
Cuba	5.000	500.000
Madagascar	3.500	140.000
Marruecos	2.200	17.000
Papúa Nueva Guinea	3.310	56.000
Filipinas	4.600	280.000
Sudáfrica	2.300	24.000
Otros países	120.000	6.900.000

A menudo, las tierras raras (REE, por sus siglas en inglés) se encuentran asociadas al cobalto. Las REE son un conjunto de 17 elementos metálicos pertenecientes al grupo III de la tabla periódica. Dentro de este grupo incluyen 15 elementos del grupo de los lantánidos (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Au, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu), Sc e Y. Los tipos de REE se pueden dividir en: “tierras raras livianas”, “tierras raras intermedias” y “tierras raras pesadas”, en función de su peso atómico (Burkhalter, 2016).

A continuación, se detallan otros elementos químicos que pueden encontrarse asociados al Co y magnetita.

2.1.1 Vanadio

El vanadio, de símbolo V y con número atómico 23, es un elemento químico metálico que pertenece al grupo 5 de la tabla periódica. Este elemento se obtiene de distintos minerales, por lo que lo convierte en uno de los elementos más abundantes y extensamente distribuido en la corteza terrestre (Rehder, 2008). La extracción de V se lleva a cabo principalmente en Sudáfrica (42.2%), Rusia (39.2%) y China (12.7%)

(García, 2006), países que en conjunto generan el 93% de la producción mundial de este elemento (Polyak, 2005). Por lo general, el V se utiliza usualmente en la fabricación de aleaciones de acero resistentes a la corrosión (acero inoxidable) empleado en la creación de instrumentos quirúrgicos y herramientas. Asimismo, el pentóxido de vanadio es empleado para la producción de cerámicas.

2.1.2 Titanio

El titanio, de símbolo Ti, es un elemento químico metálico con un número atómico de 22, perteneciente al grupo 4 de la tabla periódica. Este elemento es el noveno más abundante en la corteza terrestre y por lo general se encuentra en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias (Habashi, 1997). Por lo general, el uso que se le da a este elemento es principalmente aeroespacial (motores y estructuras) y militar (misiles y blindajes), esto debido a su baja densidad y alta resistencia. De esta forma también es usado para material deportivo y computadores (Enghag, 2007).

2.1.3 Níquel

El níquel (Ni) es un elemento químico con número atómico 28, perteneciente al grupo 10 de la tabla periódica y se sitúa en la serie química de metales de transición. Los principales productores de este elemento son Indonesia (24%), Filipinas (15%) y Francia (9%) (McRae, 2019). El níquel tiene una amplia gama de aplicaciones, se utiliza en la fabricación de acero inoxidable austenítico, baterías, recubrimientos metálicos y en procesos de fundición.

2.2 Depósitos tipo IOCG

Los depósitos IOCG (por sus siglas en inglés: Óxidos de hierro, cobre y oro) son depósitos de tipo magmático-hidrotermal, que se caracterizan por contener grandes cantidades de magnetita, hematita especular, calcopirita (principal mineral de Cu), bornita y oro (nativo, atrapado en los sulfuros). El depósito que da origen a esta clase y el más importante a nivel mundial es el Olympic Dam en Australia, con grandes reservas de Fe, Cu, Ag, Au, U y REE (Hitzman et al., 1992). Estos depósitos se asocian comúnmente con alteración albita-actinolita (Skirrow, 2021). Las leyes de cobre en estos depósitos también presentan enriquecimiento por la presencia de elementos menores como lo son el Co, U, REE, Mo, Zn, Ag, Ni, Zn, entre otros, además presentan un bajo contenido de Ti (Hitzman et al., 1992; Sillitoe, 2003; Williams et al., 2005; Skirrow,

2021; Camprubí et al., 2017). La distribución global de estos depósitos es amplia y presentan edades desde el Arqueano al Cenozoico (Fig. 2.1) (Groves et al., 2005).

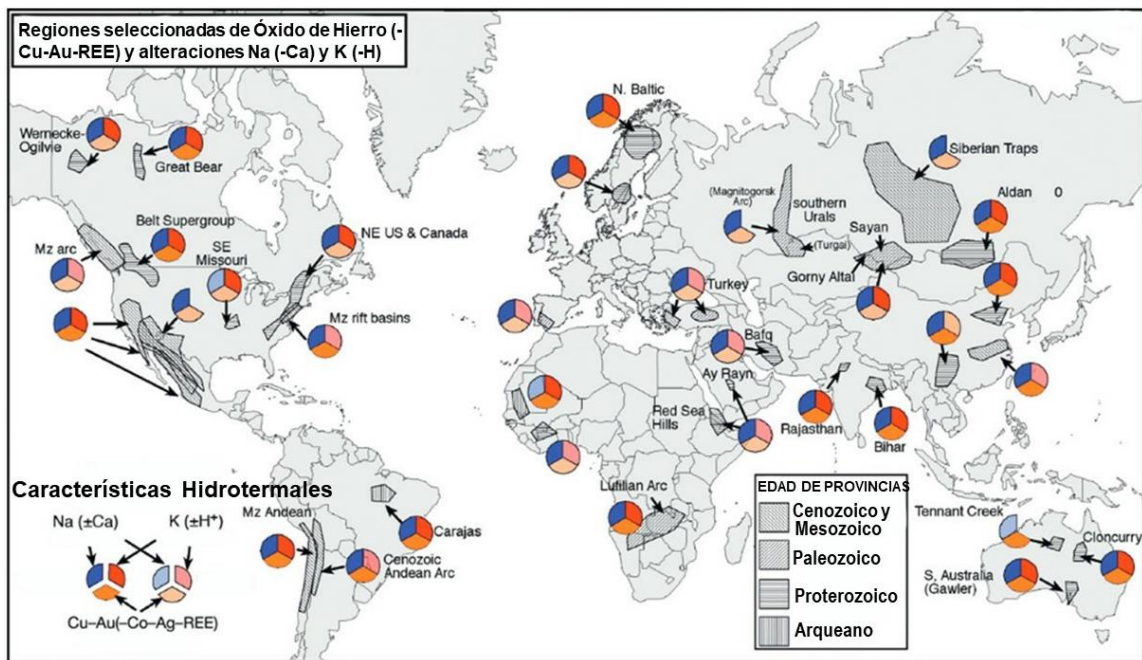


Fig. 2.1: Mapa global que indica la distribución de los distintos depósitos tipo IOCG, con las edades de las provincias y la mineralización de Cu-Au. Extraído de Barton (2014).

Debido a la amplia variedad de configuraciones tectono-magmáticas en las que se originan los depósitos IOCG, resulta difícil definir sus características principales. Además, los depósitos ricos en Cu-Au no son muy comunes, por lo que no se encuentran presentes en todos los distritos mineros (Groves et al., 2010).

Los depósitos de tipo IOCG presentan subtipos en base a su génesis, geometría y modo de ocurrencia, estos son (Sillitoe, 2003):

- IOCG-Skarn: Cuerpos magmáticos que intruyen rocas carbonatadas localmente (ej.: Candelaria).
- IOCG mantiforme: Zonas mineralizadas paralelas a la estratificación, privilegiando la geometría (ej.: Manto verde).
- IOCG vetiforme: Estos depósitos se forman cuando los fluidos mineralizados son inyectados a través de estructuras específicas.

- IOCG brechiforme: Zonas que presentan la presencia de con brechas hidrotermales como parte de su morfología y proceso de formación.

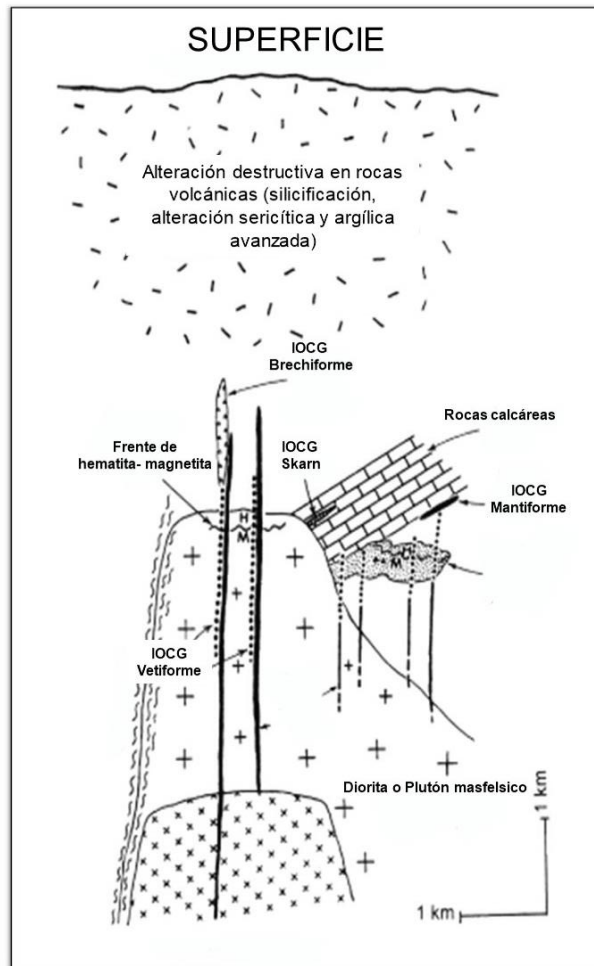


Fig. 2.2: Distintos subtipos de IOCG (Sillitoe, 2003)

En Chile estos yacimientos representan la segunda fuente más importante de cobre, después de los depósitos de sistemas de pórfidos de Cu-Mo (Barra et al., 2017), lo que los convierte en un componente crucial para la economía del país. En estos depósitos el rasgo estructural principal identificado en Chile es el Sistema de Fallas de Atacama (SFA). La actividad magmática asociada a estos depósitos se sitúa en el periodo Jurásico-Cretácico, desarrollados en ambientes extensionales asociados a una subducción de tipo Marianas (Sillitoe, 2003). Durante este proceso, los magmas presentan composiciones desde básicas hasta intermedias, principalmente diorítica-gabroica emplazadas a través del SFA (Fig. 2.3).

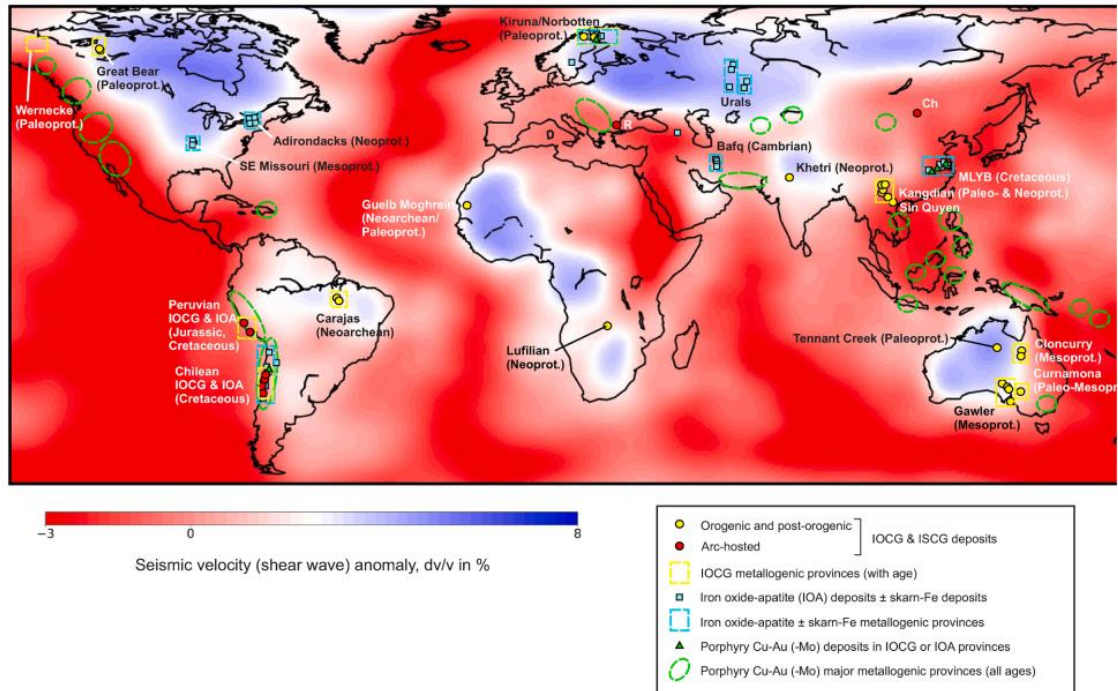


Fig. 2.3: Imagen global de los depósitos más importantes de tipo IOCG.

2.3 Depósitos tipo IOA

Los depósitos de tipo IOA (iron oxide-apatite/actinolita) o tipo Kiruna son depósitos de magnetita masiva asociados a la alteración de actinolita y apatito. Estos depósitos son ricos en hierro (Fe), normalmente hospedado en magnetitas masivas, lo que motiva su explotación en la mayoría de los casos. Además, en cantidades menores, pueden presentar sulfuros, como lo son la pirita y calcopirita. De igual forma, estos depósitos, pueden ser explotados por la presencia elementos de interés, asociados a REE.

Existen varias teorías sobre el origen de los yacimientos de tipo IOA. Una de estas teorías propone que el origen de estos depósitos es netamente de origen magmático, específicamente orto magmático. Lo que significa que la formación de depósitos ricos en hierro se produce únicamente mediante la cristalización de una masa ígnea fundida. Según esta teoría, la magnetita masiva se origina a partir de un magma inmiscible rico en Fe que, debido a la diferencia de densidad, se separa de la fase silicatada. Conforme este magma enriquecido en Fe se enfría, se va formando el depósito de magnetita (Nystrom, et al., 1994; Chen et al., 2010; Tornos et al., 2016).

Por otro lado, existe otro modelo que considera un origen hidrotermal para estos depósitos (e.g., Ruiz et al., 1965; Sillitoe & Burrows, 2002; Dare et al., 2015). Esta teoría sugiere que la exsolución de un fluido rico en Fe a partir de una fuente magmática. Los fluidos hidrotermales liberados por magmas de composición intermedia a máfica (diorítico, gabroico), serían los responsables de depositar la magnetita en la roca hospedante.

La teoría más reciente, propuesta por Knipping et al. (2015), se basa en observaciones de campo, análisis geoquímicos de los elementos traza y el estudio de la composición de los isótopos estables de Fe y O presentes en las magnetitas. Esta teoría, plantea un origen mixto (magmático e hidrotermal), donde la nucleación de cristales (o microlitos) de magnetita (altas en Ti) son de origen magmático. Posteriormente las burbujas de fluidos exsueles en el magma máfico-intermedio, ascienden a través de fallas o fracturas preexistentes. Estos cristales de magnetita de origen ígneo se nuclearían a partir del enfriamiento de la masa ígnea, a medida que el sistema evoluciona. Durante este proceso evolutivo estos cristales de origen ígneo experimentan un sobrecrecimiento o depositación de una segunda fase de cristalización a partir de soluciones hipersalinas ricas en Fe (Fig. 2.4).

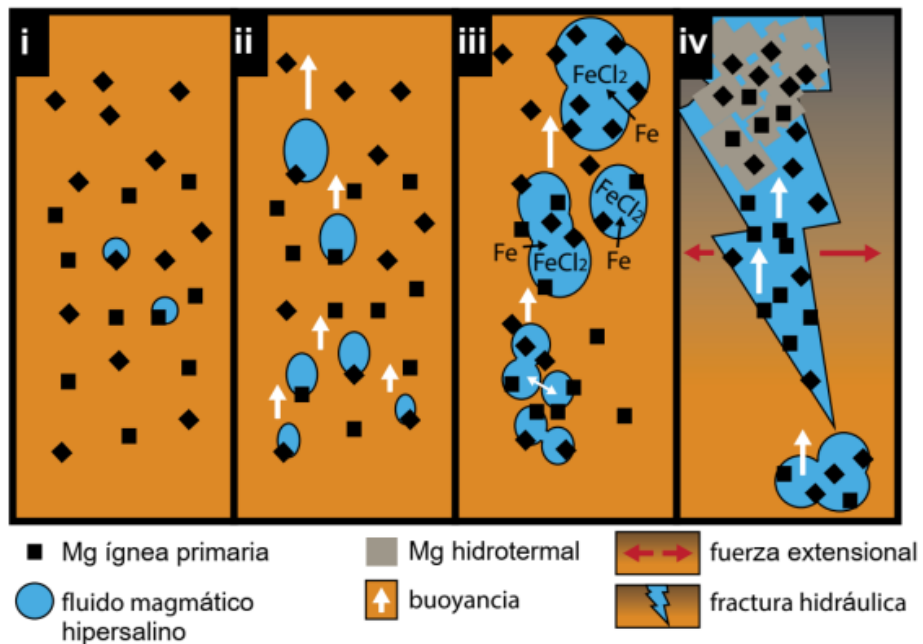


Fig. 2.4: Modelo de flotación propuesto por Knipping et al., (2015). Explicación del ascenso de la magnetita en el fluido magmático.

2.4 Geología regional

El área de estudio se ubica en la unidad geológica llamada Diorita La Brea (123-117Ma; método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; Arévalo, 2005), esta unidad esta descrita como el cuerpo con mayor exposición superficial en la región de Atacama (aproximadamente 270 km²). Al norte, la Diorita La Brea limita con el Plutón la Borracha, mediante la Falla Bandurrias. Por otro lado, hacia el sur y el este, se encuentra limitada por un contacto intrusivo de rocas estratificadas, entre las que se incluyen las formaciones Bandurrias, Punta del Cobre, Abundancia y Nantoco, generando así una inconformidad (Arévalo, 2005).

La petrografía de este plutón está compuesta por dioritas de hornblenda y clinopiroxeno, así como monzodioritas de biotitas. El tamaño de grano de estas rocas varía según la zona de extracción. Las dioritas de grano grueso presentan una composición de plagioclasa, cuarzo, hornblenda y biotita (Segerstrom, 1968).

Los diques en general se forman por la intrusión del magma en las áreas más frágiles de la roca huésped, asociado a eventos plutónicos (Steven, 1990). Estos diques poseen una forma tabular donde su ancho puede variar desde metros a kilómetros y alcanzar extensiones de varios kilómetros de longitud. Por lo general estos cuerpos pueden encontrarse en familias de composición similar.

Las vetas se originan a partir de fracturas que son rellenadas por la precipitación de minerales, desde una fase acuosa, siendo estas fracturas el resultado de procesos hidráulicos o tectónicos. La composición mineral de las vetas dependerá de la composición de la roca de caja, los elementos disueltos en el fluido, la temperatura de precipitación de estos fluidos, la presión y el pH del ambiente (Gaboury, 2000).

2.5 Configuración estructural

El comportamiento estructural en el Norte de Chile, particularmente en la Cordillera de la Costa, está dominado por un régimen de carácter frágil-dúctil reconocido como el Sistema de Fallas de Atacama (SFA), siendo uno de los rasgos estructurales más notorios de la zona. Su distribución es de más de 1000km y se puede rastrear entre 21°-30°S (Scheuber y Andriessen 1990; Brown et al. 1993; Cembrano et al., 2005).

El SFA está definido por un desplazamiento sinistral de carácter dúctil durante el Cretácico temprano (Scheuber y Andriessen, 1990). Posterior al primer episodio dúctil, experimenta una compleja serie de desplazamientos, los cuales ocurren en condiciones predominantemente frágiles (Niemeyer, 2008). La cinemática de las estructuras frágiles SFA es principalmente sinistral con un componente extensional menor (Scheuber y Andriessen 1990). Este comportamiento se atribuye a la alta convergencia oblicua de la placa de Aluk bajo de la placa de Sudamericana durante el Mesozoico (Scheuber y González 1999).

En el área de estudio se encuentran diferentes tipos de diques y vetas. Los diques muestran variaciones en sus composiciones y orientaciones preferenciales, lo cual sugiere diferentes eventos de emplazamiento a lo largo del tiempo. Este fenómeno se refleja de manera similar en las diferentes vetas estudiadas en el área, las cuales se distinguen, principalmente por los minerales y elementos que hospedan, como Au, Cu y Fe.

2.6 Geología local

2.6.1 Mineralización

En el área de Jesús María se han identificado diferentes tipos de mineralización. En las unidades Diorita La Brea y Granodiorita Sierra Paja Blanca se encuentran diques y vetas que contienen elementos como Cu, Au, Fe y Fe-Au-Cu (Arévalo, 2005). Estas vetas muestran una diversidad de minerales como magnetita, hematita, especularita, pirita, crisocola, atacamita y, ocasionalmente, oro nativo (Lledó, 1998). Además, se han registrado vetas con elevados contenidos de Cu-Au en la granodiorita de Sierra Pajas Blancas y Diorita la Brea donde la mineralización se encuentra mayormente concentrada en vetas y vetillas de calcita, cuarzo y baritina (Marco, 1978); vetas con alto contenido de Fe en tonalitas y monzodioritas del Cerro Moradito y granodioritas de la sierra Jesús María (Lledó, 1998), y vetas con elevado contenido en Fe-Au-Cu en granodioritas y monzodioritas del Cerro Moradito y en andesitas de la Formación La Negra (Díaz et al., 2006). Estos depósitos varían en potencia, corrida y profundidad, mostrando una mineralogía diversa que incluye diversos minerales metálicos y óxidos.

2.6.2 Alteración

En el área de Jesús María, se han identificado zonas de alteración argilíca avanzada (AAA) ubicadas en rocas volcánicas. Esta AAA se sitúa encima estructuralmente de la mineralización más profunda de magnetita-apatita-actinolita y de la mineralización intermedia portadora de Cu. Estas formaciones están intersectadas por diques intraminerales fechados en 127 millones de años (mediante circón U-Pb; Kreiner y Barton, 2011). La AAA se caracteriza por conjuntos iniciales de dumortierita-pirofilita±hematita relacionados con la mineralización de 127 millones de años. Posteriormente, se registra una sobreposición de turmalina-andalusita-cuarzo-calcita±hematita. Se sugiere que la andalusita superpuesta y posiblemente parte de la pirofilita sobre la dumortierita-pirofilita temprana pueden ser el resultado de una sobreimpresión metamórfica relacionada con los grandes plutones de entre 118 y 115 millones de años, vinculados a los distritos de Ojancos Viejo y Nuevo (Kreiner y Barton, 2011).

Capítulo 3: Metodología

3.1 Etapa pre-terreno

- La etapa inicial del estudio consistió en la recopilación bibliográfica existente relacionada con depósitos de Cu, Fe y Au en la zona norte de Chile. Además, se consultaron mapas geológicos con el objetivo de establecer una mejor correlación con la litología presente en el área de estudio.
- Se llevó a cabo una recopilación bibliográfica para indicar las características, distribución y concentración de elementos estratégicos asociado a las vetas de magnetita.
- Finalmente, se procedió a crear una base de mapeo de escala 1:10.000 con el propósito de crear un mapa detallado que destaque las diferentes litologías, alteraciones y cuerpos mineralizados del sector. (Fig. 3.1).

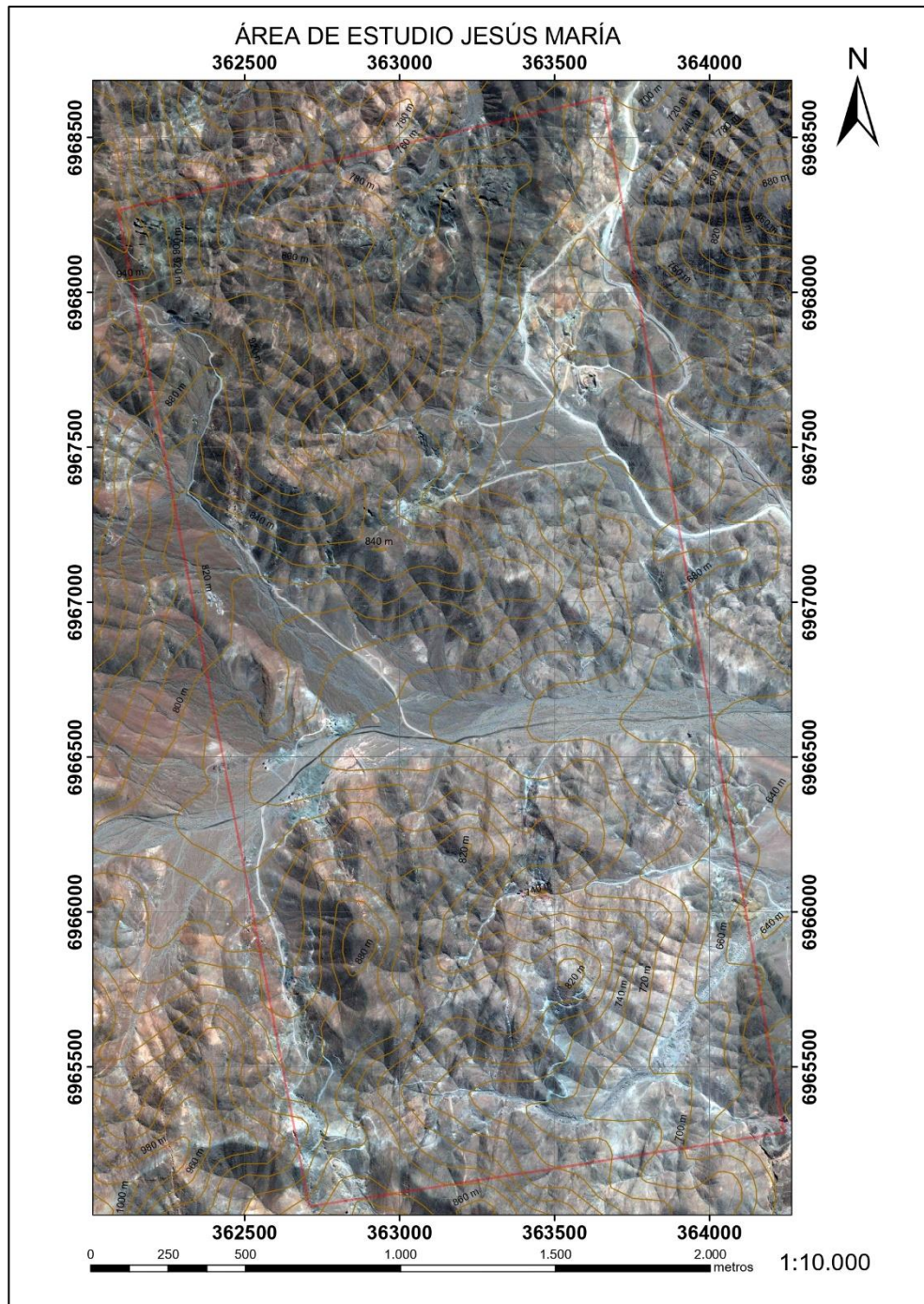


Fig. 3.1: Base de mapeo del área de estudio “Quebrada Jesús María”, escala 1:10.000.

3.2 Etapa de terreno

El trabajo de campo comprendió las siguientes actividades:

- Descripción geológica detallada de las litologías presentes en la zona, con especial énfasis en la toma de coordenadas de los sitios de interés, destacando las áreas mineralizadas y alteraciones.
- Registro de datos estructurales de vetas de magnetita, hematita y diques utilizando una brújula GeoBrunton.
- Recolección de muestras de rocas de caja, diques y vetas, otorgando especial atención a las vetas de magnetita identificadas en la región.

3.3 Etapa de gabinete

- Selección de un total de 47 muestras, incluyendo vetas de magnetita, hematita, diques y rocas de caja.
- Análisis de las muestras mediante fluorescencia de rayos X (XRF) utilizando un analizador modelo S1-Titan 600 de la marca BRUKER, realizando un total de 62 análisis geoquímicos.
- Registro de los datos obtenidos en Microsoft Excel 2019, creando dos tablas: una con parámetros MUESTRA, NORTE, ESTE (Tabla 1.2) y otra con los distintos elementos detectados por el equipo (abarcen aproximadamente 45 elementos) (Anexo tabla 1).

Tabla 1.2: Tabla con los nombres de las muestras y sus respectivas coordenadas UTM.

MUESTRA	NORTE	ESTE	MUESTRA	NORTE	ESTE
A2P60	6.966.868	363.819	D-63 C	6.968.201	362.200
A2P107	6.967.950	362.975	M10 D-4	6.967.507	363.141
A2P66.2 A	6.966.361	363.907	M21 D-4	6.967.520	363.012
A2P66.2 B	6.966.361	363.907	MO11 D-4	6.967.400	363.258
A2P86 A	6.965.788	362.640	A29	6.968.211	362.167
A2P86 B	6.965.788	362.640	A28	6.968.160	362.108
A2P66.1 A	6.966.361	363.907	A39	6.968.022	363.024
A2P66.1 B	6.966.361	363.907	A27	6.967.916	362.286
A2P66.1 C	6.966.361	363.907	D6-16	6.966.881	363.527
A2P66.5	6.966.361	363.907	P210 A	6.965.863	362.941
A2P107.1	6.967.950	362.975	P210 B	6.965.863	362.941
A2P108 A	6.967.900	362.933	D7P1M1	6.967.899	362.308
A2P108 B	6.967.900	362.933	Prime PT1	6.968.169	362.095
A2P86.1 A	6.965.788	362.640	D6P12M1	6.967.047	363.911
A2P86.1 B	6.965.788	362.640	D7P57	6.968.145	362.178
A2P69	6.966.050	363.470	A27 A	6.967.916	362.286
A2P46	6.968.255	363.160	A27 B	6.967.916	362.286
A2P29	6.967.523	363.846	A27 C	6.967.916	362.286
A2P15	6.968.151	362.191	P5-5.3	6.966.167	362.813
A2P15.1	6.968.151	362.191	P6-3 B	6.967.886	363.351
D-6P5	6.966.991	363.504	P6-3 B	6.967.886	363.351
D-6-18	6.968.205	362.229	P7-3 A	6.967.896	363.433
D-64 A	6.968.218	362.193	P7-3 B	6.967.896	363.433
D-64 B	6.968.218	362.193	A2_P8.3	6.967.910	363.559
D-63 A	6.968.201	362.200	A2_P8.3	6.967.910	363.559
D-63 B	6.968.201	362.200	A2_P81 B	6.966.676	362.712

- Selección de las muestras con contenido de cobalto superior al 0.1% en peso para realizar cortes pulidos y transparentes (Fig. 3.2C). Además, se escogió una muestra por cada tipo de roca de caja y dique presentes en el área para efectuar cortes transparentes.
- Descripción de las muestras con cortes pulidos y transparentes utilizando un microscopio binocular de la marca Motic, modelo BA310 (Fig. 3.2A).
- Elección de tres muestras de interés (A2P66.1, A2P107 y P6-3) para realizar microscopía electrónica empleando el método de SEM-EDS, utilizando el microscopio electrónico de la empresa CEMGEO Atacama.
- Creación de un mapa litológico detallado que señale las distintas litologías, cuerpos mineralizados y alteraciones en las diferentes zonas mapeadas.

Asimismo, se generaron cuatro mapas geoquímicos específicos para los elementos de interés (Co, V, Ni, Ti) mediante el Software QGIS 3.24.3.

- Elaboración de gráficos de caja y bigote (Boxplot) y gráficos binarios a partir de los datos geoquímicos para analizar la cantidad y la correlación entre los elementos de interés.

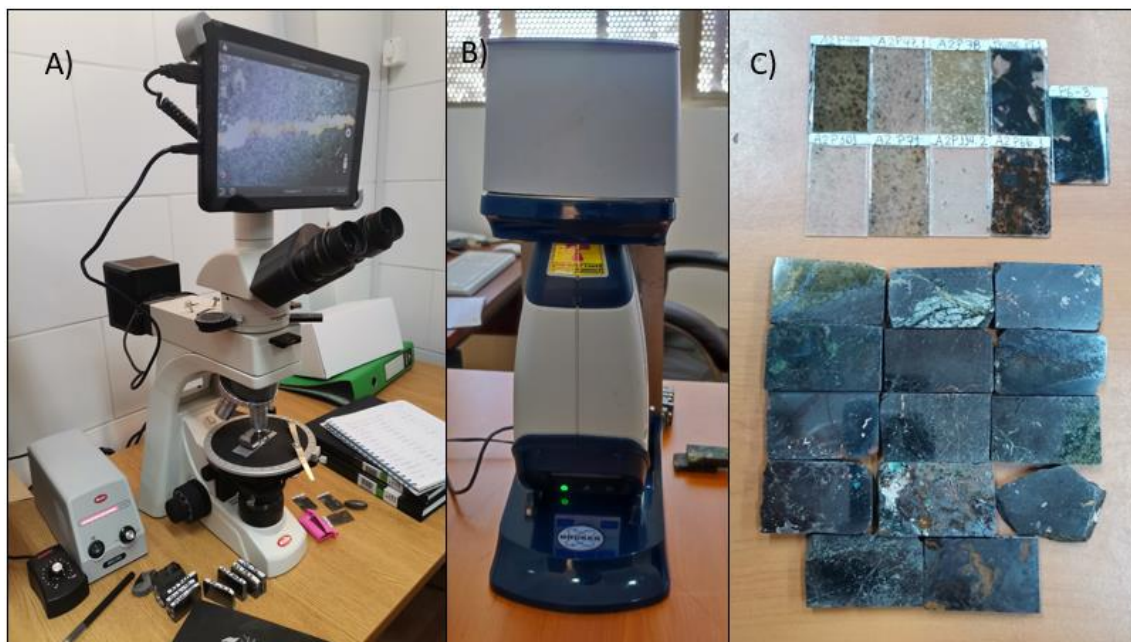


Fig. 3.2: Fotografías del microscopio para la descripción de cortes transparentes y pulidos. A) Microscopio binocular Motic marca BA310. B) analizador de XRF modelo S1-Titan 600 marca BRUKER C) Cortes pulidos y transparentes. (Elaboración propia).

Capítulo 4: Resultados

4.1 Litología

4.1.1 Diorita

En el sector central del área de estudio aflora una unidad de dioritas con textura holocristalina, fanerítica, con cristales subhedrales-anhedrales de plagioclasa (45%), cristales anhedrales de cuarzo (5%) y minerales máficos (50%) en su mayoría hornblenda y biotita. El tamaño de grano de esta unidad varía de E-W, aumentando de manera sutil hacia el W. Esta unidad presenta alteración a epidota, afectando a las plagioclasas selectivamente de manera leve a moderada, además se ve afectada por la alteración a clorita de manera moderada, afectando principalmente a los minerales máficos (hornblenda) (Fig. 4.1A).

Esta unidad puede ser relacionada con la Diorita La Brea (Arévalos, 2005) descrita en la carta de Copiapó.

En la figura 4.1B y 4.1C se puede apreciar la plagioclasa presentando una argilización leve, además de estar alterada por sericita y arcillas de forma leve, además se aprecia esfeno/titanita como mineral accesorio.

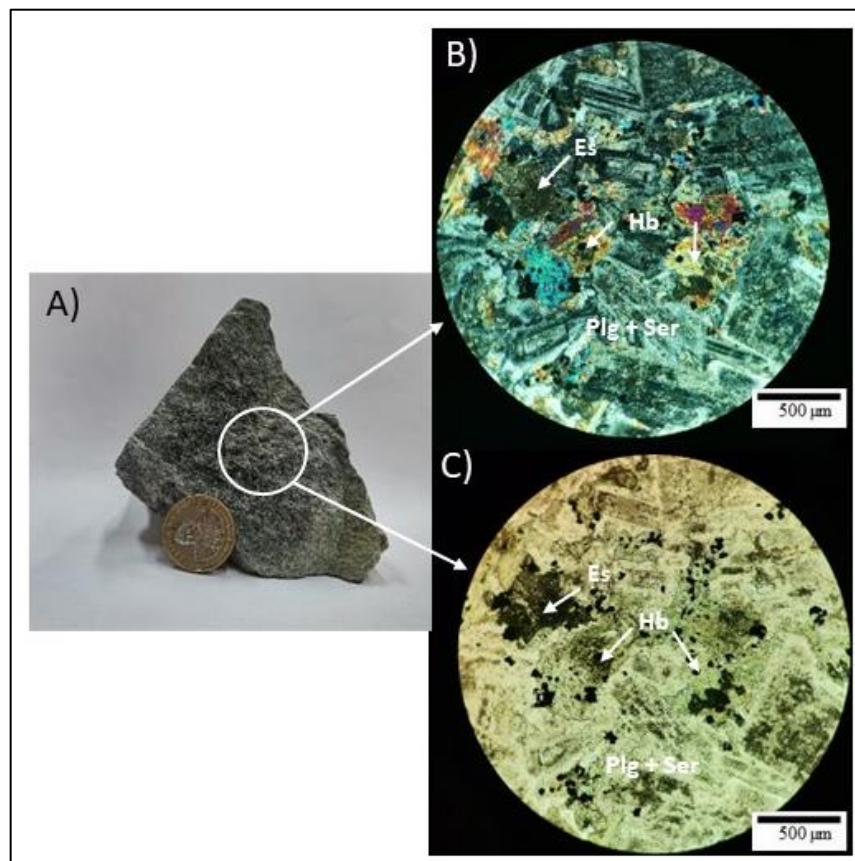


Fig. 4.1: Fotografías de muestra de mano y secciones transparentes respectivamente. A) Roca de caja, descrita como diorita., B) Corte transparente con un aumento de 500µm en nicóles cruzados. C) Corte transparente con un aumento de 500µm en LPP. Plg + Ser: plagioclasa con sericita. Hb: hornblenda. Es: esfeno.

4.1.2 Tonalita

En el sector norte hacia el oeste del área de estudio aflora una unidad de tonalitas con textura holocristalina, mesocrática, fanerítica de grano medio a grueso, con cristales subhedrales a anhedrales de cuarzo (45%), cristales subhedrales de plagioclasa (40%) y minerales máficos (15%) en su mayoría hornblenda y biotita. En esta unidad se aprecia

un cambio de granulometría de los cristales, aumentando hacia el norte. Esta unidad presenta un tipo de alteración a epidota-clorita de manera leve a moderada, afectando principalmente a los minerales máficos (Fig. 4.2A).

En la figura 4.2B y 4.2C se evidencia que la plagioclasa experimentó una alteración leve a moderada a sericita y arcillas. Además, se observan cristales anhedrales de esfeno.

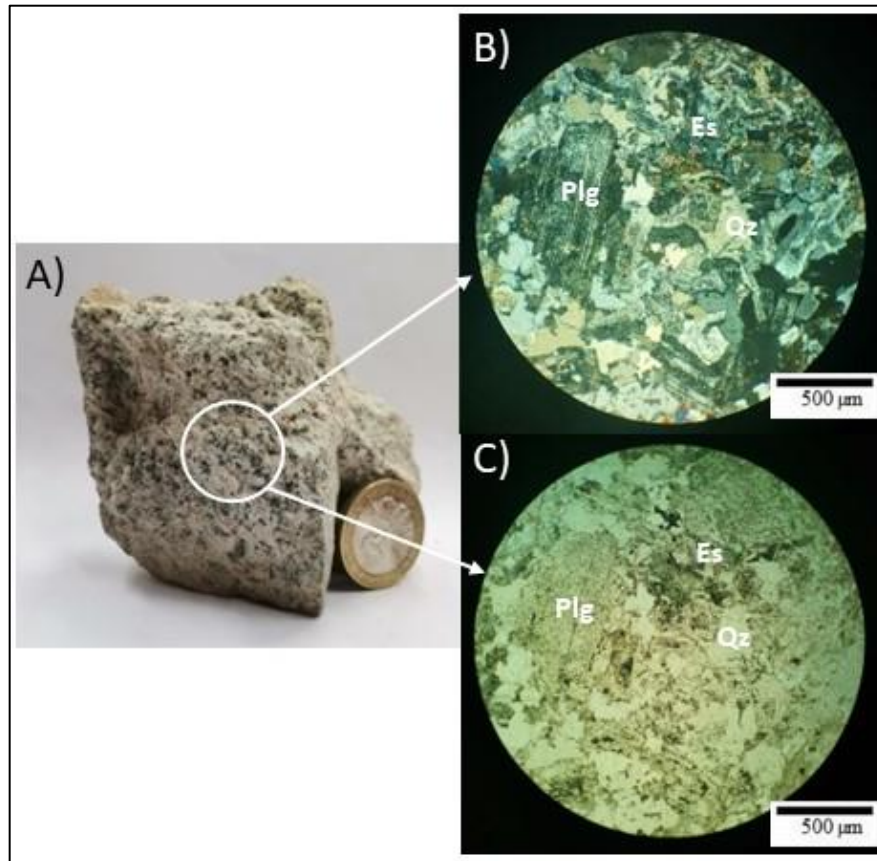


Fig. 4.2: Fotografías de muestra de mano y secciones transparentes respectivamente. A) Roca de caja, descrita como tonalita. B) Corte transparente con un aumento de 500µm en nicóles cruzados. C) Corte transparente con un aumento de 500µm en LPP. Plg: plagioclasa. Qz: cuarzo. Es: esfeno.

4.1.3 Diques

Existe una gran cantidad de diques que intruyen a las unidades diorítica y tonalítica.

Los diques pueden ser clasificados en 3 tipos: micro gabro, microdiorita porfídica y microdiorita. A continuación, se realiza una descripción de cada uno de ellos:

4.1.3.1 Dique de microgabro

Este dique es melanocrático se encuentra emplazado en la unidad de tonalitas, en la parte norte del área de estudio. Es una roca hipabisal de grano fino, con una textura fanerítica y holocristalina. Su composición mineralógica corresponde a plagioclasa (40%) y anfíbol (60%), en su mayoría hornblenda, distribuida en forma de cúmulos con una cristalización euhedral (Fig 4.3).

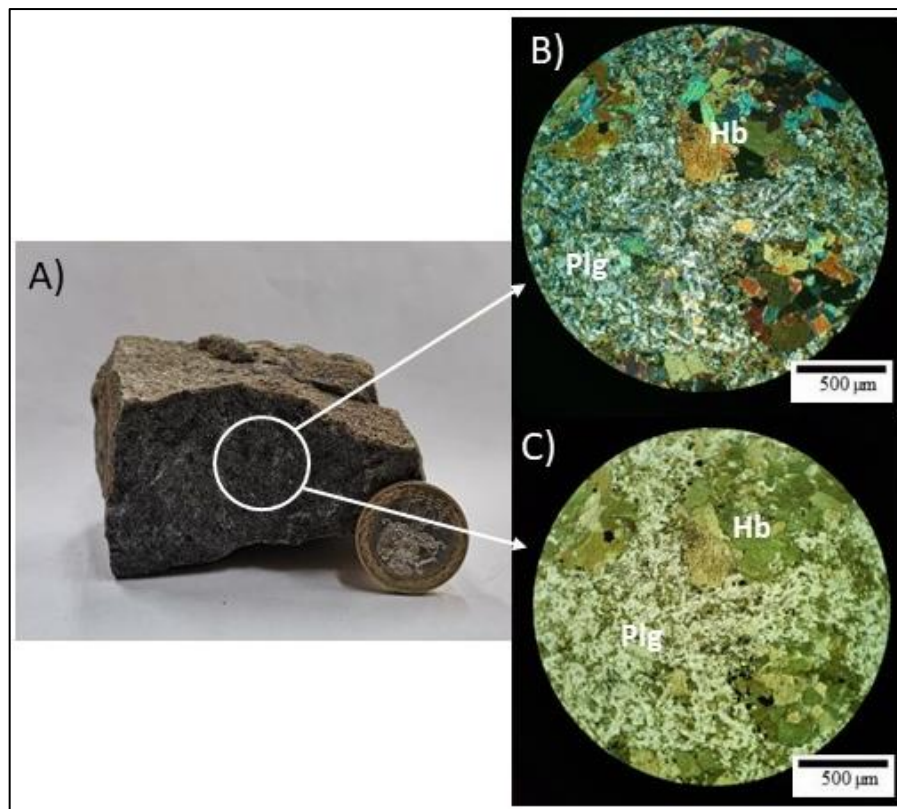


Fig. 4.3: Fotografías de muestra de mano y secciones transparentes. A) Dique de micro gabro. B) Corte transparente con un aumento de 500μm en nicoles cruzados. C) Corte transparente con un aumento de 500μm en LPP. Plg: plagioclasa. Hb: hornblenda.

4.1.3.2 Dique de microdiorita porfídica

Los diques de microdiorita porfídica, poseen fenocristales de grano grueso con textura holocristalina y se encuentran distribuidos por toda el área de estudio. En la masa fundamental se pueden apreciar anfíboles afectados por la alteración de clorita magnésica y epidota. Sus fenocristales de hornblenda son subhedrales (Fig. 4.4).

La composición mineralógica de esta unidad consiste en plagioclasas (60%) de grano fino, biotita (5%) y hornblenda (35%).

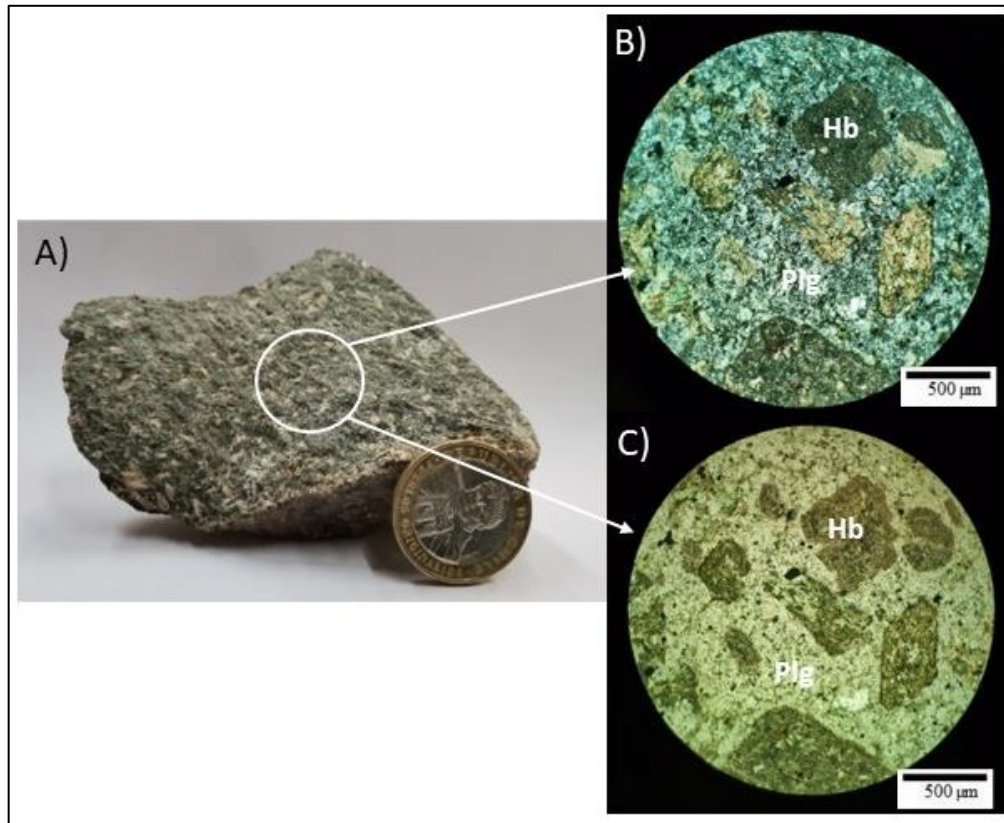


Fig. 4.4: Fotografías de muestra de mano y secciones transparentes. A) Dique de microdiorita porfídica de grano grueso. B) Corte transparente con un aumento de 500µm en nicoles cruzados. C) Corte transparente con un aumento de 500µm en LPP. Plg: plagioclasa. Hb: hornblenda.

4.1.3.3 Dique de microdiorita

Los diques de microdiorita son abundantes en la mayoría de la zona de estudio, emplazándose en la diorita y la tonalita (Fig.4.6).

Esta unidad corresponde a una roca hipabisal, que posee fenocristales de plagioclasa (70%) de textura fanerítica, holocristalina. Estos se encuentran en una masa fundamental compuesta principalmente por feldespatos (10%) y anfíbole (20%). Estos diques se encuentran afectados por alteración a epidota moderada.

En las imágenes 4.5B y 4.5C se aprecia presentan una textura porfídica microscópicamente (micro-porfídica).

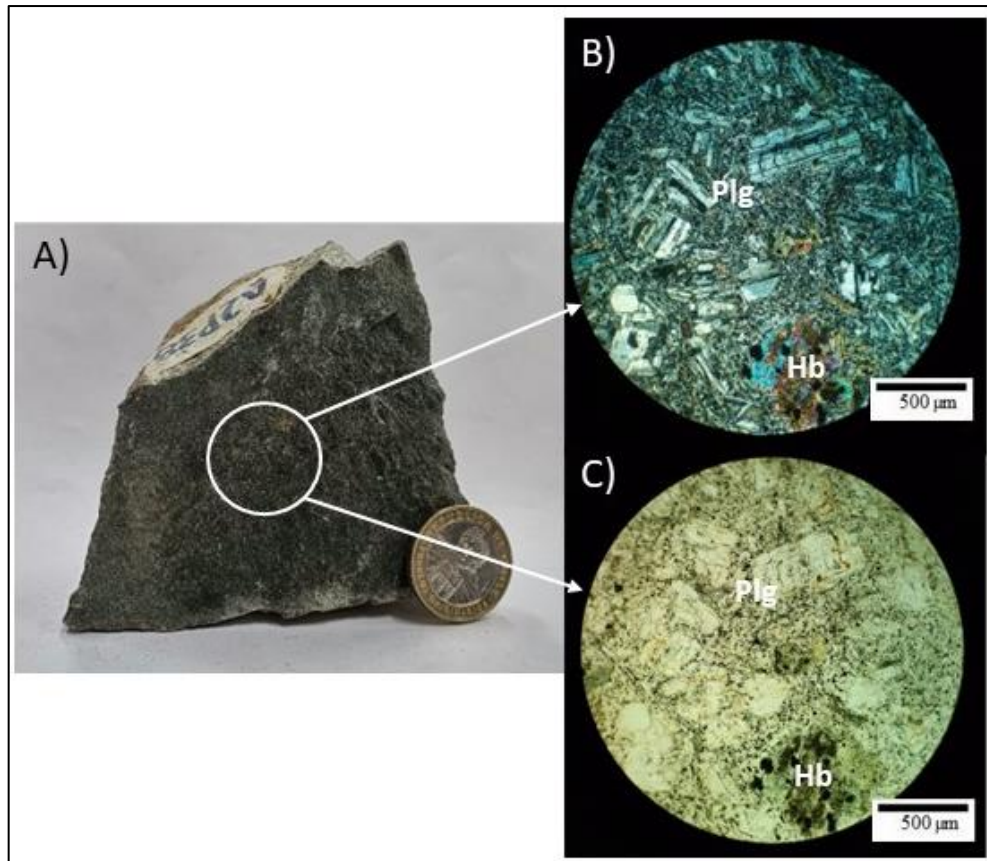


Fig. 4.5: Fotografías de muestra de mano y secciones transparentes. A) Dique de microdiorita. B) Corte transparente con un aumento de 500μm en nicols cruzados. C) Corte transparente con un aumento de 500μm en LPP. Plg: plagioclasa. Hb: hornblenda.

4.2 Alteración

4.2.1 Alteración a epidota

La epidota en esta zona se encuentra fuertemente ligada a la clorita, dándose casi siempre juntas. Con una intensidad moderada a intensa, la ocurrencia de esta alteración es de manera diseminada afectando a los anfíboles de la roca de caja y en forma de halo alrededor de los diques de microdiorita y microdiorita porfídica. Esta alteración también afecta a las vetas de magnetita, presentándose de forma moderada-intensa, muchas veces acompañada de alteración a limonitas y a clorita.

4.2.2 Alteración clorítica

Esta alteración se presenta con una ocurrencia diseminada en la roca de caja, esta se puede identificar por su tono verde oscuro, por lo general afecta, a los diques de

microdiorita y microdiorita porfídica. Se puede observar que la clorita altera selectivamente hornblendas y biotitas en estos diques. También se aprecia que esta alteración afecta tanto a la diorita como la tonalita, variando su intensidad en distintos sectores, pero por lo general se encuentra de forma moderada a intensa.

Esta alteración se encuentra acompañada normalmente por una alteración a epidota moderada.

4.2.3 Alteración argílica

Esta alteración se presenta con una ocurrencia diseminada moderada-intensa, normalmente asociada a zonas de falla inferida. Por lo general, se encuentra en forma de halos alrededor de estructuras vetiformes. En el sector estudiado hay una baja presencia de esta alteración.

4.2.3 Alteración a limonitas

De manera general, la alteración a limonitas está fuertemente ligada a las vetas de magnetita del sector, esta alteración se presenta en forma de halos alrededor de las vetas de magnetita de forma moderada a intensa y en forma de estructuras vetiformes, con porcentajes de jarosita y de hematita+goethita intensa. En el área central de la zona puede encontrarse alterando diques de microdiorita porfídica de manera moderada a intensa. Algunas de estas estructuras presentan Au de forma diseminada con asociación a cuarzo secundario presente a lo largo de la veta. En general las estructuras vetiformes afectadas por limonitas se encuentran en ambas rocas de caja, pero su mayoría se emplaza en la unidad tonalítica, la cual presenta una leve silicificación. Además, generalmente, estas vetas tienen presencia de mineralización de Cu de ocurrencia diseminada, rellenando cavidades o en zonas donde hay contacto entre el dique y la roca de caja.

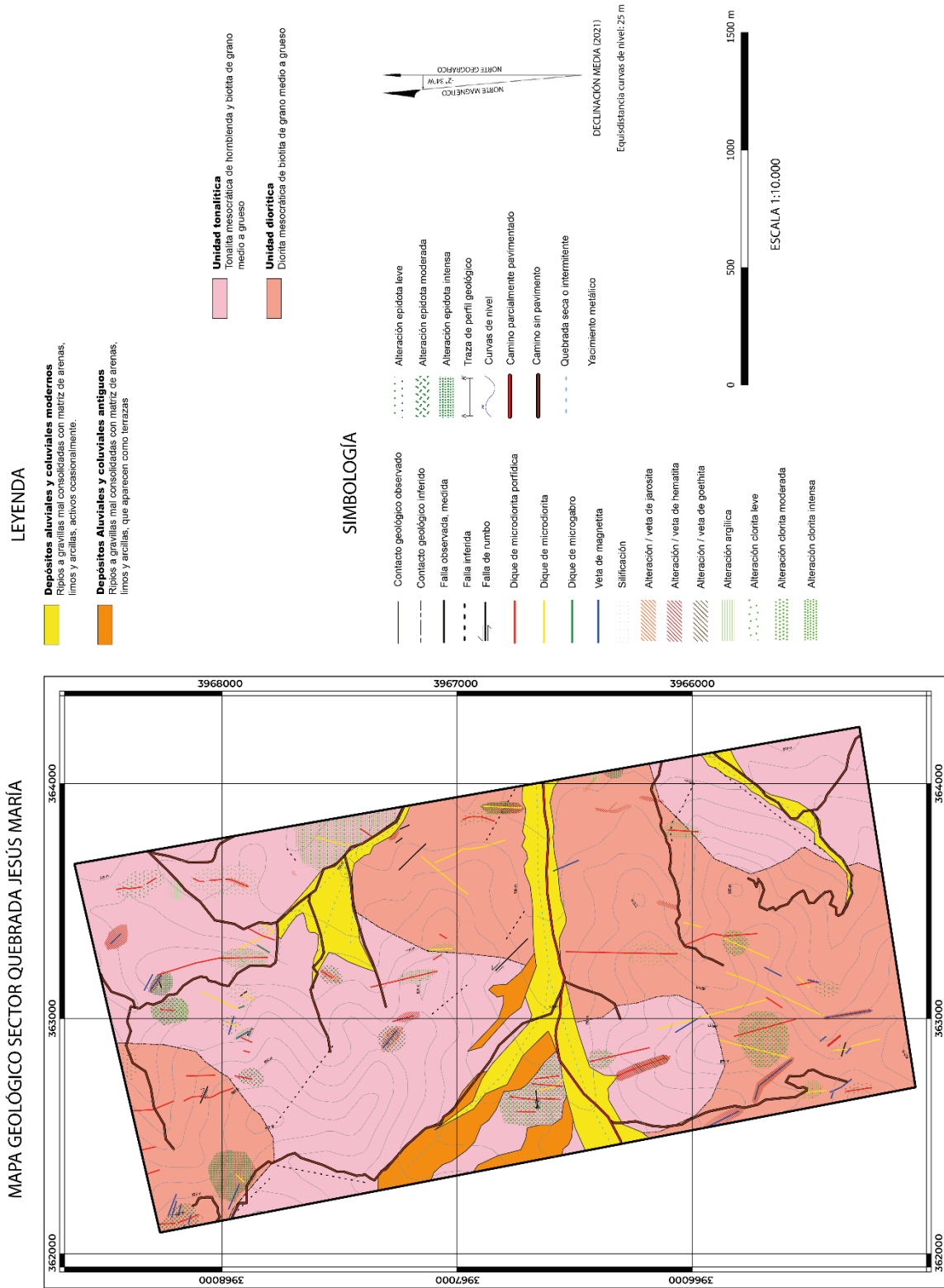


Fig. 4.6: Mapa geológico del sector Quebrada Jesús María. (Elaboración propia).

4.3 Mineralización

4.4.1 Vetas de magnetita

Estas estructuras se presentan en toda el área de estudio. Por lo general tienen una potencia de entre 2 centímetros y 2 metros, se emplazan la diorita y tonalita. La alteración asociada estas vetas es en su mayoría asociada a limonitas (hematita-jarrosita-goetita).

En la parte norte del área de estudio, la alteración predominante es de epidota y clorita intensa en la roca de caja (diorita), formando halos de alteración. En algunos sectores, además se observa granates en los bordes de las vetas. granates asociados al metamorfismo de contacto de estas vetas de magnetita. Además, estas estructuras hospedan actinolita y apatito al norte del área, estos minerales no son encontrados en las vetas de magnetita en la zona centro y sur del sector. Estos minerales encontrados en el sector norte no se encuentran en las vetas de magnetita en el sector centro y sur del área.

Por otro lado, las vetas de magnetita del sector centro-sur del área están en su mayoría presentan alteraciones a limonitas (jarrosita, hematita-goethita) (Fig. 4.7). La alteración más común en estas vetas es la presencia de limonitas (hematita-jarrosita). Muchas de estas vetas presentan también una mineralización de cobre (atacamita, crisocola, pirita y calcopirita) menor al 5%, generalmente en forma de vetillas y en la mayoría de los casos esta mineralización no es explotable.



Fig. 4.7: Ejemplos de magnetitas (4) extraídas del área de estudio. Elaboración propia.

Por otro lado, las muestras que contienen una cantidad más elevada de Cu cuentan con magnetita diseminada con una intensidad moderada y la mineralización de cobre se presenta crisocola (Fig. 4.8). Estas rocas, además, se ven afectadas por una alteración leve a limonitas, encontrándose jarosita y goethita, como también hematita debido a la martitización de la magnetita diseminada. Estas muestras, además, presentan calcopirita en forma de patinas y diseminada.

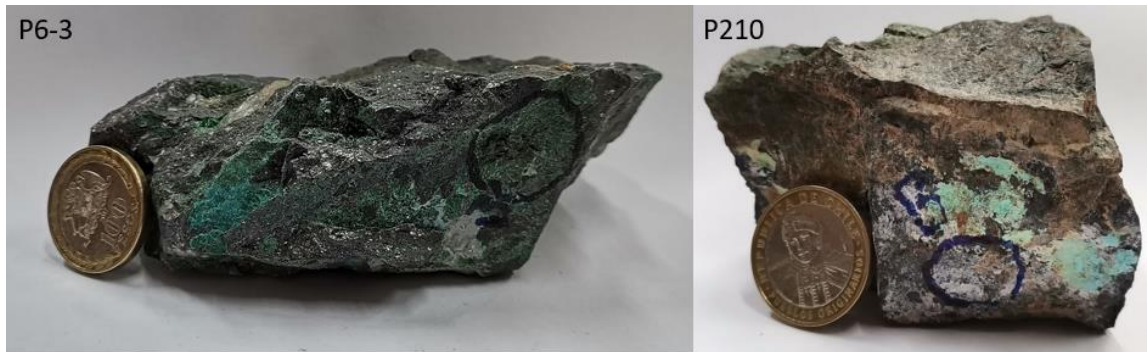


Fig. 4.8: Rocas de caja con mineralización de cobre (la muestra P6-3 presenta crisocola en forma masiva y calcopirita, mientras que la muestra P210 presenta magnetita diseminada y crisocola en forma de pátinas). Elaboración propia.

4.4 Geología Estructural

4.4.1 Vetas de magnetitas

La mayoría de estas vetas se encuentran asociadas a diques de microdiorita y microdiorita porfídica de forma paralela generalmente. Se llevaron a cabo mediciones estructurales las cuales mostraron dos tendencias preferentes (Fig. 4.9) hacia el NE y NW.

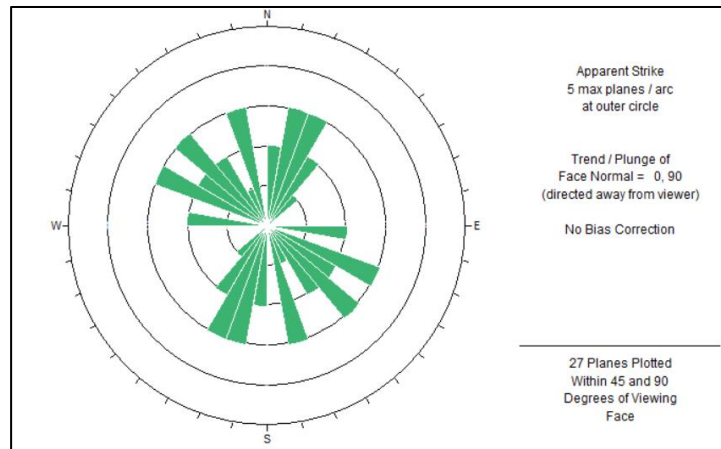


Fig. 4.9: Gráfico de roseta, se muestra la tendencia NE y NW preferente de las vetas de magnetita de la zona.

4.4.2 Fallas

En el área de estudio, únicamente se identificaron dos fallas cortando diques. La primera de ellas se encuentra cortando un dique de microdiorita porfídica, y tiene una actitud de N70W; 78SW como se puede observar en la figura 4.20A. Esta falla de rumbo sinistral se encuentra ubicada en el sector sur de la zona de estudio. La segunda falla se encuentra cortando a un dique de microdiorita con actitud N32W;84SW (Fig. 4.10B). Esta falla, de carácter inverso, se encuentra ubicada en el sector céntrico del área.

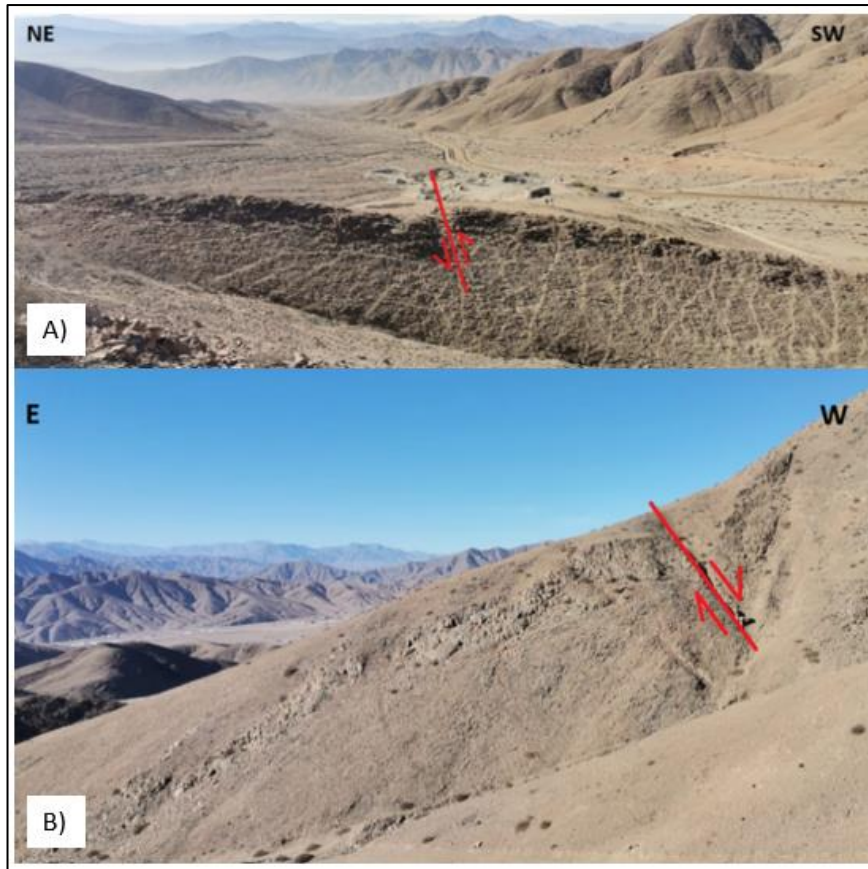


Fig. 4.10: A) Falla cortando dique de microdiorita porfídica. B) Falla cortando dique de microdiorita.

El sector reveló la presencia de estrías en cuatro planos de falla, indicadores cinemáticos que revelan la dirección del movimiento del bloque. La Tabla 4.2 muestra las mediciones de las estrías de falla observadas en el terreno. Mayormente, las estrías tienden a oscilar entre las direcciones NW y NE, y se localizan en proximidad a piques mineros.

PUNTO	TREND	PLUNGE
A2P5	318	40
A2P7	320	70
A2P29	035	79
A2P83	015	80

Tabla 4.1: Dirección en círculo completo de las estrías vistas en terreno.

4.4.3 Diques

Las unidades intrusivas de esta zona se ven cortadas por numerosos de diques, los cuales tienen potencias que van desde 1 metro hasta 3 metros. Estos diques muestran diversas orientaciones y se clasifican en base a su composición mineralógica y sus atributos texturales en: microdiorita, microdiorita porfídica y microgabro. En terreno solo se pudo identificar un dique de microgabro, siendo todos los demás de microdiorita y microdiorita porfídica. Se pueden observar diques de microdiorita siendo cortados por diques de microdiorita porfídica (Fig. 4.11).

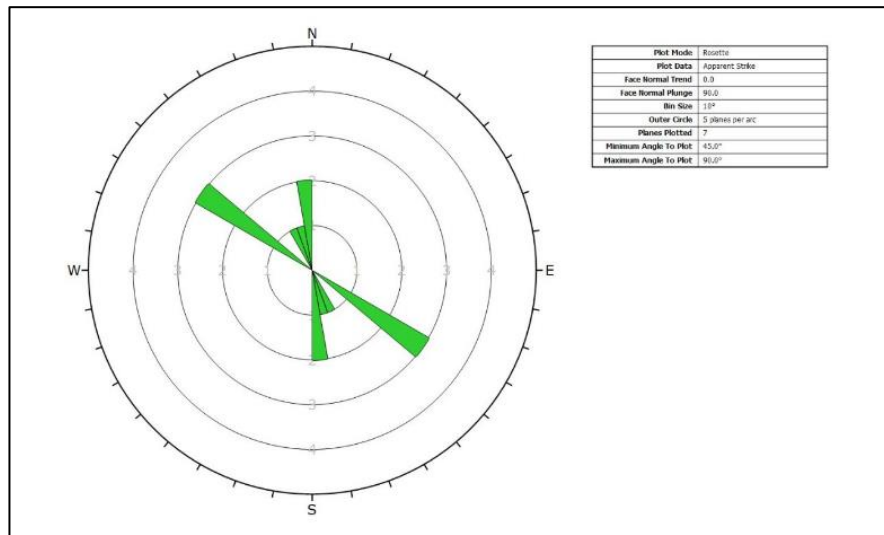


Fig. 4.11: Gráfico de roseta, se muestra la tendencia NW y SE preferente de los diques de la zona.

A partir de los datos estructurales tomados en terreno, se realizó el siguiente diagrama de roseta para los diques medidos (Fig. 4.12). Este grafico representa la orientación preferencial que tienen los diques, en este caso, la mayoría se encuentra entre (340-350) ;(70/80).

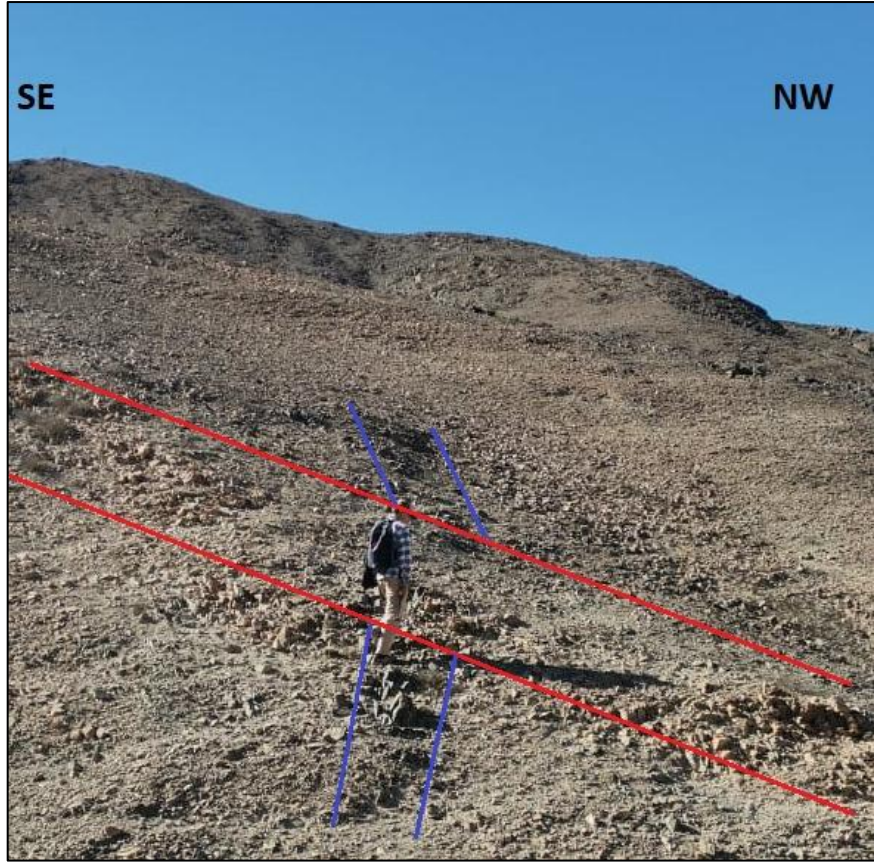


Fig. 4.12: Relación de corte entre dique de microdiorita (azul) y microdiorita porfídica (rojo).

4.5 Geoquímica de los elementos estratégicos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante análisis de fluorescencia de rayos X, a través del método de elementos traza. Se tomaron un total de 52 mediciones de las vetas de magnetita, las cuales entregaron la información que se observa en la figura 15, donde se analizan las concentraciones de los elementos de interés (Co, V, Ni, Ti) medidas en el área de Quebrada Jesús María. En este estudio se utilizan diagramas de cajas y bigotes, las concentraciones se encuentran en % peso y solo consideran las mediciones mayores a cero de los elementos.

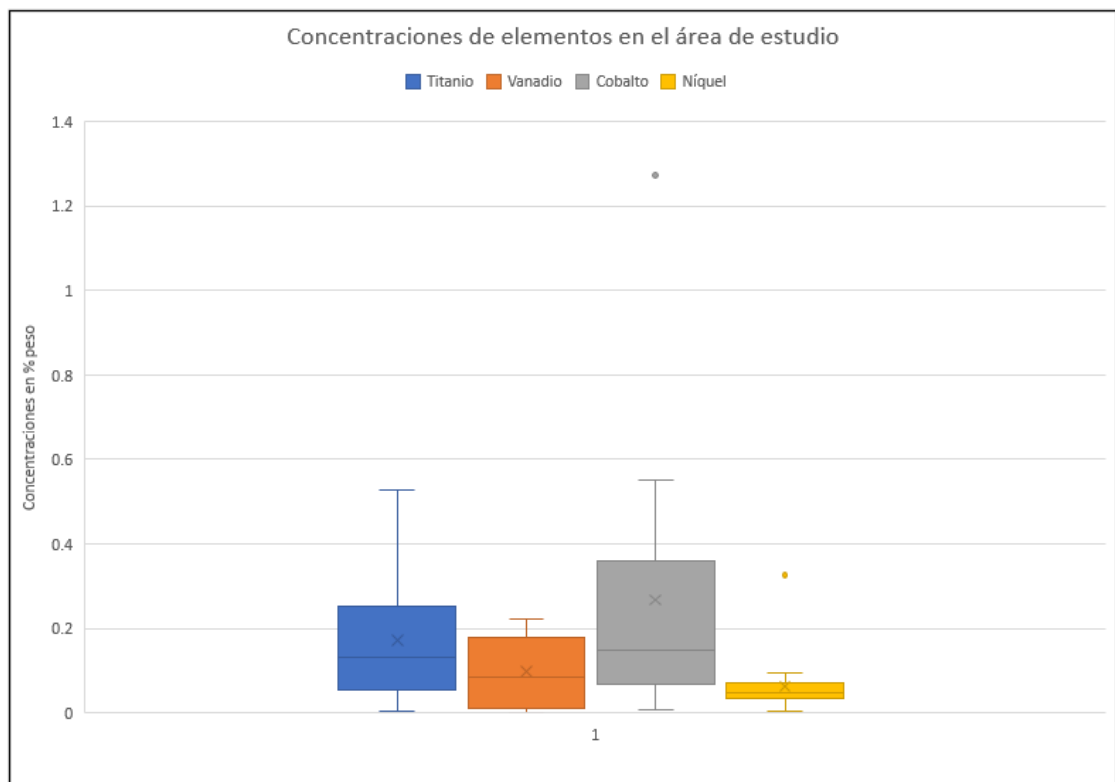


Fig. 4.13: Gráficos de caja y bigote donde se pueden observar las concentraciones en % peso de los elementos de interés en la zona de estudio. (Elaboración propia).

Se destaca la concentración de cobalto en la zona, con una mediana de 0.147%, un promedio aritmético de 0.267% y un extremo superior e inferior de 0.361% y 0.068% respectivamente. Por otro lado, el titanio presenta una mediana de 0.133%, un promedio de 0.172%, un extremo superior de 0.527% y un extremo inferior de 0.003%. Las concentraciones extremas superior e inferior del vanadio son 0.222% y 0.001% respectivamente, su promedio es de 0.099% y su mediana de 0.085%. Por último, el

níquel se puede observar con una mediana de 0.046% y un promedio de 0.062%, mientras que su máxima es de 0.096% y su mínima es de 0.005%.

	Ti %	V %	Co %	Ni %
	peso	peso	peso	peso
Mediana	0.133	0.085	0.147	0.046
Promedio	0.172	0.099	0.267	0.062
Extremo superior	0.527	0.222	0.361	0.096
Cuartil superior	0.253	0.177	0.361	0.07
Cuartil inferior	0.055	0.0105	0.068	0.034
Extremo inferior	0.003	0.001	0.068	0.005

Tabla 4.2: Tabla donde se ven los valores exactos de todas las partes del gráfico de caja y bigote.

Las figuras 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17 presentan los mapas geoquímicos del sector donde se recolectaron muestras y se realizaron las mediciones a través del método de XRF. Estos mapas muestran la distribución de los elementos con valores superiores a 0.1% de los distintos elementos de interés (Co, Ni, V, Ti). Los códigos que aparecen en los mapas son la muestra sacada del sector con un % peso mayor o igual a 0.1%.

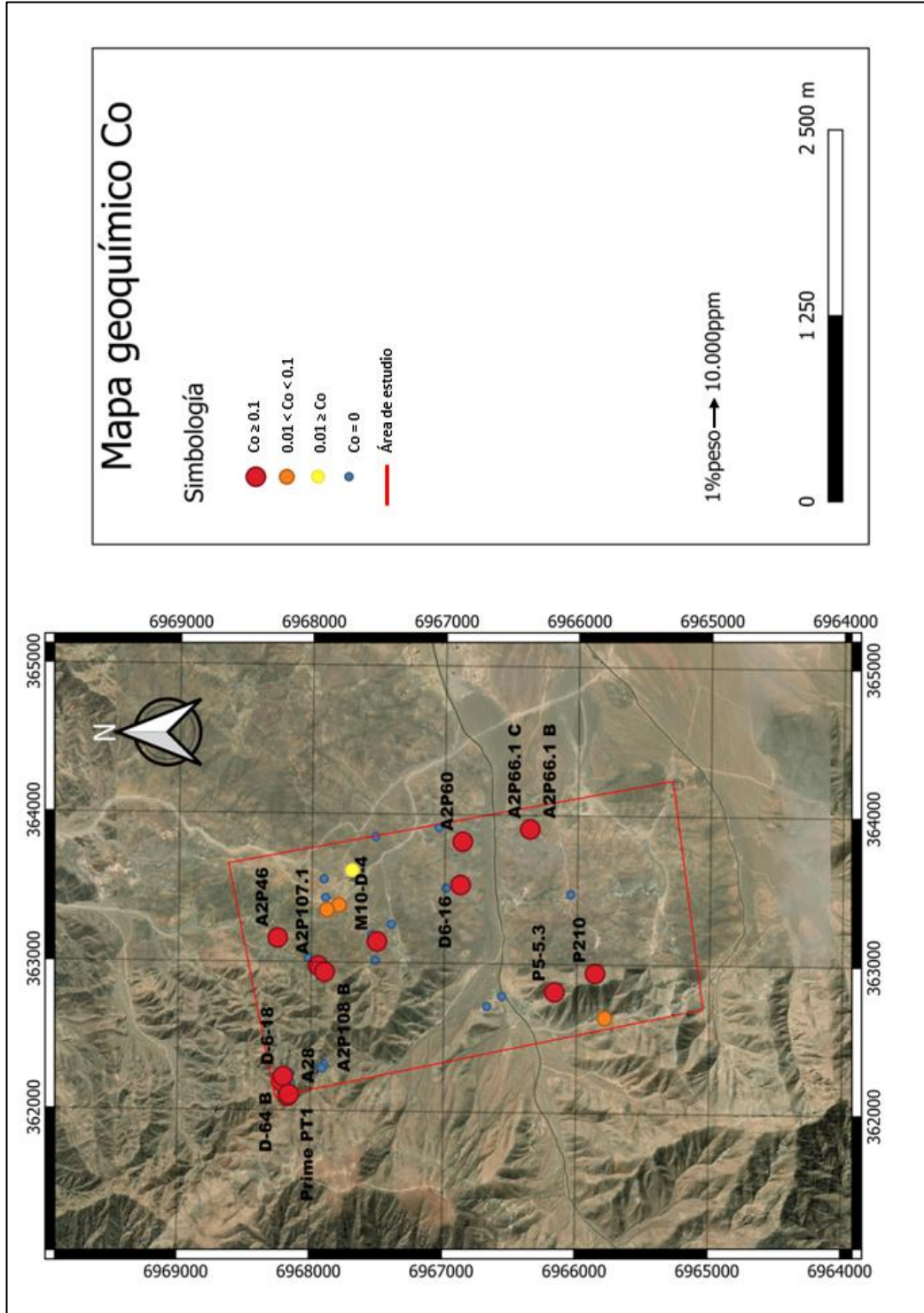


Fig. 4.14: Mapa geoquímico del área de estudio, donde se muestran los puntos de muestreo y la cantidad de concentración de cobalto en % peso. (Elaboración propia).

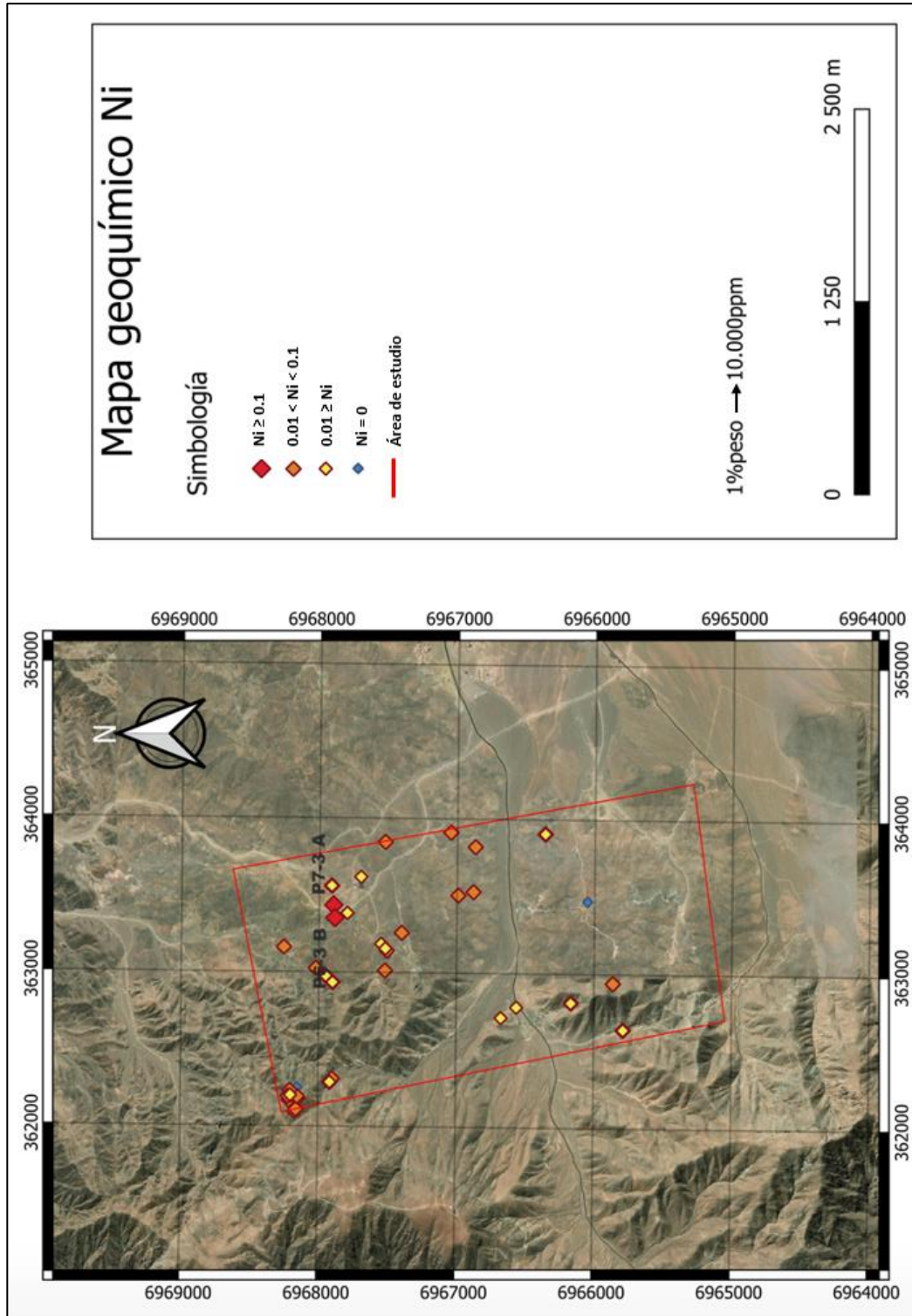


Fig. 4.15: Mapa geoquímico del área de estudio, donde se muestran los puntos de muestreo y la cantidad de concentración de níquel en % peso. (Elaboración propia).

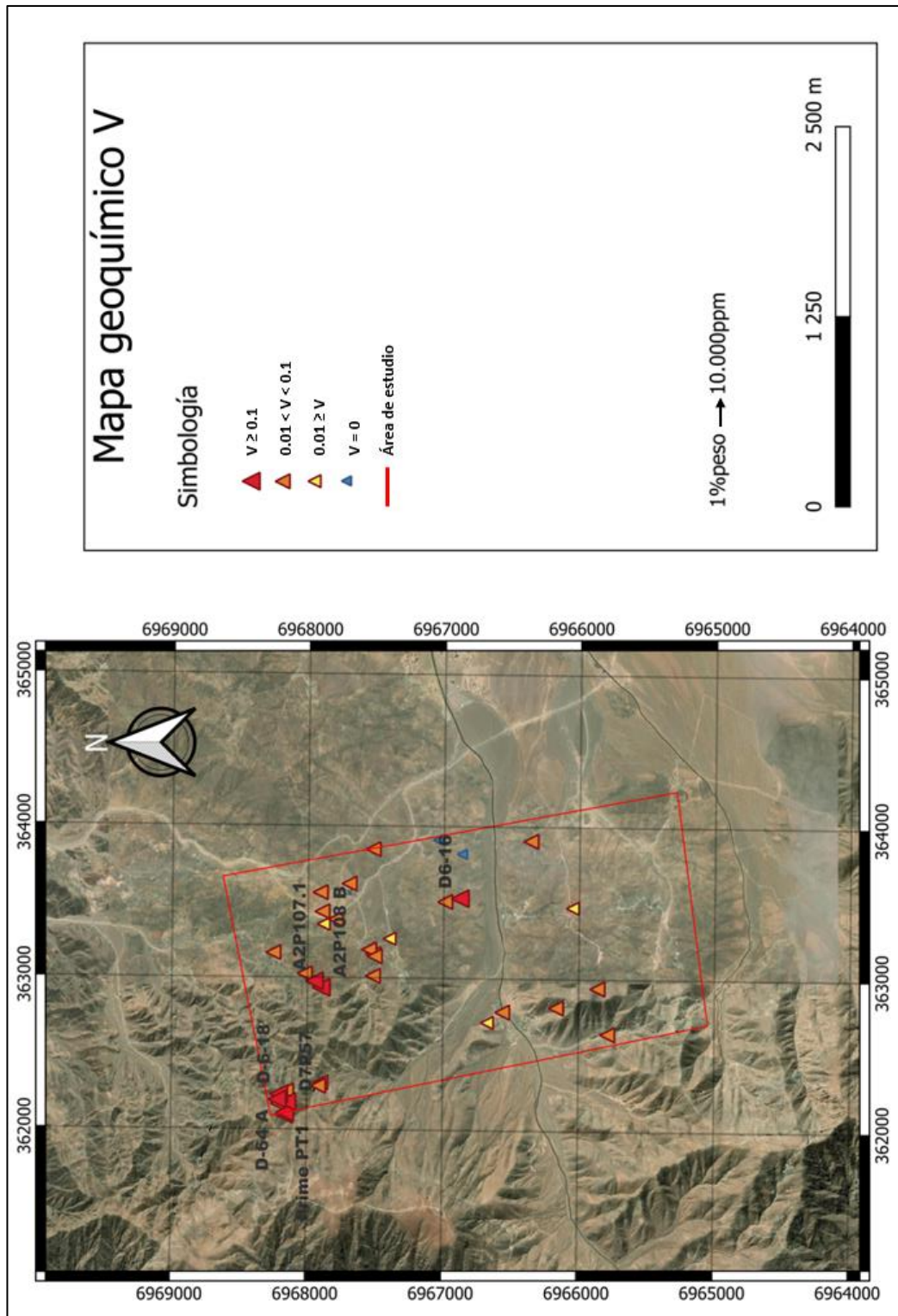


Fig. 4.16: Mapa geoquímico del área de estudio, donde se muestran los puntos de muestreo y la cantidad de concentración de vanadio en % peso. (Elaboración propia).

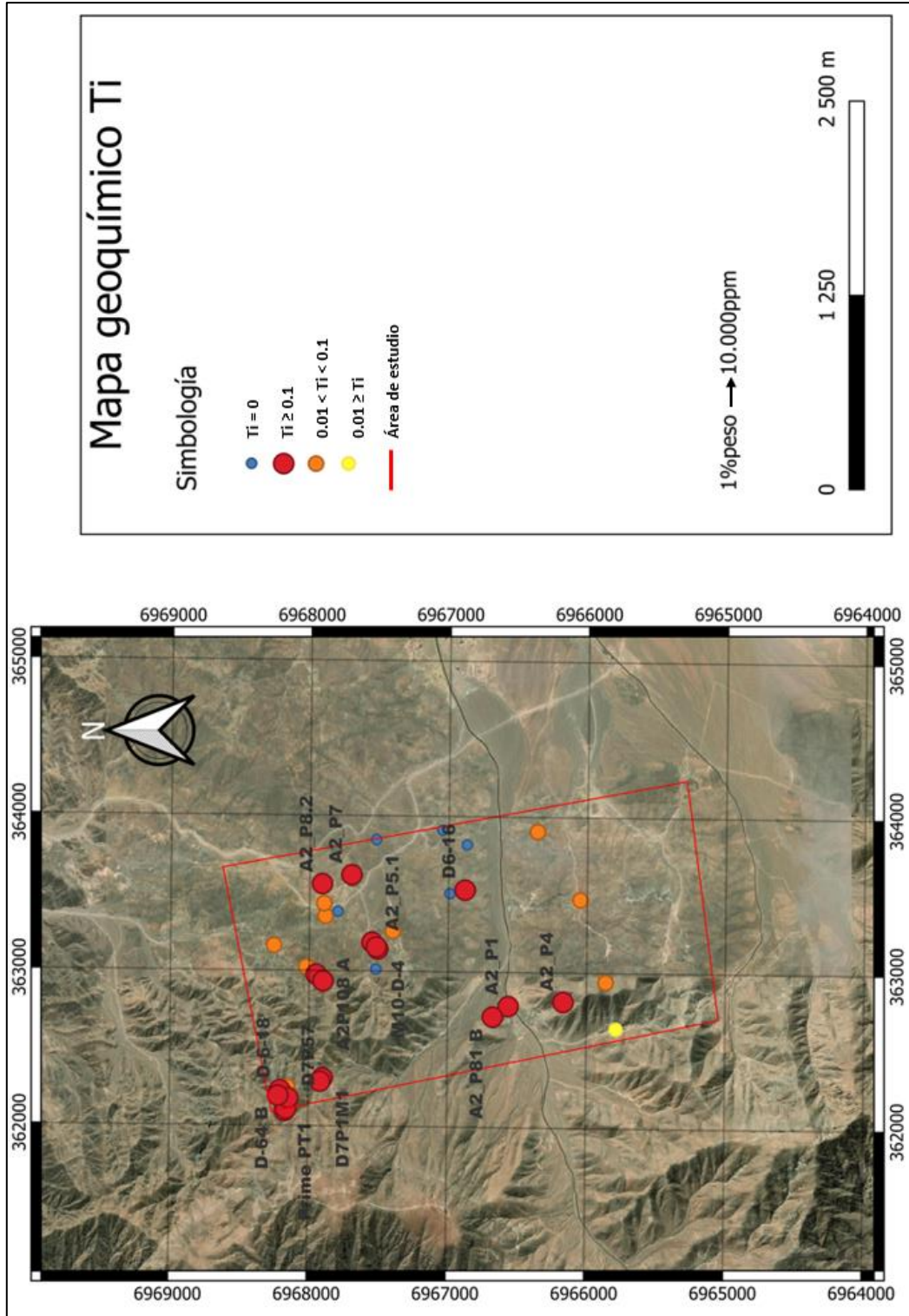


Fig. 4.17: Mapa geoquímico del área de estudio, donde se muestran los puntos de muestreo y la cantidad de concentración de vanadio en % peso. (Elaboración propia).

4.5.1 Correlación de elementos

A continuación, se presentan los gráficos binarios de los resultados de la geoquímica de elementos traza de la zona. Todos los resultados están con concentraciones en % peso.

La figura 4.18 muestra la correlación que existe entre el Fe y los elementos de interés que tienen el estudio (Co, V, Ni, Ti).

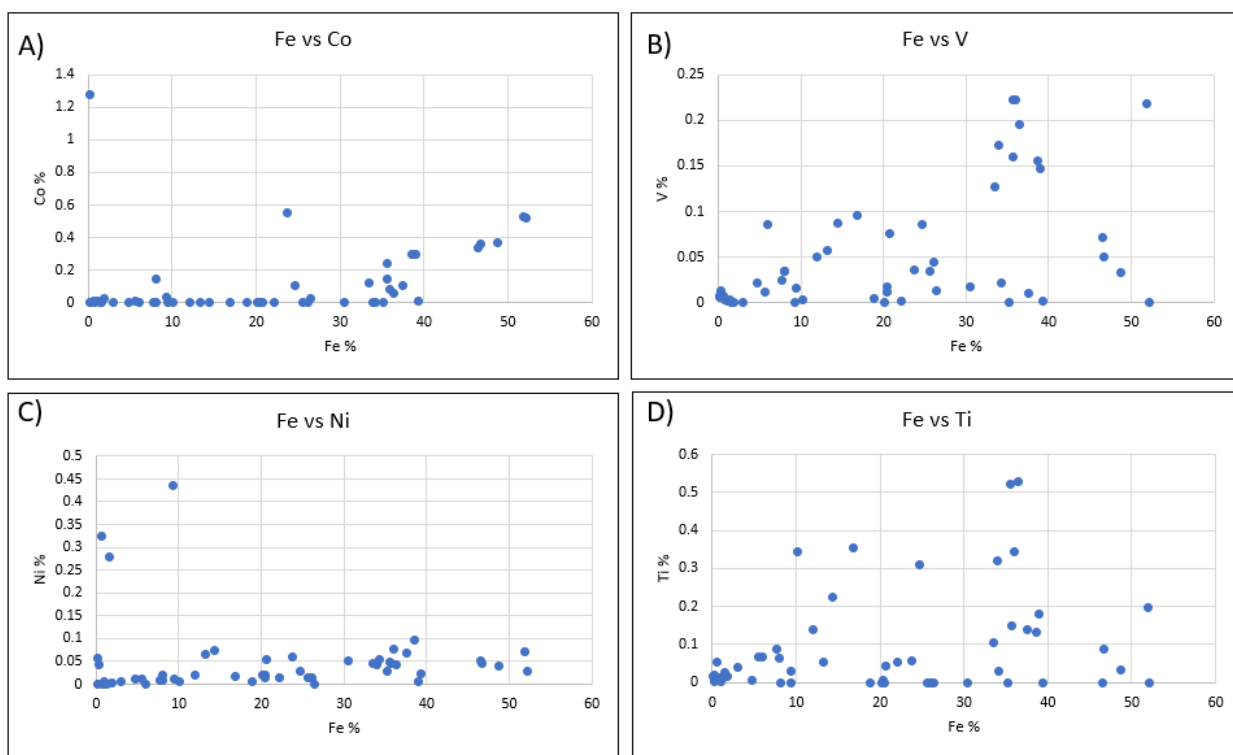


Fig. 4.18: Gráficos binarios donde se puede observar la correlación entre el hierro (Fe) y los elementos de interés (Co, V, Ni, Ti) medidos en % peso. (Elaboración propia).

Se puede observar que el gráfico de Fe vs Co tiene una correlación positiva de 30% hierro, mientras que los gráficos de Fe vs V y Fe vs Ti tienen una alta dispersión de los datos con una tendencia positiva dándose a entender que tienen una afinidad a estar juntos estos elementos. El gráfico de Fe vs Ni presenta una fuerte dispersión de datos sin una correlación entre ellos.

La figura 4.19 muestra la correlación que existe entre el cobre (Cu) y los elementos de interés que tienen el estudio (Co, V, Ni, Ti).

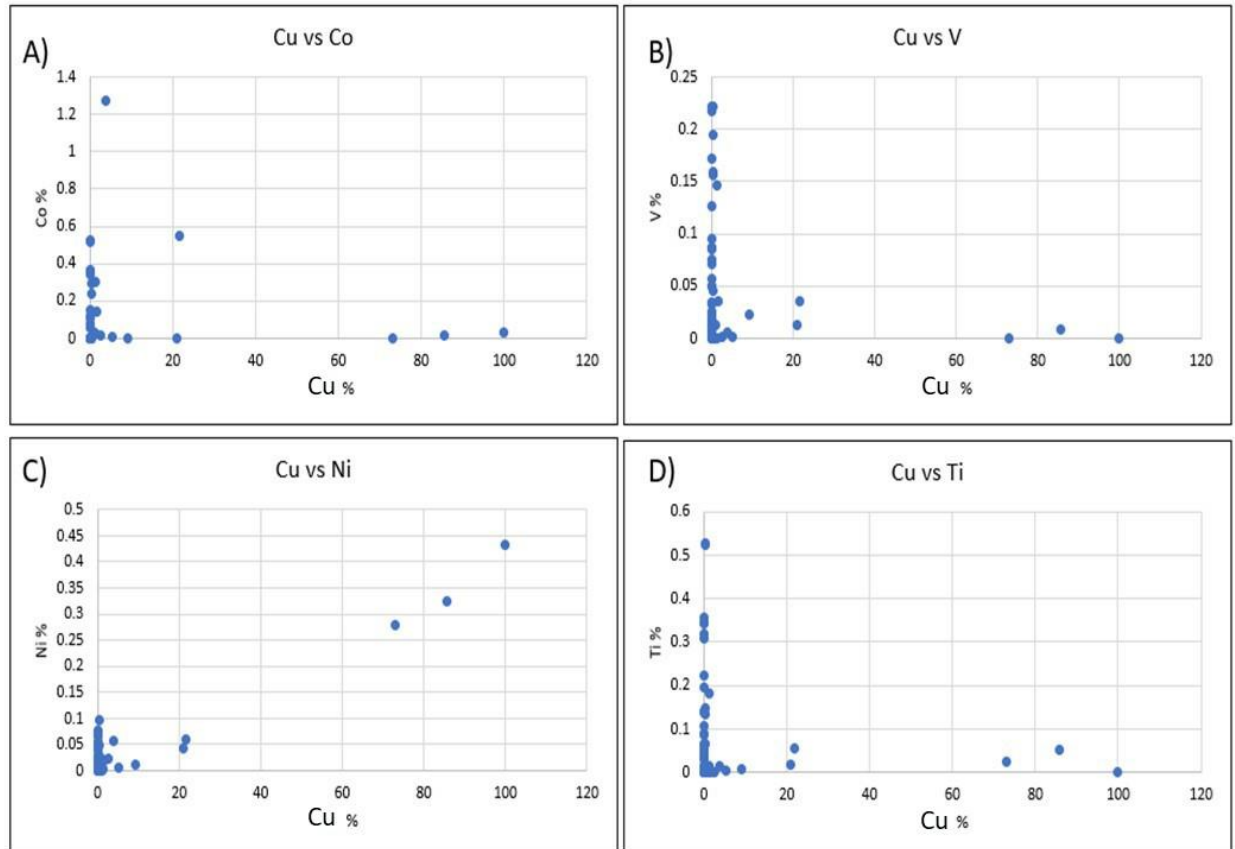


Fig. 4.19: Gráficos binarios donde se puede observar la correlación entre el cobre (Cu) y los elementos de interés (Co, V, Ni, Ti) medidos en % peso. (Elaboración propia).

No se puede observar una correlación ni positiva ni negativa en los gráficos de Cu vs Co, Cu vs V y Cu vs Ti, además, la mayoría de los datos se agrupan por debajo del 10% peso de cobre. Se puede observar, también, tres mediciones de datos anómalos. El gráfico de Cu vs Ni indica una correlación positiva de 3 mediciones.

La figura 4.20 muestra la correlación que existe entre el MgO y los elementos de interés que tienen el estudio (Co, V, Ni, Ti).

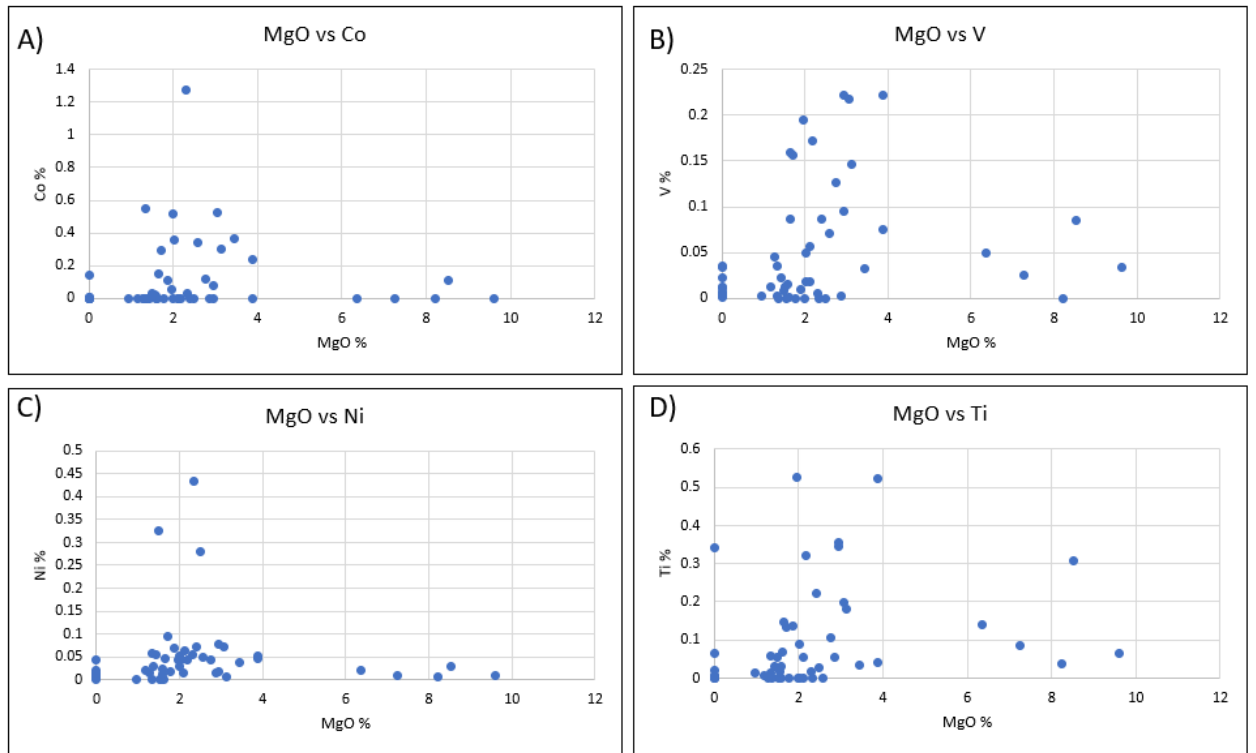


Fig. 4.20: Gráficos binarios donde se puede observar la correlación entre el MgO y los elementos de interés (Co, V, Ni, Ti) medidos en % peso. (Elaboración propia).

Los gráficos MgO vs Co, MgO vs V, MgO vs Ni y MgO vs Ti presentan una alta dispersión de datos. Los gráficos de MgO vs Co y MgO vs Ni no tienen una tendencia observable ni positiva o negativa. Por otro lado, los gráficos MgO vs V y MgO vs Ti a pesar de tener una alta dispersión de datos, se puede observar una leve tendencia positiva en estos, aun así, no llega a ser una clara correlación.

La figura 4.21 muestra la correlación que existe entre el Al_2O_3 y los elementos de interés que tienen el estudio (Co, V, Ni, Ti).

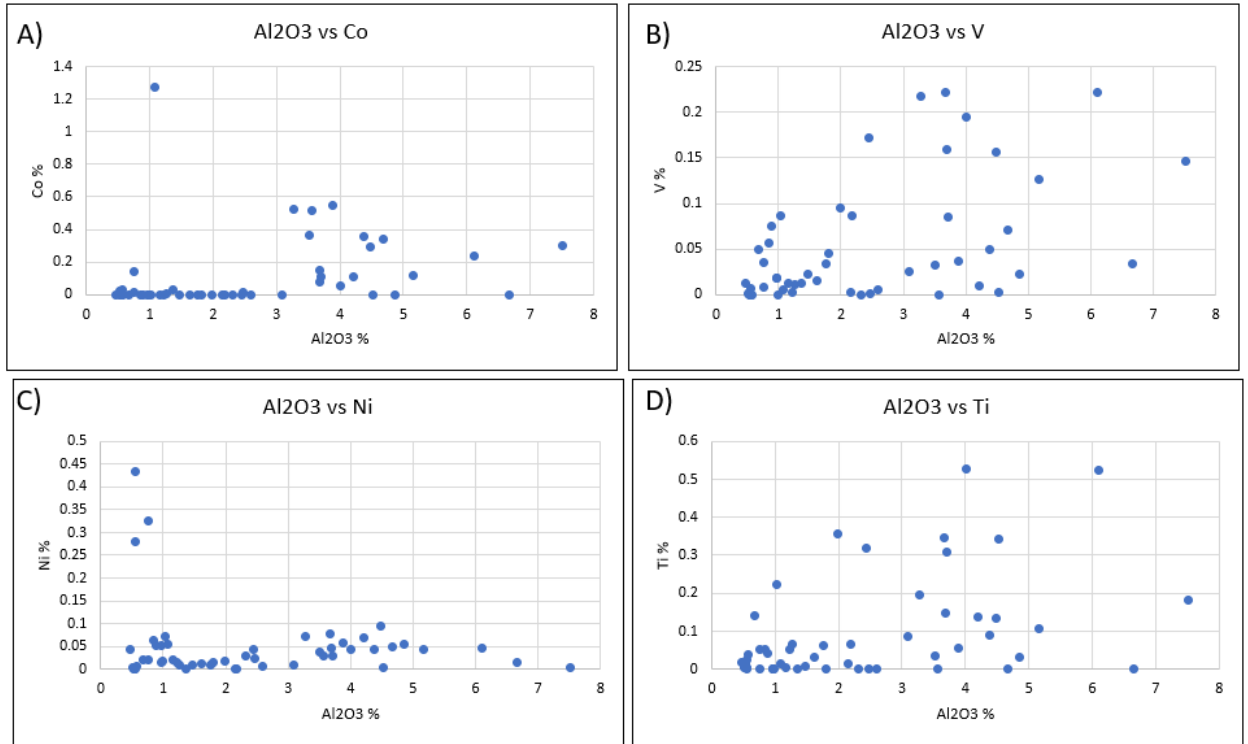


Fig. 4.21: Gráficos binarios donde se puede observar la correlación entre el MgO y los elementos de interés (Co, V, Ni, Ti) medidos en % peso. (Elaboración propia).

En los gráficos Al₂O₃ vs Co y Al₂O₃ vs Ni se puede observar una dispersión con casi nula correlación entre los elementos. Por otro lado, los gráficos Al₂O₃ vs V y Al₂O₃ vs Ti también tienen una dispersión en los datos, pero con una leve correlación positiva entre ellos.

La figura 4.22 muestra la correlación que existe entre el SiO₂ y los elementos de interés que tienen el estudio (Co, V, Ni, Ti).

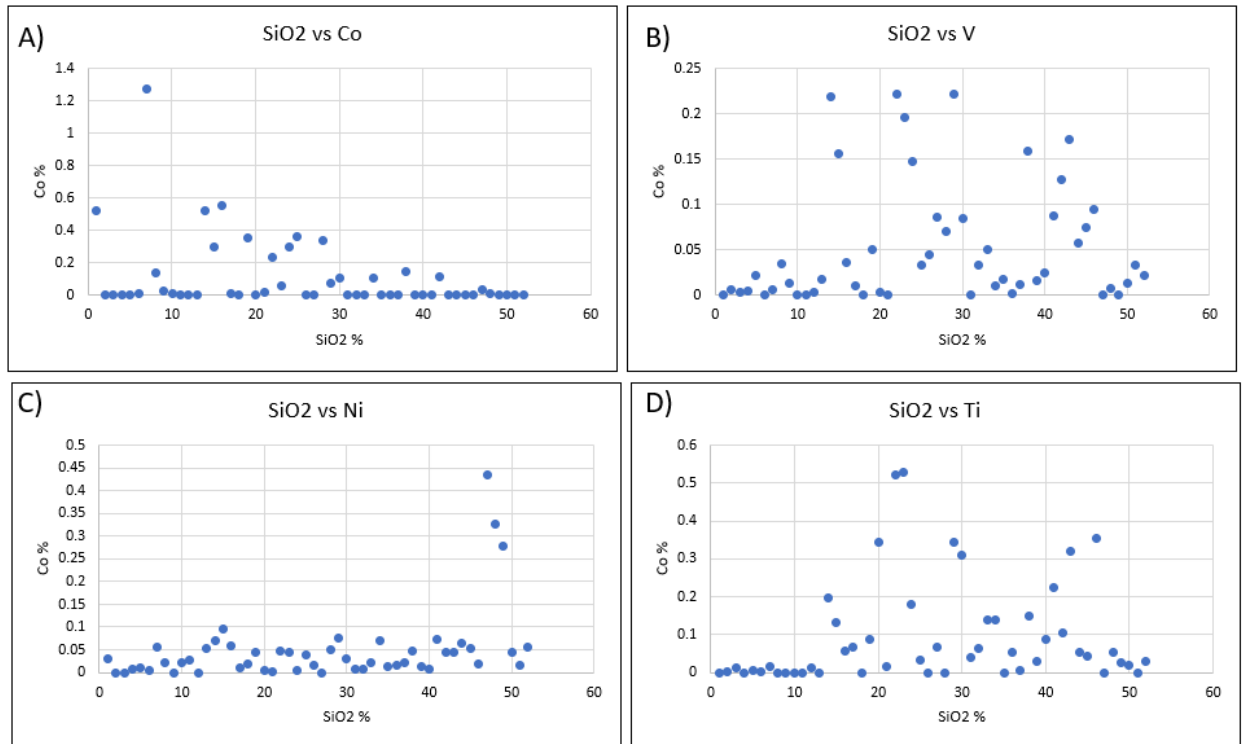


Fig. 4.22: Gráficos binarios donde se puede observar la correlación entre el SiO₂ y los elementos de interés (Co, V, Ni, Ti) medidos en % peso. (Elaboración propia).

El gráfico SiO₂ vs Co presenta una correlación negativa entre el SiO₂ y el cobalto, aun así, la mayoría de los datos no tienen correlación entre ellos. El gráfico SiO₂ vs V, SiO₂ vs Ni y SiO₂ vs Ti tienen una nula correlación entre los elementos de interés.

4.6 Análisis químico-mineralógicos de alta resolución mediante SEM-EDS

Se analizaron 3 muestras (A2P66.1, A2P107 y P6-3, Tabla 1.2) con el método de microscopia electrónica SEM-EDS con el fin de poder describir de una manera más eficiente los elementos en estas muestras de interés. A continuación, se procede a la descripción de estas:

4.6.1 Muestra A2P66.1

Esta muestra pertenece al sector sur del área de estudio, fue recolectada de la mina (pique) “La Rinconsita” (coordenadas UTM N6.966.361; E363.907), donde en su mayoría se extrae oro y cobre.

Macroscópicamente, la muestra corresponde a una magnetita masiva con un 8.092% de Fe según los análisis de XRF. En la Fig. 4.23 se puede observar la foto de la roca de que

se analizó, la imagen en SEM-EDS y los resultados en porcentaje de los elementos que se encontraron.

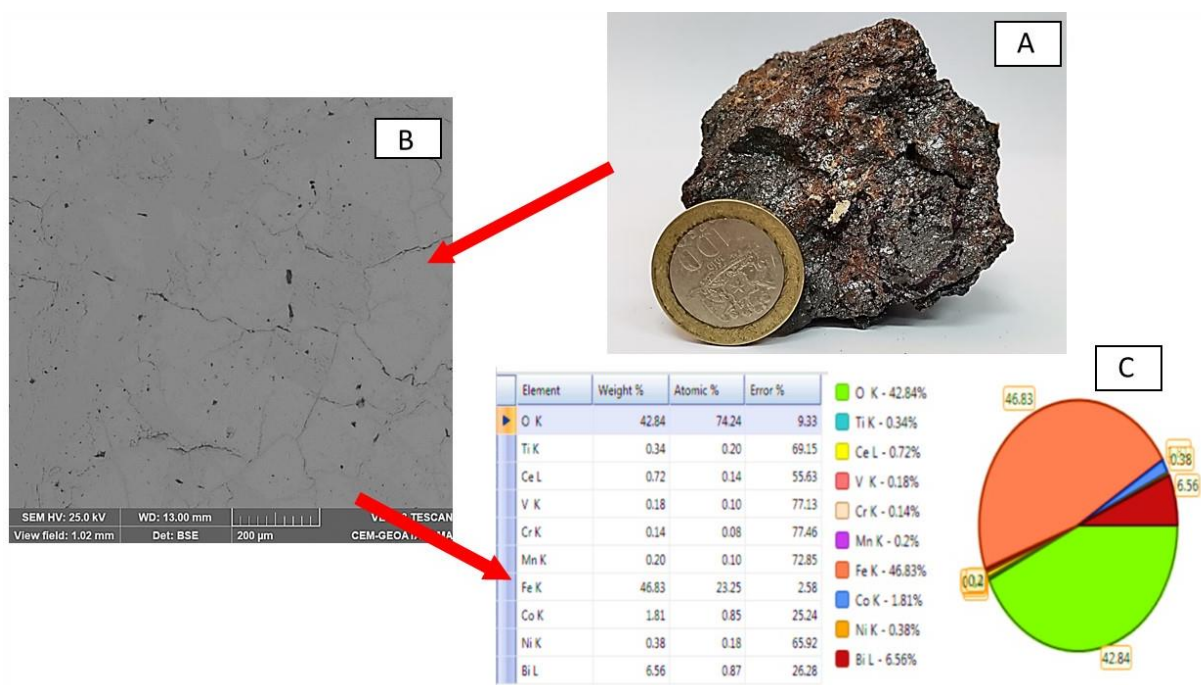


Fig. 4.23: A) Muestra tomada de veta de magnetita sector sur. B) Imagen de la microscopia electrónica en 200µm. C) Resultados en porcentaje de la cantidad de elementos encontrados en esta muestra.

En la Fig.4.23 C se pueden observar que la muestra contiene grandes cantidades de Fe (46.83%), como es de esperarse de una magnetita masiva. Se destacan los porcentajes de Co (1.81%), Mn (0.2%), Ti (0.34%) y Ni (0.38%). Además, llama la atención el porcentaje de Bi (6.56%), el cual sobre pasa todos los mencionados con anterioridad a excepción del Fe. Por último, se identifica Cr en cantidades bajas (0.14%).

Se elaboró un mapa mineral (Fig. 4.24) donde se detalla la distribución de diferentes elementos de la muestra en cuestión. Como se puede observar el Fe, de color rojizo, es el elemento más predominante en esta muestra, como se confirma con los otros análisis realizados a esta roca de magnetita masiva. También se puede observar unos pequeños puntos de color azul indicativos de la presencia de Co en la muestra, así también puntos

de color amarillo, que indica presencia de Ce. Estos elementos, junto con el V en color rosado y el Mn en color morado, se encuentran rodeados de hierro masivo.

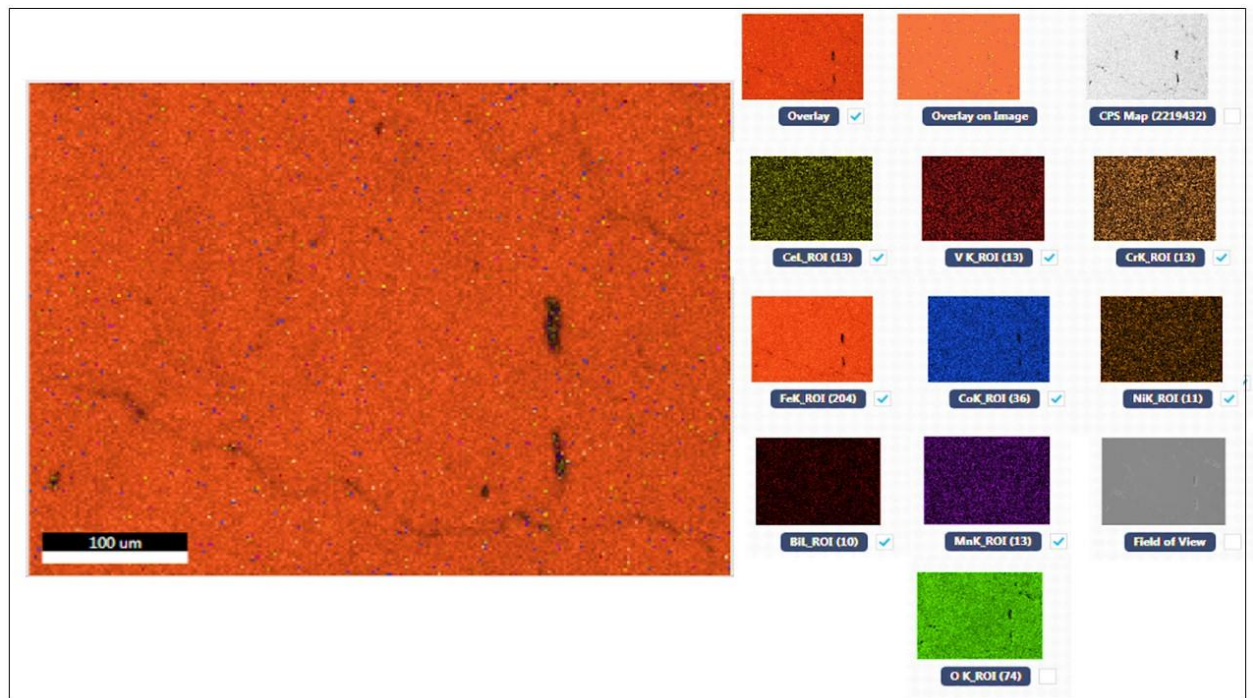


Fig. 4.24: Mapa de elementos específicos, mostrando su distribución en el mapeo de SEM-EDS. 100µm.

4.6.2 Muestra A2P107

El muestreo de esta roca se realizó en el sector norte del área de estudio (coordenadas UTM N6.967.950; E362.975) de una veta de magnetita masiva con cristales intercrecidos de apatito. Un dique corta esta veta con una orientación de N20E;82SE. Esta muestra contiene porcentajes altos de Co (0.237%) y V (0.222%) según su geoquímica. En la Fig. 4.25 se puede observar, la roca de caja, junto con los resultados de en análisis SEM-EDS de la zona “A” de la muestra. Mientras que en la Fig. 4.26 se pueden ver los resultados de la zona “B”, junto con la distribución de los elementos encontrados.

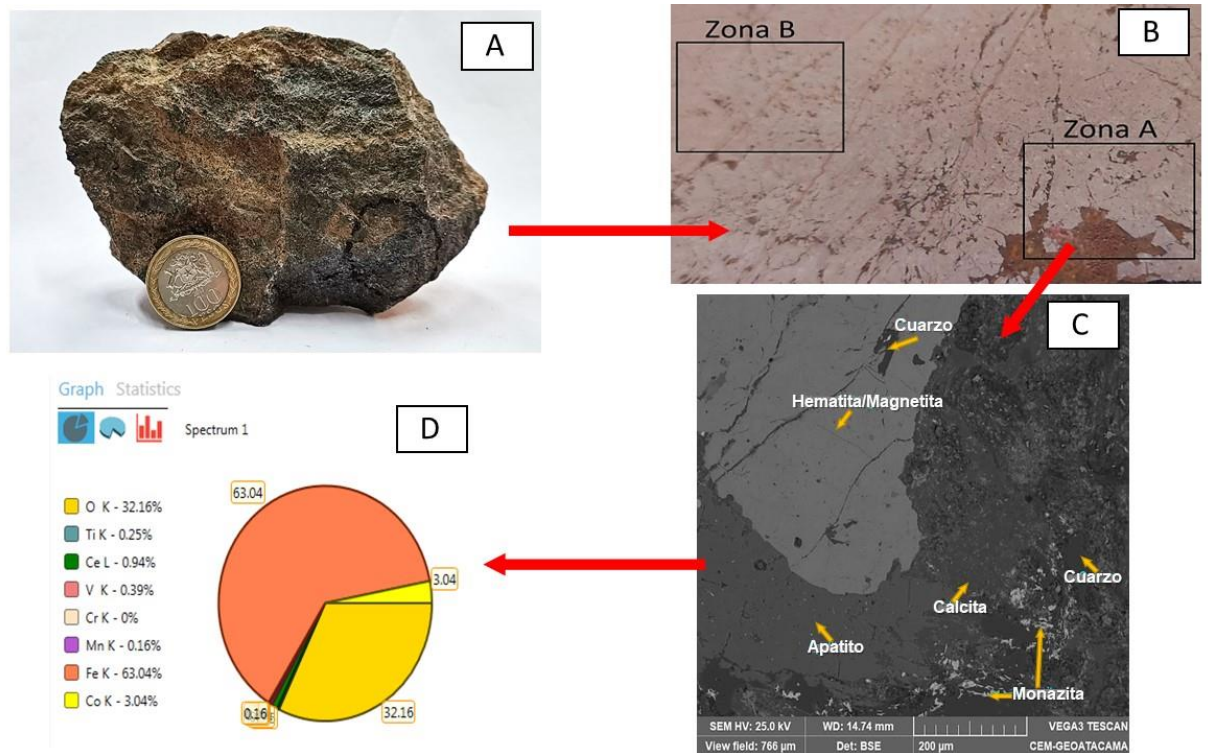


Fig.4.25: A) Muestra tomada de veta de magnetita sector norte (coordenadas N6.967.950; E362.975). B) Corte pulido donde se acotaron las zonas “A” y “B” que fueron analizadas. C) Imagen de la microscopia electrónica en 200µm. D) Resultados en porcentaje de la cantidad de elementos encontrados en esta muestra.

En la Fig. 4.25 D) se pueden observar elementos de interés como Co (3.04%), V (0.39%), Ti (0.25%) y Mn (0.16%). Esta roca posee, además, un porcentaje de casi 1% de Ce-L (0.94%), lo que se puede interpretar como monacita que se observa en los bordes y en fracturas entre la magnetita y el apatito (Fig. 4.25C).

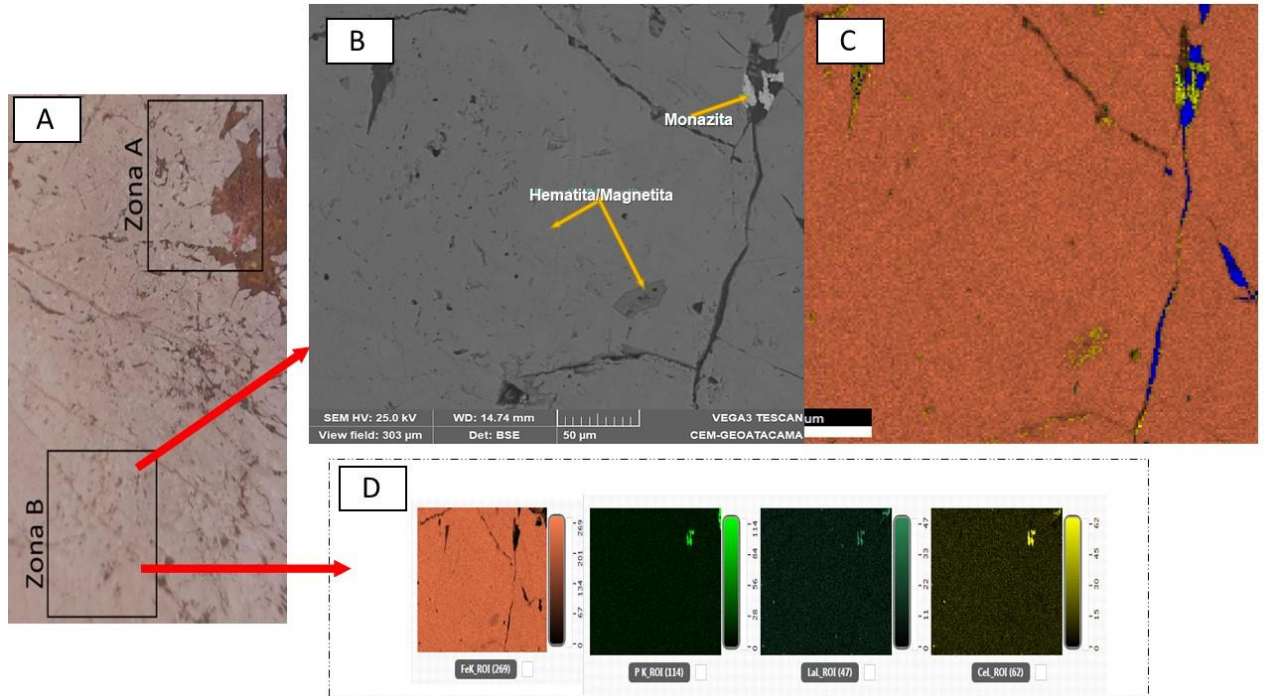


Fig.4.26: A) Corte pulido donde se acotaron las zonas “A” y “B” que fueron analizadas. B) Imagen de la microscopia electrónica en 50 µm. C) Resultados de la distribución de los elementos en el mapeo de SEM-EDS. D) Distribución específica de los elementos importantes.

En la Fig. 4.26 C) se pueden observar las distribuciones de los elementos en la zona “B” del corte pulido. Se identifican P, La y Ce, elementos principales en la composición de la monacita, mineral de mena principal de REE. Se pueden observar en la figura C) que la concentración de monacita se presenta en las fracturas de magnetita (color amarillo).

4.6.3 Muestra P6-3

Muestra recolectada del sector al NE del área (coordenadas UTM N6.967.886; E363.351), sobre la ruta C-402. Esta es una muestra de la roca de caja (diorita) la cual tiene una mineralización de crisocola y calcopirita (Fig. 4.27 A). Al hacerle un análisis en el microscopio de luz reflejada se puede observar un enriquecimiento supérgeno demostrado en las calcopiritas que están siendo reemplazadas por calcosina (Anexo 4).

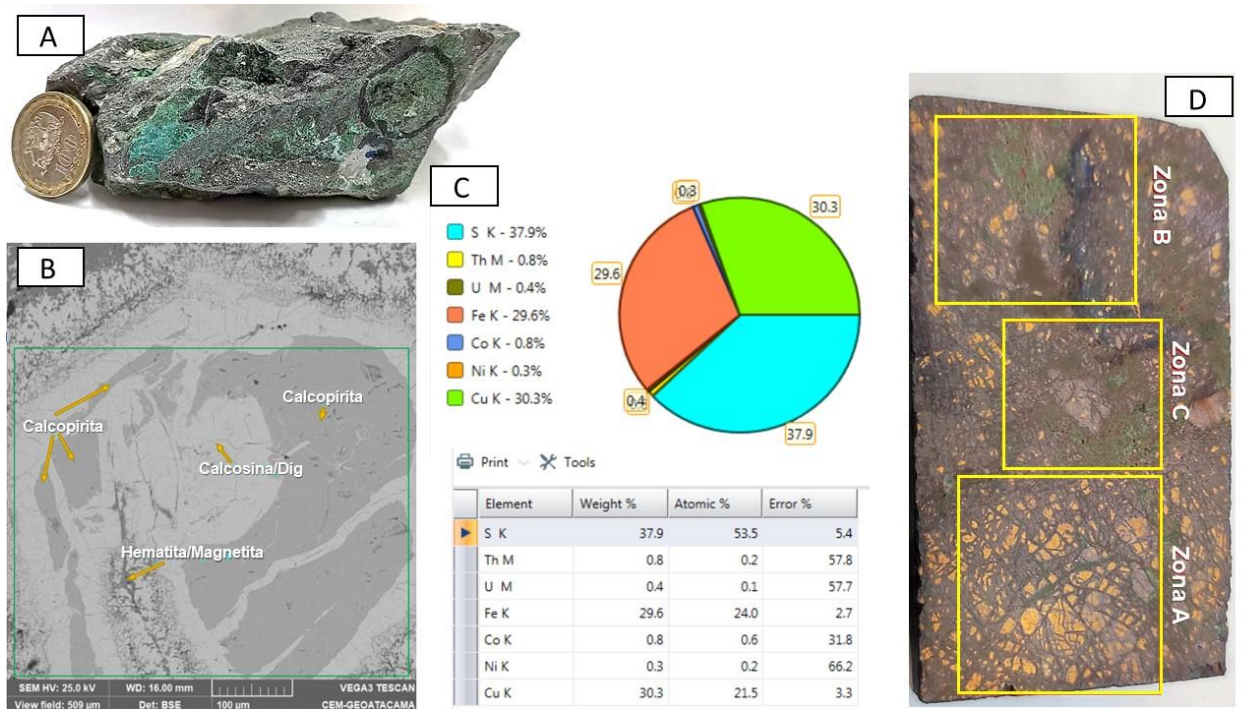


Fig. 4.27: A) Muestra de mano de mineralización de cobre en roca de caja. B) Imagen microscopia electrónica 100 μm sobre zona A. C) Resultados en porcentaje de la cantidad de elementos encontrados en la muestra. D) Corte pulido con las zonas que fueron analizadas.

En la Fig. 4.27 B se pueden observar minerales del grupo de los sulfuros como lo son la calcopirita (CuFeS_2), calcosina (Cu_2S) y digenita (Cu_9S_5). Por otro lado, en la Fig. 4.27 C la cantidad de porcentaje de Th y U presentes en la muestra es de 0.8% y 0.4%, respectivamente, debido a que estos elementos no son encontrados en ninguna otra muestra de la zona de estudio, se analizaron diferentes sectores de la muestra para mejores resultados.

En la Fig. 4.28 se puede ver la distribución de los elementos de este sector: se puede ver (en amarillo) que el Th y U se encuentran diseminados por toda la zona analizada. También, en menor proporción y sobre la calcopirita se encuentra Co (0.8%), que se puede observar de un color azul.

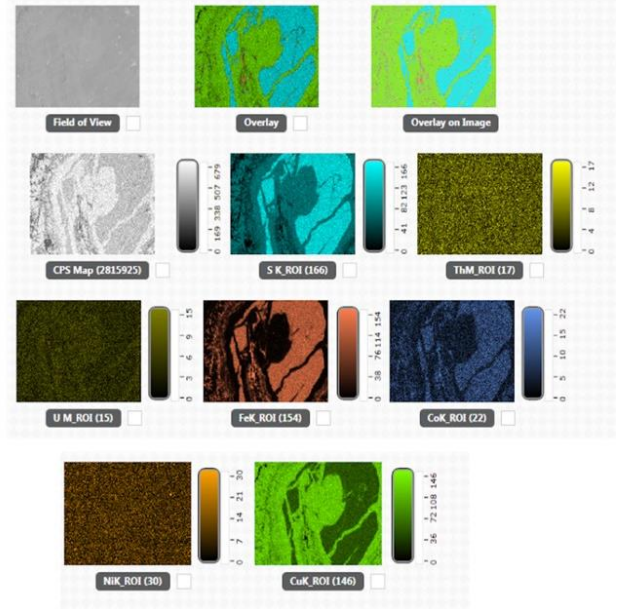
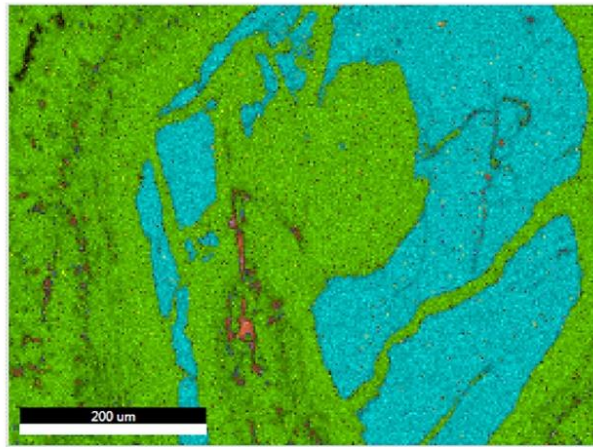


Fig. 4.28: Resultados de la distribución de los elementos en el mapeo de SEM-EDS.

Un análisis en otro sector de la roca muestra que el Th y U aumentan su porcentaje a 1.4% y 0.6% respectivamente (Fig. 4.29).

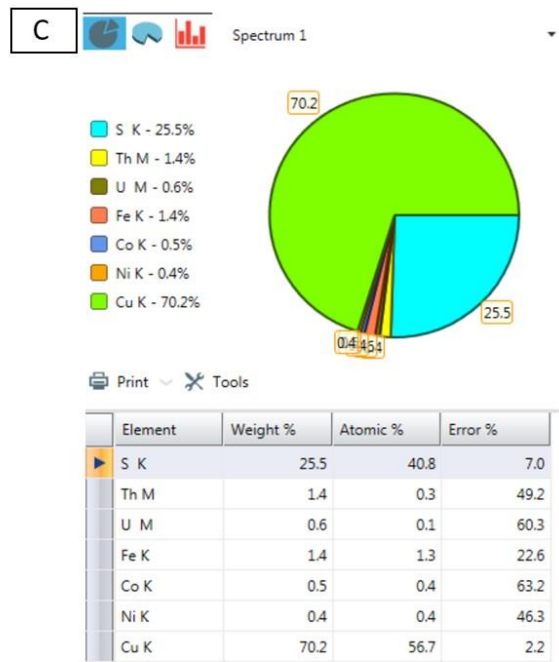
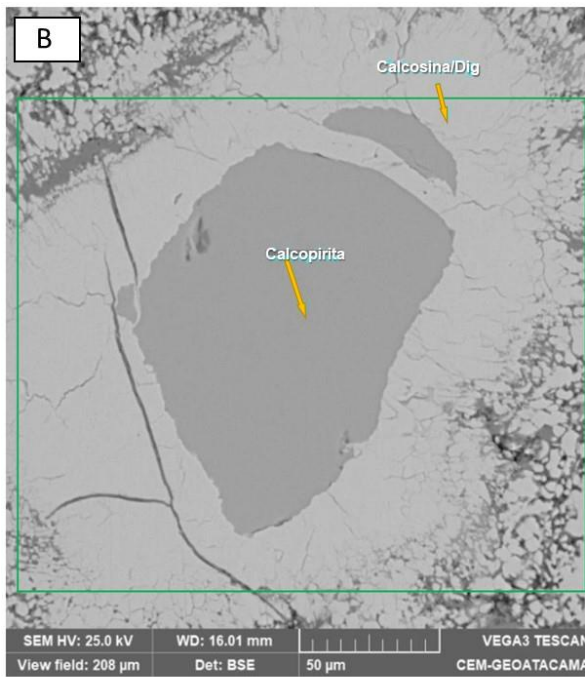
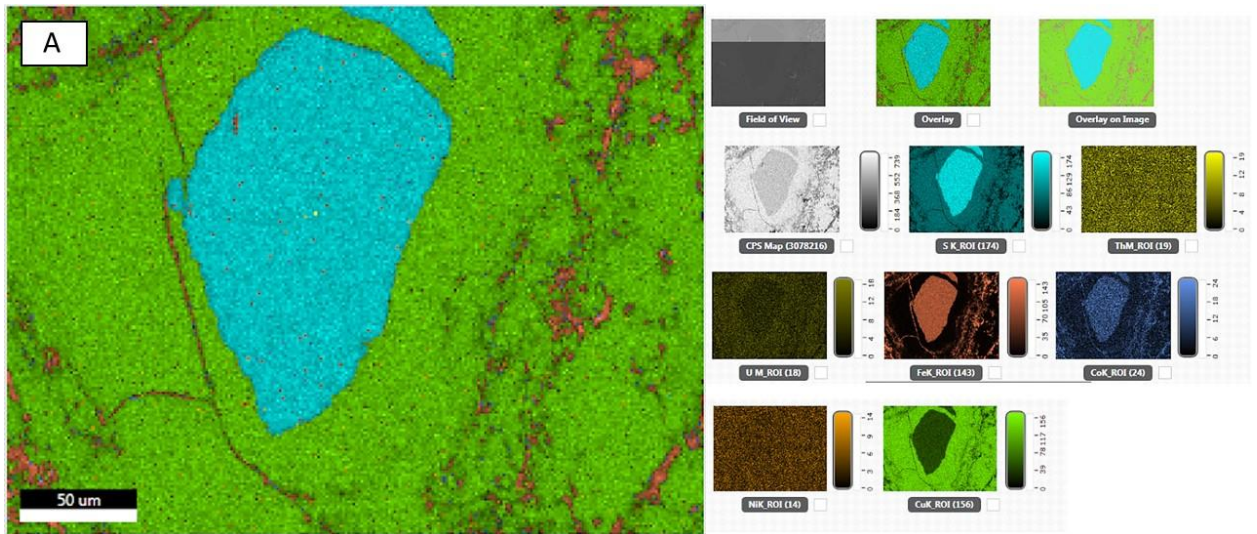


Fig. 4.29: A) Distribución de elementos sobre calcopirita. B) Imagen de la microscopia electrónica en 50 µm. C) Resultados en porcentaje de la cantidad de elementos encontrados en esta muestra.

Por otro lado, se encuentran minerales de Fe, como la hematita/magnetita, y minerales de cobre, como la malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) (Fig. 4.30).

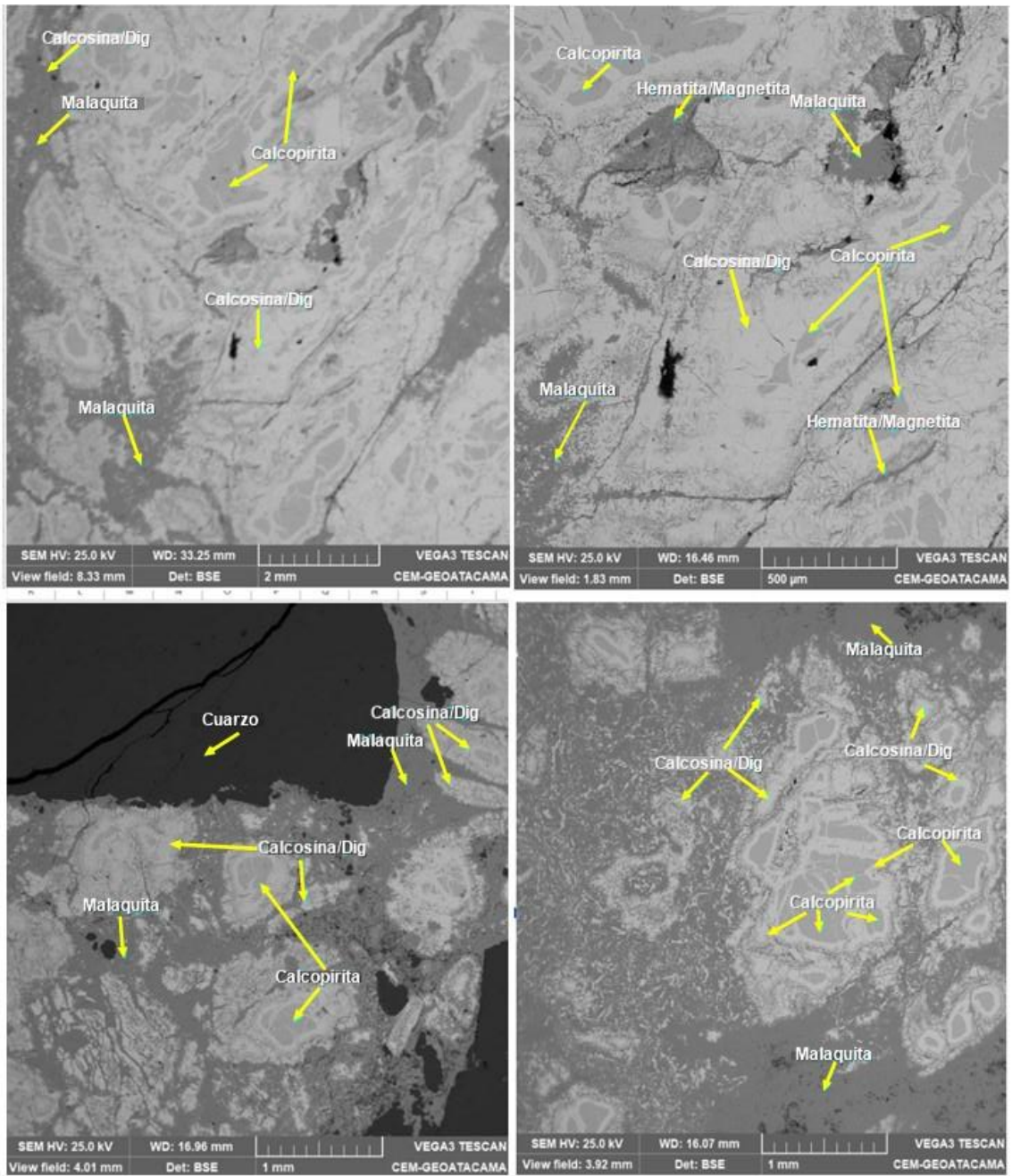


Fig. 4.30: Imágenes en distintas áreas (zonas B y C) de la muestra P6-3. Se pueden observar los diferentes minerales identificados mediante varios análisis de microscopía electrónica en diferentes sectores de la roca.

Capítulo 5: Discusión

5.1 Contexto regional de quebrada Jesús María

Durante la subducción en el margen occidental de Gondwana, Mesozoico (Scheuber y Andriessen, 1990), generó un arco magmático activo paralelo a la actual línea de costa donde hoy se encuentra la Cordillera de la Costa. Este arco provocó el emplazamiento de plutones de composición diorítica, los cuales debido a procesos de diferenciación magmática se volvieron cada vez más félsicos, conllevando al emplazamiento de nuevas unidades plutónicas de carácter tonalítico. La oblicuidad de la subducción, ayudó al emplazamiento de las unidades plutónicas, conllevó a la formación de un sistema de fallas de rumbo sinistral desde el Cretácico Inferior, denominado Sistema de Fallas Atacama (SFA), el cual posee distintas fallas de acomodamiento y fracturas asociadas (Arévalo, 2005). Gracias a estas fracturas, en el área de estudio se habrían emplazado los distintos sistemas de diques y vetas, que caracterizan la zona de estudio, quebrada Jesús María.

En el distrito quebrada Jesús María hay evidencia de características de alto potencial económico en minería metálica, donde destaca el contenido de oro, cobre y hierro (Lledo, 1998). Este estudio ha demostrado que estos depósitos vetiformes hospedan, igualmente, minerales de poco interés económico convencional, como lo son las Tierras raras y el Co (entre otros), en vetas de magnetita masiva, esparcidas por todo el sector.

5.2 Implicancias mineralógicas

En relación con las muestras descritas y analizadas, de manera macroscópica y microscópica, por lo general las muestras de magnetita se observan con una martitización moderada, lo que sugiere una oxidación de parte de las magnetitas.

En el área de estudio las vetas de magnetita asociadas con hematita se encuentran, la mayoría, en la zona centro-sur del sector, disminuyendo la intensidad de la martitización a medida que se avanza hacia el norte. La alteración más común en estas vetas son las limonitas. Esta alteración se podría explicar debido a una exposición de condiciones más oxidantes que las vetas de magnetita en el sector norte del área.

La zona más al norte del sector presenta vetas de magnetita con actinolita y apatito, estos minerales no se observan en las vetas hacia el sur, la alteración principal en estas vetas

son la de clorita y epidota moderada, mientras que las limonitas comienzan a aparecer en los sectores centro y sur del área. Este cambio se explica argumentando que el sector de la Quebrada Jesús María es una transición entre un yacimiento IOA en el norte del área y un IOCG en el sector centro y sur del área (cf. Sillitoe, 2003).

5.3 Análisis e interpretación geoquímica del área de estudio

El análisis general de las concentraciones de elementos de interés en las vetas de magnetita de este estudio muestra que el Co tiene una mediana de 0.147% peso o 1470ppm, el titanio con 0.133% peso o 1330ppm, el níquel con 0.046% peso o 460ppm y el vanadio 0.085% peso o 850ppm. El Co, V y Ni, se puede comparar en la Tabla 5.1 la cantidad de porcentaje en la corteza de la Tierra y la que se encuentra en el área de la quebrada Jesús María (Kloprogge et al., 2020). El Co presenta un enriquecimiento de 58 veces más al promedio del Co en la corteza terrestre, el V tiene 6 veces más su promedio en la corteza y el Ni 4 veces más.

En particular, la muestra P6-3 B presenta valores altos de U (0.072% peso) y Th (0.591% peso), y además un alto contenido en Cu, por lo que se hipotetiza que están asociados. Sin embargo, se requieren más estudios de esa zona para poder explicar el origen del U y Th en el área de estudio.

Las muestras A2P60, A2P66.1 y P210 presentan concentraciones elevadas de Mn (2.033%, 4.253% y 3.579% respectivamente). A pesar de esto, el Mn no alcanza a sobrepasar el promedio de concentraciones de elementos en la corteza (Ridley, 2013). Finalmente, el Ti no alcanza a sobrepasar el promedio de concentraciones para ser considerado como anómalo.

Elementos (ppm)	Co	V	Ni	Ti
Kloprogge (2020)	25	143	111	5680
Jesús María	1470	850	460	1330

Tabla 5.1: Tabla donde se compara las concentraciones de elementos en la corteza terrestre versus las de la zona de estudio.

5.4 Análisis de gráficos binarios

En la Fig. 5.1 se observa una correlación positiva entre el Co y el Fe, lo cual indica que a mayor cantidad de minerales de Fe habrá mayor cantidad de concentraciones de cobalto. Esto insinúa que el Co se encuentra hospedado en el Fe de las magnetitas con contenido

mayor a 30% de Fe. Además, en las Fig. 5.2B y Fig 5.2D, se puede ver una tendencia positiva, no tan pronunciada, en las muestras de magnetita con V y Ti, dándose a entender que, en menor medida, el hierro también es hospedante de V y Ti en las muestras. Cabe destacar que hace falta una mayor cantidad de muestras analizadas para poder obtener un resultado más decisivo, pero igualmente, hay una clara correlación entre estos elementos y el hierro de las vetas del sector.

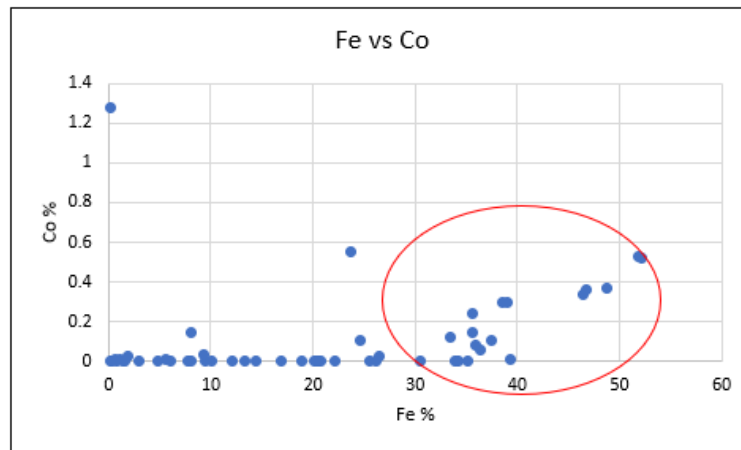


Fig. 5.1: Diagrama binario de Fe vs Co donde se puede observar la tendencia positiva comenzando en el 30% peso de hierro (círculo rojo).

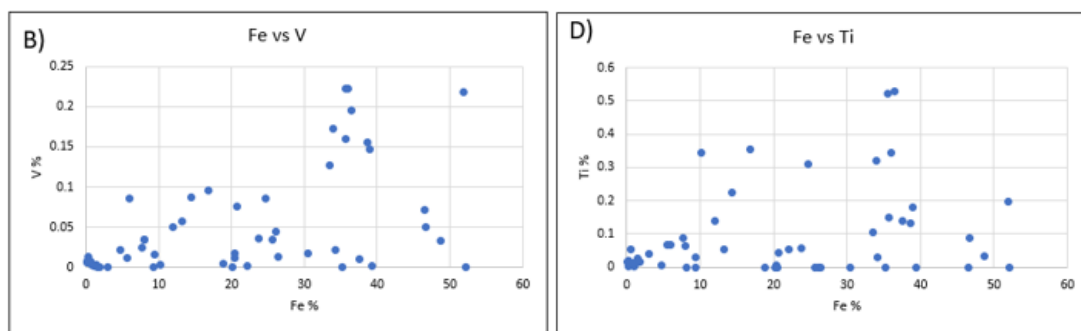


Fig. 5.2: Diagramas binarios de: B) Fe vs V; D) Fe vs Ti.

Los gráficos de la Fig. 5.3 muestran que la concentración mayor de estos elementos se limita a niveles menores al 20%, siendo pocas las muestras en el que los elementos de interés son hospedados por Cu. Esto da a entender que el Co, V, Ni y Ti, no se encuentran relacionados al Cu, si no que al Fe.

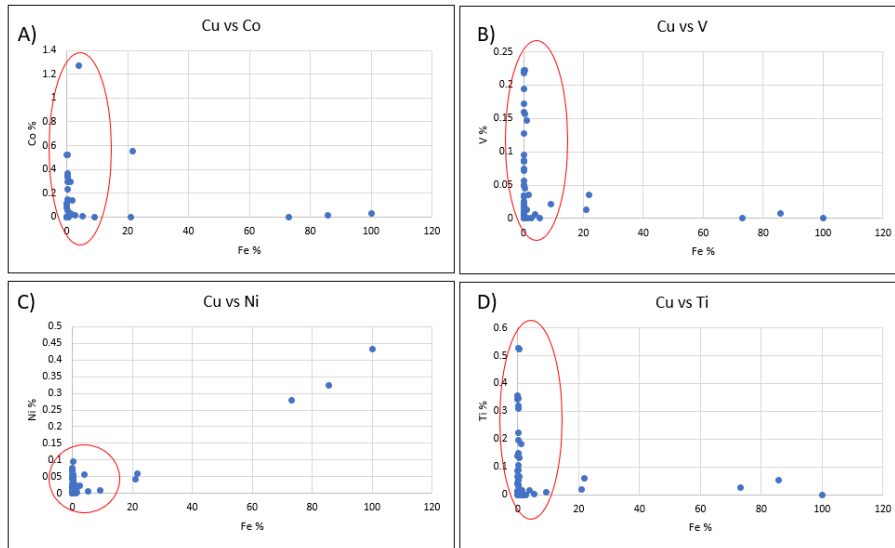


Fig. 5.3: Diagramas binarios de: A) Cu vs Co, B) Cu vs V, C) Cu vs Ni y D) Cu vs Ti. Se puede observar en un círculo rojo las concentraciones menores a 20% de cobre.

5.5 Análisis estructural

El área de estudio se encuentra fuertemente afectada por el SFA, el cual es el controlador principal de todos los plutones que se alzaron entre el Jurásico Inferior a Cretácico Superior (Camus, 2003; Charrier et al., 2007). Esta dinámica permitió el emplazamiento sintectónico del plutón Diorita La Brea N-S (algunas estructuras N-E, Arévalo, 2005), durante la exhumación de las unidades intrusivas dioríticas-tonalíticas. Producto de una inversión tectónica (Camus, 2003), ocurre un pulso magmático asociado a la génesis de las unidades de diques microdioríticos y microdioríticos porfídicos, y a los distintos sistemas de vetas en el sector.

Las vetas de magnetita, en su mayoría, presenta rumbos cercanos a 45°W . Esto podría estar relacionado a las debilidades estructurales correspondientes a fracturas de tipo tensional (T) del modelo cinemático de Riedel, 1929, característico en sistemas de rumbo como el SFA. Las relaciones de corte observadas entre las vetas de magnetita y los diques sugieren que los diques de composición microdiorítica cortan a las vetas de magnetita con manteos preferenciales a los 60°NW (Fig. 5.5). Así mismo, los diques de microdiorita son cortados por diques de microdiorita porfídica, que presentan un rumbo cercano al N-S y manteos casi verticales con preferencia al W (mayor a 80°).

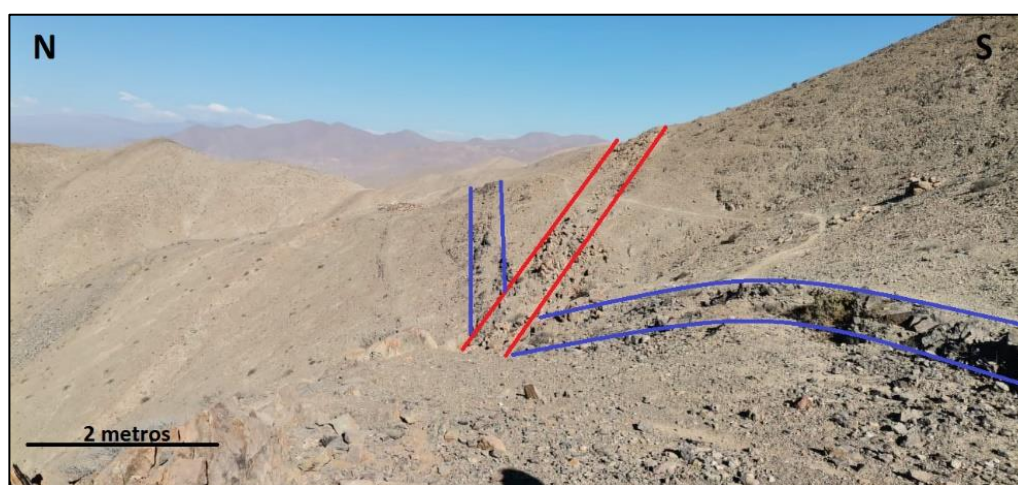


Fig. 5.5: Veta de magnetita (en azul), siendo cortada por un dique de microdiorita (en rojo).

De manera general los diques que se encuentran en la zona norte del área presentan alteraciones de epidota y clorita, mientras que, a medida que se avanza hacia el sector centro-sur, comienzan a aparecer las alteraciones a limonitas en diques cercanos a las vetas de magnetita, situación que no se da en el sector norte del área. Se puede interpretar que estos diques fueron emplazados en distintos tiempos según la alteración que presentan, en el área norte, al ser predominante las alteraciones de clorita y epidota se interpreta como un sector con un pH más neutro a alcalino de baja temperatura ($200^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$), mientras que el sector centro-sur del área igualmente presentan alteraciones de clorita y epidota, se da una alteración supergena rica en limonitas en los niveles superiores del yacimiento, principalmente como oxidación de la magnetita a hematita.

5.6 Implicancias de los resultados SEM-EDS

Muestra A2P66.1

La muestra A2P66.1 de magnetita masiva presenta una relación entre el Fe y los elementos de interés como lo son el Co, V y Ce. Es de gran importancia el contenido de Ce que se encontró en esta roca, lo que podría ser explorado en mayor profundidad haciendo este tipo de análisis a otras rocas de magnetita masiva del sector, con el fin de analizar si es rentable o no el contenido de REE en otras vetas de magnetita masiva. El contenido de Co en las vetas de magnetita se ve relacionado a la cantidad de Fe que contenga la muestra en cuestión (Fig. 5.1). La cantidad de Co encontrada en esta y las otras muestras (1.2% aproximadamente) son concentraciones a nivel traza, no dándose minerales identificables como mena principal de estos elementos, por lo que se interpreta que estos están incorporados a la red cristalina de los minerales de hierro (como la magnetita, hematita, goethita), el Co al ser un mineral siderófilo, posee radios atómicos similares a los cationes de Fe^{2+} y Fe^{3+} , por lo que pueden ser incorporados fácilmente a la red cristalina de la magnetita (e.g., Nadoll et al., 2014).

Muestra A2P107

En esta muestra se puede identificar concentraciones de casi un 1% de Ce-L (0.94%), elementos principales en la composición de la monacita, la cual es el mineral de mena principal de REE. La monacita se encuentra depositada en fracturas y bordes de la magnetita (Fig. 4.26), esto indica que este mineral fue depositado de forma tardía en la magnetita en una segunda fase de fluidos que quebrantaron la magnetita. Según Araya et al., (2016), estos elementos suelen encontrarse en depósitos de tipo IOCG e IOA de la zona, lo que indicaría que no sería raro encontrar más de este tipo en otras muestras cercanas a esta.

Esta muestra es la única que contiene monacita, pero genera indicios de que podría ser encontrada en mayores cantidades de rocas del sector, por lo que se deben hacer más estudios enfocados a elementos traza (REE).

Muestra P6-3

Se identificaron minerales de óxidos (malaquita y crisocola) y de sulfuros (calcopirita y calcosina/digenita) en esta muestra. En el caso de las calcopiritas se puede identificar un enriquecimiento supérgeno en la zona primaria, dando lugar a calcosina/digenita (zona enriquecida). Además, se pueden observar bordes irregulares y corrosivos en la malaquita de la muestra, rellenando espacios en la calcosina/digenita, lo que indica que el fluido rico en malaquita fue posterior a los otros minerales (Fig. 5.6).



Fig. 5.6: Mapa elemental zonal en SEM-EDS, donde se ve la distribución de distintos minerales.

Por último, se halló U y Th en porcentajes elevados, entre 0.8% a 1.4% de Th y 0.4% a 0.6% de U en solo esta muestra, donde la abundancia promedio de estos elementos en la

corteza es de 2.7 ppm para el U y 9.6 ppm para el Th. Además, estos elementos se encuentran fuertemente ligados al Cu existente en esta roca, ya que ninguna otra muestra de magnetita presenta tales cantidades de Th y U. El potencial económico de estos elementos debe ser evaluado analizando más muestras del sector para así estimar con mayor precisión las concentraciones de Th y U.

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

- En general la zona de estudio es un distrito minero enfocado a la extracción de vetas de hematita con un contenido alto en Cu y Au, donde las vetas de magnetita con potenciales altos de elementos no convencionales no han sido explotadas.
- En base a la mineralogía y la geología del área de estudio se pueden definir dos zonas con distintos tipos de alteración y mineralización en los diques y vetas del sector. La zona sur del área presenta una alteración supérgena de limonitas más alta que el lado norte del área. Además, la zona Sur no presenta vetas de magnetita con actinolita y apatito, siendo estas últimas encontradas solo en el sector más al norte del área.
- De manera general los minerales de alteración de la zona más comunes en los diques son: epidota, clorita y óxidos de hierro. La alteración dependerá de la zona en la que se encuentre, dándose en su mayoría alteración epidota-clorita en el sector norte del área como halos de los diques que se encuentran junto a las vetas de magnetita del sector. Estas vetas de magnetita también presentan granates asociados a metamorfismo de contacto. Por otro lado, los óxidos de hierro, como las limonitas, afectan el sector centro-sur de la zona, desapareciendo por completo mientras se avanza hacia el norte del área.
- Debido a que la actinolita y el apatito se encuentran en una zona acotada más al norte del área de estudio se puede interpretar este sector como sistemas vetiformes tipo IOA. El sur del área presenta vetas con alteración a limonitas de moderada a alta intensidad y una mineralización de magnetita/hematita-oro-cobre-calcopirita y sulfuros supérgenos de Cu como lo son la criscocola y malaquita, por lo que podría ser considerado, el sector centro-sur del área, como un depósito tipo IOCG.
- Debido a las distintas alteraciones y minerales que presentan las vetas se pueden identificar dos grupos de vetas en la zona: Vetas de la zona norte y vetas de la zona centro-sur. Las primeras vetas mencionadas (norte) son relacionadas a sistemas vetiformes tipo IOA, debido a su falta de alteración de óxidos de hierro

y a los minerales de actinolita y apatito que en el área centro-sur no son encontradas en las magnetitas. Por otro lado, las vetas del centro-sur del área no se encontró apatito ni actinolita, minerales principales para ser denominadas vetas de tipo IOA, sin embargo, estas presentan óxidos de hierro y algunas veces se encuentran vetas de Cu en paralelo a estas, presentando mineralización de Cu y Au no presente en las vetas del sector norte, la alteración y mineralización de estas vetas sugieren que el tipo de sistema vetiforme es de un IOCG.

- La única muestra (P6-3 B) que presenta valores elevados de uranio (0.072% peso) y torio (0.591% peso) se encuentra en la zona norte del área, cerca de un pique minero. A esta muestra se le hicieron análisis de tipo SEM-EDS, debido al porcentaje elevado de Cu que presenta, donde se pudo confirmar que el U y Th se encuentran hospedados en el Cu (calcopirita, malaquita), por lo que se recomienda hacer más análisis en diferentes muestras de Cu del sector para así poder tener un muestreo más representativo de la zona y poder analizar si fuese rentable o no la extracción de estos elementos.
- En general el área presenta concentraciones altas de elementos de interés como lo son el cobalto (mediana de 0.147% peso), vanadio (mediana de 0.085 % peso) y níquel (mediana de 0.046% peso).
- Hay un fuerte patrón estructural con respecto a las vetas de magnetita y los diques de microdiorita y microdiorita porfídica, ambos presentan una preferencia NE, aunque existen algunas vetas que se ven con una tendencia NW.
- Este patrón estructural se asocia al SFA, la cual permite el ascenso de fluidos provenientes del cuerpo magmático ígneo, como lo es la Diorita La Brea (123-117Ma).
- Los estudios de tipo SEM-EDS que se pudieron hacer en las tres muestras confirman la relación entre el Co y el Fe en las rocas analizadas. Además, se puede encontrar monacita en una de ellas (A2P107), por lo que se recomienda analizar con más detalle la ocurrencia y distribución de este mineral, considerando que hospeda tierras raras livianas.
- Se recomienda realizar futuros estudios geológicos y químico-mineralógicos hacia el norte, donde fueron encontradas las vetas de magnetita con actinolita y

apatito, esto con el fin de establecer la continuidad de las estructuras IOA y sus eventuales subproductos.

- Finalmente se recomienda el levantamiento de estudios magnetométricos con la finalidad de evaluar la continuidad de las estructuras mineralizadas tanto en profundidad como en su corrida.

Referencias

- Araya, J., Donoso, F., Olavarría, D., (2016), Situación actual de mercado de tierras raras y su potencial en Chile.
- Arévalo, C., (2005), Mapa Geológico del Hoja Copiapó; Región de Atacama, escala 100,000: Servicio Nacional de Geología y Minería. Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín, No. 24, 58 p.
- Barra, F., Martin, R., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E., & Palma, G. (2017). Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach. *Ore Geology Reviews*. 81: 62-78.
- Brown, M., Diaz, F., and Grocott, J. (1993), Displacement history of the Atacama Fault System 25°00'S-27°00'S, northern Chile: Geological Society of America Bulletin, v. 105, p. 1165-1174.
- Burkhalter Thiebaut E., Vergara Espuelas R. (2016). Proyecto de Tierras Raras de Matamulas: “El Primer yacimiento de Europa”. Quantum Minería - España.
- Camprubí, A.; González-Partida, E. (2017). Mesozoic magmatic–hydrothermal iron oxide deposits (IOCG ‘clan’) in Mexico: A review. *Ore Geology Review*. 81: 1804-1095.
- Camus, F. (2003). Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Cawthorn, R.G., (2005). Contrasting sulphide contents of the Bushveld and Sudbury igneous complexes. *Miner Deposita* 40:1–12.
- Cembrano, J.; González, G.; Arancibia, G.; Olivares, V; Herrera, V (2005). Fault zone development and strain partitioning in an extensional strike-slip duplex: A case study from the Mesozoic Atacama Fault System, Northern Chile. *Tectonophysics* 400: 105-125.

- Charrier, R.; Pinto, L.; Rodríguez, M. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. In *The Geology of Chile* (Moreno, T.; Gibbons, W.; editors). The Geological Society of London: 21-114.
- Chen, H.Y.; Clark, A.H.; Kyser, T. K. (2011). Contrasted hydrothermal fluids in the Marcona-Mina Justa iron-oxide Cu (-Au-Ag) deposits, south-central Perú: *Mineralium Deposita*, v. 46, p. 677–706.
- Chong-Hu Wu (2012). Low Energy-Consumption Industrial Production of Ultra-Fine Spherical Cobalt Powders.
- Dare, S., Barnes S., Beaudoin, G. (2015). Did the massive magnetite “lava flows” of El Laco (Chile) form by magmatic or hydrothermal processes? New constraints from magnetite composition by LA-ICP-MS. *Miner. Deposita* 50, 607–617.
- Del Carmen de la Torre, M. (2019). Z = 58, Cerio, Ce. el elemento químico en el que la tabla periódica se hace tridimensional. *Anales de Química de la RSEQ*, 115(2), 120.
- Díaz, C., Lledó, H., & Vivallo, W. (2006). Yacimiento metalífero de la carta Copiapó Región de Atacama. Servicio nacional de geología y minería documento de trabajo, No. 26 ,1 mapa escala 1/10000.
- Enghag P., (2007). *Encyclopedia of the elements*, Wiley-VCH Verlag, 2007, pp. 493–509.
- Ewert, J. W., Diefenbach, A. K., & Ramsey, D. W. (2018). 2018 Update to the U.S. Geological Survey National Volcanic Threat Assessment.
- Fujimori. M; N. Ono; Itasako S. (1980), *Solvent Extraction in Sumitomos Cobalt Refining Process*, Alberta.
- Gaboury, D; Daigneault, R. (2000) Flat vein formation in a transitional crustal setting by self-induced fluid pressure equilibrium – an example from the Géant Dormant gold mine, Canada *Ore Geology Reviews*, vol. 17, pág. 155-178.
- García G. B., (2006). El vanadio, un elemento ambiguo. Área Morfología. Facultad de Ciencias Bioquímicas y Farmacéuticas. Universidad Nacional de Rosario.

- Groves, D., Bierlein, F., Meinert, L., & Hitzman, M. (2010). Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology*, 105(3), 641-654.
- Groves, D., Vielreicher, R., Goldfarb, R. J., & Condie, K. C. (2005). Controls on the heterogeneous distribution of mineral deposits through time. Geological Society, London, Special Publications, 248(1), 71-101.
- Habashi F., (1997). Handbook of extractive metallurgy, Vol. II Wi-ley-VCH, Weinheim, 1997, pp. 1129–1180.
- Haynes, W., (2016-2017) Abundance of elements in the earth's crust and in the sea, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 97th edition, p. 14-17
- Hitzman, M. W., Bookstrom, A. A., Slack, J. F., & Zientek, M. L. (2017). Cobalt: Styles of Deposits and the Search for Primary Deposits. US Department of the Interior, US Geological Survey
- Hitzman, M., Oreskes, N. & Einaudi, M. (1992). Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. In: G. Gaíl and K. Schulz (Eds), Precambrian Metallogeny Related to Plate Tectonics. *Precambrian Res.*, 58:241-287.
- Kerfoot, D.G.E.; Berezowky. (1990) Hydrometallurgical process for the recovery of nickel and cobalt from nickel mattes, Sherritt Gordon limited, Alberta, Canada.
- Kloprogge, J., Ponce, C., & Loomis, T. (2020). The Periodic Table: Nature's Building Blocks: An Introduction to the Naturally Occurring Elements, Their Origins and Their Uses. Primera edición, Editorial Elsevier, 897p., Oxford. Inglaterra.
- Kreiner, D. C., & Barton, M. D. (2011). High-level alteration in iron-oxide (-Cu-Au)('IOCG') vein systems, examples near Copiapó Chile. In Proceedings of the 11th biennial meeting: society for geology applied to ore deposits (pp. 497-499).
- Lacassie, J.P.; Vivallo, W.; Díaz, A. (2016). Caracterización geoquímica de yacimientos metalíferos de la Región de Atacama mediante el uso de redes neuronales artificiales.

- Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-16-61: 177 p, 1 CD. Santiago.
- Lledó, H. (1998). Metalogénesis de los cuadrángulos Copiapó, Cerro Chamonate y Nantoco, III Región de Chile. Memoria de Título y Tesis de Magíster. Universidad de Chile, Santiago.
- Marco, J. (1978). Estudio geológico minero del yacimiento Gelleguillos III Región, provincial de Copiapó. Memoria de título (inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago. Pag 105.
- Mason, B. (1959). "Principles of Geochemistry".
- McRae, M., (2019). *Nickel Statistics and Information*. U.S. Geological Survey.
- Mudd, G. M., Weng, Z., Jowitt, S. M., Turnbull, I. D., & Graedel, T. E. (2013). Quantifying the recoverable resources of by-product metals: The case of cobalt. *Ore Geology Reviews*, 55, 87-98
- Nadoll, P., Angerer, T., Mauk, J., French, D., & Walshe, J. (2014). The chemistry of hydrothermal magnetite: A review. *Ore Geology Reviews*, 61, 1-32.
- Nystroem, J. O., & Henriquez, F. (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.
- Polyak D. E., (2015). *Minerals Yearbook: Vanadium*. U.S. Geological. Survey, Washington DC, 2016. Potencial en Chile. Comisión Chilena del Cobre, DEPP 15/2016.
- Rehder D., (2008). *Bioinorganic Vanadium Chemistry*. Wiley, Chichester.
- Ridley, J. (2013). *Ore deposit geology*. Primera edición, editorial Cambridge University Press, 392p., Inglaterra
- Riedel, W. (1929): Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen.- Zentralblatt fuer Mineralogie, Geologie und Palaeontologie p.354-368 Stuttgart. *general tectónica, Riedel Shears*

- Ruiz, C., Aguirre, L., Corvalan, J., Klohn, C., Klohn, E., Levi, B. (1965). Geología y yacimientos metalíferos de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas [Chile], 386 p.
- Scheuber, E., and Andriessen, P. A. M., (1990). The kinematic and geodynamic significance of the Atacama Fault Zone, northern Chile: *Journal of Structural Geology*, v. 12, no. 2, p. 243-257.
- Scheuber, E., Gonzalez, G., (1999). Tectonics of the Jurassic–Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22°–26°S): a story of crustal deformation along a convergent plate boundary. *Tectonics* 18, 895–910.
- Seegerstrom, K. (1968). Geología de las hojas Copiapó y Ojos del Salado Provincia de Atacama. Inst. Invest. Geol. Bol. Bd. 24 p.1-58 Santiago. Atacama, Chile, Copiapó, Mapa geológica, Estratigrafía.
- Sellés, D., Muzzio, G. y Castillo, B. (2015). Magmatismo cretácico inferior de la Franja Ferrífera de Atacama-Coquimbo: Geoquímica ígnea.
- Sillitoe, R. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7), 787-812.
- Sillitoe, R. H., & Burrows, D. R. (2002). New field evidence bearing on the origin of the El Laco magnetite deposit, northern Chile. *Economic Geology*, 97(5), 1101-1109.
- Skirrow, R. G. (2021). Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits—a review (part 1): settings, mineralogy, ore geochemistry, and classification. *Ore Geology Reviews*.
- Smith, C. (2001). Always the brides maid, never the bride: cobalt geology and resources, *Applied Earth Science*, 110:2, 75-80
- Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth-science reviews*.
- Tornos, F., Velasco, F., & Hanchar, J. M. (2016). Iron-rich melts, magmatic magnetite, and superheated hydrothermal systems: The El Laco deposit, Chile. *Geology*, 44(6), 427-430.
- Townley, B., A. Díaz y R. Luca (2017). “Recursos minerales por cobalto en Chile: potencial de exploración y explotación minera”, Corporación de Fomento de la Producción

(CORFO)/Comité de Minería No Metálica/Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

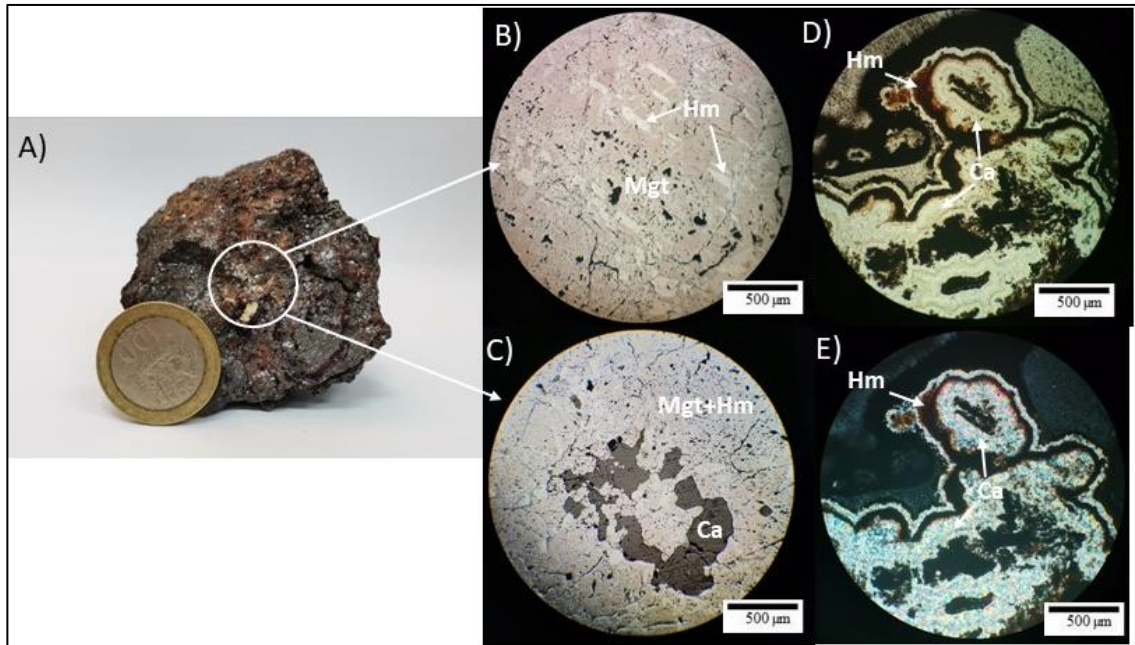
Vivallo, W., Espinoza, S. & Henríquez, F., (1995). Los depósitos de hierro del tipo magnetita-apatita: geoquímica de las rocas volcánicas asociadas y potencialidad de la mena de hierro como fuente de mineralización de oro. *Revista Geológica de Chile*, Vol.22, Nº 2, 159-175.

Williams, P., Barton, M., Johnson, D., Fontboté, L., De Haller, A., Mark, G., Oliver, N., & Marschik, R. (2005). Iron oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin.

Wu, C. (2012). Low energy-consumption industrial production of ultra-fine spherical cobalt powders.

ANEXOS

Anexo 1.- Muestra A2P66.1



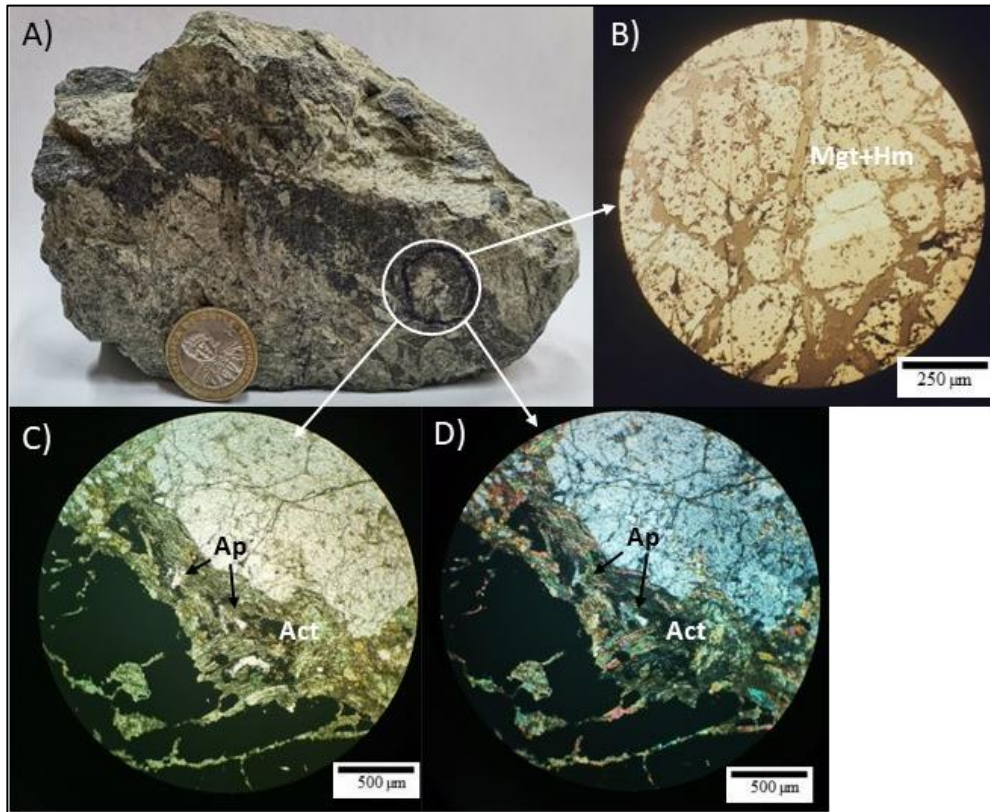
Fotografías de muestra de mano y secciones pulidas y transparentes. A) Muestra de mano A2P66.1. B) y C) corte pulido con aumento 5x. D) y E) corte transparente en LPP y NC, respectivamente con aumento 5x. Mgt: Magnetita; Hm: Hematita; Ca: Calcita.

Coordenadas: N6.966.361; E363.907

Dato estructural de la veta: N33W; 35SW

En anexo 1.- D y E del corte transparente de muestra de veta de magnetita, se pueden reconocer hematita con una textura coliforme. Esta muestra contiene jarosita, calcita y anhidrita. En el corte pulido, C, se puede apreciar una martitización de la magnetita a hematita. La magnetita se encuentra de forma masiva en toda la muestra. La roca de caja corresponde a diorita, que fue descrita con anterioridad.

Anexo 2.- Muestra Prime PT1 (transparente y pulido)



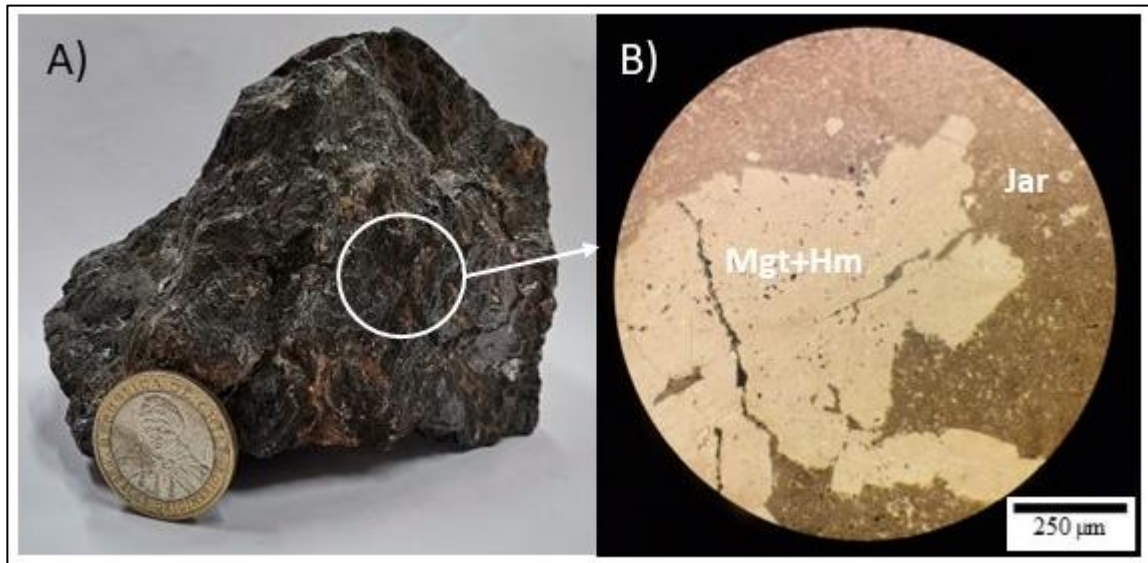
Fotografías de muestra de mano y secciones pulidas y transparentes. A) Muestra de mano Prime PT1. B) corte pulido con aumento 5x. C) y D) corte transparente en LPP y NC, respectivamente con aumento 5x. Mgt: Magnetita; Hm: Hematita; Ap: Apatito; Act: Actinolita.

Coordenadas: N6.968.169; E362.095

Muestra extraída en la cercanía de piques abandonados de vetas de magnetita de 2 m de potencia aproximadamente. En el área se encontraron granates asociados a las vetas de magnetita.

Se pueden reconocer minerales de actinolita, apatito, epidota y magnetita. La actinolita se ve alterada a epidota de forma moderada. La magnetita se encuentra de forma masiva y fracturada. En el corte pulido se aprecia una mineralización de magnetita masiva se encuentra levemente oxidada dando paso a minerales de hematita. Se puede apreciar que la magnetita se encuentra fracturada. La roca de caja hospedante corresponde a una diorita, descrita con anterioridad.

Anexo 3.- Muestra A2P60



Fotografías de muestra de mano y sección pulida. A) Muestra de mano A2P60. B) corte pulido con aumento 10x. Mgt: Magnetita; Hm: Hematita; Jar: Jarosita.

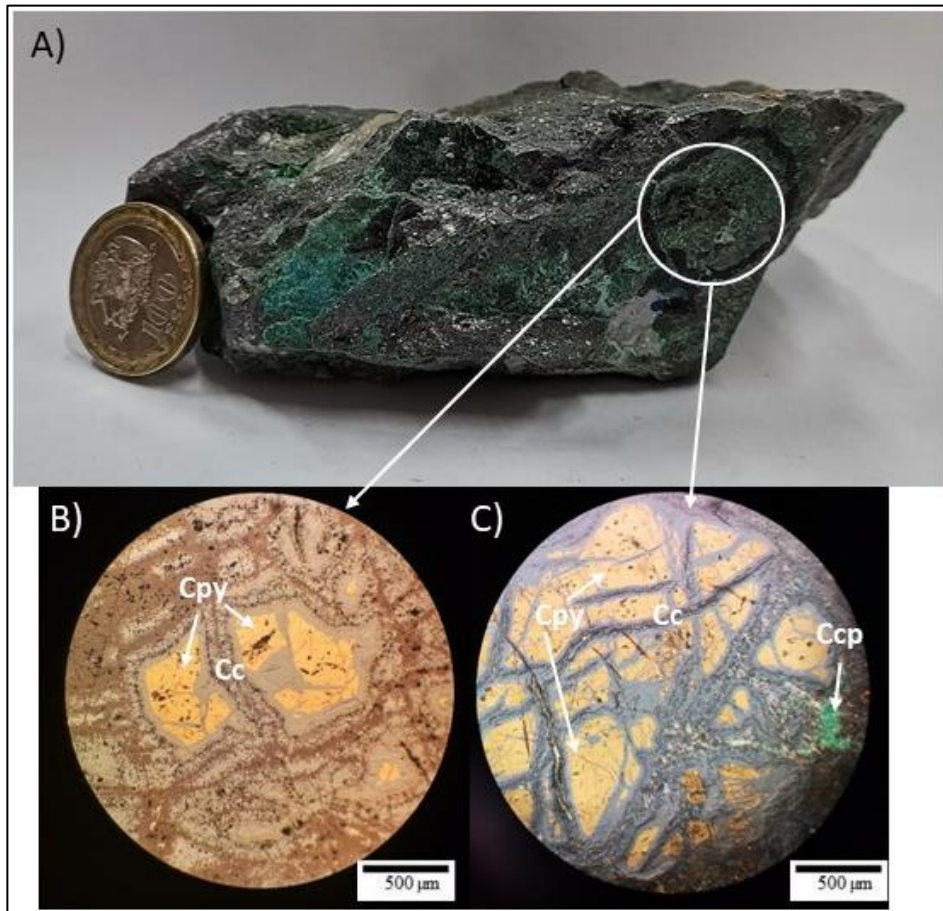
Coordenadas: N6.966.868; E363.819

Dato estructural de la veta: N22E;77SE

En el corte pulido de magnetita masiva. Se pueden apreciar zonas de oxidación en la magnetita, provocando una martitización moderada. Esto da lugar a que óxidos de hierro, como lo son la jarosita y hematita con intensidad moderada.

La roca de caja de este sector corresponde a tonalita descrita con anterioridad.

Anexo 4.- Muestra P6-3



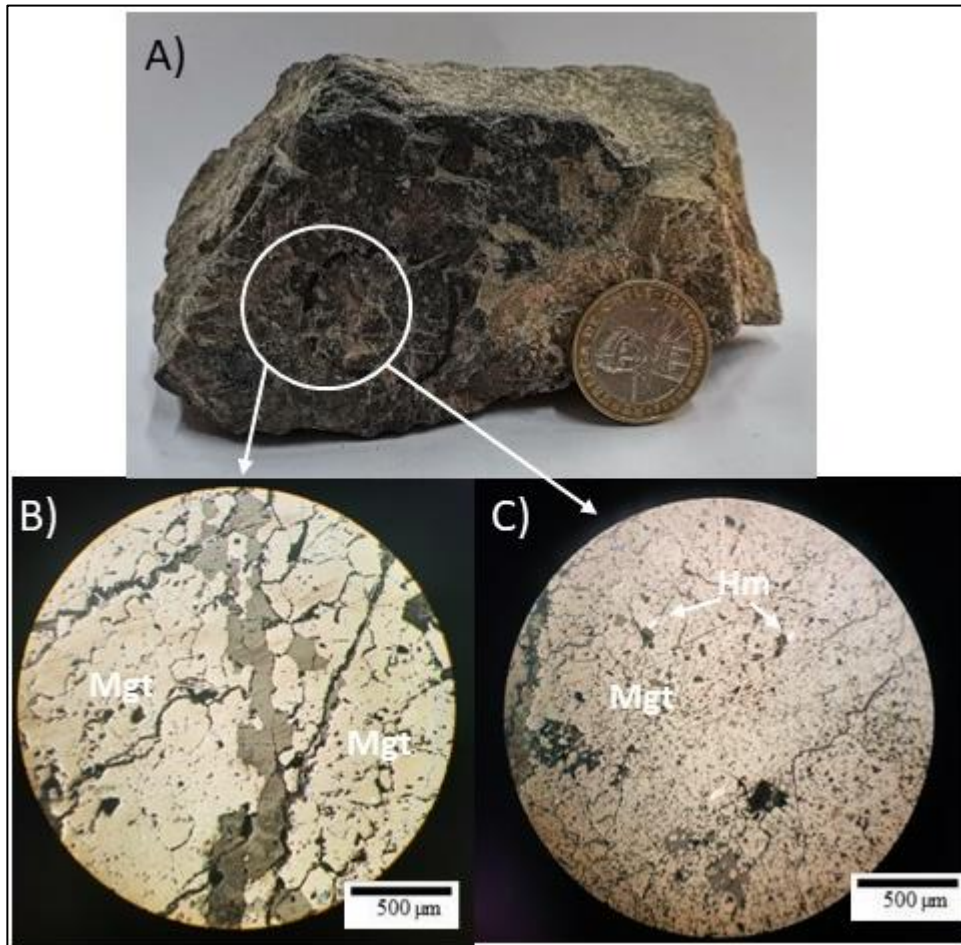
Fotografías de muestra de mano y secciones pulidas. A) Muestra de mano P6-3. B) corte pulido con aumento 5x en LPP. C) corte pulido con aumento 5x en NC. Cpy: Calcopirita; Cc Calcosina; Ccp: Crisocola.

Coordenadas: N6.967.886; E363.351

Muestra de veta de Cu paralela a veta de hematita. Presenta una mineralización de crisocola y calcopirita.

En la imagen B y C se puede observar el proceso de enriquecimiento supérgeno que afecta a las calcopiritas, siendo estas reemplazadas por calcosina en los halos más oscuros que se pueden ver en la imagen anterior. Se reconoce la mineralización de Cu como crisocola y calcopirita fracturada.

Anexo 5.- Muestra M10-D4

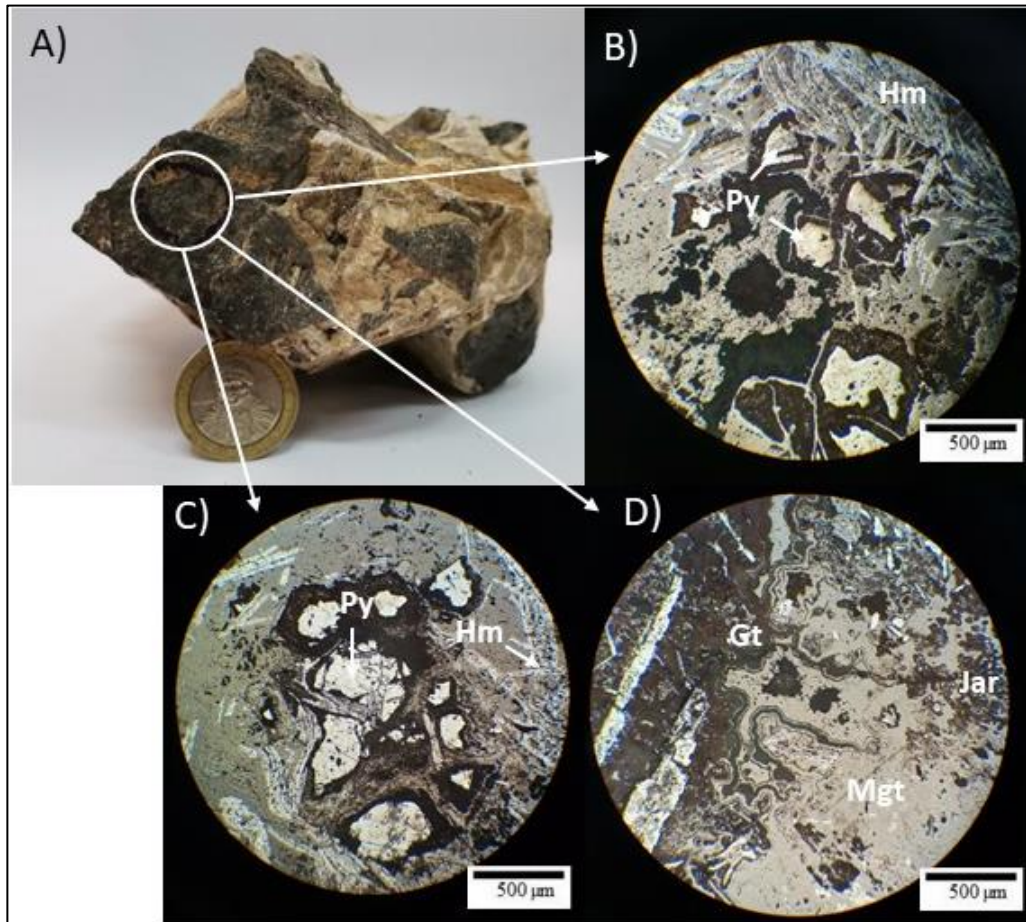


Fotografías de muestra de mano y secciones pulidas. A) Muestra de mano M10-D4. B) corte pulido con aumento 5x en LPP. C) corte pulido con aumento 5x en LPP. Hm: Hematita; Mgt: Magnetita.

Coordenadas: N6.967.507; E363.141

Muestra recolectada de pique minero con vetas de hematita y magnetita, esta presenta alteración intensa a óxidos de hierro (jarosita intensa, hematita moderada, goetita intensa en la parte baja), la veta de goetita presenta un magnetismo intenso. En la zona se aprecian brechas con clastos de yeso y tonalita, y matriz de jarosita. La magnetita se encuentra en forma masiva fracturada con vetillas de cuarzo. Además, presenta un grado de oxidación leve, presentando hematita relleno los espacios de la magnetita.

Anexo 6.- Muestra A2P15.1



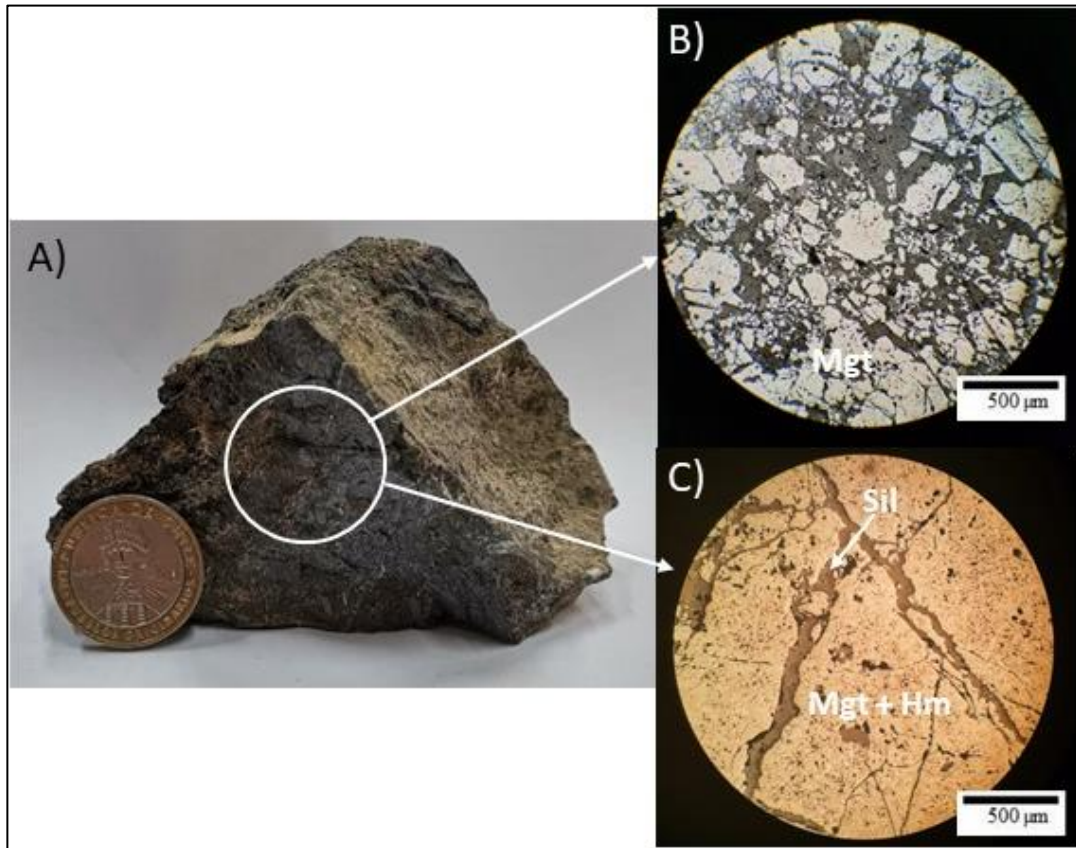
Fotografías de muestra de mano y secciones pulidas. A) Muestra de mano A2P15.1. B), C) y D) corte pulido con aumento 5x en LPP. Hm: Hematita; Mgt: Magnetita; Gt: Goethita. Jar: Jarosita. Py: Pirita.

Coordenadas: N6.968.151; E362.191

Dato estructural de la veta: N65W;81NE

Corte pulido es de un clasto magnetita masiva. Se pueden reconocer inclusiones de magnetita en el cuarzo, el cual presenta una textura coloforme, también se reconocen cristales de pirita con halos de oxidación (goethita). La hematita intersticial, primaria, se encuentra muy bien formada, por lo que la roca no presenta una martitización.

Anexo 7.- Muestra P5-5.3

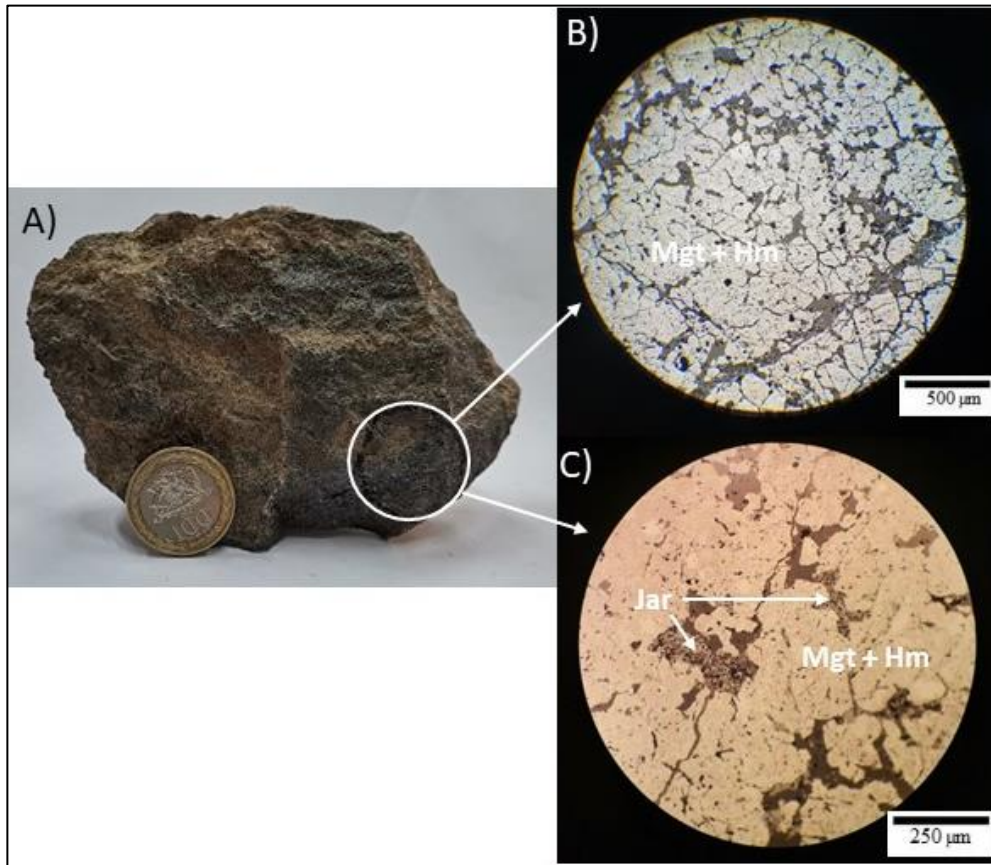


Fotografías de muestra de mano y secciones pulidas. A) Muestra de mano P5-5.3. B) y C) corte pulido con aumento 5x en LPP. Hm: Hematita; Mgt: Magnetita; Sil: Silicato.

Coordenadas: N6.966.167; E362.813

Magnetita masiva con óxidos de hierro. Presenta una alteración argílica intensa en los bordes de la veta. En corte pulido (Anexo 7, imágenes B y C) se puede apreciar silicato rellenando en forma de vetillas o cúmulos en la magnetita masiva y se aprecian zonas de oxidación en la magnetita, dando lugar a una martitización moderada.

Anexo 8.- Muestra A2P107.1



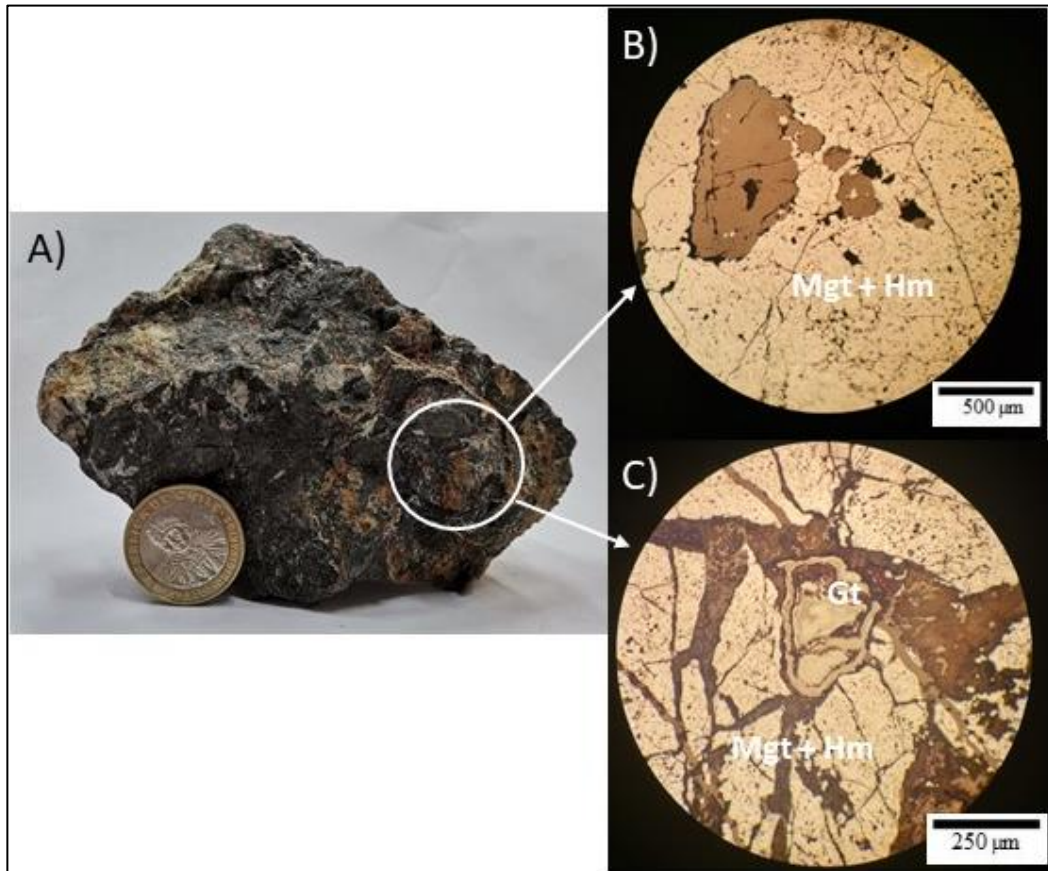
Fotografías de muestra de mano y secciones pulidas. A) Muestra de mano A2P107.1. B) y C) corte pulido con aumento 5x en LPP. Hm: Hematita; Mgt: Magnetita; Jar: Jarosita.

Coordenadas: N6.967.950; E362.975

Dato estructural de la veta: N85W;72NE

Veta de magnetita masiva con clastos intercrecidos de apatito, esta está siendo cortada por un dique de microdiorita. El dique que la corta tiene un dato estructural de N20E;82SE. Se puede observar el corte pulido (Anexo 8, imágenes B y C) de la muestra la magnetita masiva que se encuentra fracturada, con una oxidación de hematita y jarosita leve relleno los intersticios de las fracturas.

Anexo 9.- Muestra D6-16

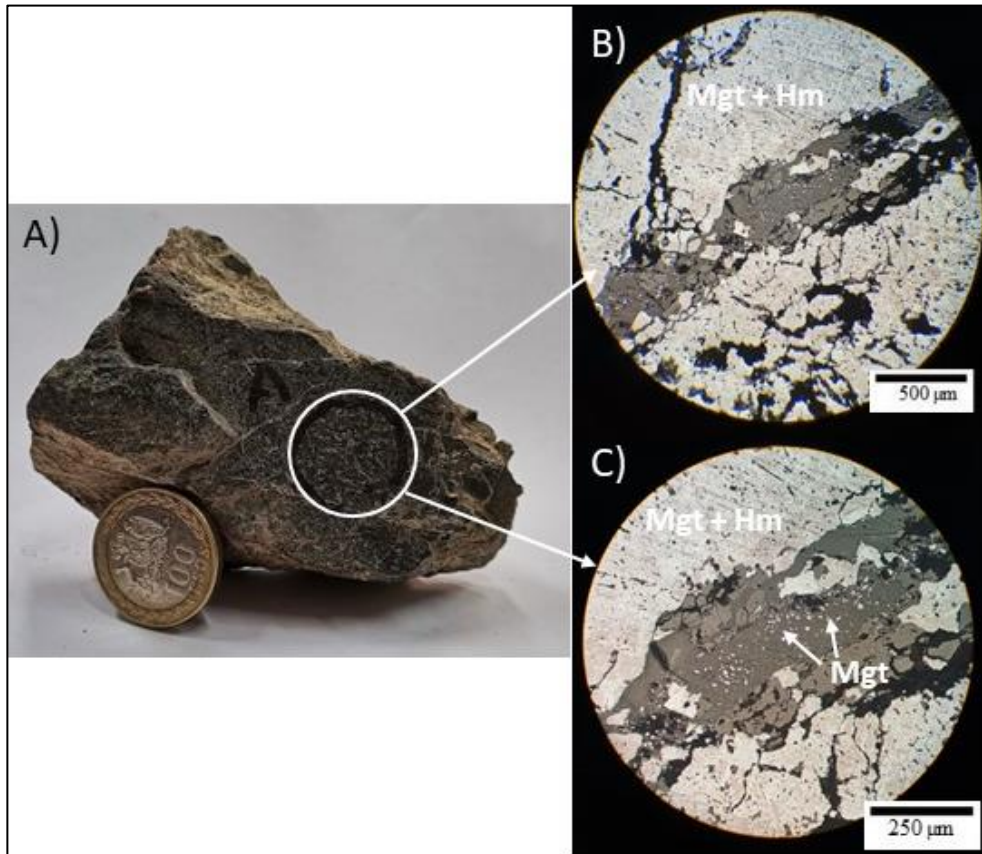


Fotografías de muestra de mano y secciones pulidas. A) Muestra de mano D6-16. B), C) y D) corte pulido con aumento 5x en LPP. Hm: Hematita; Mgt: Magnetita; Gt: Goethita.

Coordenadas: N6.966.881; E363.527

Veta de magnetita masiva con apatito. Se puede observar que en el corte pulido la magnetita masiva esta fracturada y rellena por óxidos de hierro(hematita) de forma leve (Anexo 9, imagen B). Además, se le notan apatitos de forma subhedral (Anexo 9, imagen A) en la muestra de mano. Se puede observar goethita relleno intersticios de la magnetita fracturada.

Anexo 10.- Muestra A2P108



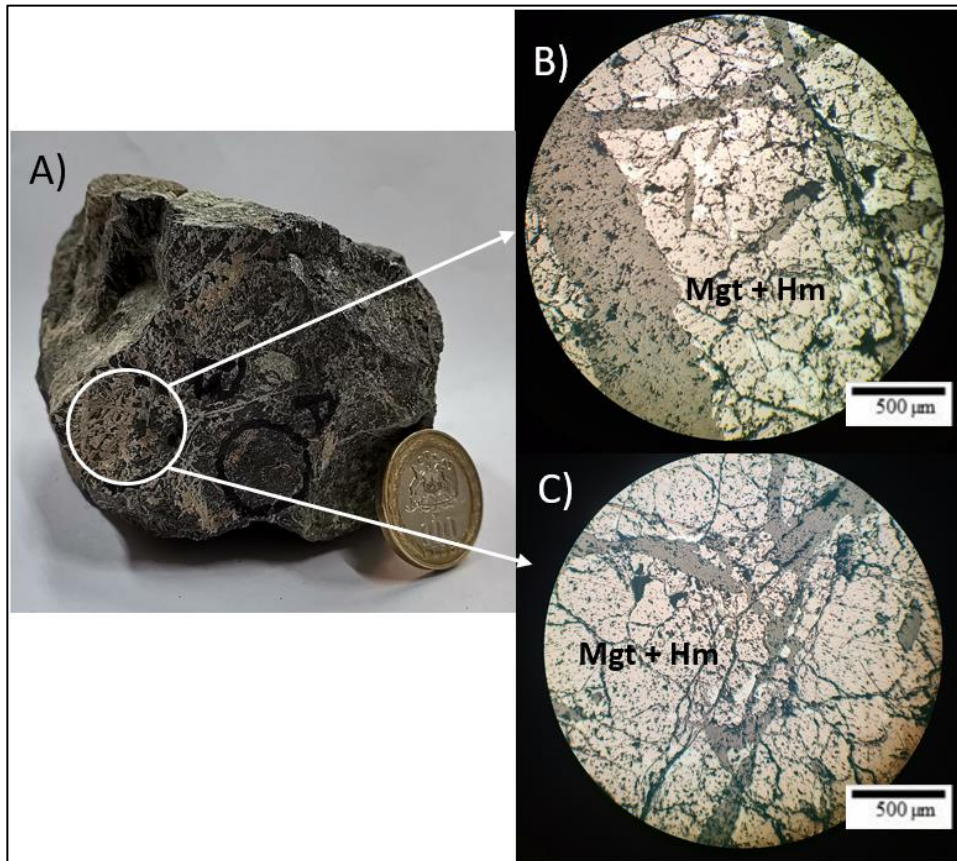
Fotografías de muestra de mano y secciones pulidas. A) Muestra de mano A2P108. B) corte pulido con aumento 5x en LPP. C) corte pulido con aumento 10x en LPP. Hm: Hematita; Mgt: Magnetita.

Coordenadas: N6.967.900; E362.933

Dato estructural: N34W;81SW

Veta de magnetita masiva que alberga vetillas de cuarzo. Esta muestra fue recolectada a 60 m aproximadamente de la muestra A2P107.1. Se puede observar el cuarzo relleno de orificios en la magnetita en forma de vetillas. En las vetillas de cuarzo que intruyen a la magnetita, se pueden observar fragmentos de magnetita posterior a la magnetita masiva principal.

Anexo 11.- Muestra D-64

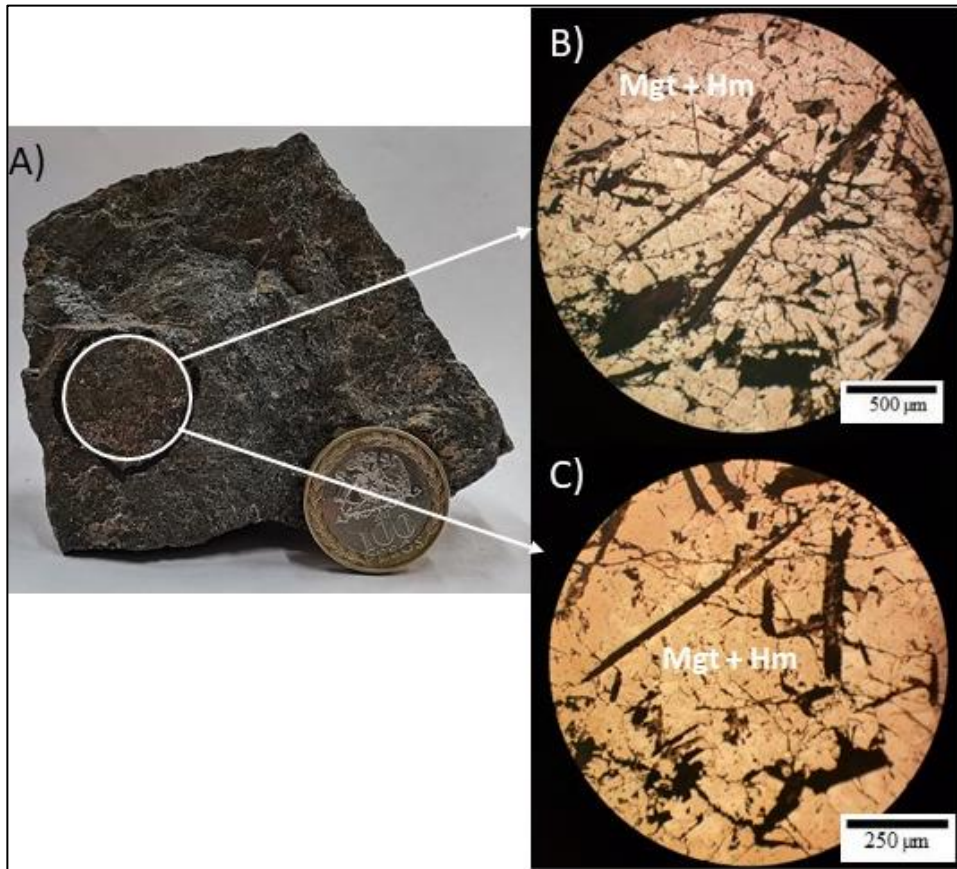


Fotografías de muestra de mano y secciones pulidas. A) Muestra de mano D-64. B) y C) corte pulido con aumento 5x en LPP. Hm: Hematita; Mgt: Magnetita.

Coordenadas: N6.968.218; E362.193

Muestra de magnetita masiva (Anexo 11, imagen A) con apatito subhedral de tamaño 1cm-0.5cm y actinolita. En el corte pulido (Anexo 11, imagen B y C) se observan cristales de apatito en la magnetita masiva, la cual, se encuentra con una martitización moderada y totalmente fragmentada, estos cristales se encuentran relleno los espacios que se encuentran en la magnetita masiva.

Anexo 12.- Muestra D-6-18

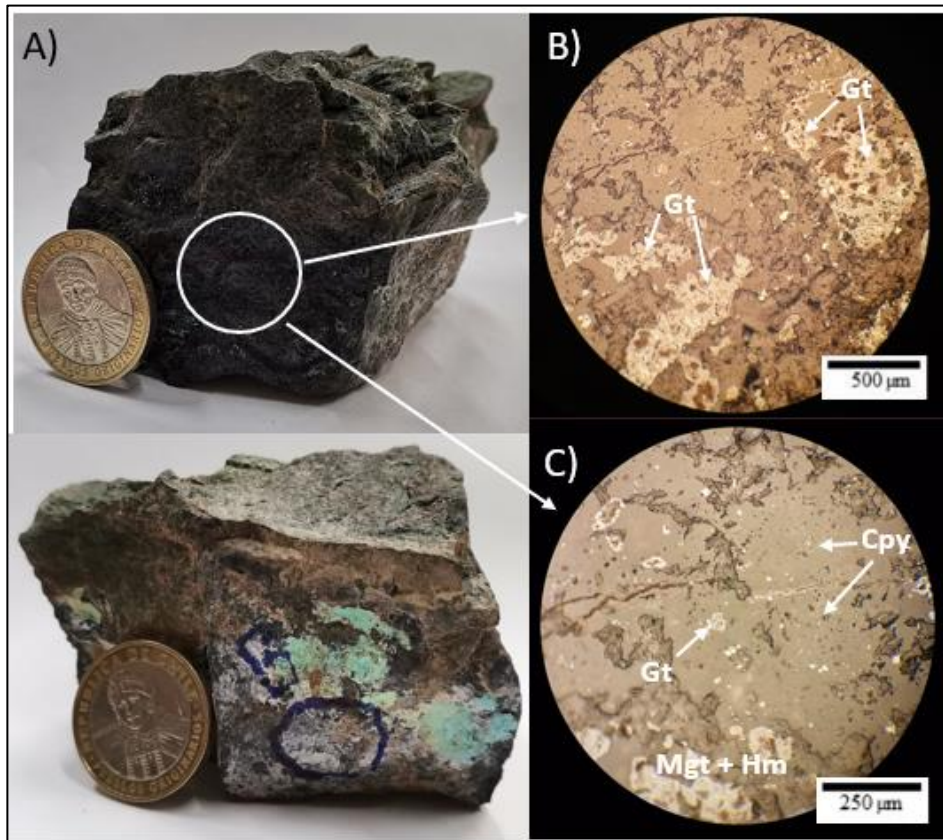


Fotografías de muestra de mano y secciones pulidas. A) Muestra de mano D-6-18. B) corte pulido con aumento 5x en LPP. C) corte pulido con aumento 10x en LPP. Hm: Hematita; Mgt: Magnetita.

Coordenadas: N6.968.205; E362.229

Muestra de magnetita en la cual se observan pequeños cristales alargados de apatito. Se puede observar que la magnetita está siendo martitizada moderadamente y se encuentra fragmentada. En el corte pulido (Anexo 12, imágenes B y C) se pueden identificar cristales de apatito de forma alargada en la magnetita masiva.

Anexo 13.- Muestra P210

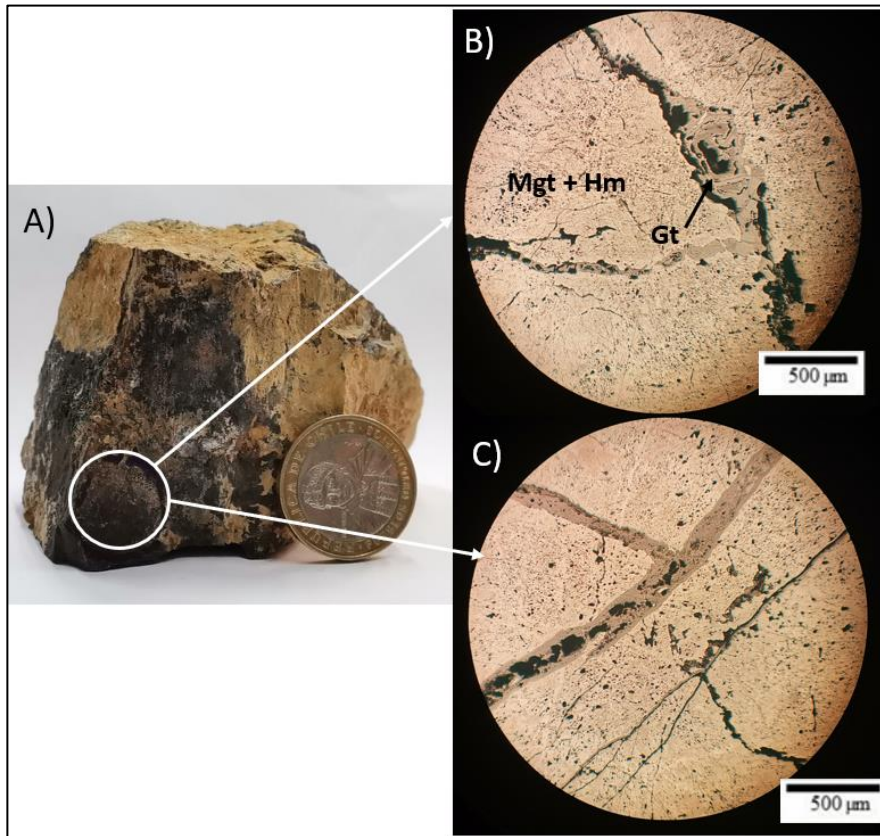


Fotografías de muestra de mano y secciones pulidas. A) Muestra de mano P210. B) corte pulido con aumento 5x en LPP. C) corte pulido con aumento 10x en LPP. Hm: Hematita; Mgt: Magnetita; Gt: Goetita; Cpy: Calcopirita.

Coordenadas: N6.965.863; E362.941

Muestra de roca de caja (diorita) descrita con anterioridad (Fig.4.1), con magnetita diseminada de intensidad moderada y patinas de crisocola (Anexo 13, figura A). En el corte pulido (Anexo 13, figura B y C) se puede observar que la magnetita diseminada se encuentra martitizada, dando lugar a hematita y goethita. Se observan pequeños cristales de calcopirita en la magnetita. Esta muestra presenta vetillas de calcita que se pueden observar en la muestra de mano como un evento más tardío dentro de la roca.

Anexo 14.- Muestra A28



Fotografías de muestra de mano y secciones pulidas. A) Muestra de mano A28. B) y C) corte pulido con aumento 5x en LPP. Hm: Hematita; Mgt: Magnetita; Gt: Goetita.

Coordenadas: N6.968.160; E362.108

Dato estructural: N88W;73SW

Veta de magnetita masiva. La magnetita se encuentra fracturada y presenta una martitización moderada, la muestra presenta vetillas de óxidos de hierro rellenando los espacios entre fracturas. Además, presenta partes con zonación en la goetita (Anexo 14, imagen B).

Anexo tabla 1.-

MUESTRA	NORTE	ESTE	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	S	Cl	K2O	CaO	Ti
A2P60	6966868	363819	1,987	3,562	4,903	0,122	0,049	0,008	0,066	19,237	0
A2P107	6967950	362975	1,564	0,528	2,34	19,89	0	0,254	0	34,945	0,016
A2P66.2 A	6966361	363907	0	0,561	90,589	0,126	0,143	0,079	0,051	0,442	0,003
A2P66.2 B	6966361	363907	1,328	2,152	88,04	0,108	0,15	0,054	0,556	0,413	0,013
A2P86 A	6965788	362640	0	2,592	46,75	0,376	25,887	0,08	0,445	1,752	0
A2P86 B	6965788	362640	0	1,473	59,577	0,066	5,794	0,067	0,153	1,06	0,007
A2P66.1 A	6966361	363907	0	0,521	54,819	0,142	0,193	0,176	0,059	0,444	0,003
A2P66.1 B	6966361	363907	2,313	1,079	9,176	0	2,651	0,17	0	13,057	0,016
A2P66.1 C	6966361	363907	0	0,758	67,181	0,091	0,165	0,088	0,039	0,399	0
A2P66.5	6966361	363907	1,511	1,357	11,636	0,173	0,233	0,056	0	32,65	0
A2P107.1	6967950	362975	3,893	6,109	19,998	0,623	0	0,614	0,583	2,678	0,523
A2P108 A	6967900	362933	1,96	4,006	14,918	0,052	0,684	0,038	0,081	1,995	0,527
A2P108 B	6967900	362933	3,132	7,518	33,48	0,589	0,05	0,001	0,242	11,486	0,181
A2P86.1 A	6965788	362640	1,603	2,472	9,612	0	0	0	0,025	0,788	0
A2P86.1 B	6965788	362640	1,362	2,318	9,21	0,001	0,194	0,026	0,064	1,296	0
A2P69	6966050	363470	0,955	0,529	82,933	0,117	0,164	0,052	0,055	0,552	0,013
A2P46	6968255	363160	3,446	3,513	5,981	0,806	0,067	0,075	0	23,687	0,034
A2P29	6967523	363846	1,276	1,809	27,889	0,047	0,17	0,039	0,122	0,965	0
A2P15	6968151	362191	1,631	2,183	13,93	0,695	0,35	0,069	0	31,907	0,067
A2P15.1	6968151	362191	2,577	4,678	13,729	0,294	2,164	0,103	0,135	3,367	0
D-6P5	6966991	363504	2,009	0,971	15,661	0,083	0,038	0,014	0,002	3,191	0
D-6-18	6968205	362229	3,062	3,271	13,168	0,051	0,086	0,071	0,025	11,553	0,197
D-64 A	6968218	362193	2,948	3,673	19,48	0,061	0,142	0,017	0,112	1,48	0,345
D-64 B	6968218	362193	8,535	3,705	40,488	0,107	0,309	0,028	0,138	6,612	0,309
D-63 A	6968201	362200	8,227	0,568	34,074	0,101	0,143	0,07	0	7,687	0,039
D-63 B	6968201	362200	9,615	1,758	42,001	0,141	0,198	0,029	0,013	8,956	0,064
D-63 C	6968201	362200	6,362	0,677	25,826	0	2,474	0,042	0	6,015	0,14
M10 D-4	6967507	363141	1,882	4,207	16,894	1,257	0,822	0,036	0,215	4,121	0,138
M21 D-4	6967520	363012	2,104	0,971	3,922	0,119	0	0,14	0	19,694	0
M24-D3	6967796	363383	0	0,756	51,153	0,053	0,224	0,02	0,025	0,378	0
MO11 D-4	6967400	363258	2,864	1,222	3,844	0,096	0,015	0,04	0	15,094	0,053
A29	6968211	362167	1,174	1,158	34,722	1,073	0	0,075	0,012	2,323	0,005
A28	6968160	362108	1,654	3,686	21,634	0,52	0,668	0,254	0,148	1,93	0,148
A39	6968022	363024	1,59	1,623	11,663	1,6	4,897	0,21	0	23,224	0,031
A27	6967916	362286	7,259	3,086	43,131	1,784	0,187	0,101	0,69	10,494	0,086
D6-16	6966881	363527	1,716	4,475	28,349	0,922	0	0,025	0,094	2,482	0,133
P210 A	6965863	362941	1,337	3,888	29,421	0,982	0,041	0,028	0,058	1,016	0,057
P210 B	6965863	362941	0	1,261	81,057	0,076	1,194	0,047	0,168	0,464	0,066
D7P1M1	6967899	362308	2,412	1,027	3,689	0	0,088	0,072	0,035	0,629	0,223
Prime PT1	6968169	362095	2,758	5,163	21,324	1,858	0	0,031	0,125	6,5	0,106
D6P12M1	6967047	363911	1,786	0,985	35,239	0,045	0	0,027	0	3,644	0
D7P57	6968145	362178	2,169	2,447	15,584	0	1,548	0,055	0,14	2,032	0,32
A27 A	6967916	362286	2,122	0,850	13,007	0,176	0	0,049	0	2,222	0,053
A27 B	6967916	362286	3,877	0,887	9,701	0,088	0	0,043	0,007	1,634	0,042
A27 C	6967916	362286	2,95	1,988	27,540	2,847	0	0,217	0,071	9,744	0,355
P5-5.3	6966167	362813	2,027	4,382	13,422	0,288	0,565	0,289	0,225	1,895	0,089
P6-3 B	6967886	363351	2,339	0,562	2,732	0,322	17,581	0	0,047	0,187	0
P6-3 B	6967886	363351	1,488	0,754	10,255	0	0,469	0,050	0,088	0,250	0,053
P7-3 A	6967896	363433	2,488	0,546	4,521	0	5,760	0,074	0,085	0,932	0,026
P7-3 B	6967896	363433	0	0,466	41,577	0	1,212	0,042	0,054	0,162	0,019
P8-8.2 A	6968152	362250	1,578	2,83	7,395	0,096	5,705	0,169	0,281	25,101	0,091
P8-8.2 B	6968152	362250	1,741	0,942	0	0,455	0,258	0,048	0	45,524	0,034
A2_P8.2	6967910	363559	1,423	14,467	72,251	0,042	0,980	0,072	1,708	3,496	0,166
A2_P7	6967698	363618	3,916	12,700	42,308	0,063	1,158	0,129	0,824	2,958	0,73
A2_P5.1	6967549	363185	2,306	8,388	47,058	0,128	0,154	0,017	1,046	5,869	0,237
A2_P4	6966168	362812	4,769	4,331	28,940	0,349	0,518	0,039	0,159	13,019	0,449
A2_P5	6967549	363185	1,27	3,217	20,101	0,024	0,146	0,031	1,060	1,551	0,128
A2_P1	6966564	362781	2,932	6,068	35,745	0,650	0,359	0,033	1,153	3,223	0,267
A2_P6	6967518	363155	1,591	7,950	36,154	0,245	0,362	0,037	0,236	18,821	0,483
A2_P8.3	6967910	363559	0	6,660	23,083	0,017	3,699	0,260	0,088	3,930	0
A2_P8.3	6967910	363559	1,435	4,862	15,631	0	1,934	0,230	0,169	1,692	0,031
A2_P81 B	6966676	362712	0	4,529	18,420	0	15,277	0,323	0,012	11,286	0,343

V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Rb	Sr
0	0.028	2.033	52.174	0.519	0.029	0.214	0.002	0	0	0.013	0
0	0	0.007	1.86	0.022	0.002	1.393	0.001	0.003	0	0	0.032
0.007	0.001	0.005	0.192	0	0	0.004	0.001	0	0	0	0
0.003	0.003	0.004	1.361	0	0	0.02	0.001	0.002	0	0.001	0
0.005	0	0.019	18.871	0	0.006	0.205	0.001	0.001	0	0	0
0.022	0	0.038	4.779	0	0.01	9.193	0	0.001	0	0	0
0.001	0	0.128	1.034	0.008	0.005	5.296	0	0.001	0.001	0	0
0.006	0.004	4.253	0.131	1.274	0.056	3.949	0	0	0	0	0.003
0.035	0.01	1.707	8.092	0.141	0.021	1.742	0	0.001	0	0	0
0.013	0	0.689	26.424	0.027	0	1.102	0.002	0	0	0.001	0.002
0.222	0	0.09	35.612	0.237	0.047	0.399	0.004	0	0	0.018	0
0.195	0	0.089	36.396	0.057	0.043	0.237	0.005	0	0	0.019	0
0.147	0	0.206	38.968	0.299	0.005	1.217	0.004	0	0	0.006	0
0.001	0	0.154	39.362	0.012	0.023	2.572	0.001	0	0	0.021	0
0	0	0.158	35.215	0	0.028	0.552	0.003	0	0	0.016	0
0.003	0	0.004	0.821	0	0	0.02	0	0	0	0	0
0.033	0	0.107	48.684	0.366	0.039	0.157	0.004	0	0	0.007	0
0.045	0	0.049	26.107	0	0.015	0.319	0.002	0	0.003	0.006	0
0.086	0	0.381	6.025	0	0	0.049	0.002	0.001	0	0	0.005
0.071	0.034	0.115	46.498	0.338	0.05	0.187	0.007	0	0	0.022	0
0.018	0	0.084	30.467	0	0.052	0.018	0	0	0	0.009	0
0.218	0.138	0.11	51.933	0.525	0.071	0.046	0.004	0	0	0.019	0
0.222	0	0.097	35.992	0.079	0.077	0.046	0.005	0	0	0.018	0
0.085	0	0.094	24.662	0.107	0.029	0.028	0.005	0	0	0.004	0
0	0	0.034	3.026	0	0.006	0.011	0.002	0	0	0	0
0.034	0	0.144	8.027	0	0.008	0.018	0.004	0	0	0	0
0.05	0	0.046	12.022	0	0.021	0.014	0.002	0	0	0.001	0
0.01	0	0.102	37.534	0.107	0.069	0.067	0.006	0	0	0.016	0
0.018	0	0.163	20.488	0	0.014	0.17	0.003	0.004	0	0.002	0
0.032	0	0.054	21.362	0.013	0.004	0.276	0.002	0.006	0.001	0.002	0
0.002	0	0.578	22.123	0	0.015	0.128	0.003	0	0	0.003	0.004
0.012	0	0.068	20.401	0	0.021	0.116	0.006	0	0	0.004	0
0.159	0	0.092	35.645	0.147	0.046	0.241	0.011	0	0	0.017	0
0.016	0	0.016	9.43	0	0.012	0.202	0.001	0.001	0	0	0.019
0.025	0	0.083	7.706	0	0.008	0.019	0.004	0.003	0	0	0.002
0.156	0	0.105	38.603	0.297	0.096	0.398	0.004	0	0	0.017	0
0.036	0.024	3.579	23.726	0.551	0.059	21.739	0	0.046	0	0.004	0
0.011	0.011	2.324	5.595	0.01	0.01	0.388	0.002	0.028	0	0	0.008
0.087	0	0.042	14.396	0	0.073	0.061	0.006	0	0	0.008	0
0.127	0	0.104	33.491	0.118	0.044	0.06	0.006	0	0	0.009	0
0	0	0.094	20.182	0	0.019	0.087	0.003	0	0	0.003	0
0.172	0	0.096	33.935	0	0.043	0.042	0.005	0	0	0.013	0
0.057	0	0.040	13.283	0	0.064	0.024	0.009	0	0	0	0
0.075	0	0.067	20.687	0	0.053	0.019	0.005	0	0	0.008	0
0.095	0	0.079	16.867	0	0.018	0.019	0.005	0.003	0	0.002	0.012
0.05	0	0.110	46.688	0.356	0.044	0.192	0.007	0	0	0.026	0
0	0	0.013	9.314	0.034	0.434	100	0	0	0.010	0	0
0.008	0	0.009	0.640	0.011	0.325	85.700	0	0	0	0	0
0	0	0.007	1.559	0	0.279	73.018	0.068	0	0	0	0
0.013	0	0	0.325	0	0.043	21.086	0	0	0	0	0
0.004	0	0.522	17.914	0	0	0.300	0.069	0.002	0	0	0.010
0.016	0	0.658	4.330	0	0	0.135	0.001	0.004	0	0	0.016
0.006	0	0.012	1.280	0	0.001	0.002	0	0	0	0.003	0.010
0.014	0	0.021	5.195	0.003	0.002	0.048	0	0.001	0	0.009	0.035
0.014	0	0.083	5.080	0	0.001	0.017	0	0.002	0	0.009	0.051
0.024	0	0.069	4.845	0	0.003	0.011	0	0	0	0.002	0.045
0.011	0	0.056	2.299	0	0	0.026	0	0	0	0.011	0.039
0.012	0	0.054	3.125	0	0.001	0.013	0	0	0	0.009	0.054
0.015	0	0.022	6.597	0.006	0.002	0.013	0	0	0	0.002	0.028
0.034	0	0.059	25.623	0	0.015	0.074	0.003	0	0	0.003	0.001
0.022	0	0.085	34.222	0	0.055	0.129	0.003	0	0	0.016	0
0.003	0	0.015	10.143	0	0.004	0.013	0.001	0	0.002	0	0.008

Y	Zr	Nb	Mo	Rh	Pd	Ag	Cd	Sn	Sb	Ba	La
0	0,002	0	0	0	0	0	0,003	0	0	0	0
0,012	0,003	0,001	0,003	0	0	0	0	0	0	0,034	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,001	0	0,005	0	0	0	0,003	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,001	0	0	0	0	0	0,001	0	0	0	0	0
0	0	0	0,003	0	0	0	0	0,018	0	0	0
0	0	0	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0
0,003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0
0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0,005	0	0	0	0
0,003	0	0	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,005	0	0	0	0,001	0	0	0	0
0	0	0	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0
0,003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,01	0	0	0	0,002	0	0	0	0
0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0,001	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0,005	0	0	0	0
0,003	0	0	0	0	0	0	0,002	0	0	0	0
0,006	0,002	0	0	0	0	0	0	0,014	0	0	0
0,005	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,007	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0	0	0
0,008	0,002	0	0	0	0	0	0,005	0	0	0	0
0,002	0,002	0	0,042	0	0	0	0,001	0	0,11	0	0
0	0	0	0,013	0	0	0	0	0	0	0	0
0,003	0,002	0	0,008	0	0	0	0,005	0	0	0	0
0,002	0	0	0	0	0	0	0,007	0	0	0	0
0	0,002	0	0	0	0	0	0,005	0	0	0	0
0,007	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,009	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,004	0,002	0	0,043	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,003	0	0,015	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,009	0	0	0	0	0
0,013	0,002	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,002	0	0	0,012	0	0	0	0	0	0,052	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,081
0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,004	0	0	0
0,011	0,003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,027
0	0,003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,006	0	0	0	0	0	0,005	0	0	0	0
0	0,004	0	0	0	0	0	0,001	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0,055	0
0,001	0,002	0	0,002	0	0	0	0	0	0	0,073	0
0	0,008	0	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0
0,002	0,004	0	0,002	0	0	0	0	0,009	0	0,069	0
0,002	0,002	0	0,001	0	0	0	0	0,003	0	0,102	0
0,004	0	0	0	0	0	0	0	0,008	0	0	0
0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,128	0
0,003	0	0	0	0	0	0	0,003	0,011	0	0,081	0
0,004	0,009	0,002	0,002	0	0	0	0	0,008	0	0	0
0	0,002	0	0,003	0	0	0	0,002	0	0	0	0
0	0	0	0,005	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,008	0	0,003	0	0	0	0	0	0	0	0

Ce	Hf	Ta	W	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U
0	0	0	0	0	0	0,008	0,005	0,031	0,033	0	0
0	0,013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,008	0,005	0,031	0,033	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,006	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,007	0
0	0,079	0	0	0	0	0	0	0	0	0,005	0
0	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,002	0	0	0	0	0,006	0,004	0,005	0,005	0	0
0	0	0	0	0	0,001	0	0	0,057	0,044	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,06	0,04	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,022	0,02	0,007	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,075	0,058	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,062	0,043	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,012	0,011	0,023	0,025	0	0
0	0,002	0	0	0	0	0	0	0,025	0,013	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,068	0,058	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,038	0,024	0	0
0	0	0,001	0	0	0	0,005	0,005	0,045	0,051	0	0
0	0	0,003	0	0	0	0	0	0,065	0,042	0	0
0	0	0,003	0	0	0	0	0	0,017	0,01	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,053	0,037	0	0
0	0,002	0	0	0	0	0	0,003	0,012	0,007	0	0
0	0,002	0,001	0	0	0	0	0	0,012	0,007	0	0
0	0	0	0	0	0,002	0,004	0,004	0,012	0,008	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,021	0,006	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,058	0,042	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,052	0,042	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,021	0,01	0,011	0,006
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,001	0	0	0	0	0	0	0,03	0,012	0	0
0	0	0,003	0	0	0	0	0	0,035	0,021	0	0
0	0	0,002	0	0	0	0	0	0,021	0,011	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,052	0,03	0	0
0	0	0,004	0	0	0	0	0	0,019	0,009	0	0
0	0	0,003	0	0	0	0	0	0,038	0,02	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,007	0,009	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,078	0,066	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,591	0,072
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,473	0,054
0	0,067	0	0	0	0	0	0	0	0	0,242	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,057	0
0	0	0	0	0,001	0	0	0,004	0,003	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,017	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,002	0,007	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,001	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0
0	0	0,008	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,011	0,005	0	0
0	0	0	0	0	0,003	0	0	0,052	0,035	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0	0	0