



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

MODELO GEOLÓGICO Y CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DEL YACIMIENTO
DE HIERRO SAN GABRIEL, COMUNA DE TALTAL; II REGIÓN, CHILE.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

ESTEBAN GABRIEL JIMÉNEZ OLGUÍN

PROFESOR GUÍA:
BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

MIEMBRO DE LA COMISIÓN:
VICTOR MAKSAEV JURCHUC
KATJA DECKART

SANTIAGO DE CHILE

2014

RESUMEN

El Yacimiento de hierro San Gabriel se encuentra ubicado en la Cordillera de la Costa del Norte de Chile, en el límite entre las regiones de Antofagasta y Atacama. Está en el extremo septentrional de la Franja Ferrífera de Chile y 15 km al este de la traza principal del Sistema de Falla de Atacama. Los recursos del Yacimiento San Gabriel se han estimado en 80 Mt con una ley de corte de 15% de Fe Total.

El objetivo principal de este trabajo fue confeccionar un modelo geológico del depósito, además de caracterizar mineralógicamente las distintas unidades propuestas en el modelo y establecer asociaciones de minerales metamórficos/metasomáticos. Esto se realizó a través del mapeo de sondajes y descripción de secciones pulidas y transparentes. Además, se incluye una breve caracterización geoquímica de las unidades geológicas definidas, mediante el análisis ICP-MS e ICP-AES.

El Yacimiento San Gabriel consiste principalmente en un cuerpo irregular de brecha de matriz de magnetita, el cual está hospedado en una secuencia volcánica en rocas pertenecientes a la Fm. Aeropuerto, de edad Cretácico Inferior. Estas rocas son intruídas por un extenso batolito de edad Albiana (~110-100 Ma). En torno al cuerpo de brecha se desarrollan halos metasomáticos, donde se han identificado las siguientes asociaciones de minerales: feldespato-diópsido, escapolita-diópsido, actinolita-epidota, epidota-sericita, clorita-sericita y ceolita-calcita. La mena de este yacimiento la constituye exclusivamente la magnetita, mineral que se presenta como: lentes (en forma maciza), matriz-cemento de brecha, relleno de vetillas y disseminación en la roca huésped.

La geoquímica de las rocas de caja alteradas muestra que existe un considerable aporte metasomático de Ca-Mg-Y-Ga-Cr-HREE y en menor medida de P y Th. Además, junto a la mineralización de magnetita existe una contribución de Ni-V-Co-Sn-Ge.

Se concluye que es posible clasificar el Yacimiento San Gabriel como un depósito magnetita-apatito del tipo Kiruna, en base a las similitudes en características morfológicas, mineralógicas, texturales y geoquímicas respecto a otros depósitos del mismo tipo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que contribuyeron al desarrollo de este trabajo y, en especial, a aquellas personas que han influido en mi vida.

No existen palabras para demostrar lo agradecido que estoy con mi familia. Mis padres lo han dado todo para que yo tenga las herramientas y el amor que se necesita para aprovechar esta vida al máximo. Gracias infinitas, los amo mucho.

Mis hermanos siempre han estado apoyándome durante toda mi vida, siempre cuidándome las espaldas. Sin duda que son las personas que más han influido en mi vida. Todas mis virtudes son un fiel reflejo de ellos y mis padres.

Gracias a mis abuelitos: Isidora y Julio. Siempre me hicieron sentir que yo era capaz de lograr cualquier cosa. Los extraño demasiado.

No hubiera sido posible haber realizado este trabajo sin el apoyo y la ayuda de mi amor, Rocío Vargas. Eres la persona más bella de este mundo. Tu amor incondicional me ha dado las energías para seguir avanzando en las etapas de la vida. Gracias por todo mi amor.

Gracias a las personas de SBX que me ayudaron durante la memoria y en el inicio de mi vida laboral. Entre ellas destaco a Luis Barrera y Sergio Díaz, quienes siempre estuvieron dispuestos a enseñarme y ayudarme en lo que necesitase.

Agradezco inmensamente a los geólogos Martín Pérez V. y a Jose Luis Fuenzalida, quienes han sido mis sensei de la geología, además de ser unas grandes personas. Siempre llevaré sus enseñanzas.

Por último, gracias a la Blanquita y al Prof. Brian por haber tenido tanta paciencia durante todo este largo tiempo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	II
AGRADECIMIENTOS	III
TABLA DE CONTENIDO.....	IV
INDICE DE FIGURAS	VI
INDICE DE TABLAS	VIII
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. ANTECEDENTES GENERALES	9
1.2. OBJETIVOS	10
1.2.1. <i>Objetivo general</i>	10
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	11
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	11
1.4. METODOLOGÍA	12
1.5. UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO	14
2. MARCO GEOLÓGICO	16
2.1. MARCO METALOGÉNICO	16
2.2. GEOLOGÍA REGIONAL	18
2.2.1. ROCAS ESTRATIFICADAS	20
2.2.1.1. <i>Formación La Negra (Jln)</i>	20
2.2.1.2. <i>Formación Aeropuerto (Ka)</i>	21
2.2.2. UNIDADES INTRUSIVAS	23
2.2.2.1. <i>Grupo Plutónico Cerro del Pingo (Kgcp)</i>	23
2.2.3. ESTRUCTURAS	23
2.2.3.1. <i>Sistema de Falla de Atacama</i>	23
3. RESULTADOS.....	26
3.1. GEOLOGÍA LOCAL	26
3.1.1. <i>Unidades Geológicas</i>	26
3.1.2. <i>Modelo Geológico</i>	31
3.1.3. <i>Metamorfismo/Metasomatismo</i>	35

3.1.4. Mineralización.....	35
3.1.5. Estructuras	38
3.2. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DEL YACIMIENTO	39
3.2.1. Descripción de Sondajes.....	40
3.2.2. Petrografía y Calcografía.....	46
3.2.3. Alteración/Metamorfismo.....	47
3.2.4. Mineralización.....	57
3.2.5. Análisis SEM	60
3.2.6. Mineralogía y texturas según unidades geológicas.....	66
3.3. GEOQUÍMICA.....	68
3.3.1. Control de Calidad.....	72
3.3.2. Análisis Estadístico.....	76
3.3.3. Geoquímica de las unidades geológicas.....	79
4. DISCUSIONES	93
5. CONCLUSIONES	106
6. BIBLIOGRAFÍA	110
ANEXO A	114
ANEXO B	129
ANEXO C	130
ANEXO D	133
ANEXO E	147
ANEXO F.....	153

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Vías de acceso al Yacimiento San Gabriel..	15
Figura 1-2. Imagen satelital del Yacimiento San Gabriel.....	15
Figura 2-1. Depósitos de óxidos de Fe-apatito del norte de Chile.....	17
Figura 2-2. Mapa geológico regional de la zona de estudio..	19
Figura 2-3. Segmentación del Sistema de Falla de Atacama.....	24
Figura 3-1. Mapa geológico de la zona de estudio.....	27
Figura 3-2. Fotografías de testigos de sondaje representando a las distintas unidades geológicas.	30
Figura 3-3. Modelo geológico, sección SG_6.....	32
Figura 3-4. Modelo geológico, sección SG_6A.	33
Figura 3-5. Modelo geológico, sección SG_7.....	34
Figura 3-6. Fotografías de ejemplo de los estilos de mineralización.	37
Figura 3-7. Magnetometría de la zona reducida al polo,	39
Figura 3-8. Distribución de las muestras estudiadas mediante microscopía óptica. Sección SG_6	43
Figura 3-9. . Distribución de las muestras estudiadas mediante microscopía óptica. Sección SG_6A.....	44
Figura 3-10. . Distribución de las muestras estudiadas mediante microscopía óptica. Sección SG_7.	45
Figura 3-11. Fotomicrografías en luz transmitida (scp-cpx)	50
Figura 3-12. Fotomicrografías en luz transmitida (act-ep, ep-ser y chl-ser).	52
Figura 3-13. Zonas de alteración y modelo geológico; sección SG_6.....	54
Figura 3-14. Zonas de alteración y modelo geológico; sección SG_6A.	55
Figura 3-15. Zonas de alteración y modelo geológico; sección SG_7.....	56
Figura 3-16. Imágenes que ejemplifican la mineralización.....	58
Figura 3-17. Imágenes que ejemplifican los tres tipos de vetillas principales	61
Figura 3-18. Diagrama de clasificación de clinopiroxenos.	64
Figura 3-19. Ubicación de las muestras tomadas en el perfil SG06.....	69
Figura 3-20. Ubicación de las muestras tomadas en el perfil SG06a.....	70
Figura 3-21. Ubicación de las muestras tomadas en el perfil SG07.....	71

Figura 3-22. Gráfico de las muestras OREAS 90.....	75
Figura 3-23. Gráfico de probabilidad lognormal de Ag.	75
Figura 3-24. Gráficos de probabilidad lognormal de: Fe, Co, Ni y V.	79
Figura 3-25. Diagramas de caja de los elementos mayores analizados, clasificados según unidad geológica.	80
Figura 3-26. Diagrama spider de elementos menores y trazas	82
Figura 3-27. Gráfico de factores de correlaciones del Fe, en la Brecha de Magnetita. ...	83
Figura 3-28. Diagrama spider de tierras raras.....	84
Figura 3-29. Gráfico de dispersión Al vs Ca.....	86
Figura 3-30. Factor de correlación de las tierras raras con respecto al hierro.....	88
Figura 3-31. Gráficos de dispersión de los elementos del grupo I contra el Fe.....	89
Figura 3-32. Diagramas de caja de algunos elementos del grupo II.	90
Figura 3-33. Diagramas de caja de algunos elementos del grupo III.	91
Figura 3-34. Diagramas de caja de algunos elementos del grupo IV.	91
Figura 3-35. Diagramas de caja de algunos elementos del grupo V.	92
Figura 4-1. Paragénesis de minerales secundarios del Yacimiento San Gabriel.	93
Figura 4-2. Diagramas de caja de variables sintéticas del grupo I.	98
Figura 4-3. Diagramas de caja de variables sintéticas del grupo II.	99
Figura 4-4. Diagramas de caja de variables sintéticas del grupo III.	99
Figura 4-5. Diagramas de caja de variables sintéticas del grupo IV.....	100
Figura 4-6. Sección geológica SG_06 junto a los valores de fósforo de todas las muestras según la cota.	101
Figura 4-7. Diagramas de clasificación de rocas ígneas.	103

INDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Largo, inclinación y azimut de los sondajes estudiados.	40
Tabla 3-2. Minerales identificados, junto a sus abreviaturas.	46
Tabla 3-3. Resumen de la petrografía de secciones transparentes.	48
Tabla 3-4. Asociaciones de minerales metamórficos/metasomáticos.	57
Tabla 3-5. Análisis SEM correspondiente a escapolita.	62
Tabla 3-6. Análisis SEM correspondiente a feldespatos.	63
Tabla 3-7. Análisis SEM correspondiente a clinopiroxenos.	64
Tabla 3-8. Análisis SEM correspondiente actinolitas.	65
Tabla 3-9. Evaluación de la precisión.	72
Tabla 3-10. Estadísticas básicas, incluyendo todas las muestras.	77
Tabla 3-11. Matriz de correlación de elementos mayores, considerando todos los análisis.	86
Tabla 3-12. Matriz de correlación de elementos mayores, sin considerar las muestras pertenecientes a la unidad de Brecha de Matriz de magnetita (BxM).	86
Tabla 3-13. Pares de correlaciones de elementos, clasificados por intervalos.	87
Tabla 5-1. Asociaciones de minerales metamórficos/metasomáticos.	106

1. INTRODUCCIÓN

El Yacimiento San Gabriel se ubica en la Comuna de Taltal, Región de Antofagasta. Durante los años 2007 a 2011 la empresa Hierro Taltal Sociedad Contractual Minera ha explorado intensamente el área, dando como resultado el descubrimiento del distrito minero de hierro San Gabriel, en el cual se han reconocido los siguientes cuerpos mineralizados: San Gabriel, Esperanza, Antonia y Vetarrones. Actualmente el Yacimiento San Gabriel se encuentra en evaluación para una eventual explotación.

Este yacimiento, al igual que otros en la zona, se encuentra al este de la Zona de Falla de Atacama, en el contacto entre rocas meta-andesíticas e intrusivas, donde se puede identificar un halo de metasomatismo en las meta-andesitas producto de la intrusión. Este estudio se enfoca en la caracterización de la alteración y/o metamorfismo y mineralización del yacimiento para la elaboración de un modelo geológico.

1.1. Antecedentes generales

En el norte de Chile se presenta una serie de franjas metalogénicas, de orientación nortesur, las cuales están asociadas a distintas épocas metalogénicas. Dentro de estas se encuentra la Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa, situada entre las latitudes 26° y 32°S, extendiéndose por más de 600 km y que coincide con una franja de intrusivos del Albiano (~110-100 Ma; Cretácico Inferior alto) y con el extremo sur de la Zona de Falla de Atacama (Maksaev et. al, 2007). Esta franja alberga los yacimientos de hierro más grandes de Chile. Inmediatamente al norte de esta franja se encuentra ubicado el Yacimiento San Gabriel, dentro de la Zona de Falla de Atacama, a unos 15 km al este de la falla principal.

Sociedad Contractual Minera Hierro Taltal (Hierro Taltal SCM), ha realizado numerosos trabajos de exploración en las propiedades que conforman el Yacimiento San Gabriel, ubicadas en el área de Barreal Seco, en el límite entre las regiones Segunda de Antofagasta y Tercera de Atacama.

En la zona aflora una secuencia de rocas volcánicas (lavas, tobas y brechas andesíticas) con intercalaciones de rocas sedimentarias, con manteos suaves al este, de edad Jurásica Superior a Cretácico Inferior (Olcay y Pérez, 2008). Esta secuencia está en contacto por falla NS con andesitas Neocomianas, estructura que se interpreta como una falla mayor que separa rocas volcánicas andesíticas de la cuenca de tras-arco del Neocomiano, de rocas volcanosedimentarias del margen de tras-arco (Ulricksen, 1973). Estas secuencias volcánicas han sido intruídas por un batolito, formado por facies dioríticas, granodioritas y monzonitas, elongado en dirección NS. En torno a estos, en la secuencia volcánica sedimentaria, se han desarrollado rocas metamórficas de contacto y zonas con fuerte fracturamiento (SBX Consultores, 2008). En la zona hay evidencias de moderado a débil metasomatismo, caracterizado por diseminación de magnetita, escapolita, actinolita, epidota, clorita, hematita, apatito y menor ocurrencia de skarn (Ulricksen, 1973).

A la fecha se han ejecutado aproximadamente alrededor de 14.000 m de sondajes, principalmente de aire reverso, los cuales han permitido realizar estudios destinados a caracterizar la geología de los diferentes cuerpos mineralizados (principalmente con mineralización de magnetita), tomando en consideración: litología, estructuras, metamorfismo/alteración, leyes de Fe total por volumetría, determinación de Fe Magnético por concentración magnética, densidades e impurezas, entre otros parámetros. Los resultados, si bien han permitido una evaluación parcial de los recursos geológicos comprometidos, no han permitido desarrollar con un modelo geológico integral que contemple las diferentes variables que conforman el yacimiento ni tampoco una caracterización mineral de los distintos tipos de rocas encontradas en el yacimiento, lo que en el futuro permitiría dar respuestas a eventuales problemas metalúrgicos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es elaborar un modelo geológico integral del Yacimiento San Gabriel, además de caracterizar mineralógicamente las unidades geológicas definidas.

1.2.2. Objetivos específicos

- Agrupar las distintas litologías en unidades geológicas mediante el mapeo geológico de sondajes, para facilitar la interpretación del yacimiento.
- Elaborar 3 secciones geológicas para posteriormente realizar una interpretación geológica del yacimiento.
- Estudiar y caracterizar la mineralogía de cada asociación litológica, mediante microscopía óptica de secciones delgadas y pulidas.
- Determinar asociaciones de alteración y/o metamorfismo.
- Realizar una breve caracterización geoquímica de las unidades geológicas e identificar los elementos que se asocian al proceso de formación del yacimiento.
- Estudiar la relación entre metamorfismo/metasomatismo y mineralización.
- Discutir acerca del tipo de depósito y sus semejanzas con otros yacimientos de magnetita.

1.3. Hipótesis de trabajo

El Yacimiento San Gabriel es un depósito de hierro del tipo magnetita-apatito, en donde la mena es principalmente magnetita, originado a partir de procesos magmáticos-hidrotermales, que se gatillan por la intrusión de un magma y/o soluciones hidrotermales ricas en Fe (además de la conjunción de otros factores geológicos), generando halos de metamorfismo y/o zonas de alteración hidrotermal.

1.4. Metodología

A continuación se expone la metodología empleada en este trabajo para el desarrollo de los objetivos específicos:

- *Agrupar las distintas litologías en unidades geológicas, para facilitar la interpretación del yacimiento.*

Se seleccionaron tres secciones consecutivas, de orientación perpendicular a N60°W, espaciadas cada 50 metros. En estas se realizó un mapeo geológico a detalle de todos los sondajes (1 de diamantina y 9 de aire reverso) pertenecientes a dichas secciones, haciendo énfasis en la litología, alteración hidrotermal/metamorfismo y mineralización. A partir del mapeo geológico, se realizó una agrupación de las litologías en base a sus similitudes texturales, mineralógicas y de mineralización.

- *Elaborar 3 secciones geológicas para posteriormente realizar una interpretación geológica del yacimiento.*

Se confeccionó una base de datos de los sondajes mapeados, incluyendo collares, desviaciones y unidades geológicas, para posteriormente ingresarla al software MapInfo 10.5, en donde se generó e interpretó el modelo geológico del yacimiento.

- *Estudiar y caracterizar la mineralogía de cada asociación litológica, mediante microscopía óptica de secciones delgadas y pulidas.*

Una vez definidas las unidades geológicas (UGs), se escogieron muestras de sondaje representativas de cada una de éstas. Se recolectaron un total de 42 muestras, de las cuales 21 provienen de sondajes de diamantina, en donde se seleccionó un tramo de 8 cm aproximadamente, representativo de un tramo de 2 metros, correspondiente al soporte de muestra para el análisis geoquímico. Las 21 muestras restantes se obtuvieron de sondajes de aire reverso, de las cuales se realizó compósitos de 2 metros de longitud

y cuarteos sucesivos hasta llegar a una muestra de 0.5 kg, para posteriormente confeccionar una briqueta.

El estudio de microscopía óptica se enfocó en la litología y alteración/metamorfismo, con énfasis en las asociaciones de minerales secundarios y la temporalidad de los eventos interpretados en las muestras.

Además, se realizaron 12 análisis SEM en los laboratorios del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, para identificar ciertas especies minerales.

- *Determinar asociaciones de alteración y/o metamorfismo*

A partir de las descripciones microscópicas se determinaron las asociaciones minerales que se encuentran en equilibrio, así como también las relaciones texturales que puedan presentar, para posteriormente integrar esta información con las unidades geológicas definidas.

- *Realizar una breve caracterización geoquímica de las unidades geológicas.*

Posterior al mapeo geológico de los sondajes seleccionados para este estudio, se procedió a seleccionar muestras representativas de cada UG, procedentes de dichos testigos de sondajes. Se seleccionaron un total de 100 muestras, cada una de ellas representa un tramo de 2 metros de largo de testigos, las cuales se obtuvieron chancando y realizando cuarteos sucesivos, hasta llegar a 0.5 kg de muestra.

El análisis de las muestras se realizó en los laboratorios *ALS CHEMEX*, mediante el procedimiento ME-MS61r, que consiste en una técnica combinada entre ICP-MS y ICP-AES (47 elementos + lantánidos) mediante una digestión de cuatro ácidos (HF, HNO₃, HClO₄, HCl).

Una vez obtenidos los resultados del análisis geoquímico de las muestras se procedió a realizar el control de calidad de estos resultados. Posteriormente se elaboró un estudio exploratorio de los datos, consistente en un análisis de la base de datos y la estadística

univariable por litología. Finalmente, se contrastaron las concentraciones de los elementos mayores, menores y tierras raras, entre las distintas unidades geológicas.

- *Estudiar la relación entre metamorfismo de contacto/alteración hidrotermal y mineralización.*

A través de la integración de la información petrológica, geoquímica y estructural del modelo, se discutió acerca de los posibles controles que puedan ejercer las distintas variables en la mineralización de este yacimiento.

- *Discutir acerca del tipo de depósito y sus semejanzas con otros yacimientos de magnetita.*

A partir de los resultados de los pasos anteriores, se analizó a fondo las mineralogías, texturas, estructuras, geoquímica y litologías, que permitan compararlos con otros depósitos de magnetita de Chile y el mundo.

1.5. Ubicación y vías de acceso

El Yacimiento San Gabriel se encuentra ubicado en el área de Barreal Seco, a 30 km al suroeste de Altamira (Figura 1-1), en el límite entre las regiones Segunda y Tercera, específicamente a 70 km en línea recta al noreste del puerto de Chañaral y a 75 km al sureste de Taltal, en la Región de Antofagasta. Su acceso desde Chañaral se realiza por la Carretera Panamericana hacia el norte hasta el cruce de Altamira (60 km); desde este punto se toma la ruta B-955 en dirección este, luego de 8 km se toma la ruta B-965, la cual llega hasta el yacimiento. Se encuentra limitado por las coordenadas UTM 3.875.00 E, 7.132.600 N y 389000 E, 7.131.300 N (Figura 1-2), a 1050 m de altura.



Figura 1-1. Vías de acceso al Yacimiento San Gabriel. Imagen Satelital modificada de Google Earth.

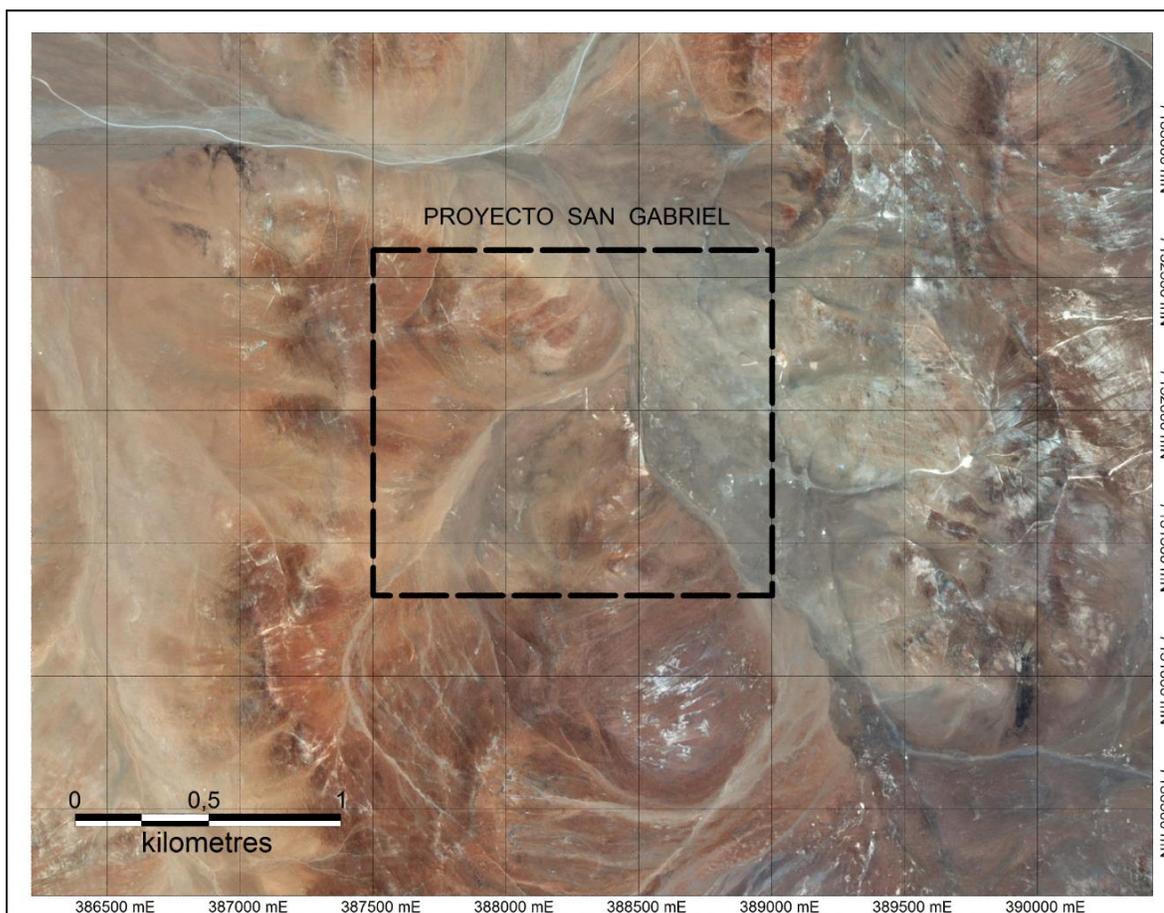


Figura 1-2. Imagen satelital del Yacimiento San Gabriel

2. MARCO GEOLÓGICO

El margen de Sudamérica ha sido, la mayor parte de su historia, un margen de placa activo, caracterizado por la subducción de la placa oceánica bajo la placa continental, las cuales actualmente corresponden a las placas Sudamericana y Nazca respectivamente. La evolución tectonoestratigráfica de este margen ha sido agrupada en distintos ciclos tectónicos (Charrier et al, 2007), dentro de los cuales el Ciclo Andino es el que tiene mayor injerencia en la zona.

El Ciclo Andino comenzó en el Jurásico Inferior, una vez finalizado el Ciclo Pre-Andino, este último caracterizado por el cese temporal de la subducción a lo largo del margen de Gondwana. El Ciclo Andino refleja la evolución tectónica del margen occidental de Gondwana, representado por la reanudación de la subducción y la formación del arco magmático Andino, actividad que ha continuado casi ininterrumpidamente hasta el presente. Durante la temprana evolución de este ciclo (Jurásico Inferior – Cretácico Superior) en el norte, centro y centro-sur de Chile (al norte de los 39°S) se desarrolló un arco magmático paralelo al margen occidental de Gondwana junto con una cuenca de trasarco en su lado oriental. Por el contrario, la evolución posterior (Cretácico Superior a Cenozoico) está caracterizado por el traslado gradual del arco magmático hacia el este, y por el desarrollo de una cuenca de antepaís en el lado este del arco (Charrier et al, 2007).

La subducción ha originado un orógeno no-colisional producto de una deformación compresiva y un engrosamiento cortical asociado a esta. Además, junto con la migración del frente magmático, también a lo largo del tiempo migró el frente de deformación hacia el interior del continente (Charrier et al, 2007). La cadena montañosa formada por esta deformación tectónica se conoce con el nombre de Cordillera de los Andes.

2.1. Marco metalogénico

Una característica distintiva de los Andes de Chile es la abundancia de rocas ígneas calcoalcalinas, y los depósitos metálicos presentes son principalmente de origen

hidrotermal-magmático, con una relación inherente y temporal con la actividad magmática asociada (Maksaev et al, 2007).

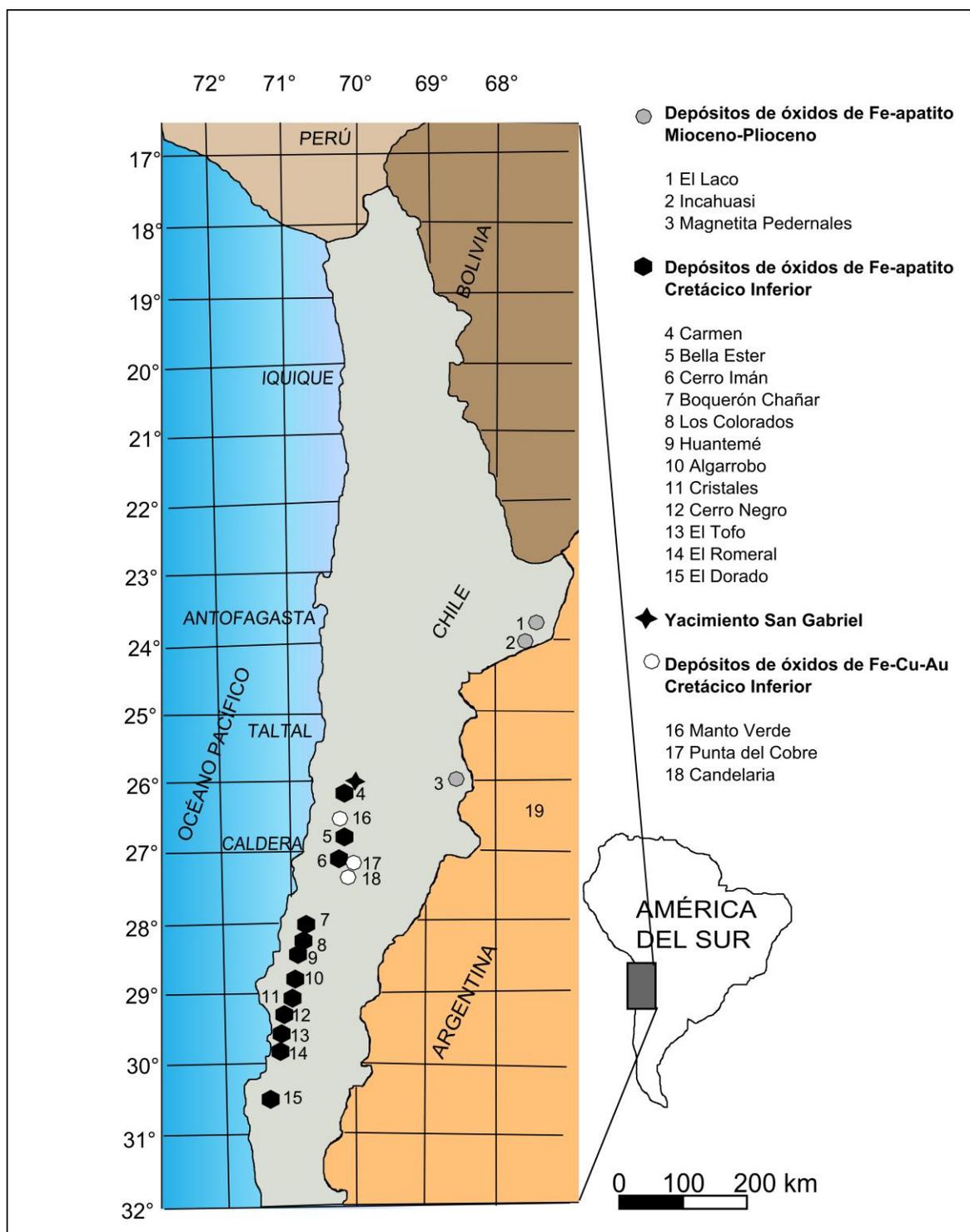


Figura 2-1. Depósitos de óxidos de Fe-apatito del norte de Chile. Modificado de Maksaev et al (2007).

Varios autores definen Provincias Metalogénicas (Oyarzún, 1985) o Franjas Metalogénicas (Boric et al., 1990; Sillitoe, 1976) que corresponden a períodos discretos de tiempo geológico en que se generaron magmas con mayor capacidad de desarrollar depósitos metálicos de origen hidrotermal, debido a la concurrencia de un conjunto de condiciones geológicas favorables. Dentro de estas provincias se encuentra la Franja Ferrífera Chilena (Figura 2-1), la que comprende a más de 40 depósitos y prospectos de óxidos de Fe-apatito (pobres en Ti), extendiéndose por más de 600 km a lo largo de la Cordillera de la Costa desde los 25°30' a 32°00'S (Ménard, 1995; Espinoza, 1990). Estos depósitos se encuentran en el dominio más meridional del Sistema de Falla de Atacama. Los principales cuerpos con mineralización de hierro son irregulares, formados por magnetita maciza con menor especularita y trazas de pirita y calcopirita. Las rocas de caja son en su mayoría meta-andesitas, las cuales se encuentran adyacentes (o como *roof pendants*) a intrusivos de composición diorítica a granodiorítica de edad c. 100-120 Ma (K-Ar). Sin embargo, también existen vetas de magnetita maciza emplazadas en rocas intrusivas, en particular dioritas. Los cuerpos de mena económicamente relevantes son de 100 a 1000 m de largo, hasta 200 m de ancho y de hasta 650 m de extensión vertical, aunque también son comunes las vetas de magnetita y cuerpos lenticulares de menor tamaño (Maksaev et al, 2007).

2.2. Geología regional

Este subcapítulo se enfoca en la parte central (Cordillera de la Costa) de la Carta Geológica de Chile 1:250.000 (Figura 2-2), en las Hojas Taltal y Chañaral, descritas por Naranjo y Puig (1984). En la zona de estudio solo se han reconocido rocas pertenecientes a la Fm. Aeropuerto y al Grupo Plutónico Cerro del Pingo.

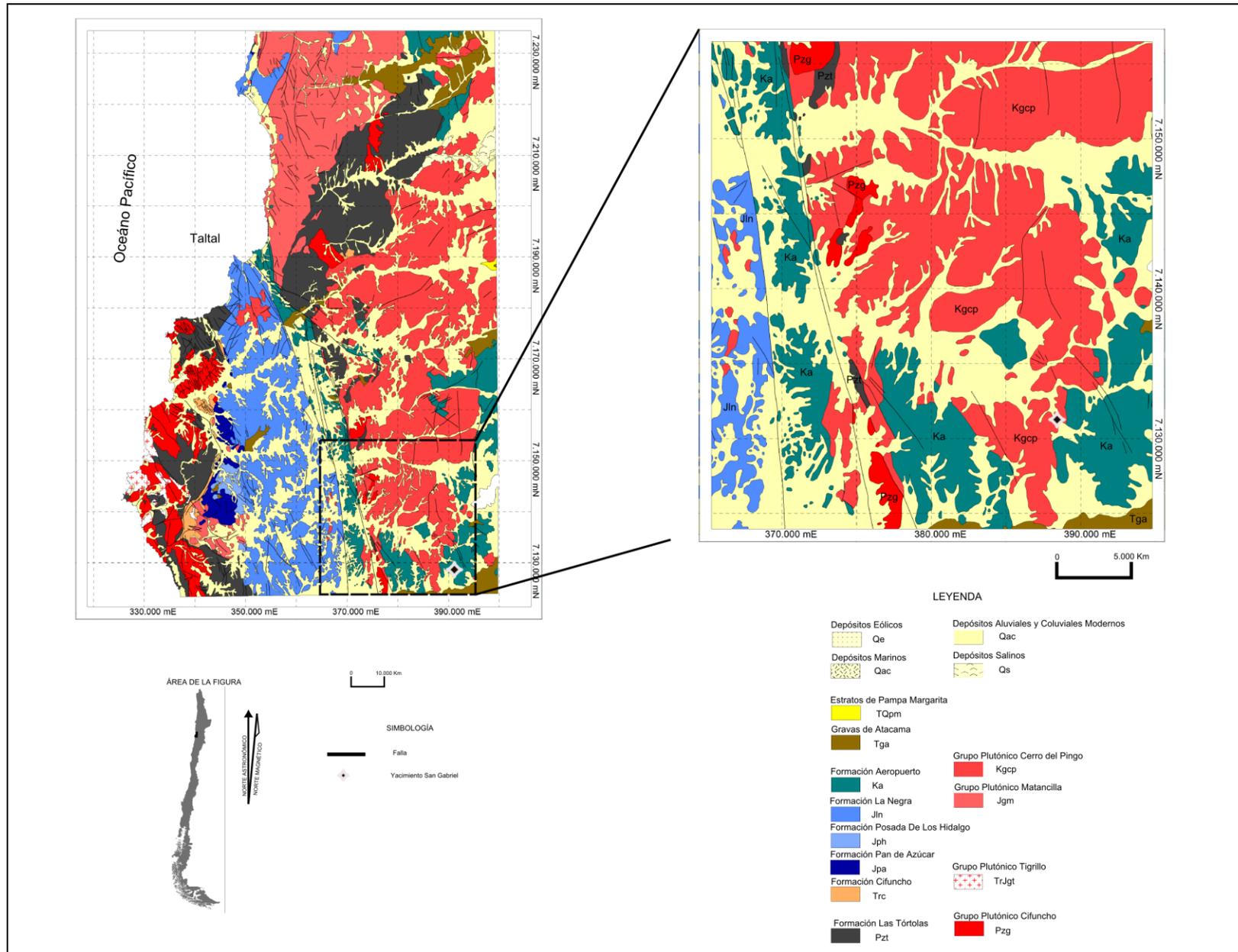


Figura 2-2. Mapa geológico regional de la zona de estudio. Modificado de Naranjo y Puig (1984).

2.2.1. Rocas estratificadas

2.2.1.1. Formación La Negra (Jln)

Definición:

García (1967) definió la Formación La Negra como una secuencia de lavas andesíticas con intercalaciones de brechas y rocas sedimentarias que afloran desde Quebrada La Negra (localidad tipo, al sur de Antofagasta) hasta el sur de Taltal, e incluso hasta la zona de Chañaral (Mercado, 1978).

Distribución y litología:

La Formación La Negra se distribuye en una franja prácticamente continua a lo largo de la Cordillera de la Costa, de 8 a 18 km de ancho, desde Quebrada la Negra hasta Chañaral, al oeste de la Zona de Falla Atacama (Figura 2-2).

Litológicamente se caracteriza principalmente por lavas andesíticas porfídicas, brechas volcánicas y tobas. Algunos niveles de lavas son “ocoíticos”, con estructuras de almohadillas. Las intercalaciones sedimentarias corresponden a depósitos continentales, caracterizados por areniscas pardo-rojizas y por lentes conglomerádicos de clastos exclusivamente andesíticos, y a depósitos marinos, tales como areniscas calcáreas, margas y calizas fosilíferas (Naranjo y Puig, 1984).

Relaciones de contacto:

La Formación La Negra se apoya en discordancia de erosión sobre la Formación Pan de Azúcar, aunque, en el área de Paposó la sobreyace en aparente concordancia. Está en contacto por falla con la Formación Aeropuerto y es intruída por granodioritas del Grupo Plutónico Matancilla (Naranjo y Puig, 1984). En el sector de Quebrada Cifuncho se estima una potencia de más de 5000 m.

Edad y ambiente de depositación:

Los fósiles identificados en la Formación La Negra corresponden al Pliensbachiano, esto para el sector de Cerro Blanco. Bajo este nivel sedimentario existen unos 200 m de rocas volcánicas sin base expuesta, lo que sugiere una edad menor para esta secuencia. En el sector de Cerros Buena Esperanza los niveles sedimentarios presentan fósiles atribuibles al Bajociano. Además, como se menciona anteriormente, en el sector de Paposo la Formación La Negra está en aparente concordancia sobre la Formación Pan de Azúcar, del Sinemuriano. Estos datos permiten inferir una edad máxima Sinemuriano-Pliensbachiano para la base de la Formación La Negra (Naranjo y Puig, 1984). Por otro lado, dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ recientemente realizadas por Oliveros (2005) indican una edad de 159 a 137 Ma, Jurásico Superior-Cretácico Inferior (Oxfordiano-Berriasiano), para la Formación La Negra.

Las facies presentes en la Formación La Negra y su considerable potencia hacen pensar que representa el arco volcánico del Jurásico. Las intercalaciones de depósitos marinos indicarían breves períodos de interrupción de la actividad volcánica.

2.2.1.2. Formación Aeropuerto (Ka)

Definición:

Ulriksen (1979) definió informalmente la Formación Aeropuerto como una secuencia volcano-clástica con intercalaciones sedimentarias continentales y marinas, y la dividió en dos miembros. Sin embargo, Naranjo y Puig (1984), considerando las similitudes entre ambos miembros, redefinieron esta unidad eliminando esta subdivisión.

Distribución y litología:

La Formación Aeropuerto se presenta en el lado oriente de la Cordillera de la Costa, desde las vecindades del Aeropuerto Breas de Taltal hasta la Quebrada Pan de Azúcar (Figura 2-2). Se presenta como una secuencia volcanosedimentaria con intercalaciones de lavas andesíticas y calizas. Esporádicamente se presentan niveles de lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados, estos últimos con clastos de andesitas porfídicas. Al norte del Aeropuerto Breas la secuencia es predominantemente volcánica andesítica, con

coladas de hasta 10 m de espesor. En el sector de Juncal-Carrizalillo aflora una secuencia constituida principalmente por lavas andesíticas, en algunos casos ocoíticas y amigdaloidales, con intercalaciones de brechas conglomerádicas. Hacia los niveles superiores, la secuencia presenta intercalaciones de brechas finas y areniscas de color verde (Naranjo y Puig, 1984).

Relaciones de contacto:

La base de la Formación Aeropuerto está truncada hacia el oeste por la traza de la Zona de Falla Atacama, constituyendo un límite arbitrario con la Formación La Negra, de la cual se diferencia por un carácter más clástico sedimentario y por la presencia de intercalaciones de calizas. Subyace en discordancia a la Formación Chile-Alemania del Terciario Inferior.

Edad y ambiente de depositación:

El contenido fósil, Exogyras mal conservadas y fragmentadas, recolectado en la Formación Aeropuerto, es característico del Cretácico. En el sector de Diego de Almagro se encontraron amonites del Valangianiano. Con estos antecedentes se le asigna una edad Cretácica Inferior, aun cuando pueda tener una edad menor al estar en contacto erosivo con la Formación Chile-Alemania (Naranjo y Puig, 1984).

La Formación Aeropuerto representaría los productos del arco volcánico durante el Cretácico Inferior, como una continuación del arco volcánico Jurásico manifestado en la Formación La Negra. Su ambiente deposicional habría sido principalmente continental, en cuencas intravolcánicas, con algunos episodios locales de transgresiones marinas (Naranjo y Puig, 1984).

2.2.2. Unidades intrusivas

2.2.2.1. Grupo Plutónico Cerro del Pingo (Kgcp)

Definición y distribución:

Ulriksen (1979) denominó como Grupo Plutónico Cerro del Pingo a “un gran batolito, aflorante en el sector de Cerro del Pingo, incluyendo dioritas, granodioritas y adamelitas” (Figura 2-2). Naranjo y Puig (1984) señalan que se prolonga hacia el norte y el sur de esa localidad con una gran variedad litológica que incluye dioritas, granodioritas, tonalitas, granitos y pórfidos.

Relaciones de contacto:

Intruye a la Formación Aeropuerto (Naranjo y Puig, 1984).

Edad de intrusión:

Debido a sus relaciones de contacto se puede restringir la edad del Grupo Plutónico Cerro del Pingo al Cretácico Inferior-Paleoceno. Además, numerosas dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ entregan edades entre los 121 y 109 Ma, por lo que restringen su edad al Cretácico Inferior (Naranjo y Puig, 1984).

En base a las edades se plantea una relación temporal y espacial importante entre el Grupo Plutónico Cerro del Pingo y la Formación Aeropuerto que permite vincularlos genéticamente (Naranjo y Puig, 1984).

2.2.3. Estructuras

2.2.3.1. Sistema de Falla de Atacama

El Sistema de Falla de Atacama (SFA) está situado en la posición actual de la Cordillera de la Costa y se originó durante el desarrollo del arco Jurásico como un sistema de falla transcurrente sinistral ligado a subducción. Este sistema de fallas acomodó un

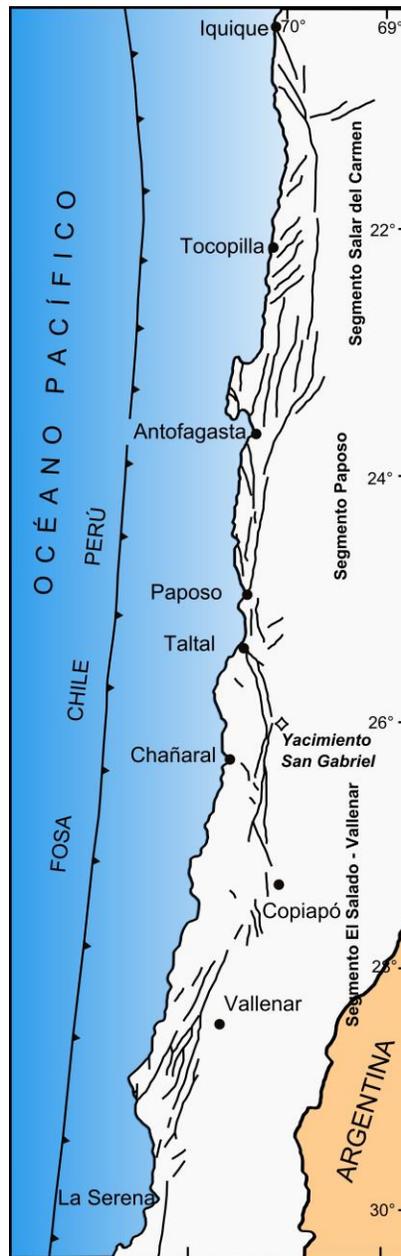


Figura 2-3. Segmentación del Sistema de Falla de Atacama (Modificado de Charrier, 2007)

componente de cizalle producto de la subducción oblicua entre las placas Aluk (Phoenix) y Sudamericana desde el Jurásico Superior y durante el Cretácico Inferior. Se caracteriza por el desarrollo de milonitas dúctiles (zonas de cizalle), con reactivaciones frágiles posteriores durante el Cenozoico con desplazamientos normales y transcurrentes menores documentados. Durante el Cretácico Inferior a lo largo de la Cordillera de la Costa de Antofagasta está documentada la exhumación de milonitas al sur de Antofagasta (Scheuber y Andriessen, 1990) y al mismo tiempo subsidencia en la cuenca de *pull-apart* de El Way (Maksaev, 1990), lo que indica que se produjeron

simultáneamente zonas de transtensión y transpresión a lo largo de esta estructura regional durante el Cretácico Inferior, lo que es típico en sistemas de fallas transcurrentes (Cembrano et al., 1997).

El SFA se constituye principalmente por fallas subparalelas de rumbo cercano a NS y manteos subverticales y ha sido dividido en tres segmentos curvos, cóncavos hacia el W los cuales son de norte a sur: Salar del Carmen, Paposo y El Salado-Vallena (Charrier et al., 2007). El Yacimiento San Gabriel se encuentra en el segmento El Salado-Vallena (Figura 2-3).

3. RESULTADOS

3.1. Geología local

La geología local se basa en el mapeo de escasos afloramientos y principalmente en la información proporcionada por los sondajes perforados en secciones paralelas cada 50 y 100 metros, orientadas en dirección N30°E. Este apartado se elaboró a partir de los resultados del presente estudio.

En la Figura 3-1 se presenta el mapa geológico de la zona de estudio elaborado por Hodking (2008) y posteriormente modificado en el presente trabajo de acuerdo a los resultados de la petrografía de las muestras de sondaje y a la comparación de éstas con las rocas que afloran en el sector.

El Yacimiento San Gabriel se encuentra emplazado en las rocas de la Fm. Aeropuerto, la cual, localmente, se encuentra intruída por rocas del Grupo Plutónico Cerro Del Pingo.

3.1.1. Unidades Geológicas

A continuación se presenta una descripción de las unidades geológicas definidas, la cual será complementada en el subcapítulo 3.2. La distribución espacial en superficie es presentada en la Figura 3-1.

Aluvios y coluvios (Qa)

Sedimentos no consolidados de origen aluvial y coluvial que cubren un 80 % del área. La profundidad de esta cobertura es variable, siendo de menor potencia en la zona SW (2 m) y aumentando hacia el NE (< 40 m). Presentan granulometría desde arena fina a grava gruesa. Es posible distinguir clastos de lavas porfíricas, dioritas y fragmentos de magnetita maciza. En todos ellos se observa un cierto grado de oxidación, evidenciado por pátinas de óxidos e hidróxidos de hierro sobre la magnetita.

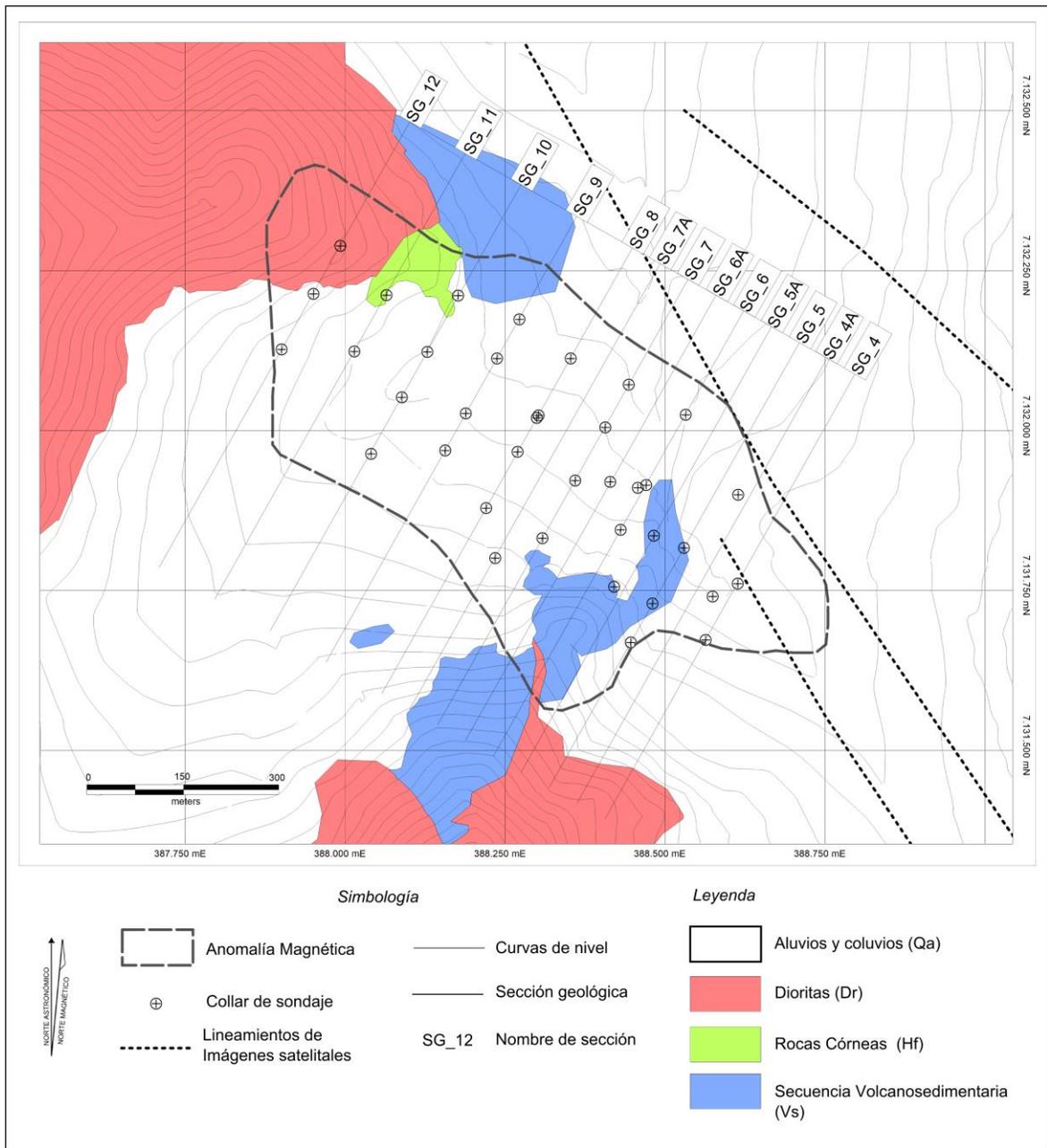


Figura 3-1. Mapa geológico de la zona de estudio. Modificado de Hodking, 2008.

Secuencia Volcanosedimentaria (Vs)

Esta secuencia se encuentra bajo la unidad anterior. Presenta una potencia aparente de 170 m (su base y manto son desconocidos). Se compone principalmente de coladas de lavas de composición basáltica, con escasas intercalaciones de depósitos de caída (tobas de ceniza en general). Además, Easdon (2008) indica que existen intercalaciones lenticulares de rocas sedimentarias, en general areniscas y conglomerados mal seleccionados con intercalaciones de niveles de areniscas o lutitas calcáreas.

Brecha de matriz de magnetita (BxM)

Se reconoce un cuerpo irregular de brecha, elongado preferentemente en la dirección N30°E. Se encuentra bajo la secuencia volcanosedimentaria, a una profundidad variable de 50 a 120 m. Este cuerpo mineralizado es de aproximadamente 800 m de largo, con un ancho de 100 a 200 m y un espesor de 80 a 250 m.

La brecha se describe como polimíctica, matriz-soportada (en general), sin embargo, cercano a los contactos laterales esta se observa como fragmento-soportada. Los fragmentos son de variados tamaños, se presentan desde 1 hasta 20 cm, son pobremente esféricos y de moderado redondeamiento. Por lo común, la litología de los fragmentos es principalmente: rocas córneas, dioritas y meta-basaltos. Por otra parte, la matriz y el cemento de esta brecha se componen de magnetita anhedral, junto con cantidades variables de clinopiroxeno, actinolita y apatito (Figura 3-2d). Dentro de este cuerpo de brecha existen lentes de magnetita maciza de aproximadamente 200 m de largo, 110 m de ancho y de 60 m de espesor.

Rocas Córneas de escapolita-diópsido (Hf)

Estas rocas metamórficas son principalmente metabasitas, las que se desarrollan en los halos laterales de la brecha de matriz de magnetita. En general, presentan texturas completamente obliteradas salvo en algunos casos en donde es posible reconocer texturas porfíricas relictas de los protolitos. La mineralogía de estas rocas corresponde principalmente a escapolita, feldespato y diópsido junto a cantidades variables de epidota (Figura 3-2b).

Rocas Córneas de escapolita-actinolita (HfA)

Estas rocas han sido identificadas en el flanco NE de la brecha de matriz de magnetita, en contacto y subyaciendo a la unidad de Rocas Córneas de escapolita-diópsido. Textural y mineralógicamente son similares a estas últimas, sin embargo, se diferencian de éstas en que las rocas corneas de escapolita-actinolita presentan actinolita en vez de diópsido (Figura 3-2e).

Brecha Periférica (BxH)

Estas brechas se desarrollan en los flancos de la brecha de magnetita. Es posible reconocer esta unidad como una brecha matriz soportada, generalmente polimíctica con clastos subredondeados a angulosos de rocas córneas, meta-basaltos y dioritas, sin embargo en ocasiones suele ser monomíctica. Los fragmentos son difíciles de distinguir de la matriz debido a que la alteración es muy penetrativa. Se encuentran en el rango de tamaño entre 0.5 y 15 cm. La matriz y el cemento se componen de un agregado mineral de grano muy fino, compuesto principalmente de feldespato, menor diópsido y magnetita (Figura 3-2f).

Esta unidad se encuentra afectada por el proceso de brechización que dio origen al cuerpo de brecha de matriz de magnetita.

Diorita (Dr)

Corresponde a rocas intrusivas, las que se describen como dioritas porfíricas de clinopiroxeno, leucocráticas y de grano medio de color blanco verdoso. Los fenocristales corresponden a plagioclasa, en tanto la masa fundamental presenta principalmente plagioclasa y en menor cantidad diópsido; feldespato potásico; magnetita; y escaso cuarzo (Figura 3-2c).

Existen dos diques subverticales en la zona SW de los perfiles, de 10 m de potencia, con un rumbo aproximado de N30°E. También existe una intrusión en el flanco NE de la unidad de brecha de magnetita maciza (BxM), la cual es de mayor envergadura y se encuentra afectada por dos eventos de brechización; el primero consiste en una brecha de matriz de magnetita (unidad de Brecha de matriz de magnetita); y el segundo a una brecha de matriz de feldespato, diópsido y magnetita.

De acuerdo a las relaciones de contacto, se observa que los cuerpos de esta unidad intruyen a la Secuencia Volcanosedimentaria y a las Rocas Córneas de escapolita-diópsido.

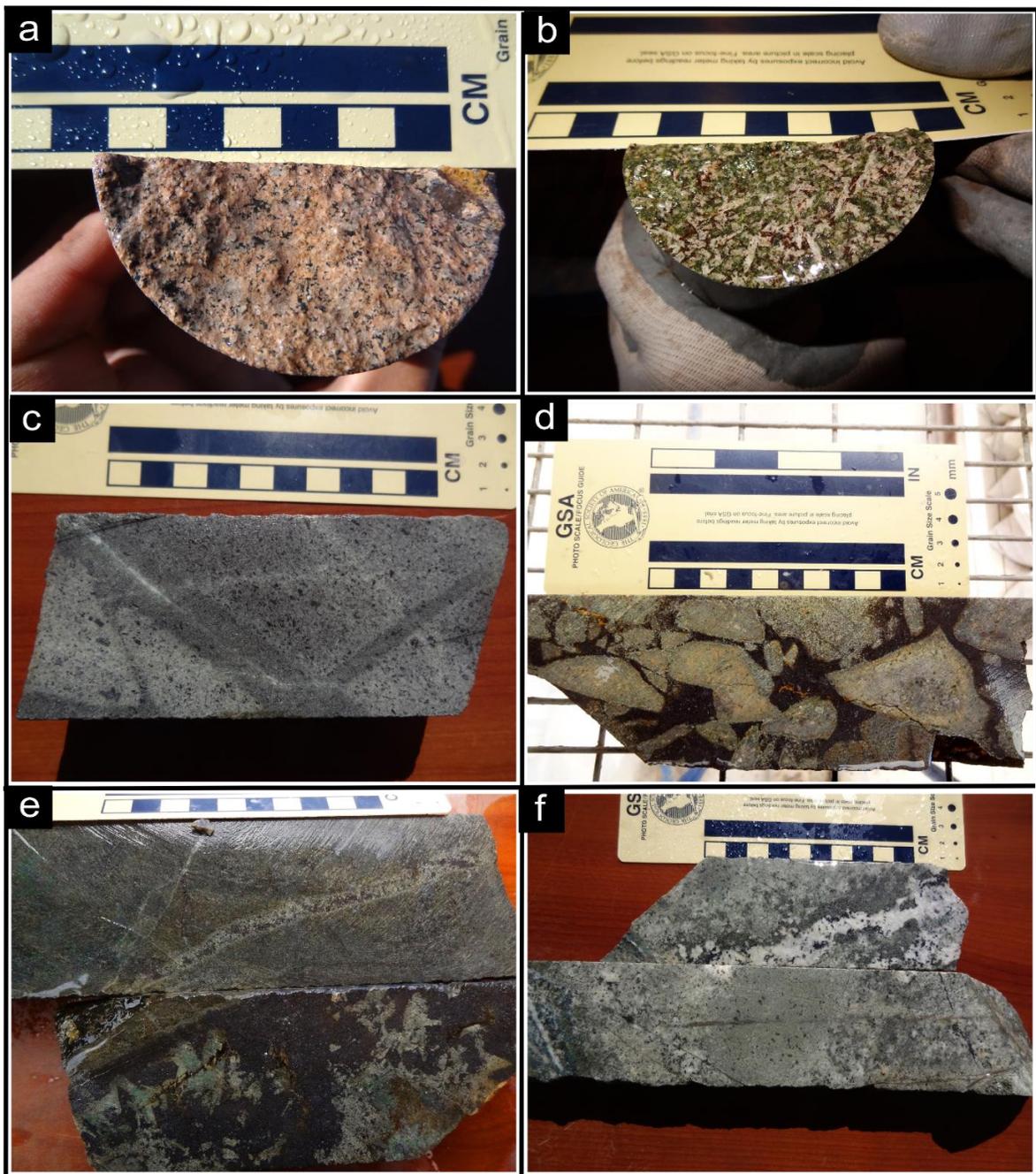


Figura 3-2. Fotografías de testigos de sondaje representando a las distintas unidades geológicas. (a) Dique aplítico (Ap); (b) Rocas Córneas de escapolita-diópsido; (c) Diorita (Dr); (d) Brecha de matriz de magnetita (e) Rocas Córneas de escapolita-actinolita junto a vetilla de magnetita-actinolita; y (f) Brecha Periférica (BxH).

Diques Aplíticos (Ap)

Unidad intrusiva de composición aplítica de textura holocristalina equigranular con cristales de tamaño milimétrico de feldespato subhedral, cuarzo anhedral, menor biotita subhedral e incipiente magnetita anhedral (Figura 3-2a). Se observa como un cuerpo tabular subhorizontal de 10 m de potencia y 12°NNE de manteo aparente, que intruye a la Secuencia Volcanosedimentaria por sobre el cuerpo de magnetita maciza (cota 950 m aproximadamente).

3.1.2. Modelo Geológico

A continuación se expone el modelo geológico del yacimiento, elaborado a partir de los resultados del presente estudio

Se elaboraron tres secciones paralelas, con un espaciamiento de 50 metros (Figura 3-3, Figura 3-4 y Figura 3-5). Cada sección presenta una influencia de 25 m en ambos sentidos. Se expondrán más detalles en el capítulo 3.1.

La zona se encuentra cubierta por una capa de aluvios y coluvios (unidad Qa), bajo la cual se presenta la unidad Volcanosedimentaria (Vs). En contacto con esta unidad se encuentra un cuerpo de brecha de matriz de magnetita (unidad BxM), el cual exhibe una forma irregular, que puede ser descrito como un dique de espesor variable que aumenta en potencia bajo la unidad Volcanosedimentaria. Existen evidencias en los clastos que indican que la brechización afecta a todas las unidades de rocas presentes en los perfiles estudiados. Dentro de esta unidad es posible encontrar cuerpos lenticulares de magnetita maciza (80 a 98% de magnetita), preferentemente en contacto y subyaciendo a la unidad Volcanosedimentaria. En el flanco sureste del cuerpo de brecha de magnetita se presenta la unidad Brecha Periférica (BxH) y en el flanco noreste un intrusivo diorítico (unidad Dr). En torno a estos cuerpos (unidades BxM, BxH y Dr) se observan Rocas Córneas de escapolita-diópsido y otras de escapolita-actinolita (unidades Hf y HfA respectivamente).

Existen diques de composición diorítica que cortan la secuencia volcanosedimentaria y las Rocas Córneas de escapolita-diópsido. Además, existe un dique subhorizontal que

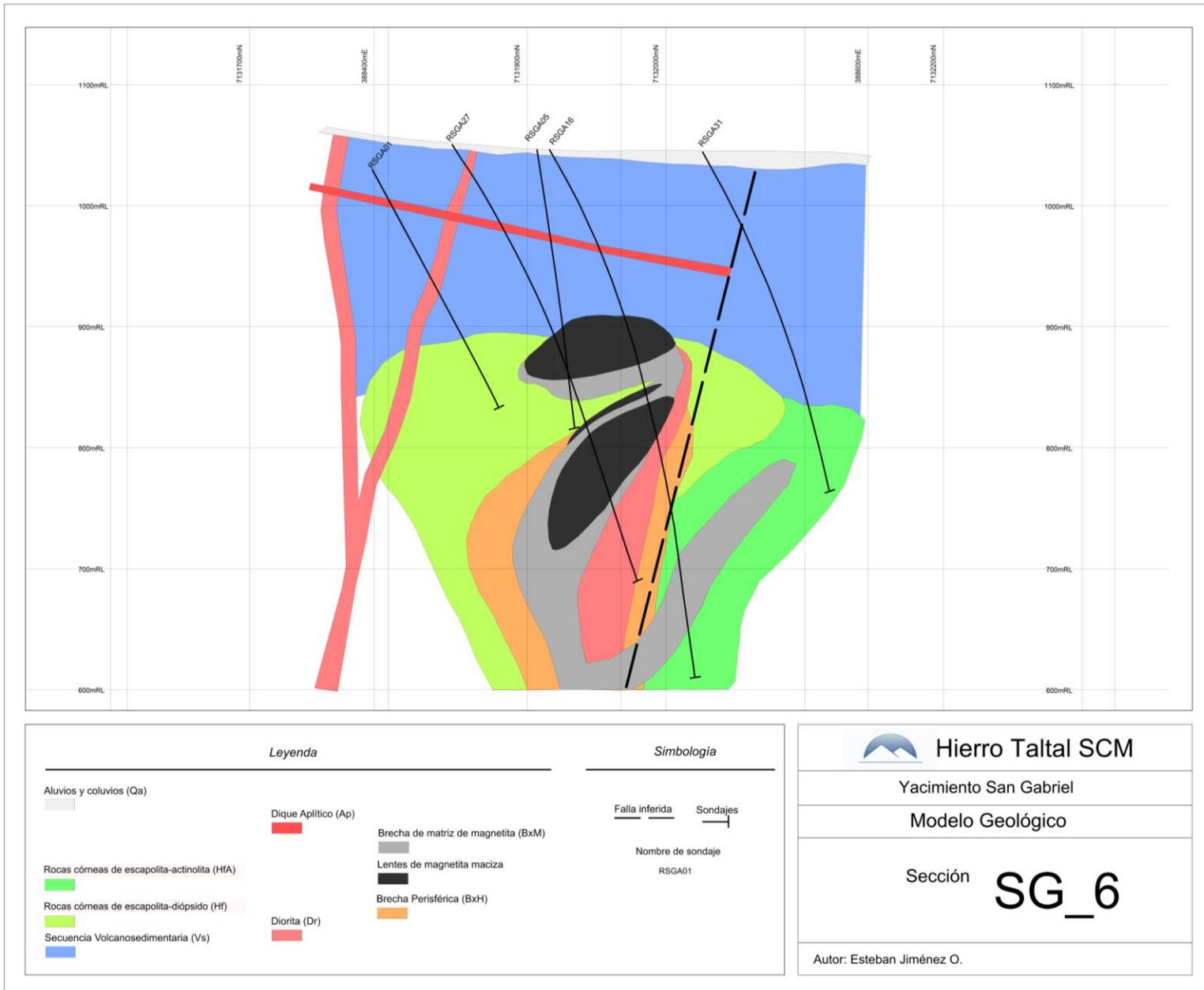


Figura 3-3. Modelo geológico, sección SG_6.

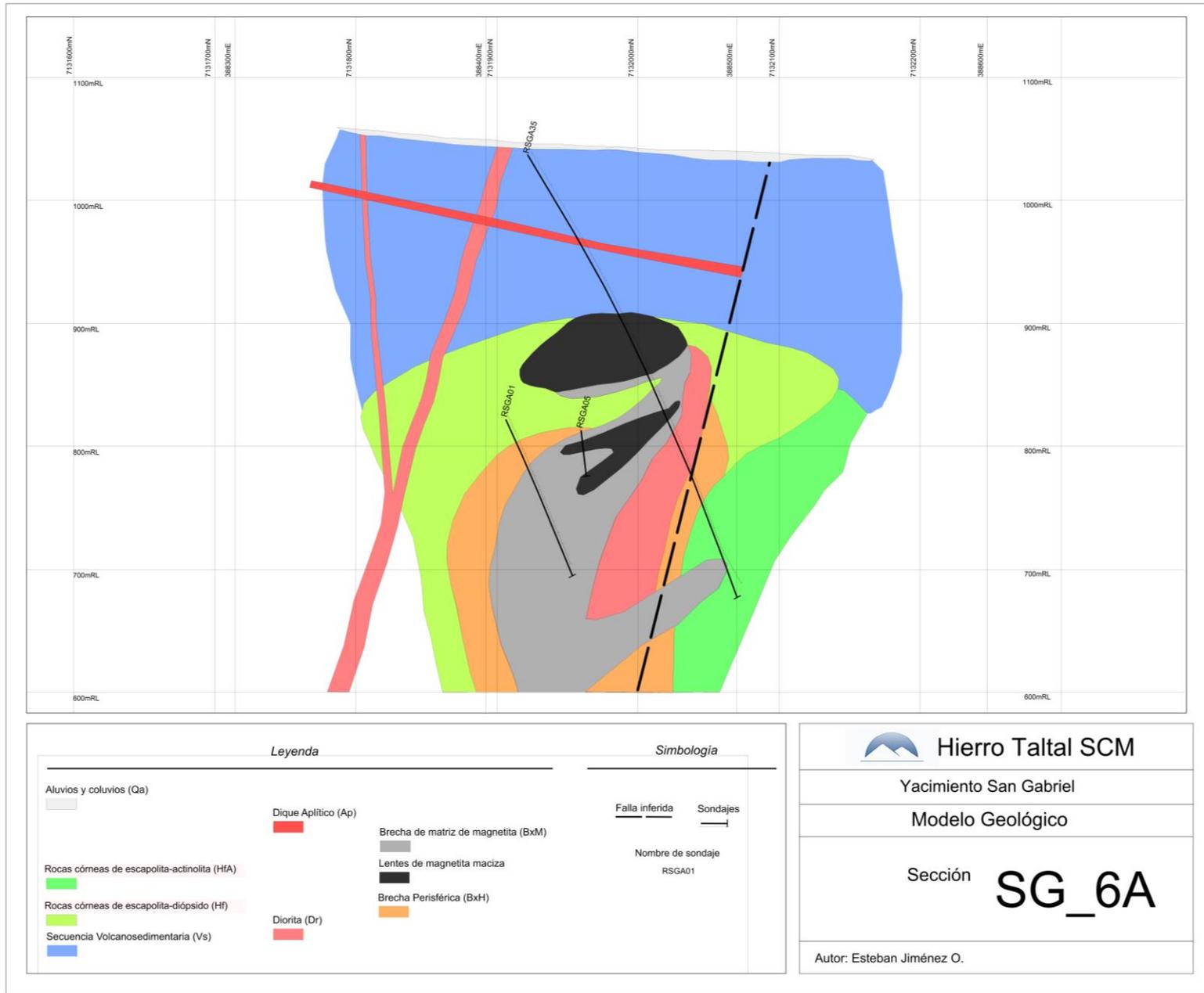


Figura 3-4. Modelo geológico, sección SG_6A.

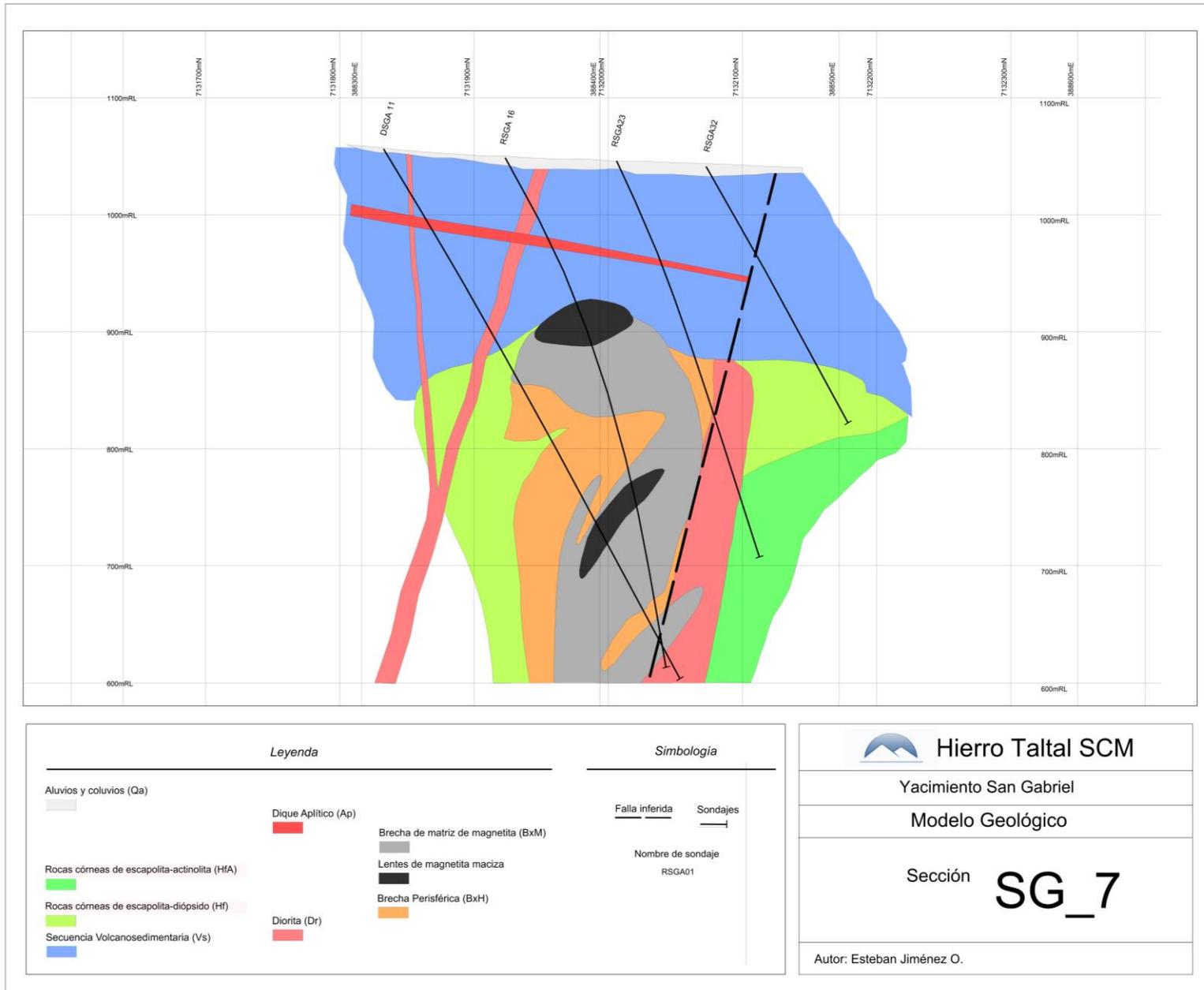


Figura 3-5. Modelo geológico, sección SG_7.

intruye a la secuencia volcanosedimentaria, el cual se encuentra interrumpido hacia el noreste.

3.1.3. Metamorfismo/Metasomatismo

Las rocas pertenecientes a esta secuencia presentan metamorfismo de contacto en zonas cercanas al cuerpo de brecha de matriz de magnetita (unidad BxM). La mineralogía desarrollada en la parte superior del sistema, producto del metasomatismo, contempla principalmente escapolita, diópsido y magnetita, junto a cantidades menores de plagioclasa y feldespato K. La extensión de este halo de metamorfismo no se ha podido determinar debido a que este se extiende más allá de lo reconocido por los sondeos. En los flancos laterales de este cuerpo, las rocas presentan texturas completa a moderadamente obliteradas producto del metasomatismo. A estas rocas se les ha denominado como Rocas Córneas de escapolita-diópsido (unidad Hf). En cambio, en las raíces del sistema, se ha podido identificar un metasomatismo caracterizado por actinolita, escapolita y magnetita, junto a menor plagioclasa. Estos dos tipos de metamorfismos de contacto concuerdan espacialmente con el metasomatismo observado en los clastos de la brecha de matriz de magnetita (unidad BxM).

También se han identificado otros minerales secundarios como: apatito, especularita, epidota, zoisita, clorita, sericita, ceolita, calcita, turmalina y arcillas.

3.1.4. Mineralización

La mineralización del Yacimiento San Gabriel es principalmente de magnetita, la que en algunos casos se encuentra levemente martitizada. El principal recurso de este yacimiento lo constituyen en gran parte los lentes de magnetita maciza y las brechas de matriz de magnetita.

A continuación se describen brevemente los distintos estilos de mineralización de este yacimiento.

Lentes de magnetita maciza

En los sondajes de aire reverso se han interceptado dos cuerpos lentiformes de magnetita maciza ubicados dentro de un cuerpo de brecha de matriz de magnetita, presentes en las tres secciones estudiadas, con leyes entre 40% y 70% de Fe total (Figura 3-6a). El primer intercepto se ubica en la cota 900 m aproximadamente, presenta una potencia máxima de 55 m, se encuentra bajo 125 m (en promedio) de cobertura y está manteando suavemente hacia el SE. El siguiente se ubica más en profundidad, posee un manteo variable entre 30° y 25°NW, y una potencia máxima de 25 m.

Brechas de matriz de magnetita

Como se ha mencionado en el subcapítulo 3.1.1 existe un cuerpo de brecha en el centro de los perfiles estudiados. La matriz y el cemento de estas brechas se constituyen principalmente de magnetita maciza, junto a cantidades menores de actinolita, diópsido y/o apatito. La proporción de clasto/matriz es altamente variable, ya que en los bordes del cuerpo se encuentran brechas clasto soportadas, llegando a tener leyes de Fe de 15 a 40%. Hacia el centro es posible encontrar los lentes de magnetita maciza (descritos en el párrafo anterior).

Vetas y vetillas

Durante el mapeo geológico de los sondajes fue posible distinguir tres tipos principales de vetillas que presentan mineralización (Figura 3-6b-e), estas son:

- a. Magnetita-diópsido
- b. Magnetita-actinolita
- c. Feldespato K-magnetita±diópsido±plagioclasa
- d. Actinolita-turmalina-especularita

Los primeros dos tipos de vetillas predominan en los flancos del cuerpo de brecha (unidad BxM), sin embargo, no se observan relaciones de corte entre éstas. Las vetillas de Feldespato K-magnetita±diópsido±plagioclasa presentan una mayor distribución espacial, aunque se encuentran ausentes en los cuerpos de brecha de magnetita maciza. Las vetillas actinolita-turmalina-especularita (en ocasiones se desarrollan como

microbrechas) son escasas y están pobremente mineralizadas. Estas últimas se ha observado que cortan a las vetillas de magnetita-actinolita.

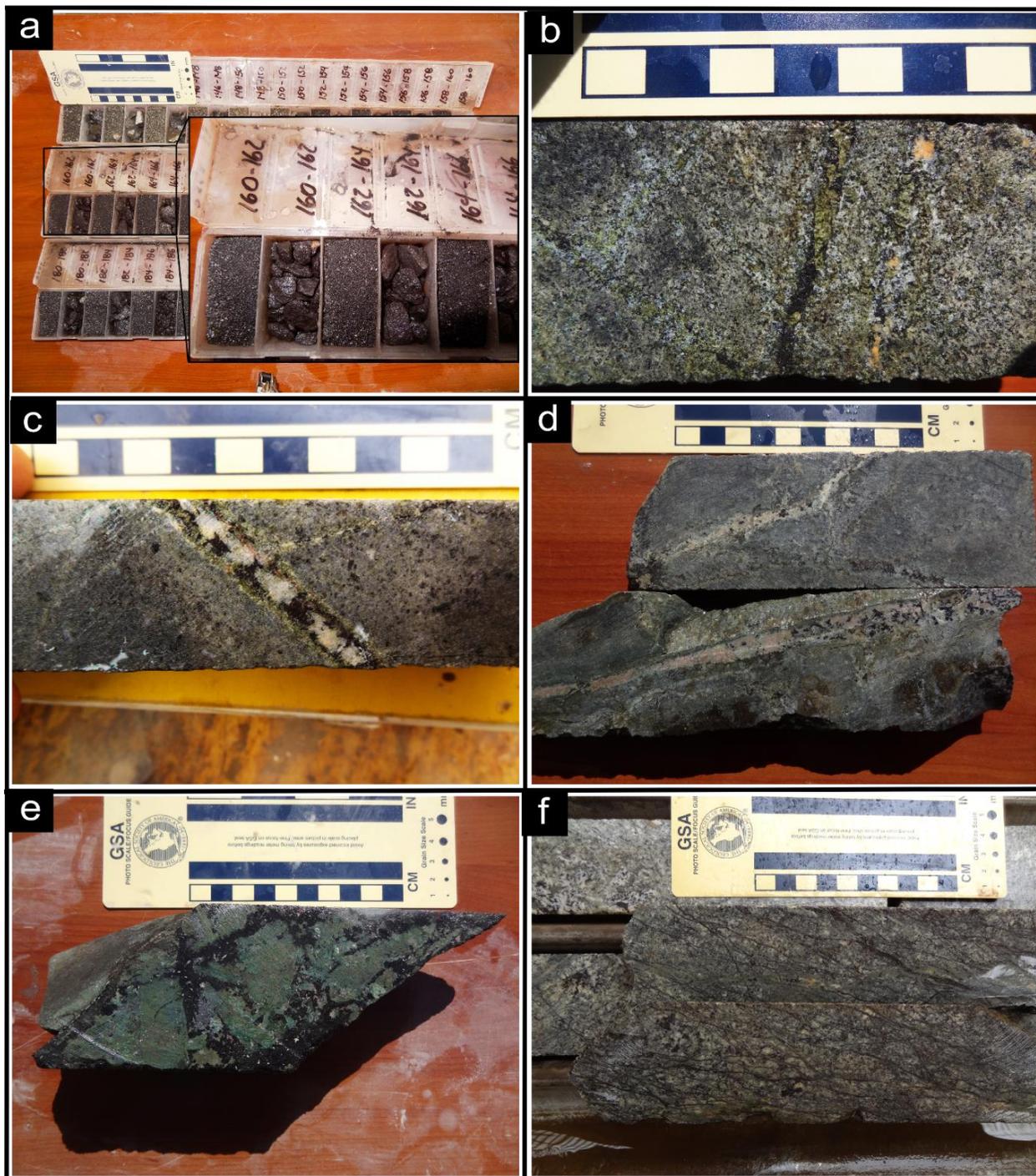


Figura 3-6. Fotografías de ejemplo de los estilos de mineralización. (a) Magnetita maciza (cutting de RSGA22); (b) vetilla de magnetita-diópsido; (c) vetilla de feldespato K-magnetita-diópsido; (d) vetilla de feldespato K-magnetita; (e) estructura de brechización rellena de actinolita-turmalina-especularita; (f) stockwork de magnetita.

Mineralización en enjambre de vetillas (stockwork)

Existe un desarrollo de stockwork de finas vetillas rellenas de magnetita (típicamente <1 mm), similares a un estilo del tipo “vetillas laminares” (Figura 3-6f). Es posible observarlo en las raíces del sistema, sin embargo este estilo es de escasa ocurrencia.

Mineralización diseminada

La magnetita diseminada generalmente es de grano fino y se distribuye ampliamente en la roca de caja cercana del cuerpo mineralizado principal, esencialmente en las unidades de Rocas Córneas de escapolita-diópsido (Hf), Rocas Córneas de escapolita-actinolita (HfA) y en la matriz de la unidad Brecha Periférica (BxH). El hierro contenido en este estilo típicamente no supera el 20%.

3.1.5. Estructuras

Los mapeos de superficie no permiten reconocer fallas o sistemas estructurales relevantes, sin embargo, las imágenes satelitales permiten inferir lineamientos de orientación NNW y NW. Los sondajes de aire reverso, indican la presencia de fallas menores, interpretadas por la ocurrencia de rocas altamente fracturadas y con escasa arcilla, pero que no evidencian movimientos significativos en los cuerpos de brecha y, por ende, en los cuerpos mineralizados asociados

Los controles estructurales de la mineralización se observan claramente en una escala distrital, donde la tendencia NNW y NW del Sistema de Fallas de Atacama (Figura 2-3) se refleja en la orientación de tres anomalías de magnetometría y en los lineamientos estructurales en imágenes satelitales, las cuales coinciden con la orientación de la elongación preferencial de los cuerpos mineralizados. Lo anterior se observa en la magnetometría reducida al polo en la Figura 3-7, donde se han incluido los lineamientos observados en imágenes satelitales y los collares de los sondajes de los distintos proyectos.

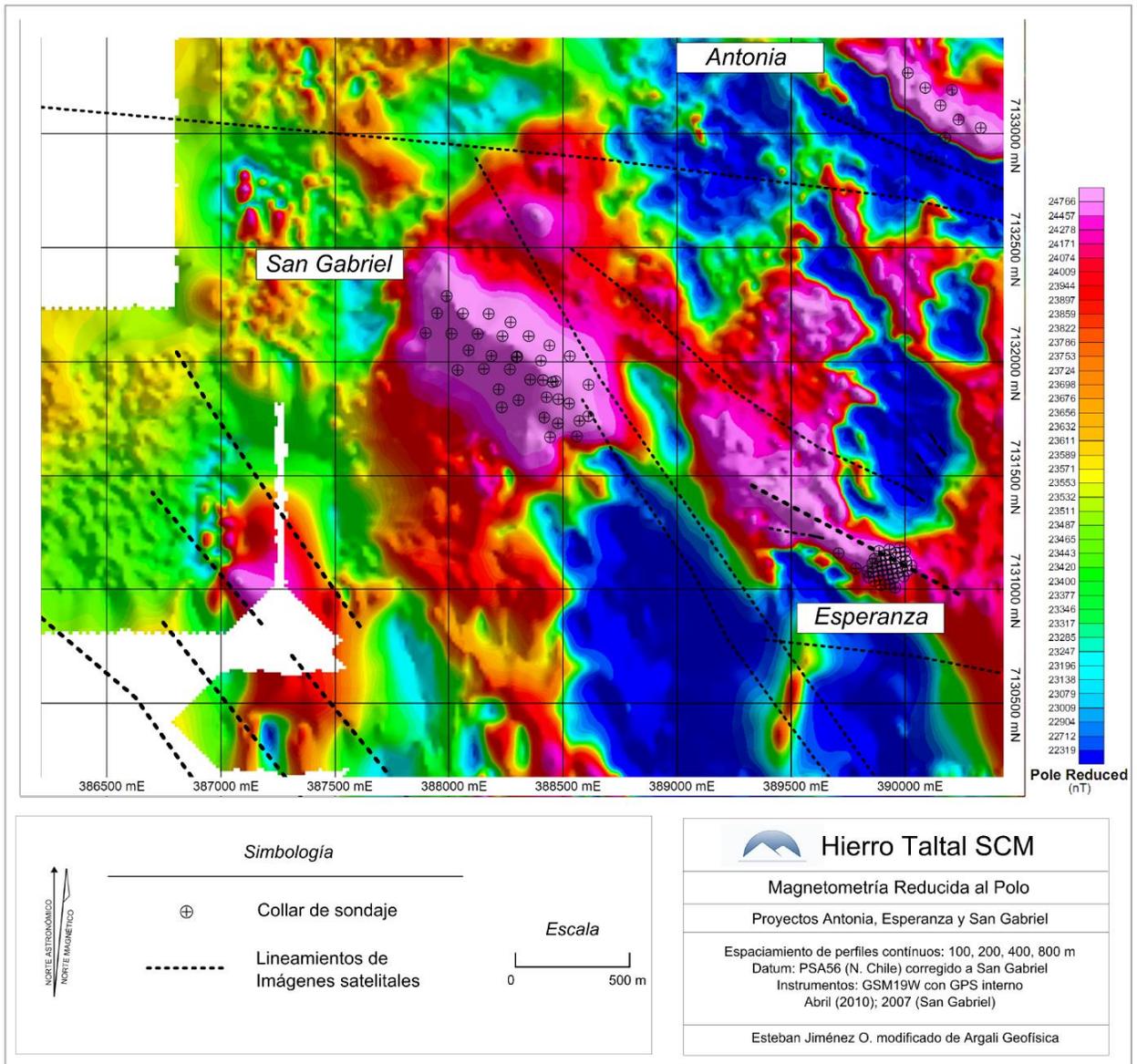


Figura 3-7. Magnetometría de la zona reducida al polo, modificada de Argali Geofísica (2010).

3.2. Caracterización mineralógica del yacimiento

El Yacimiento San Gabriel cuenta con diversa información representada en 13 secciones perpendiculares a la dirección N60°W. Las primeras 9 están espaciadas cada 50 m y las 4 restantes cada 100 m (Figura 3-1). Existe un total de 36 sondajes contenidos en tales secciones, de los cuales 3 son de diamantina y los demás de aire reverso. Para este estudio se consideraron los sondajes pertenecientes a las secciones SG_6, SG_6A y SG_7, debido a que es el sector del yacimiento que acumula más metros de sondaje (3.292 metros; 9 sondajes). Además, se observa una continuación de la mineralización a

mayor profundidad (con respecto a las otras secciones) y existe un sondaje de diamantina que intercepta esta mineralización.

3.2.1. Descripción de Sondajes

En la Tabla 3-1 se muestran las direcciones de los sondajes, donde la mayoría de estos presentan un azimut paralelo a las secciones (N30°E) y una inclinación cercana a los -60°, excepto los sondajes RSGA01 y RSGA05, que tienen un rumbo de 0°, por lo que se encuentran oblicuos a las secciones. Todos estos sondajes son de aire reverso, excepto el sondaje DSGA11 que es diamantino.

Las 3 secciones consideradas para este estudio (SG_6, SG_6A y SG_7), se encuentran espaciadas cada 50 m y tienen una influencia de 25 metros en ambos sentidos (hacia delante y hacia atrás). En la Figura 3-8, Figura 3-9 y Figura 3-10 se presentan estas secciones; confeccionadas a partir del mapeo de los sondajes, las que muestran los interceptos de los sondajes coloreados según la unidad geológica y, además, incluyen la distribución de las muestras tomadas para estudios petrográficos y calcográficos.

Tabla 3-1. Largo, inclinación y azimut de los sondajes estudiados.

Sección SG_06				Sección SG_7			
Hole_id	Largo	Inclinación	Azimut	Hole_id	Largo	Inclinación	Azimut
RSGA01	408	-59.0	359.4	RSGA22	456	-59.6	29.5
RSGA05	264	-79.7	0.9	DSGA11	519	-60.2	29.4
RSGA27	394	-56.8	28.5	RSGA16	460	-59.7	31.4
RSGA31	300	-58.5	29.1	RSGA23	360	-64.1	29.3
Sección SG_6A				RSGA32	250	-57.5	27.7
Hole_id	Largo	Inclinación	Azimut				
RSGA35	400	-59.1	31.4				

Con el objetivo de resumir las descripciones de sondajes, estos se han agrupado de acuerdo a su relación espacial con el cuerpo mineralizado:

- RSGA05, RSGA16, RSGA22, RSGA27 y RSGA35: se encuentran en la parte central de los perfiles e interceptan la parte superior del cuerpo de brecha mineralizado.

- RSGA01 y DSGA11: ubicados en la parte SW; reconocen la parte más profunda del cuerpo mineralizado.

- RSGA23, RSGA31 y RSGA32: se sitúan al NE. No interceptan el cuerpo de brecha.

A continuación se presenta un resumen de los sondajes descritos (los striplogs y la descripciones se encuentran el ANEXO A),

Todos los sondajes comienzan con una cobertura de sedimentos aluviales de espesor variable (2 a 20 m), bajo la cual subyace la Secuencia Volcanosedimentaria (VS), compuesta principalmente por basaltos porfíricos con leve a moderada cloritización y en algunos casos se observa epidota. Esta unidad es intruída por 2 tipos de diques: de composición diorítica y aplítica.

RSGA05, RSGA16, RSGA22, RSGA27 y RSGA35

Bajo la secuencia volcanosedimentaria (VS), los sondajes del centro de los perfiles interceptan un cuerpo de magnetita maciza (con cantidades menores de clinopiroxeno, apatito y calcita) cercano a la cota 900 m. Previo a este brusco contacto la secuencia volcanosedimentaria presenta un leve metasomatismo, evidenciado por blastos de escapolita alterando la masa fundamental. Bajo el cuerpo de magnetita maciza se encuentra una brecha polimíctica de matriz de magnetita con clastos de dioritas, rocas córneas y meta-basaltos. Dentro de este cuerpo de brecha también existen lentes de magnetita maciza. Más en profundidad, cercano a la cota 850 m, se interrumpe el cuerpo de brecha y se encuentran rocas córneas de escapolita-clinopiroxeno con abundante magnetita diseminada (~8-15% Fe). Esto se presenta en todos estos sondajes, salvo en el sondaje RSGA16 en donde es posible distinguir una brecha de matriz de feldespato-clinopiroxeno (correspondiente a la unidad de Brecha Periférica). Luego se intercepta nuevamente un cuerpo de brecha de matriz de magnetita de similares características al

anterior, sin embargo, se observa una moderada a fuerte alteración de actinolita tanto en la matriz como en los clastos de rocas córneas. Además, la proporción de clastos de diorita aumenta en profundidad. Posteriormente, los sondajes RSGA35, RSGA22 y RSGA27 indican la presencia de un intrusivo diorítico porfírico (unidad Diorita) en contacto con una brecha de matriz de feldespato-clinopiroxeno (unidad de Brecha Periférica) para finalizar con rocas córneas de actinolita-escapolita-plagioclasa. Esta última litología se encuentra cortada por una estructura brechizada de magnetita-actinolita.

RSGA01 y DSGA11

Estos sondajes se ubican al SW de los perfiles. Previo al contacto entre las unidades Volcanosedimentaria y Rocas Córneas de escapolita-diópsido (unidades VS y Hf respectivamente). Se observa que en la primera unidad se presenta un metamorfismo/metasomatismo evidenciado por el desarrollo de porfidobláastos de escapolita y blastos milimétricos de clinopiroxeno. Aproximadamente bajo la cota 900 m se encuentra el contacto, donde se observa la ocurrencia de rocas córneas de escapolita-clinopiroxeno de textura granoblástica, con mineralización de magnetita diseminada y en cúmulos y menor magnetita en vetillas junto con clinopiroxeno. A mayor profundidad la escapolita no se observa, presentándose feldespato anhedral junto a clinopiroxeno. El siguiente contacto se ubica a una profundidad variable (entre las cotas 800 y 860 m), donde se encuentra una brecha de matriz de feldespato-clinopiroxeno (unidad Brecha Periférica) con mineralización de magnetita diseminada y una alteración moderada de epidota. Cercano al próximo contacto, en el sondaje de diamantina es posible observar vetillas de magnetita-actinolita, las cuales son más abundantes en profundidad. Posteriormente, existe un cuerpo de brecha de matriz de magnetita (unidad BxM), en donde los clastos se encuentran fuertemente actinolitizados. La última litología reconocida en estos sondajes corresponde a una brecha monomítica clasto-soportada de matriz de feldespato-clinopiroxeno.

RSGA23, RSGA31 y RSGA32

Al igual que el resto de los sondajes, es posible distinguir un leve metamorfismo/metasomatismo en las rocas de la secuencia volcanosedimentaria, previo al siguiente contacto litológico; blastos de escapolita como alteración de la masa

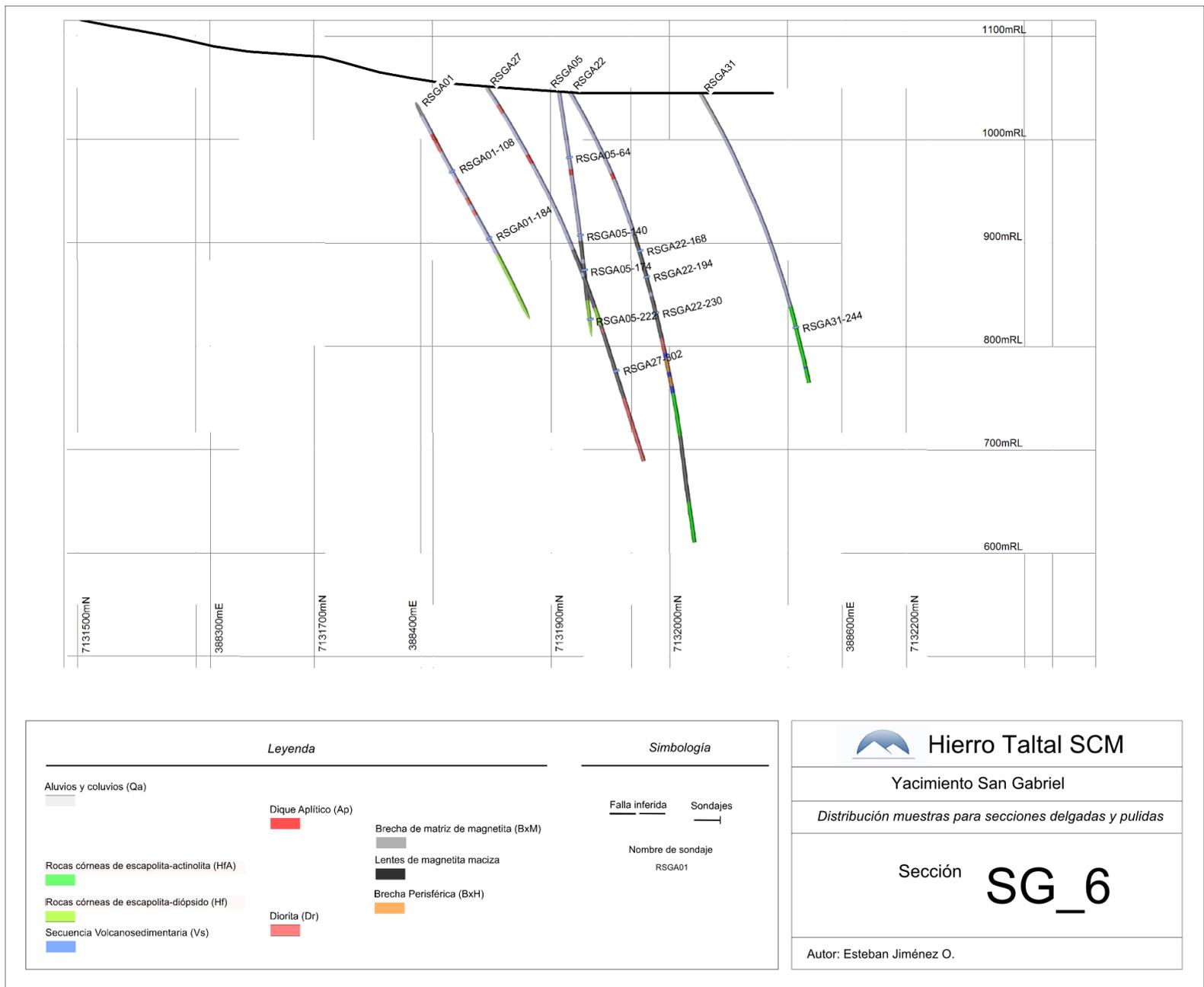


Figura 3-8. Distribución de las muestras estudiadas mediante microscopía óptica, junto con las unidades geológicas representadas en la traza de los sondajes. Sección SG_6.

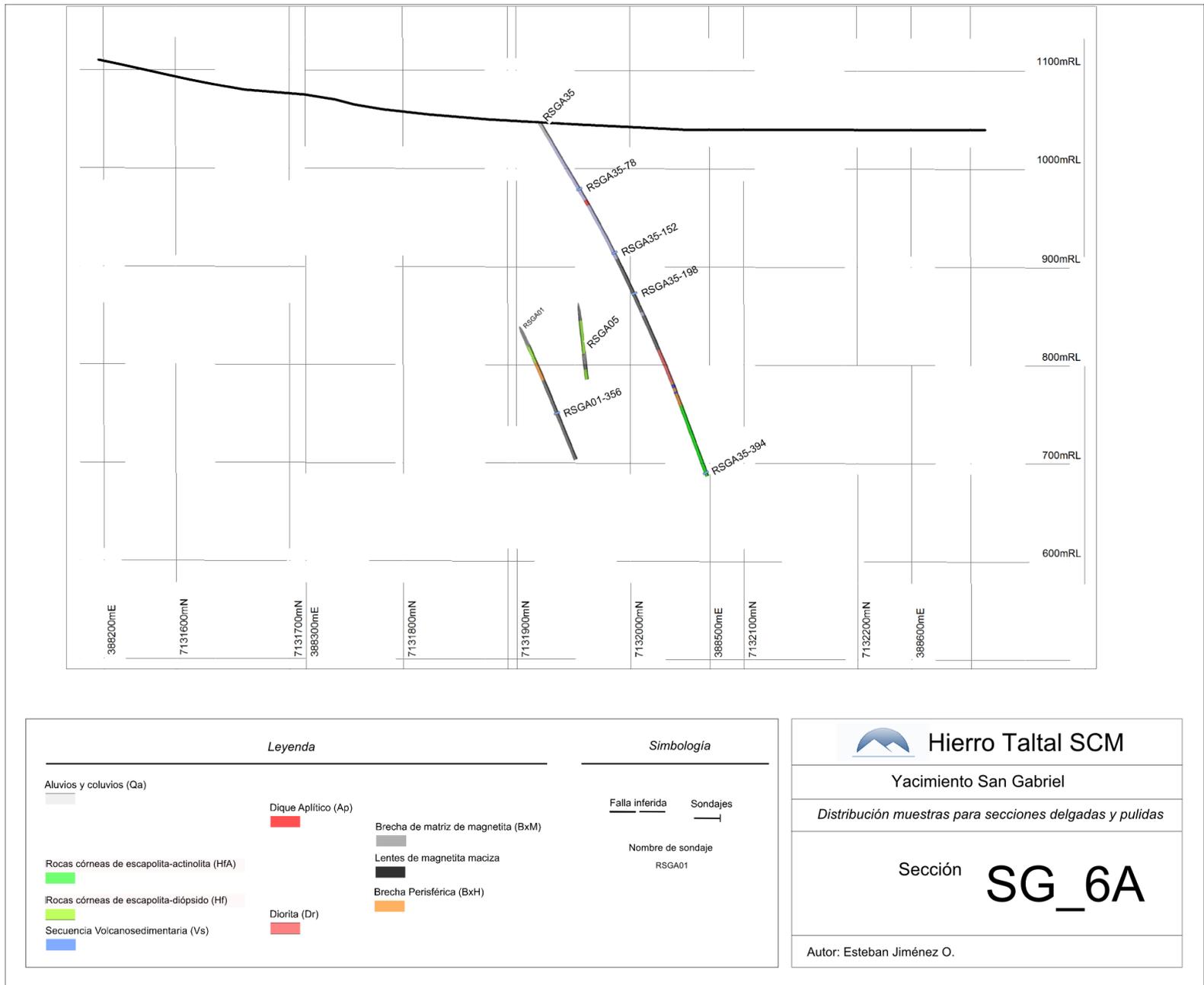


Figura 3-9. Distribución de las muestras estudiadas mediante microscopía óptica, junto con las unidades geológicas representadas en la traza de los sondajes. Sección SG_6A.

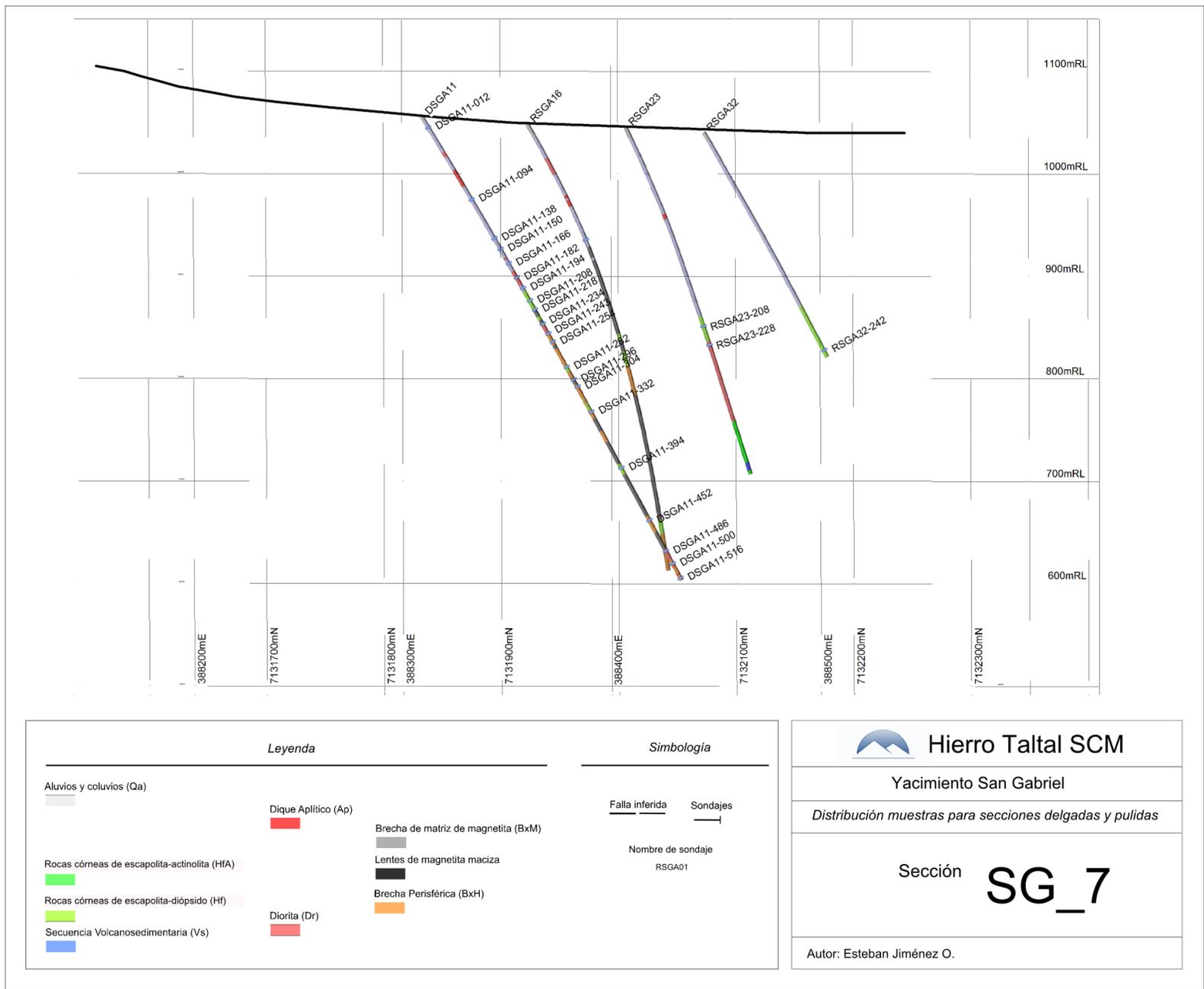


Figura 3-10. . Distribución de las muestras estudiadas mediante microscopía óptica, junto con las unidades geológicas representadas en la traza de los sondajes. Sección SG_7.

fundamental de las rocas volcánicas. A mayor profundidad, el sondaje RSGA23 muestra la existencia de una brecha de matriz de feldespato-clinopiroxeno-magnetita, en contacto con un intrusivo diorítico levemente albitizado. Luego, se exhibe la última litología reconocida por este sondaje, la que corresponde a una roca córnea de escapolita-feldespato-actinolita con mineralización de magnetita diseminada y en cúmulos. En cambio los sondajes RSGA31 y RSGA32, bajo la secuencia volcanosedimentaria, solo interceptan rocas córneas de escapolita-clinopiroxeno, que en el caso del sondaje RSGA31 presenta actinolitización penetrativa de los minerales máficos de la roca.

3.2.2. Petrografía y Calcografía

Las muestras estudiadas pertenecen a diversas litologías, y además exhiben distintos minerales secundarios, asociados a eventos de metamorfismo y/o alteración hidrotermal. Durante el mapeo de sondajes se recolectaron 40 muestras; 21 del sondaje DSGA11 (sondaje diamantino) y 19 repartidas en el resto de los sondajes (sondajes de aire reverso). Todas estas fueron descritas mediante cortes transparentes y pulidos, salvo la muestra DSGA11-013 que solo se estudió mediante sección transparente.

Los minerales identificados durante el estudio de secciones transparentes y pulidas se encuentran en la Tabla 3-3, junto a las abreviaciones de cada mineral.

Tabla 3-2. Minerales identificados, junto a sus abreviaturas.

Mineral	<i>abr.</i>	Mineral	<i>abr.</i>	Mineral	<i>abr.</i>
Actinolita	<i>Act</i>	Cuarzo	<i>Qz</i>	Magnetita	<i>Mt</i>
Anhidrita	<i>Anh</i>	Epidota	<i>Ep</i>	Muscovita	<i>Ms</i>
Apatito	<i>Ap</i>	Escapolita	<i>Scp</i>	Pirita	<i>Py</i>
Arcillas	<i>Arc</i>	Esfalerita	<i>Sp</i>	Plagioclasa	<i>Pl</i>
Calcita	<i>Cal</i>	Especularita	<i>Spc</i>	Prehnita	<i>Prh</i>
Calcopirita	<i>Cpy</i>	Feldespato K	<i>Kfs</i>	Sericita	<i>Ser</i>
Ceolitas	<i>Ceo</i>	Hematita	<i>Hem</i>	Titanita	<i>Ttn</i>
Clinopiroxeno	<i>Cpx</i>	Hornblenda	<i>Hbl</i>	Turmalina	<i>Tur</i>
Clorita	<i>Chl</i>	Ilmenita	<i>Ilm</i>	Zoisita	<i>Zo</i>

En la Tabla 3-3 se presenta un resumen del estudio petrográfico, en donde es asignada una clasificación a cada roca, y además, se muestran las intensidades de alteración de

las asociaciones (descritas en el subcapítulo siguiente) en una escala de 1 a 5, siendo el grado 5 el de mayor intensidad. Además, se incluyen 3 columnas de alteración para cada muestra, donde la “alteración 1” corresponde a metamorfismo/metasomatismo de escapolita-clinopiroxeno o feldespato-clinopiroxeno, la “alteración 2” a clorita-sericita, epidota-sericita o actinolita-epidota, y por último, la “alteración 3” muestra cualquiera de los tipos de asociaciones de metamorfismo/metasomatismo (descritos en el siguiente subcapítulo) que presente la muestra y que tenga menor relevancia que las otros dos tipos de asociaciones. El detalle de las descripciones se encuentra en el ANEXO B

3.2.3. Alteración/Metamorfismo

Mediante la descripción de sondajes y el estudio petrográfico es posible determinar distintas asociaciones minerales de alteración hidrotermal y/o metamorfismo. La génesis de este metamorfismo/metasomatismo es discutida en el capítulo 4.

Las rocas contenidas en las secciones estudiadas muestran diferentes grados de metamorfismo/metasomatismo, variaciones que gradan espacialmente. A continuación se presentan las distintas asociaciones minerales identificadas:

Feldespato – Clinopiroxeno (feld-cpx)

Esta asociación incluye plagioclasa-clinopiroxeno-magnetita \pm feldespato K \pm apatito. Se presenta generalmente como principal componente de matriz de brecha (Figura 3-11a y Figura 3-11b), en donde los feldespatos presentan un hábito anhedral a subhedral, generalmente de 0.5 mm aproximadamente (en algunos casos hasta 7 mm) y se disponen en una textura granoblástica junto con clinopiroxeno y magnetita (Figura 3-11a y Figura 3-11b). Los clinopiroxenos son subhedrales y de 0.8 mm de tamaño en promedio, llegando a ser de hasta 2 mm. Es posible encontrar cristales de apatito en equilibrio con esta asociación; se presentan en el halo de algunas vetillas de clinopiroxeno-magnetita, sin embargo, su ocurrencia es más bien escasa.

Tabla 3-3. Resumen de la petrografía de secciones transparentes.

Muestra	Feld-Cpx	Scp-Cpx	Act-Ep	Ep-Ser	Chl-Ser	Calcita	Observaciones	Nombre	Alteración 1	Alteración 2	Alteración 3
DSGA11-013					2			<i>Basalto porfírico de hornblenda</i>		Chl-Ser	
DSGA11-095		3			1		Poiquiloblastos de escapolita junto con blastos de clinopiroxeno	<i>Meta-basalto</i>	Scp-Cpx	Chl-Ser	
DSGA11-138	1				1		Masa fundamental con leve alt. a feldespato	<i>Basalto porfírico de piroxeno</i>	Feld-Cpx	Chl-Ser	
DSGA11-151	1				2		Masa fundamental con leve alt. a feldespato	<i>Basalto porfírico de hornblenda</i>	Feld-Cpx	Chl-Ser	
DSGA11-167	2	5			2	2	Textura granoblástica	<i>Roca córnea de escapolita-clinopiroxeno</i>	Scp-Cpx	Chl-Ser	Calcita
DSGA11-183	3				2		Recristalización de las plagioclasas y de la masa fundamental	<i>Diorita porfírica de clinopiroxeno</i>	Feld-Cpx	Chl-Ser	
DSGA11-194		3			2		Poiquiloblastos de escapolita junto con blastos de clinopiroxeno	<i>Meta-basalto</i>	Scp-Cpx	Chl-Ser	
DSGA11-208		5		3	2		Textura granoblástica	<i>Roca córnea de escapolita-clinopiroxeno</i>	Scp-Cpx	Ep-Ser	Calcita
DSGA11-219		5			5		Presenta relleno de calcita (evento posterior)	<i>Veta de magnetita-clinopiroxeno</i>	Scp-Cpx	Calcita	
DSGA11-234		5			2			<i>Brecha mx desconocido-clinopiroxeno</i>	Scp-Cpx	Calcita	
DSGA11-243					5			<i>Diorita porfírica de hornblenda</i>		Chl-Ser	
DSGA11-255	5			3	2		Clasto de Andesita Porfírica. Feldespatos fuertemente alterados a sericita y arcillas.	<i>Brecha de feldespato-clinopiroxeno</i>	Feld-Cpx	Ep-Ser	Calcita
DSGA11-283		4			2		Metabasalto	<i>Roca córnea de escapolita-clinopiroxeno</i>	Scp-Cpx	Chl-Ser	
DSGA11-297	5			3	2			<i>Matriz de brecha feldespato-clinopiroxeno</i>	Feld-Cpx	Ep-Ser	Calcita
DSGA11-305	5		2	3	1		Actinolita reemplazando a clinopiroxenos (parcial a totalmente).	<i>Roca córnea de feldespato-clinopiroxeno</i>	Feld-Cpx	Act-Ep	Ep-Ser
DSGA11-332	5		4	2	2		Actinolita reemplazando a clinopiroxenos (parcial a totalmente).	<i>Matriz de brecha feldespato-Clinopiroxeno</i>	Feld-Cpx	Act-Ep	Ep-Ser
DSGA11-395		4	2	3				<i>Roca córnea de escapolita-clinopiroxeno</i>	Scp-Cpx	Act-Ep	Ep-Ser
DSGA11-453	5	2	5	2			Clastos de rocas córneas de escapolita-clinopiroxeno-actinolita.	<i>Brecha de feldespato-clinopiroxeno</i>	Feld-Cpx	Act-Ep	Ep-Ser
DSGA11-486	3				3		Plagioclasas con bordes recristalizados, junto con clinopiroxeno secundario.	<i>Meta-diorita de clinopiroxeno</i>	Feld-Cpx	Ep-Ser	
DSGA11-501	5			3			Clasto de Basalto porfírico.	<i>Brecha de feldespato-clinopiroxeno</i>	Feld-Cpx	Ep-Ser	
DSGA11-516	5			1			Clastos de meta-dioritas.	<i>Brecha de feldespato-clinopiroxeno</i>	Feld-Cpx	Ep-Ser	
RSGA01-108					2			<i>Basalto porfírico de hornblenda</i>		Chl-Ser	
RSGA01-184		2					Poiquiloblastos de escapolita junto con blastos de clinopiroxeno	<i>Andesita porfírica de hornblenda</i>	Scp-Cpx		
RSGA01-356	2		4	1	3		Clastos completamente actinolitizados. En la matriz existen relictos de clinopiroxeno reemplazados por actinolita	<i>Brecha de matriz de magnetita</i>	Feld-Cpx	Act-Ep	Ep-Ser

Tabla 3-3. Resumen de la petrografía de secciones transparentes.

Muestra	Feld-Cpx	Scp-Cpx	Act-Ep	Ep-Ser	Chl-Ser	Calcita	Observaciones	Nombre	Alteración 1	Alteración 2	Alteración 3
RSGA05-064					4		Textura obliterada	<i>Toba de Ceniza</i>		Chl-Ser	
RSGA05-140		2			1		Poiquiloblastos de escapolita junto con blastos de clinopiroxeno	<i>Basalto porfírico de clinopiroxeno</i>	Scp-Cpx	Chl-Ser	
RSGA05-174	1	1			1	2	Clastos de rocas córneas de feldespato clinopiroxeno y de escapolita-clinopiroxeno.	<i>Brecha de matriz de magnetita</i>	Feld-Cpx	Chl-Ser	Calcita
RSGA05-222	3	3		4	1		Es posible observar textura porfírica relictiva (Metabasalto)	<i>Roca córnea de escapolita-clinopiroxeno-feldespato</i>	Feld-Cpx	Ep-Ser	Scp-Cpx
RSGA22-168						1	Magnetita anhedral con trazas de calcita y apatito.	<i>Magnetita maciza</i>	Calcita		
RSGA22-194		5			2		Monomíctica; clastos de meta-basaltos, con metamorfismo de escapolita-clinopiroxeno	<i>Brecha de matriz de magnetita</i>	Scp-Cpx		
RSGA22-230		5					Polimíctica; clastos de meta-basalto y meta-diorita. Con metamorfismo de escapolita-clinopiroxeno	<i>Brecha de matriz de magnetita</i>	Scp-Cpx		
RSGA23-208		5		3			Poiquiloblastos de escapolita junto con blastos de clinopiroxeno. Textura granoblástica poligonal.	<i>Roca córnea de escapolita-clinopiroxeno</i>	Scp-Cpx	Ep-Ser	
RSGA23-228					1		Plagioclasas recrystalizadas.	<i>Diorita de clinopiroxeno</i>		Chl-Ser	
RSGA27-302	2				3		Monomíctica; clastos de diorita.	<i>Brecha de matriz de magnetita</i>	Feld-Cpx	Chl-Ser	
RSGA31-244	3	3	4		2		Las rocas se encuentran actinolizadas; es posible encontrar relictos de clinopiroxenos parcialmente alterados a actinolita.	<i>Rocas Córneas de escapolita-clinopiroxeno y feldespato-clinopiroxeno</i>	Feld-Cpx	Act-Ep	Chl-Ser
RSGA32-242		4		3	1		Textura granoblástica.	<i>Rocas Córneas de escapolita-clinopiroxeno y feldespato-clinopiroxeno</i>	Scp-Cpx	Ep-Ser	Feld-Cpx
RSGA35-078		4		2			Metabasalto con poiquiloblastos de escapolita y blastos de clinopiroxeno.	<i>Roca córnea de escapolita-clinopiroxeno</i>	Scp-Cpx	Ep-Ser	
RSGA35-152		2			1		Poiquiloblastos de escapolita junto con blastos de clinopiroxeno	<i>Basalto de clinopiroxeno</i>	Scp-Cpx	Chl-Ser	
RSGA35-198		3			2		Monomíctica; clastos de meta-basalto, Este presenta poiquiloblastos de escapolita.	<i>Brecha de matriz de magnetita</i>	Scp-Cpx	Chl-Ser	
RSGA35-394		3	3	2	2	2	Clastos Obliterados	<i>Roca córnea de escapolita actinolizado</i>	Scp-Cpx	Act-Ep	Calcita

Escapolita – Clinopiroxeno (scp-cpx)

Asociación mineral compuesta por escapolita-clinopiroxeno±magnetita±feldespato K. La intensidad con que esta asociación ocurre en las rocas es altamente variable; va desde incipiente, generalmente en basaltos (Figura 3-11c y Figura 3-11d), donde la escapolita exhibe un hábito anhedral, de textura poiquiloblástica; encerrando minerales primarios (plagioclasas en general) y cristales anhedrales de clinopiroxeno (de tamaño menor a 0.5 mm), hasta una alteración fuertemente penetrativa, obliterando completamente la roca, manifestándose en una textura granoblástica subpoligonal, con escapolitas centimétricas de hábito subhedral tabular, clinopiroxenos subhedrales y magnetita, estos últimos en relleno de espacios entre los porfidoblástos de escapolitas. En ocasiones es posible observar feldespatos en equilibrio con esta asociación.

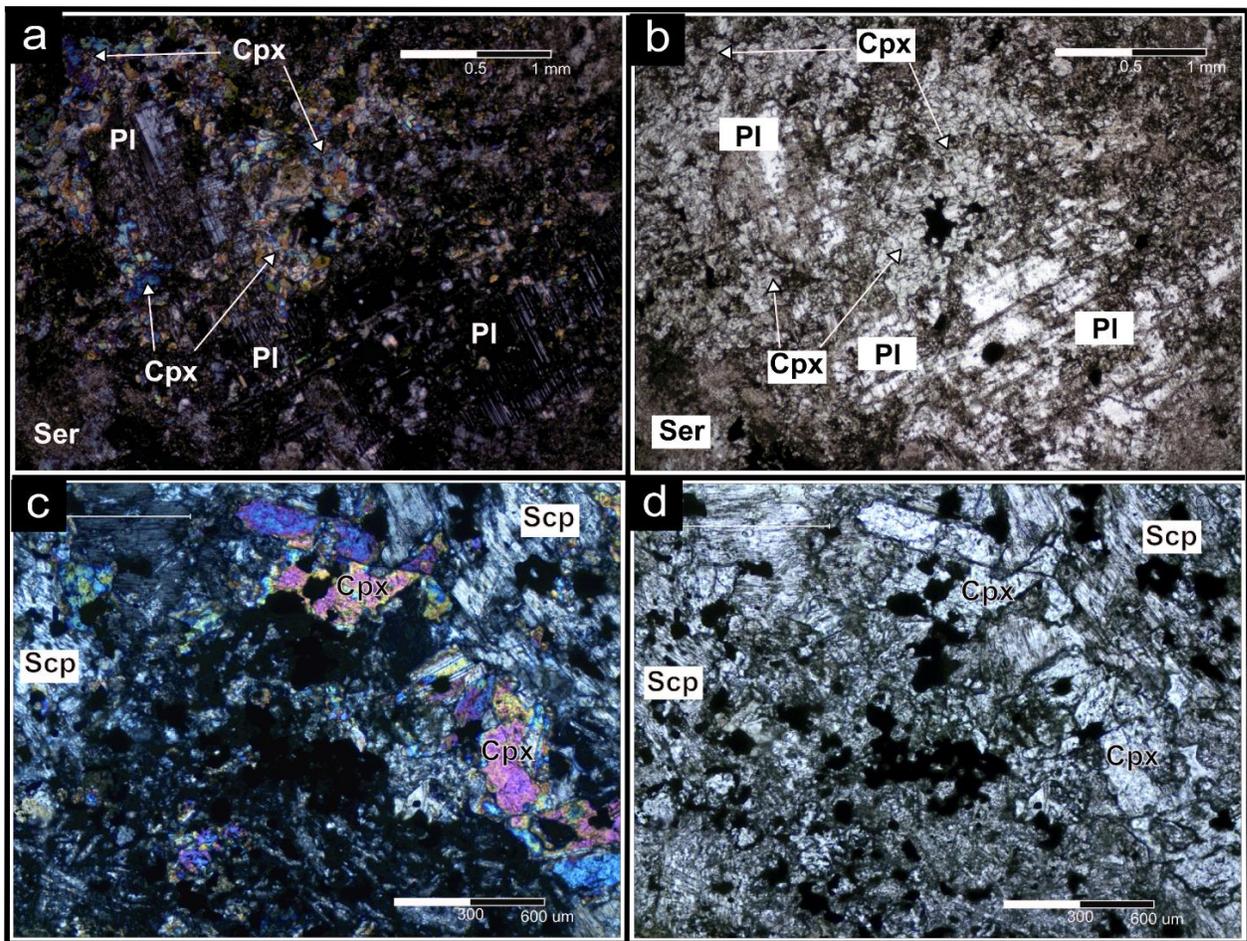


Figura 3-11. Fotomicrografías en luz transmitida (*scp-cpx*): (a-b) muestra DSGA11- 501 a 5x y (c-d) DSGA11-283 a 10x. Cada par de fotomicrografías corresponde a la misma imagen tomadas en distintos nicols; las imágenes de la izquierda son a nicols cruzados y las de la derecha a nicols paralelos

Las vetillas identificadas con esta asociación son de tamaños milimétricos, irregulares, sinuosas y discontinuas. El relleno se compone principalmente de magnetita anhedral y clinopiroxenos subhedrales. Además, presentan un halo de escapolita que en ocasiones es acompañado de clinopiroxenos.

Actinolita – Epidota (act-ep)

Se conforma de actinolita-epidota±magnetita±muscovita±sericita±zoisita. Esta asociación se presenta como alteración de la roca, de intensidad moderada a fuerte. Las actinolitas son subhedrales, de tamaño variable de 0.05 a 1 mm; sin embargo, es posible encontrarlas de tamaño centimétrico. Se presentan en varios estilos: diseminadas en la roca, en cúmulos junto con epidota, zoisita y/o muscovita, y también como alteración selectiva a blastos de clinopiroxenos. Las epidotas y zoisitas preferentemente se observan en cúmulos junto a sericita y muscovita, y en menor proporción diseminadas. La zoisita, a diferencia de la epidota, se presenta subhedral a euhedral con hábito prismático, no obstante, ambas muestran un rango de tamaño similar, entre 0.2 y 1 mm (excepcionalmente hasta 3 mm). La sericita se presenta en reemplazo selectivo de feldespatos, de forma parcial a completa.

La Figura 3-12a y la Figura 3-12b ilustran un ejemplo de esta asociación; la muestra corresponde a una matriz de brecha de feldespato-clinopiroxeno, la cual presenta la asociación actinolita-epidota±magnetita±muscovita±sericita±zoisita interpretada como producto de una alteración posterior.

Por otra parte, existen vetillas rellenas de magnetita con menor actinolita y epidota. La actinolita se observa de integridad baja (parcialmente cloritizada) junto con epidota anhedral. Estas vetillas se ubican espacialmente con la asociación actinolita-epidota.

Epidota – Sericita (ep-ser)

Formada por epidota-zoisita-sericita±arcillas±muscovita. La intensidad de alteración de esta asociación es débil a moderada. Generalmente se presenta en cúmulos y los minerales son de grano muy fino; las epidotas y zoisitas no superan el milímetro de tamaño. La zoisita es subhedral a euhedral, al igual que la muscovita. Las arcillas y

sericitas se presentan en un reemplazo selectivo de los feldespatos (tanto primarios como producto de metamorfismo/metasomatismo).

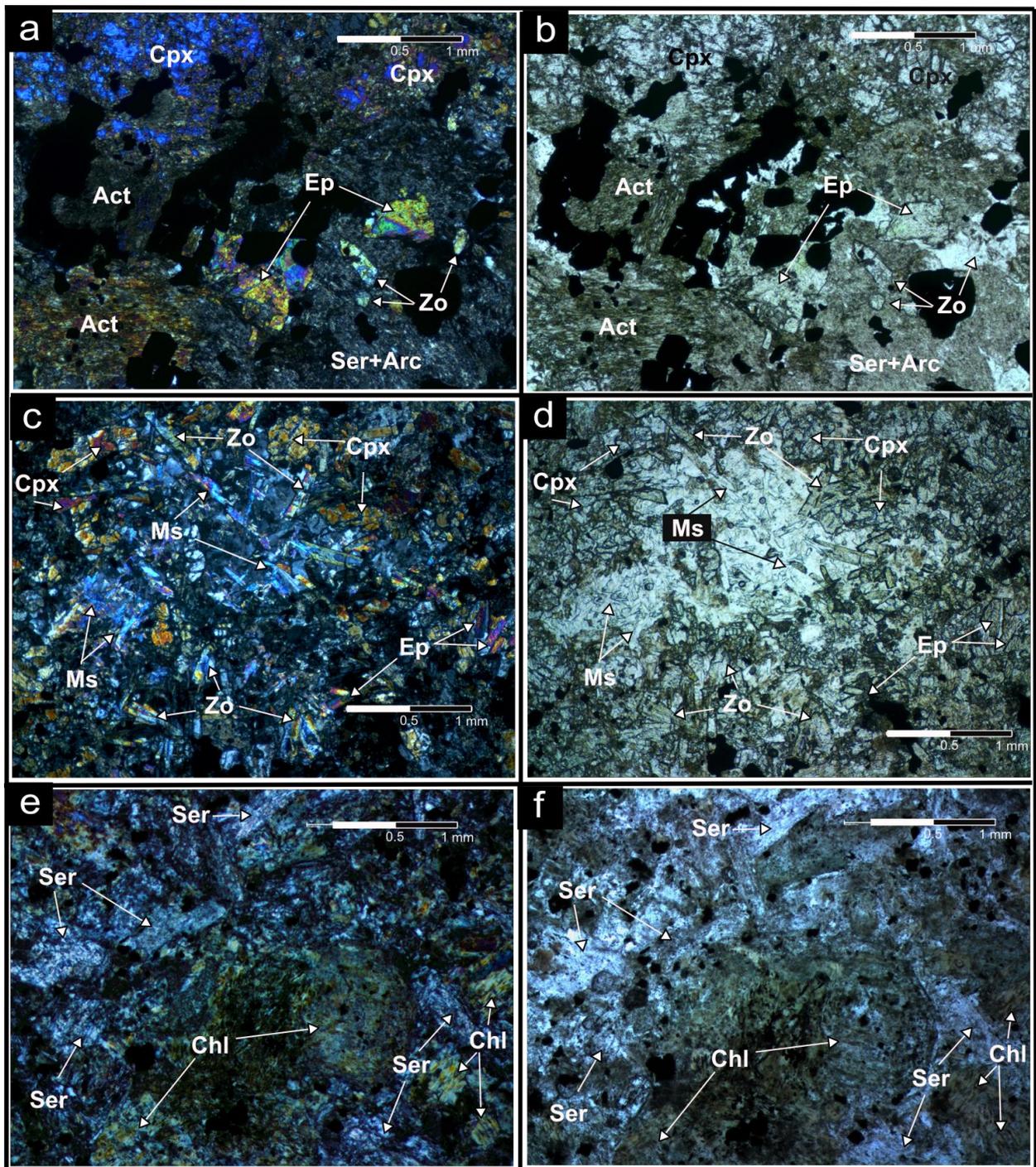


Figura 3-12. Fotomicrografías en luz transmitida (act-ep, ep-ser y chl-ser) a 5x: (a-b) muestra DSGA11-305, (c-d) DSGA11-208 y (e-f) DSGA-243. Cada par de fotomicrografías corresponde a la misma imagen tomadas en distintos nicoles; las imágenes de la izquierda son a nicoles cruzados y las de la derecha a nicoles paralelos.

Un ejemplo de esta alteración se muestra en la Figura 3-12c y Figura 3-12d, que corresponde a una roca córnea de escapolita-clinopiroxeno con cúmulos de epidota-zoisita-muscovita (correspondiente a la asociación *epidota-sericita*). Al igual que la asociación actinolita-epidota; esta (*epidota-sericita*) se interpreta como posterior al evento que dio origen a roca; en este caso al metamorfismo/metasomatismo de escapolita-clinopiroxeno.

Clorita – Sericita (chl-ser)

Esta asociación se compone por clorita-sericita-arcillas. Este conjunto de minerales se encuentra ampliamente distribuido como alteración de las rocas de forma leve a incipiente. La clorita se presenta anhedral, en un rango de tamaño entre los 0.05 y 2 mm, y se muestra de diversas formas: en reemplazo de vidrio volcánico (en lavas) y como producto de alteración de minerales máficos (anfíbolos y piroxenos). Además, es posible observarla en los clivajes de la escapolita (en rocas córneas de escapolita-clinopiroxeno). La sericita se presenta en reemplazo parcial de los feldespatos y en ocasiones de forma total, al igual que las arcillas. Además, estas últimas se observan en reemplazo de vidrio volcánico y de los clinopiroxenos.

La Figura 3-12e y Figura 3-12f muestra un ejemplo de esta asociación; plagioclasas completamente reemplazadas por sericita y los máficos totalmente cloritizados, esto ocurre en una diorita de hornblenda.

Ceolita- Calcita (cal-ceo)

Se manifiesta exclusivamente en vetillas de no más de 2 mm de espesor, rellenas por ceolitas y menor calcita. Se presentan en todas las unidades geológicas de forma esporádica. Las relaciones de cortes con el resto de las vetillas indican que estas vetillas son las más jóvenes del sistema.

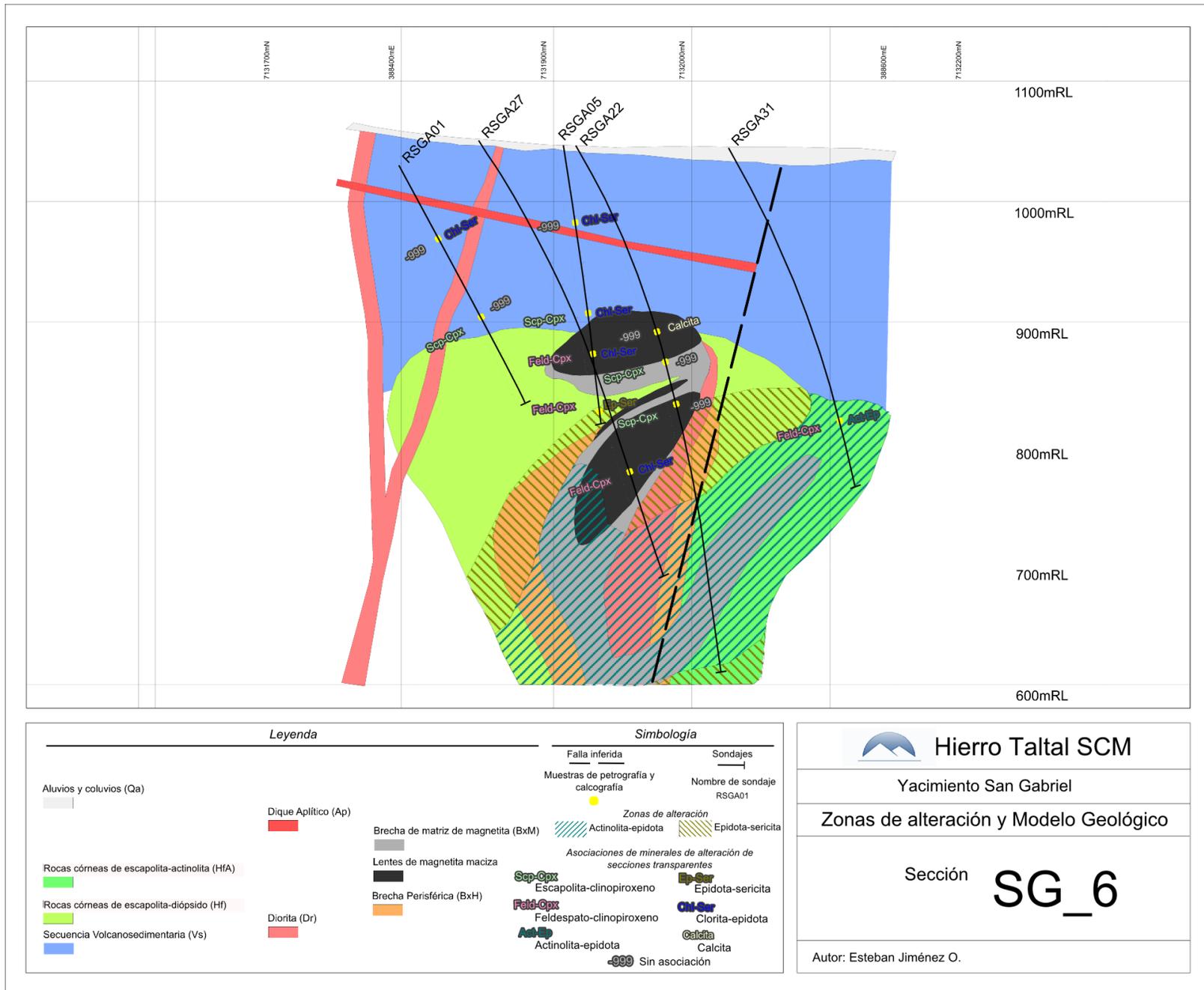


Figura 3-13. Zonas de alteración y modelo geológico; sección SG_6.

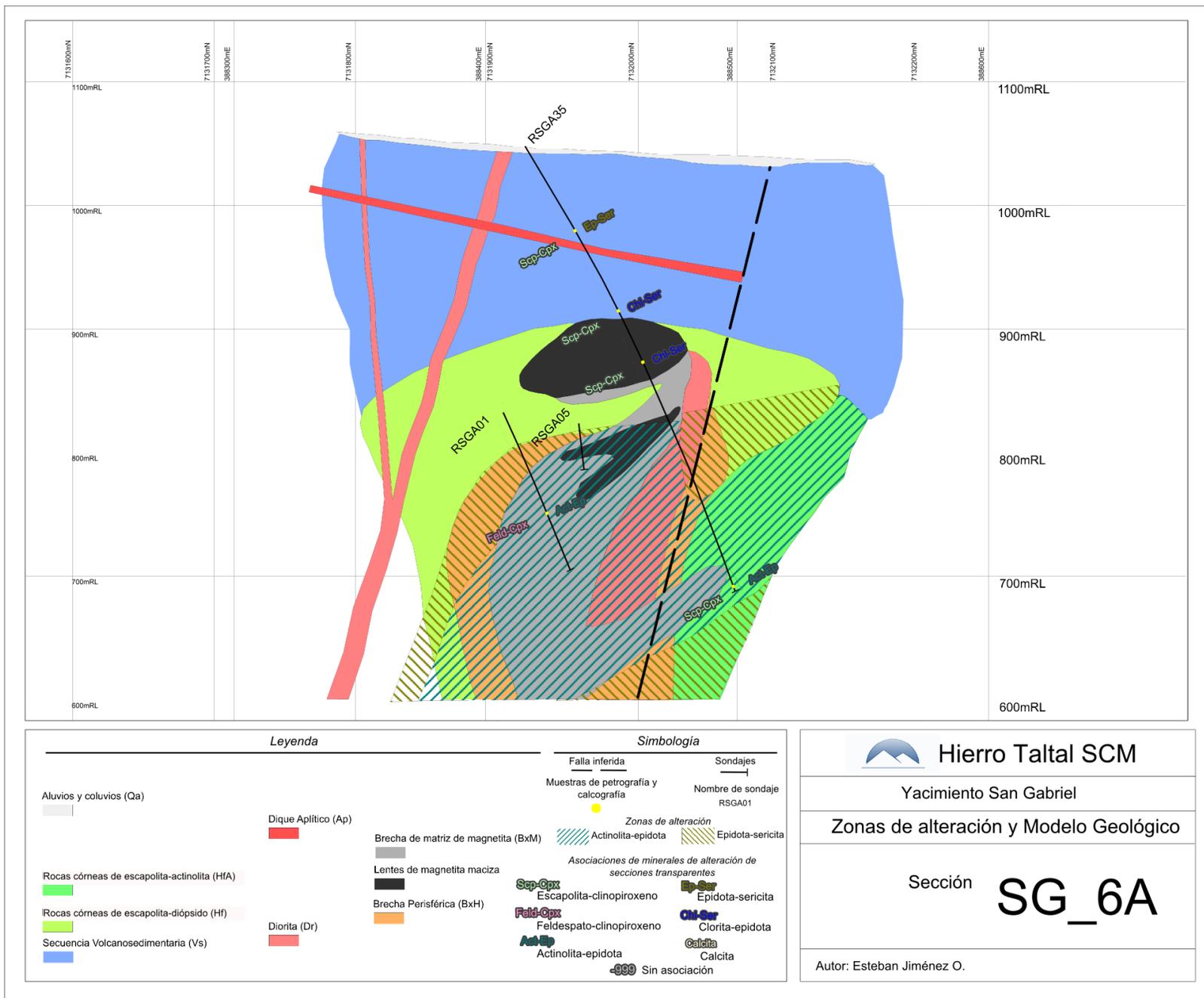


Figura 3-14. Zonas de alteración y modelo geológico; sección SG_6A.

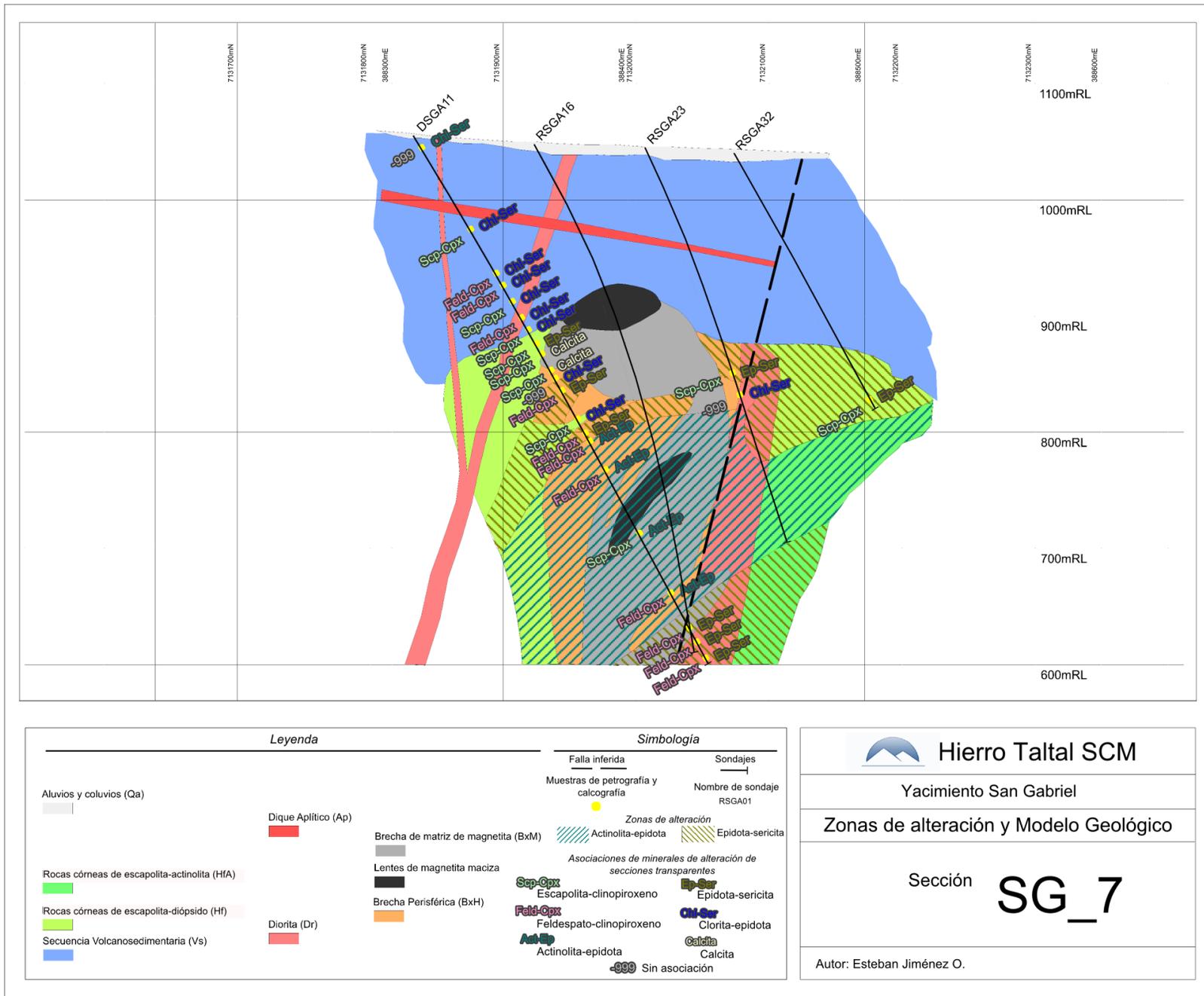


Figura 3-15. Zonas de alteraci3n y modelo geol3gico; secci3n SG_7.

En la Tabla 3-4, se muestra un resumen de las asociaciones descritas en este subcapítulo.

Tabla 3-4. Asociaciones de minerales metamórficos/metasomáticos.

Nombre de Asociación	Abreviación	Minerales	Preferentemente en
Feldespato-Clinopiroxeno	<i>feld-cpx</i>	plagioclasa-clinopiroxeno-magnetita±feldespato k±apatito	BxH
Escapolita-Clinopiroxeno	<i>scp-cpx</i>	escapolita-clinopiroxeno±magnetita±feldespato K	Hf
Actinolita-Epidota	<i>act-ep</i>	actinolita-epidota±magnetita±muscovita±sericita±zoisita	-
Epidota-Sericita	<i>ep-ser</i>	epidota-zoisita-sericita±arcillas±muscovita	-
Clorita-Sericita	<i>chl-ser</i>	clorita-sericita-arcillas	Vs

Cabe mencionar que debido a que algunas unidades geológicas incluyen rocas metamórficas (unidades Hf y HfA) o corresponden a brechas (unidades BxM y BxH), presentan algunas de las asociaciones de minerales de forma intrínseca. Por ejemplo, las rocas de la unidad de Rocas Córneas de escapolita-diópsido presentan la asociación escapolita-clinopiroxeno. Es por esto que el modelo geológico de alteración excluye las asociaciones que se encuentren implícitas en las unidades geológicas y solo se modelaron las asociaciones *actinolita-epidota* y *epidota-sericita*.

3.2.4. Mineralización

La mineralización de este yacimiento de óxidos de hierro consiste principalmente y de forma exclusiva en magnetita con cantidades menores de especularita. Además, en algunos casos es posible distinguir martita; presente en los bordes y en los clivajes de la magnetita (Figura 3-16a).

En secciones pulidas y transparentes, es posible observar que junto con la mineralización se presentan minerales como: titanita, ilmenita, calcopirita, pirita y esfalerita. Sin embargo, su ocurrencia es más bien escasa. A continuación se describen los tipos de mineralización de magnetita:

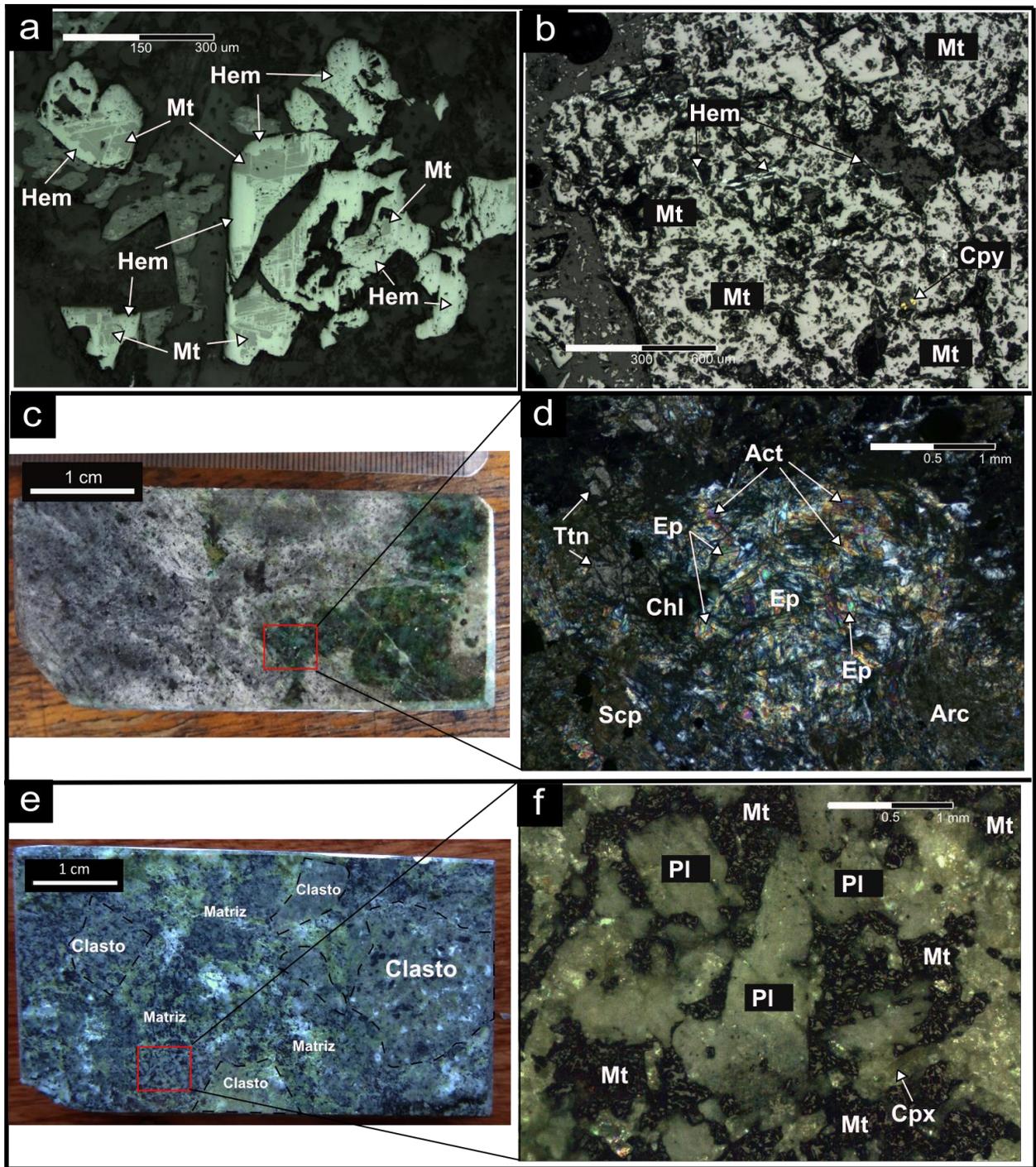


Figura 3-16. Imágenes que ejemplifican la mineralización: (a) fotomicrografía (20x) a luz reflejada a nicoles paralelos de la muestra RSGA31-244 (briqueta), mostrando magnetita martitizada; (b) fotomicrografía (10x) a luz reflejada a nicoles paralelos de la muestra RSGA05-174 (briqueta), se observa magnetita anhedral con menor especularita y calcopirita; (c) fotografía de la muestra DSGA11-395, correspondiente a un clasto de roca córnea dentro del cuerpo de brecha de magnetita; (d) fotomicrografía (5x) a luz transmitida a nicoles cruzados de la muestra DSGA11-395, mostrando los minerales de alteración (actinolita-epidota-clorita y menor titanita) que acompañan la mineralización; (e) fotografía de la muestra DSGA11-255, representa un fragmento de una brecha de matriz de feldespato-clinopiroxeno; (f) fotomicrografía (5x) a luz reflejada a nicoles cruzados de la muestra DSGA11-255, mostrando la matriz compuesta de magnetita-plagioclasa-clinopiroxeno.

Lentes de magnetita maciza

Durante el mapeo de sondajes en estos cuerpos se observó solo magnetita maciza anhedral con leve presencia de calcita y, en ocasiones, también presenta escasos fragmentos de roca de color verde completamente obliterada. Sin embargo, el estudio petrográfico revela la presencia de microinclusiones de clinopiroxeno y calcita dentro de la magnetita, y además fragmentos de metabasaltos presentando la asociación mineral *escapolita-clinopiroxeno*. También es posible encontrar especularita lamelar dentro de la magnetita, no obstante, es de escasa abundancia (Figura 3-16b).

Brechas de magnetita

Existen brechas con matriz de magnetita anhedral, maciza y de alta integridad (existen muestras con martitización en los bordes y en los clivajes de la magnetita, sin embargo, es de muy baja intensidad). Esta mineralización viene acompañada de dos distintas asociaciones: *actinolita-epidota* en la parte más profunda del yacimiento (en general, bajo la cota 750 m), en donde en la matriz se encuentran cristales subhedrales, milimétricos a centimétricos, de actinolita y menor epidota, y en los fragmentos se presentan igual tipo de minerales de alteración/metamorfismo (Figura 3-16c y Figura 3-16d). En niveles superiores ocurre *escapolita-clinopiroxeno*, exhibiendo cristales subhedrales de clinopiroxeno junto con magnetita en la matriz y escapolita y clinopiroxeno como alteración de los fragmentos.

Mineralización diseminada

Este estilo se encuentra ampliamente distribuido, es posible encontrarlo en todas las litologías, sin embargo, tiene un mejor desarrollo en las Rocas Córneas de escapolita-diópsido y en la matriz de las brechas de feldespato-clinopiroxeno (Figura 3-16e y Figura 3-16f). En las rocas anteriores, la magnetita generalmente se encuentra en relleno de los intersticios entre los porfidoblástos de escapolita o plagioclasa según corresponda. Presenta un rango de tamaño entre los 0.001 y 2 mm, mostrando siempre un hábito anhedral y de forma maciza.

La magnetita presenta una leve martitización en los bordes y en los clivajes, producto de oxidación supérgena. El grado de oxidación de la magnetita disminuye progresivamente con la profundidad.

Vetillas

Se observan distintos tipos de vetillas con mineralización de magnetita, sin embargo, existen 3 tipos de vetillas dominantes:

- a. *Magnetita-clinopiroxeno±escapolita±apatito±sericita*: Presentan un relleno de magnetita maciza junto con cristales subhedrales a euhedrales de clinopiroxeno, con halos de clinopiroxeno-escapolita, sericita o apatito. En general, son de espesores milimétricos, sinuosas e irregulares, aunque cerca de los cuerpos de brecha se presentan en un régimen frágil y de mayor espesor (< 6 cm).
- b. *Magnetita-actinolita±epidota*: Vetillas de corte recto, de espesores centimétricos, rellenas principalmente por magnetita, menor actinolita y epidota. Se encuentran en las partes profundas del sistema, cercanas a la brechas de magnetita maciza.
- c. *Feldespato-magnetita±clinopiroxeno±escapolita*: Este tipo de vetillas se presentan en las partes más profundas (bajo la cota 550 m), son de tamaño milimétrico a centimétrico, y están rellenas principalmente por feldespato subhedral junto a magnetita anhedral. En ocasiones presentan un halo de clinopiroxeno-escapolita.

3.2.5. Análisis SEM

En 3 muestras se analizaron 12 minerales mediante análisis SEM: muestras RSGA23-208 (corte transparente-pulido), RSGA31-244 (corte transparente-pulido) y DSGA11-208 (corte pulido). El objetivo de este análisis es identificar la composición de ciertas especies minerales. Los resultados entregados dan a conocer las concentraciones de elementos en proporción atómica y en porcentaje en peso. Estos resultados se transformaron a porcentaje en peso de óxidos para luego obtener el número de iones por unidad de fórmula.

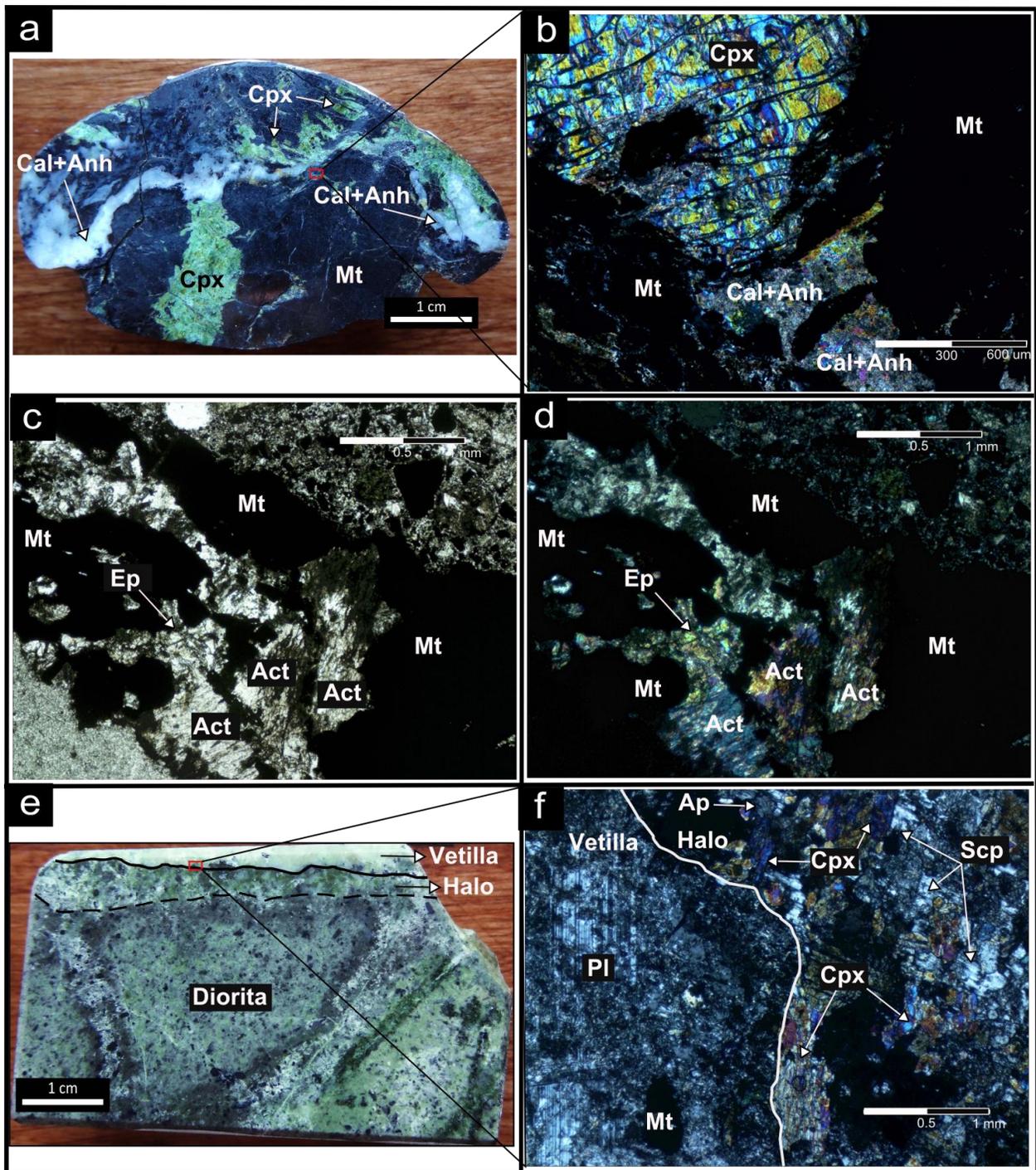


Figura 3-17. Imágenes que ejemplifican los tres tipos de vetillas principales; (a) fotografía de la muestra DSGA11-219, correspondiente a un fragmento de vetilla magnetita-clinopiroxeno rellena posteriormente por calcita-anhidrita; (b) fotomicrografía (10x) a luz transmitida a nicoles cruzados de la muestra DSGA11-219; (c) fotomicrografía (5x) a luz transmitida a nicoles paralelos de la muestra RSGA01-356 (briqueta), que exhibe un fragmento de vetilla de magnetita-actinolita-epidota; (d) ídem a la fotomicrografía anterior, pero a nicoles cruzados; (e) fotografía de la muestra DSGA11-486, correspondiente a un fragmento de diorita con vetillas de plagioclasa-magnetita con halos de clinopiroxeno-escapolita-apatito; y (f) fotomicrografía (5x) a luz transmitida a nicoles cruzados de la muestra DSGA11-486.

A continuación se presentan los análisis (los certificados se encuentran en el ANEXO F):

Escapolita

De acuerdo a Shaw (1960) la composición de la escapolita se expresa por la fórmula general $W_4Z_{12}O_{24}R$, donde $W = Ca, Na, K$; $Z = Si, Al$; $R = Cl, CO_3, SO_4$. La composición de los dos miembros extremos de la serie, expresada analógicamente a la de las plagioclasas, se presenta como $3NaAlSi_3O_8.NaCl$ (marialita, Ma) y $3CaAl_2Si_2O_8.CaCO_3$ (meionita, Me). La nomenclatura de clasificación de esta serie es marialita, Me_0-Me_{20} ; dipiro, $Me_{20}-Me_{50}$; mizzonita, $Me_{50}-Me_{80}$; meionita, $Me_{80}-Me_{100}$.

Tabla 3-5. Análisis SEM correspondiente a escapolita.

Análisis	1
Muestra	RSGA23-208
O	62.93
Si	18.63
Al	7.78
Ca	1.51
Na	6.55
K	0.38
Cl	2.23
Total	100

Número de iones en base a ${}^1Z=12$

Si	8.46	} 12
Al	3.54	
Ca	0.69	
Na	2.98	} 3.84
K	0.17	
Cl	1.01	
${}^2\% Me$	17.89	

$${}^1 Z = (Si + Al)$$

$${}^2 \% Me = 100(Ca + Mg + Fe + Mn + Ti) / (Na + K + Ca + Mg + Fe + Mn + Ti)$$

En la Tabla 3-5, se presenta un análisis composicional realizado en la muestra RSGA23-208, correspondiente a escapolita. Se observa que Na representa la mayor parte del componente W, lo que concuerda con que Cl complete la componente R. Además, el porcentaje de meionita equivale a un 17.89%, lo que implica que la clasificación de este mineral corresponde a Marialita.

Feldespatos

En las muestras RSGA31-244 y DSGA11-208 se realizaron 4 medidas en total (Tabla 3-6), en 4 diferentes cristales de feldespato; 2 de plagioclasas y 2 de feldespato potásico. Los resultados se normalizaron de acuerdo a $(Si+Al+Fe)=4$. Según estos análisis, las plagioclasas corresponden a albita (%Ab entre 97 y 98%), mientras que los feldespatos potásicos presentan una pequeña componente de albita, que no supera el 10%.

Tabla 3-6. Análisis SEM correspondiente a feldespatos.

Análisis	8	4	5	9
Muestra	RSGA31-244	DSGA11-208	DSGA11-208	RSGA31-244
O	64.26	65.40	65.79	64.35
Si	21.75	20.94	20.91	21.90
Al	7.04	6.84	6.43	7.26
Fe	0.08	0.09	0.00	0.00
Ca	0.14	0.19	0.00	0.00
Na	6.73	6.55	0.68	0.31
K	0.00	0.00	6.18	6.08
Ba	0.00	0.00	0.00	0.11
Total	100.00	100.01	99.99	100.01

Número de iones en base a $(Si+Al+Fe)=4$				
Si	3.01	3.01	3.06	3.00
Al	0.98	0.98	0.94	1.00
Fe ⁺³	0.01	0.01	0.00	0.00
Ca	0.02	0.03	0.00	0.00
Na	0.93	0.94	0.10	0.04
K	0.00	0.00	0.90	0.83
Ba	0.00	0.00	0.00	0.02
	4	4	4	4
	0.95	0.97	1	0.89
%Ab	97.96	97.18	9.91	4.85
%An	2.04	2.82	0.00	0.00
%Or	0.00	0.00	90.09	95.15

Clinopiroxeno

Para determinar la composición de los clinopiroxenos presentes en las Rocas Córneas de escapolita-clinopiroxeno, se realizaron análisis en las muestras RSGA23-208 y DSGA11-208 (Tabla 3-7). Según la fórmula general de los piroxenos $[(M2)(M1)(Si,Al)_2O_6]$, estos corresponden a piroxenos cálcicos (clinopiroxenos), donde el calcio ocupa entre un 87 a un 94% del sitio M2 junto a menores cantidades de Mg (<9% de M2) y en ocasiones con Na (<4% de M2). El sitio M1 lo conforma principalmente el Mg (82 a 90% de M1) seguido por Fe (10 a 13% de M1) y bajas cantidades de Al. De acuerdo a las proporciones de wollastonita (Wo), enstatita (En) y ferrosilita (Fs), se clasifican estos análisis en un

diagrama ternario de clasificación de clinopiroxenos (Figura 3-18), que revela que la composición de estos clinopiroxenos corresponden a diópsidos.

Tabla 3-7. Análisis SEM correspondiente a clinopiroxenos.

Análisis Muestra	2 RSGA23-208	3 RSGA23-208	6 DSGA11-208	7 DSGA11-208
O	64.47	64.74	63.84	63.35
Si	17.83	17.65	18.16	18.53
Al	0.00	0.00	0.29	0.36
Fe	1.06	0.87	1.19	1.11
Mg	8.54	8.43	7.88	8.32
Ca	8.10	8.31	8.31	7.99
Na	0.00	0.00	0.34	0.35
Total	100.00	100.00	100.01	100.01

	Número de iones en base a 6 O			
Si	2.00	2.00	2.00	2.00
Fe ⁺³ + Fe ⁺²	0.12	0.10	0.13	0.12
Al	0.00	0.00	0.03	0.04
Mg	0.82	0.90	0.83	0.82
Ca	0.87	0.94	0.92	0.87
Na	0.04	0.00	0.04	0.04
Mg	0.09	0.06	0.04	0.09
	0.94	1	0.99	0.98
	1	1	1	1

%Wo	45.76	47.18	47.81	45.85
%En	48.22	47.86	45.34	47.76
%Fs	6.01	4.95	6.85	6.39

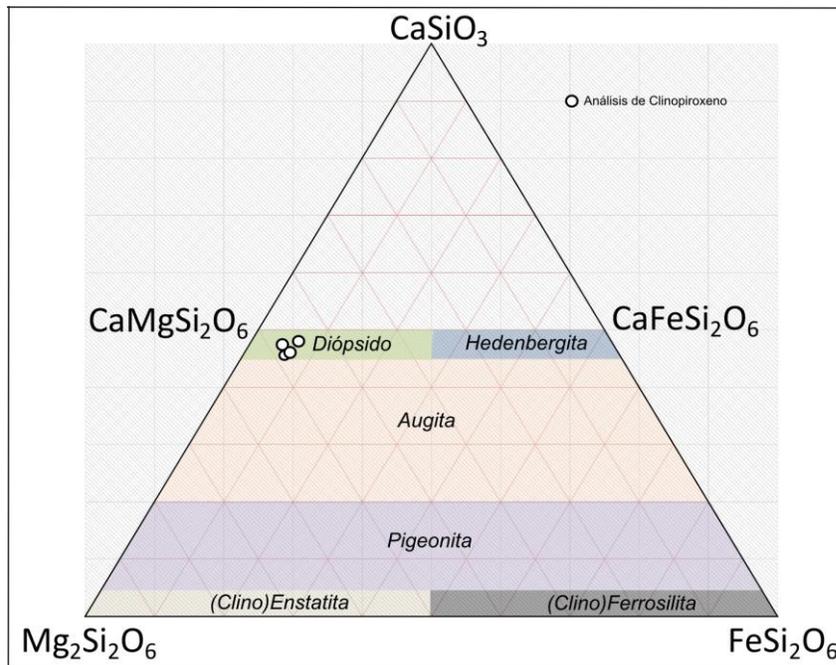


Figura 3-18. Diagrama de clasificación de clinopiroxenos.

Actinolita

Los análisis para determinar la composición de la actinolita se realizaron en la muestra RSGA31-244, los resultados se presentan en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8. Análisis SEM correspondiente actinolitas.

Análisis	10	11	12
Muestra	RSGA31-244	RSGA31-244	RSGA31-244
O	64.03	63.04	64.64
Si	19.38	19.32	18.15
Ti	-	-	0.09
Al	0.25	0.8	1.25
Fe	2.28	2.15	2.21
Mn	0.18	-	0.16
Mg	9.34	10.01	9.09
Ca	4.53	4.67	4.41
Total	99.99	99.99	100

Número de iones en base a 24 O

Si	8.03	8.03	7.84	8	7.70	8
Al	-		0.16		0.30	
Ti	-		-		0.04	
Al	0.10	5	0.17	5	0.23	5
Fe ⁺²	0.95		0.77		0.88	
Mn ⁺²	0.07		-		-	
Mg	3.87	1.88	4.06	2	3.86	2
Ca	1.88		1.89		1.87	
Mn ⁺²	0.00		-		0.07	
Fe ⁺²	-	0.103	0.103	2.00	0.059	2.00
OH	2.00		2.00		2.00	
%Mg/(Mg + Fe)	80.29		82.28		80.43	

Una fórmula general de las anfíbolas puede ser escrita como $A_{0-1}B_2C_5T_8O_{22}(OH,F)_2$ donde los cationes más comunes en cada sitio estructural son: A- Na, K; B- Na, Ca, Mg, Fe⁺², Mn, Li; C- Mg, Fe⁺², Al, Fe⁺³, Mn, Zn, Cr, Ti, Li; y T-Si, Al (Deer et. al, 1966). En la Tabla 3-8 se muestran los análisis realizados en anfíbolas, junto al número de iones en base a la normalización de 24 O. En este caso se concluye que los sitios; B se compone de ~95% Ca junto a cantidades menores de Mn⁺² y Fe⁺²; C presenta ~80% de Mg junto a ~17% Fe y en algunas ocasiones con trazas de Mn⁺² y Ti; T se encuentra ocupado casi exclusivamente por Si con reemplazos de Al de hasta 4%; y el sitio A se encuentra vacío. Según lo anterior estos análisis corresponden a anfíbolas de la serie tremolita, actinolita y ferroactinolita $[Ca_2(Mg,Fe^{+2})_5(Si_8O_{22})(OH,F)_2]$, donde los rangos de $X = Mg/(Mg + Fe) =$

1.0-0.9, 0.9-0.5 y 0.5-0.0 son utilizado para discriminar entre estas anfíbolas respectivamente, por lo tanto estas anfíbolas corresponden a actinolita.

3.2.6. Mineralogía y texturas según unidades geológicas

A continuación se describe la mineralogía y texturas de las rocas de las distintas unidades geológicas en base a la descripción petrográfica realizada:

Secuencia Volcanosedimentaria (VS)

Los basaltos pertenecientes a esta unidad se caracterizan por tener texturas porfíricas y traquíticas, los fenocristales corresponden a plagioclasa y los microlitos a plagioclasa y diópsido.

Es posible encontrar la asociación mineralógica *clorita-sericita* como alteración de fondo en gran parte de esta unidad. Además, a medida que aumenta la profundidad, en la vecindad del cuerpo de brecha de matriz de magnetita, comienza a manifestarse gradualmente la asociación *escapolita-clinopiroxeno*; poiquiloblastos de escapolita con inclusiones de diópsido.

Rocas Córneas de escapolita-diópsido (Hf)

Corresponden a rocas córneas granoblásticas de escapolita y diópsido (asociación mineralógica *escapolita-clinopiroxeno*), exhibiendo abundantes porfidoblastos de escapolita subhedral junto a blastos de diópsido anhedrales a subhedrales; plagioclasas anhedrales; feldespato K anhedral y magnetita anhedral. En algunos casos es posible reconocer lavas como protolitos (menores tobas), sin embargo, en la mayoría de las rocas las texturas primarias han sido completamente obliteradas. Se observan alteraciones posteriores: en algunos casos la asociación *clorita-sericita*; clorita anhedral en reemplazo leve en escapolita (generalmente en los bordes), y en otros casos la asociación *epidota-sericita*; epidota, zoisita y/o muscovita en cúmulos, en ambos casos la sericita se presenta como alteración selectiva de los feldespatos

Rocas Córneas de escapolita-actinolita (HfA)

Presentan texturas, en general, obliteradas, granoblásticas y poiquiloblásticas. La mineralogía presente en estas rocas es similar a las rocas de la unidad de Rocas Córneas de escapolita-diópsido, sin embargo, no se observa diópsido y presenta cristales subhedrales de actinolita. Además, estas rocas presentan mayor cantidad de plagioclasa (albita) que las rocas de escapolita-diópsido.

Esta unidad presenta la asociación *actinolita-epidota* y la asociación *epidota-sericita*.

Brecha Periférica (BxH)

Esta brecha se describe como polimíctica matriz soportada, con fragmentos subredondeados a angulosos de rocas córneas, meta-basaltos y dioritas, los cuales son difíciles de distinguir de la matriz debido a que la alteración es muy penetrativa; caracterizada por escapolita-diópsido (en algunos casos la escapolita está ausente), y además, presentan una segunda alteración sobre impuesta a la anterior que puede ser *epidota-sericita* o *actinolita-epidota*.

La matriz se compone de un agregado mineral de grano muy fino, compuesto principalmente de plagioclasa, feldespato K, diópsido y magnetita. Además presenta alteraciones posteriores a la génesis de esta unidad, evidenciado por los reemplazos selectivos en la roca por minerales de la asociación *epidota-sericita*, en reemplazo de plagioclasas, y en algunos casos de *actinolita-epidota* (que coincide con la alteración en los fragmentos), en reemplazo de diópsido entre otros.

Diorita (Dr)

Esta unidad se caracteriza por tener una textura porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasa de 1 a 4 mm de tamaño que componen hasta un 70% del total de la roca, y una masa fundamental formada por plagioclasa, diópsido, menor magnetita, feldespato y cuarzo. Estos dos últimos minerales forman una textura consertal de bordes aserrados. En algunos casos es posible observar fenocristales y microlitos de hornblenda.

El tipo de alteración en esta unidad es variable y depende de su cercanía a la unidad de brecha de magnetita maciza; en el halo externo se observa una asociación *clorita-sericita* y en zonas adyacentes se presenta recristalización de las plagioclasas. Sin embargo, a pesar de que en algunos sectores esta unidad se ubica en contacto al cuerpo de magnetita maciza, e incluso afectado por la brechización de magnetita, la intensidad de la alteración es notablemente menor que en otras unidades.

Brecha de Matriz de Magnetita (BxM)

La matriz de esta brecha se compone principalmente por magnetita anhedral y cantidades menores de actinolita y/o diópsido. La litología y alteración de los fragmentos es variable ya que, generalmente, en la parte baja del cuerpo se encuentran fragmentos principalmente de rocas córneas y menores dioritas, presentando minerales de la asociación *feldespato-clinopiroxeno*, junto a una superposición de minerales de las asociaciones *actinolita-epidota* y *epidota-sericita*. En cambio, en la parte alta, comúnmente por sobre la cota 750, existen fragmentos de rocas córneas (meta-basaltos) exhibiendo la asociación *escapolita-clinopiroxeno* y en algunos casos las asociaciones *clorita-sericita*.

3.3. Geoquímica

El análisis de las 100 muestras seleccionadas se realizó en el laboratorio *ALS Chemex Vancouver*, donde se solicitó el procedimiento ME-MS61r, que consiste en una digestión de HF-HNO₃-HClO₄-HCl y un análisis mediante una técnica combinada entre ICP-AES y ICP-MS. Las variables analizadas junto con los límites de detección se observan en la Tabla 3-9.

Durante el proceso de muestreo se tomaron muestras representativas de las litologías de cada unidad geológica. Además, en las unidades geológicas en donde la intensidad de alteración es variable, se tomaron muestras con distinta intensidad con el objetivo de representar a las unidades geológicas, ya que, en parte, la geología del yacimiento permite agrupar las litologías y los tipos de alteración en las unidades geológicas. La ubicación de las muestras presenta en las Figura 3-19, Figura 3-20 y Figura 3-21.

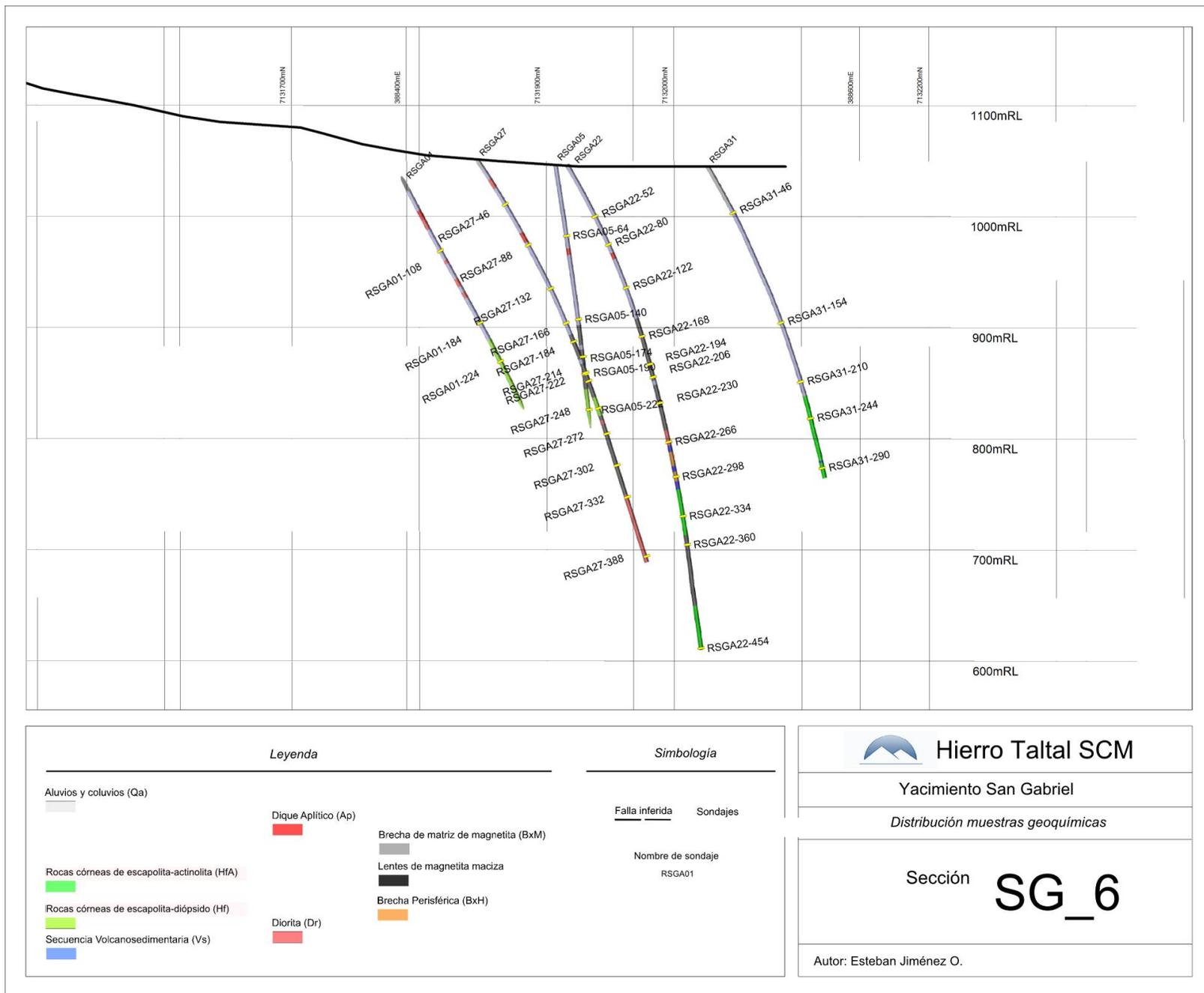


Figura 3-19. Ubicación de las muestras tomadas en el perfil SG06.

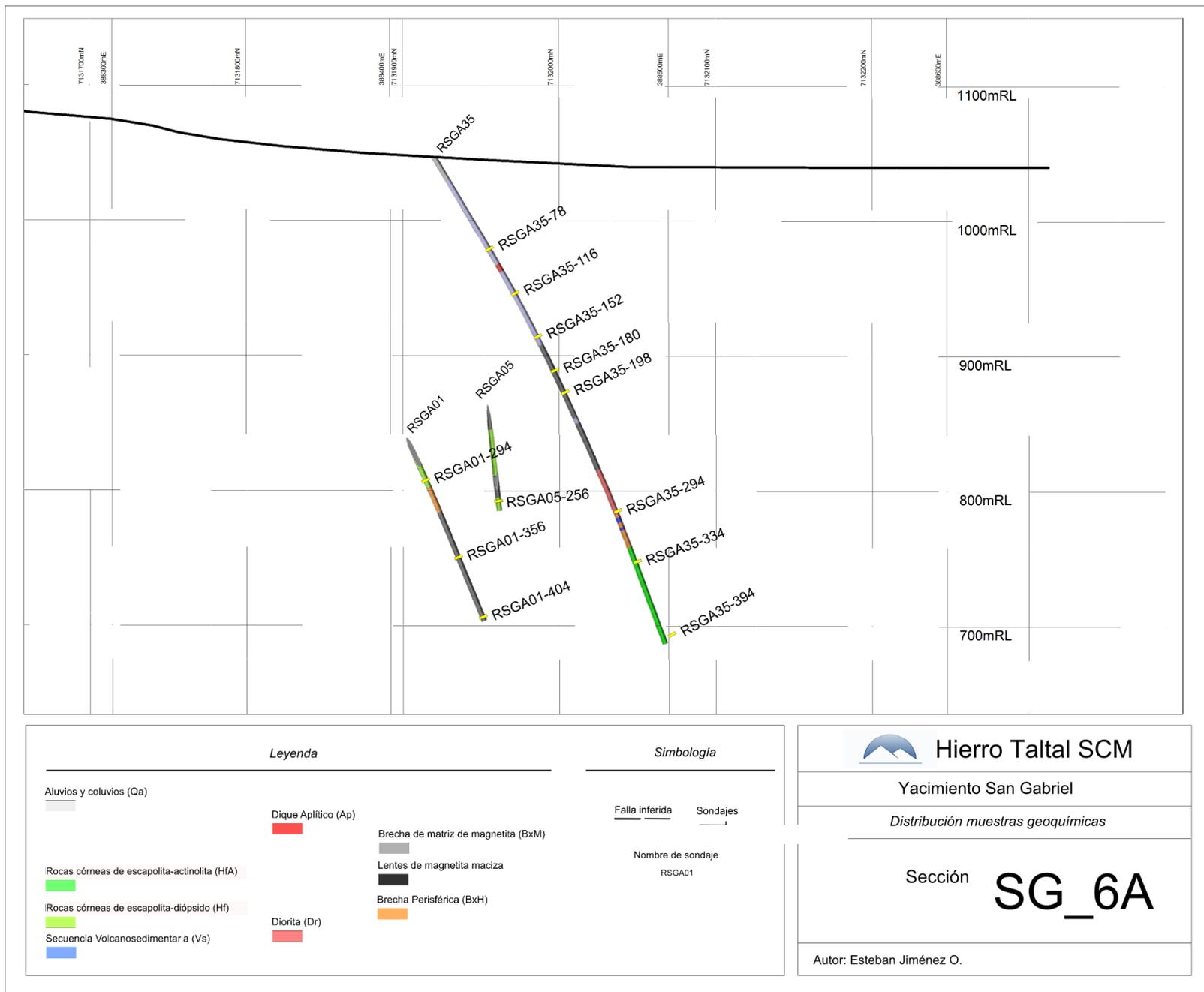


Figura 3-20. Ubicación de las muestras tomadas en el perfil SG06a.

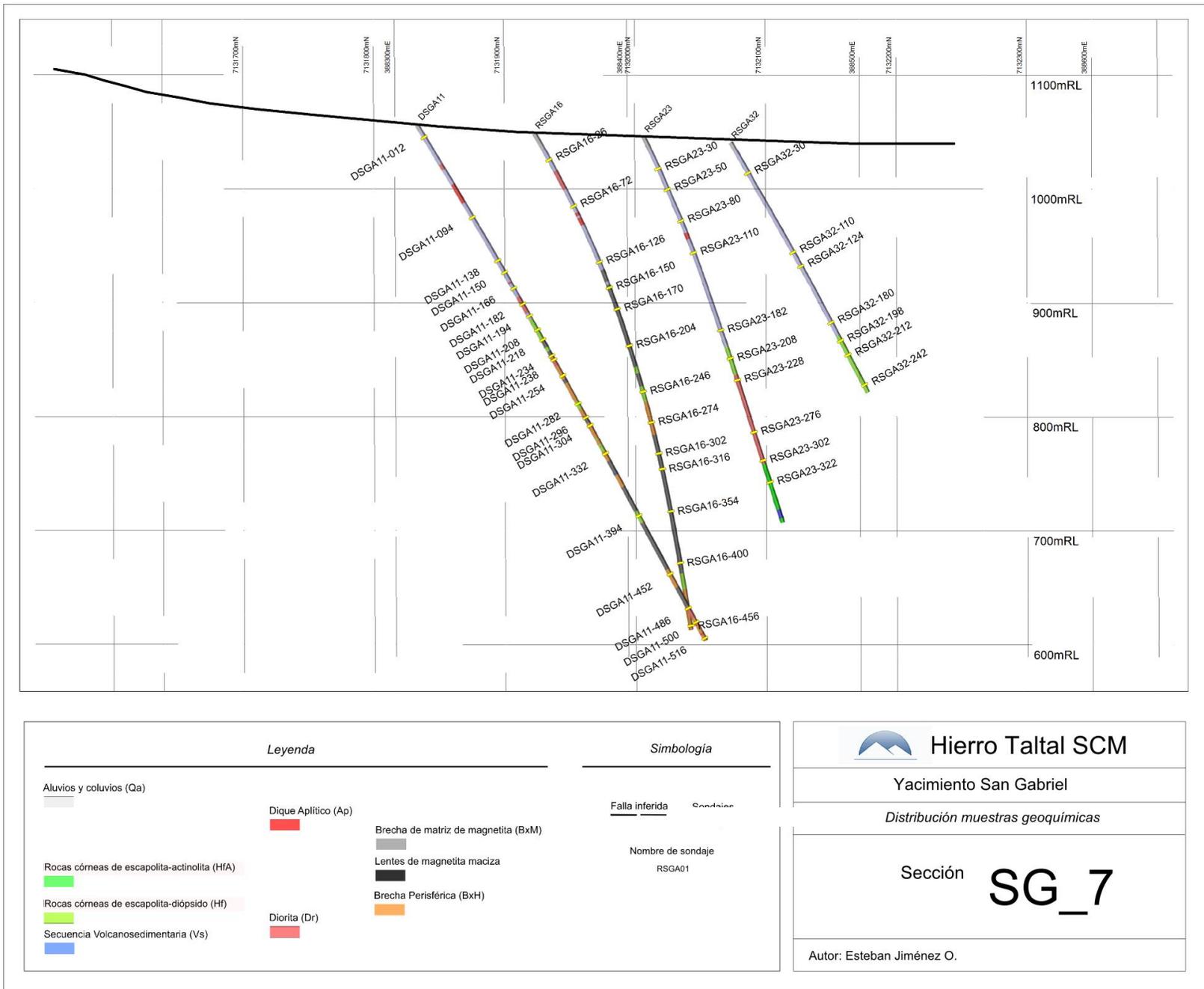


Figura 3-21. Ubicación de las muestras tomadas en el perfil SG07.

Los certificados de los análisis se encuentran en el ANEXO C.

3.3.1. Control de Calidad

Para el control de calidad de los análisis se agregaron 32 muestras de control, de las cuales 26 corresponden a estándares (GMB908-10, GBM908-5, MRGeo08 y OREAS 90), 6 a blancos y 6 a duplicados de pulpa.

La precisión de cada variable se evalúa construyendo un parámetro de precisión, que consiste en un coeficiente de variación. Este es calculado a partir del cuadrado de la diferencia de cada par de muestras duplicadas. La sumatoria de estos valores (un valor por cada par) es dividida por el número total de muestras de control, lo que entrega una medida de la variabilidad. Para obtener el coeficiente de variación se calcula la raíz cuadrada de la variabilidad y este valor se divide por la media de todos los análisis de las muestras de control; tanto originales como duplicadas.

Tabla 3-9. Evaluación de la precisión.

Elemento	Unidad	Límite inferior	Límite Superior	Precisión [%]	Valores no únicos [%]
Ag	ppm	0.01	100	3.4	62
Al	%	0.01%	50%	3.3	18
As	ppm	0.2	10,000	4.3	22
Ba	ppm	10	10,000	4.2	59
Be	ppm	0.05	1,000	7.9	50
Bi	ppm	0.01	10,000	19.2	88
Ca	%	0.01%	50%	2.6	9
Cd	ppm	0.02	1,000	1.8	57
Ce	ppm	0.01	500	3.5	8
Co	ppm	0.1	10,000	2.8	13
Cr	ppm	1	10,000	3.7	33
Cs	ppm	0.05	500	3.8	14
Cu	ppm	0.2	10,000	4.3	7
Fe	%	0.01%	50%	2.1	8
Ga	ppm	0.05	10,000	2.7	27
Ge	ppm	0.05	500	5.1	57
Hf	ppm	0.1	500	3.5	79
In	ppm	0.005	500	3.9	38
K	%	0.01%	10%	2.9	30
La	ppm	0.5	10,000	3.0	21

Tabla 3-9. Evaluación de la precisión.

Elemento	Unidad	Límite inferior	Límite Superior	Precisión [%]	Valores no únicos [%]
Li	ppm	0.2	10,000	11.5	8
Mg	%	0.01%	50%	2.5	15
Mn	ppm	5	100,000	2.2	11
Mo	ppm	0.05	10,000	2.8	18
Na	%	0.01%	10%	1.9	11
Nb	ppm	0.1	500	2.4	64
Ni	ppm	0.2	10,000	3.1	9
P	ppm	10	10,000	3.1	39
Pb	ppm	0.5	10,000	4.5	28
Rb	ppm	0.1	10,000	9.6	13
Re	ppm	0.002	50	7.6	92
S	%	0.01%	10%	0.0	86
Sb	ppm	0.05	10,000	2.6	51
Sc	ppm	0.1	10,000	4.6	15
Se	ppm	1	1,000	29.4	96
Sn	ppm	0.2	500	0.0	71
Sr	ppm	0.2	10,000	2.5	8
Ta	ppm	0.05	100	2.9	74
Te	ppm	0.05	500	14.6	96
Th	ppm	0.2	10,000	7.1	58
Ti	%	0.01%	10%	2.2	16
Tl	ppm	0.02	10,000	6.5	76
U	ppm	0.1	10,000	8.2	87
V	ppm	1	10,000	2.8	8
W	ppm	0.1	10,000	4.4	82
Y	ppm	0.1	500	4.2	16
Zn	ppm	2	10,000	2.8	15
Zr	ppm	0.5	500	2.9	12
Dy	ppm	0.05	1,000	3.4	12
Er	ppm	0.03	1,000	4.2	23
Eu	ppm	0.03	1,000	3.2	34
Gd	ppm	0.05	1,000	3.8	13
Ho	ppm	0.01	1,000	3.6	47
Lu	ppm	0.01	1,000	3.1	65
Nd	ppm	0.1	10,000	3.1	20
Pr	ppm	0.03	1,000	3.0	9
Sm	ppm	0.03	1,000	3.1	7
Tb	ppm	0.01	1,000	3.2	48
Tm	ppm	0.01	1,000	3.5	67
Yb	ppm	0.03	1,000	3.3	26

En la Tabla 3-9 se muestra el parámetro de precisión de cada elemento, calculados para los duplicados de pulpa. Se observa que la gran mayoría se encuentran bajo el 5% y que

solo 4 elementos (Bi, Li, Se y Te) exceden el 10%, por lo que la precisión para los 56 elementos restantes se considera como aceptable.

Para evaluar la exactitud de los análisis se elaboran gráficos de dispersión para cada tipo de estándar (material de referencia), en los cuales se contrastan los valores esperados¹ y medidos², con el objetivo de discriminar visualmente aquellos elementos que se alejen de la recta de pendiente igual a 1 (recta que se formaría idealmente, si es que los valores medidos fueran igual a los esperados).

La Figura 3-22 muestra del caso el estándar *Oreas 90*; donde el eje x representa los valores esperados, y el eje y se encuentran los valores medidos. Acá se grafican todos los elementos y se ordenan de menor a mayor concentración. Algunas variables fueron multiplicadas por potencias de 10, de tal forma que todos los valores se encuentren entre 1 y 100. En el gráfico es posible distinguir que los elementos Te, Ge, Re, Cd y Ag se desvían considerablemente del rango aceptado. El resto de los gráficos de las muestras de estándar se pueden encontrar en el ANEXO C.

Considerando todas las muestras de estándares, el análisis de exactitud concluye que en los cuatro tipos de estándares los elementos Re y Te se posicionan fuera del rango aceptable. Cabe mencionar que los valores esperados para estos elementos son cercanos a los límites de detección respectivos. Además, existen otras variables que presentan valores fuera del rango aceptable, siendo: Ag, Bi, Cd, Ge y Se. Al igual que el Re y Te, los elementos anteriores presentan concentraciones esperadas cercanas a los límites de detección, sin embargo, son casos particulares de ciertos estándares.

Con respecto a la contaminación, el análisis de los blancos indica que esta no ocurre ya que todos los valores se encuentran en el rango esperado para cada una de las variables.

¹ Valor conocido y certificado por el laboratorio productor de los estándares.

² Resultado entregado por la técnica analítica que se está evaluando.

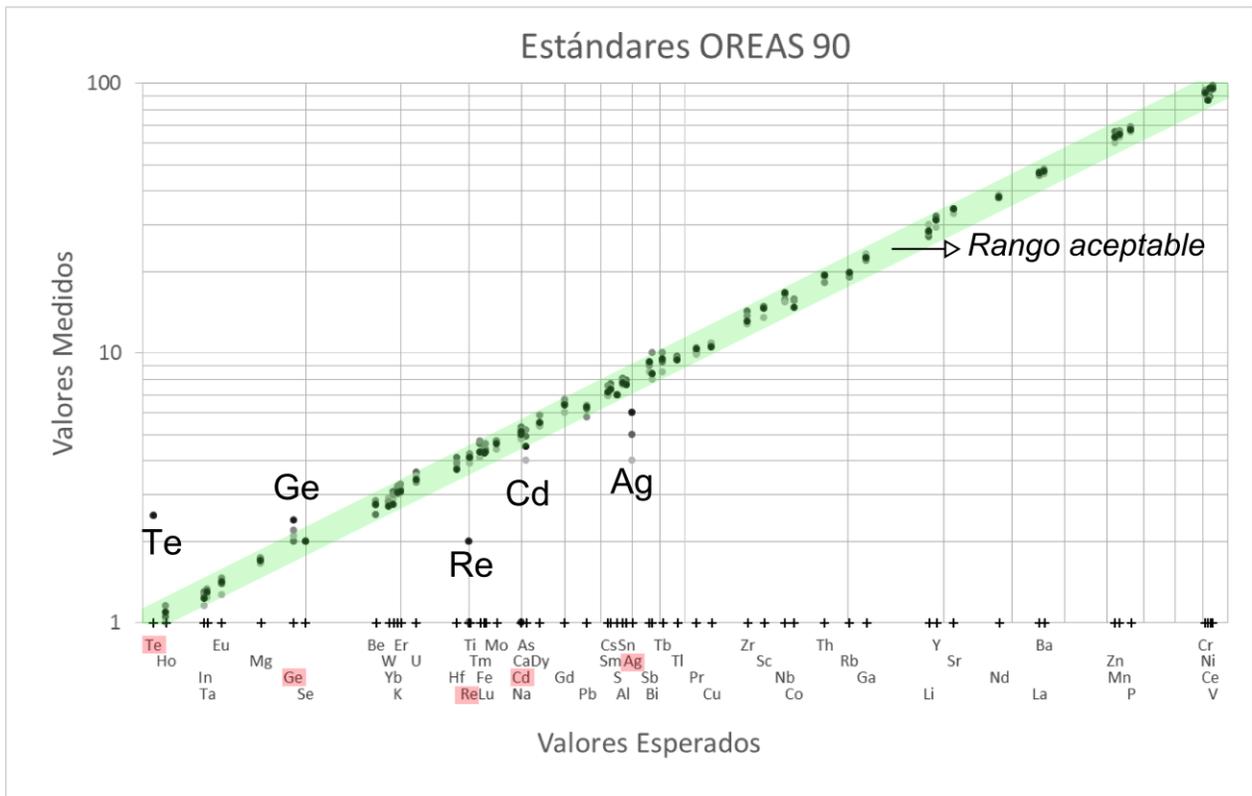


Figura 3-22. Gráfico de las muestras OREAS 90, en donde se muestran los valores medidos contra los valores esperados.

En cuanto a los límites de detección, de todas las variables solo el Te presenta sobre el 50% de los datos bajo el límite de detección entregado por el laboratorio. Sin embargo, existen algunos elementos que presentan valores cercanos al límite de detección que se repiten y no existen valores intermedios.

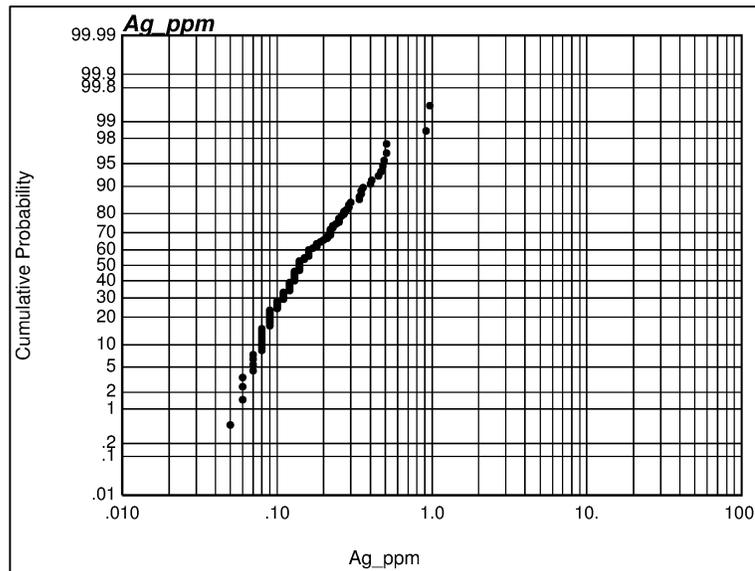


Figura 3-23. Gráfico de probabilidad lognormal de Ag.

En la Figura 3-23 se muestra un ejemplo de lo anterior; los valores menores a 0.1 ppm de Ag se presentan en forma de “escalones” indicando que existen muestras con exactamente la misma concentración de Ag indicando que la resolución del método es pobre a leyes menores a 0.1 ppm. En la Tabla 3-9. se muestra el porcentaje de los valores no únicos de cada elemento, es decir, la proporción de muestras que presentan al menos algún otro valor de igual resultado. Todos aquellos elementos que tengan un porcentaje de valores no únicos mayor a 75%, no fueron incluidos en la base de datos estudiada. Si bien es cierto, esto puede causar un sesgo en las leyes bajas, este será mínimo debido a que el intervalo en el cual no se encuentran valores es de 0.01 ppm.

En resumen, se incluyen un total de 51 variables a la base de datos, excluyendo las siguientes: Bi, Hf, Re, S, Se, Te, Tl, U y W. Si bien es cierto, existen variables que exhiben desviaciones en el análisis de exactitud (como es el caso de Ag), sin embargo, se considera que estas desviaciones son producto de un descenso de la resolución del método analítico, solo en concentraciones cercanas al límite de detección, las que son mínimas, por lo cual no se excluyó la variable de la base de datos.

Para finalizar el control de calidad, cabe señalar que existen muestras con valores de Fe mayores al 50% (límite superior de detección del método), pertenecientes a la unidad de brecha de matriz de magnetita (BxM). Estos valores fueron reemplazados por leyes obtenidas en trabajos anteriores en los cuales se analizaron las muestras con el mismo soporte (2 m) mediante un análisis por Fe volumétrico.

3.3.2. Análisis Estadístico

3.3.2.1. Análisis Univariable

En la Tabla 3-10, se muestran algunos estadígrafos de cada variable de la base de datos, además, se incluye el número de poblaciones definidas en base al estudio de los gráficos de probabilidad lognormal e histogramas (ANEXO D).

Entre las variables que muestran una alta desviación estándar (> 20 ppm en elementos menores y >2% en elementos mayores) se encuentran: P, Mn, V, Ba, Zn, Sr, Ni, Co, Fe y Al (Tabla 3-10). Dentro de este grupo destacan los elementos Co, Ni y V, presentando una distribución similar a la del Fe. En la Figura 3-24, se puede observar la distribución de dichos elementos, donde se han trazado con rectas rojas las distintas poblaciones. Se identifican 3 poblaciones de datos: baja, intermedia y alta ley. La población de baja ley muestra una escasa variabilidad al igual que la de alta ley, mientras que la de ley intermedia presenta una alta variabilidad.

Tabla 3-10. Estadísticas básicas, incluyendo todas las muestras.

	Ag_ppm	Al_pct	As_ppm	Ba_ppm	Be_ppm	Ca_pct	Cd_ppm	Ce_ppm	Co_ppm
Mínimo	0.05	0.06	1.1	10	0.08	0.44	0.01	3.68	9.2
Máximo	0.97	8.68	25.6	2050	1.21	10.05	3.92	92.7	120
Media	0.20	6.42	7.73	248.40	0.69	5.59	0.30	23.12	35.31
Mediana	0.14	7.45	6.85	190.00	0.71	5.82	0.06	22.80	26.40
Desviación estándar	0.16	2.20	4.63	249.32	0.20	1.87	0.55	13.07	25.32
Coefficiente de variación	0.79	0.34	0.60	1.00	0.28	0.33	1.80	0.57	0.72
N° Poblaciones	2	4	1	2	1	4	1	3	3

	Cr_ppm	Cs_ppm	Cu_ppm	Fe_pct	Ga_ppm	Ge_ppm	In_ppm	K_pct
Mínimo	1	0.05	0.1	2.3	6.14	0.1	0.028	0.01
Máximo	223	25.3	493	68.62	43	1.97	0.401	3.27
Media	53.03	2.53	63.18	15.47	20.12	0.45	0.09	0.68
Mediana	44.50	0.98	34.45	7.91	18.75	0.21	0.07	0.64
Desviación estándar	44.76	3.77	87.16	16.25	6.52	0.51	0.05	0.47
Coefficiente de variación	0.84	1.49	1.38	1.05	0.32	1.13	0.55	0.68
N° Poblaciones	4	4	2	3	4	4	2	4

	La_ppm	Li_ppm	Mg_pct	Mn_ppm	Mo_ppm	Na_pct	Nb_ppm	Ni_ppm
Mínimo	1.2	4.5	0.46	1170	0.15	0.03	0.4	7.3
Máximo	39.9	76.2	5.91	5270	8.49	5.92	6.9	213
Media	8.54	40.12	3.02	2801.10	1.14	2.66	2.36	52.32
Mediana	8.10	37.65	3.11	2790.00	0.98	3.07	2.30	30.35
Desviación estándar	5.61	16.44	0.88	925.41	0.90	1.37	1.12	52.13
Coefficiente de variación	0.66	0.41	0.29	0.33	0.79	0.51	0.47	1.00
N° Poblaciones	3	3	4	2	5	3	5	3

Tabla 3-10. Estadísticas básicas, incluyendo todas las muestras.

	P_ppm	Pb_ppm	Rb_ppm	Sb_ppm	Sc_ppm	Sn_ppm	Sr_ppm	Ta_ppm
Mínimo	40	0.5	0.2	0.13	2	0.3	8.6	0.025
Máximo	5080	39.3	63.9	5.18	53.6	4.7	822	0.49
Media	758.20	6.16	15.95	0.46	24.89	1.38	365.08	0.14
Mediana	700.00	3.70	14.25	0.37	26.55	1.10	371.50	0.13
Desviación estándar	934.64	7.23	10.43	0.52	8.64	0.87	198.49	0.08
Coefficiente de variación	1.23	1.17	0.65	1.12	0.35	0.63	0.54	0.62
N° Poblaciones	4	2	3	1	4	3	3	2

	Th_ppm	Ti_pct	V_ppm	Y_ppm	Zn_ppm	Zr_ppm
Mínimo	0.4	0.029	85	2.3	71	1.3
Máximo	10.7	0.814	2440	38.5	1630	81.7
Media	2.47	0.39	600.55	17.88	293.09	22.82
Mediana	1.70	0.41	260.00	16.00	247.50	21.65
Desviación estándar	1.94	0.12	538.96	7.22	239.34	14.12
Coefficiente de variación	0.79	0.31	0.90	0.40	0.82	0.62
N° Poblaciones	4	3	3	4	1	5

	Dy_ppm	Er_ppm	Eu_ppm	Gd_ppm	Ho_ppm	Lu_ppm	Nd_ppm	Pr_ppm
Mínimo	0.31	0.2	0.07	0.4	0.06	0.03	2.5	0.54
Máximo	6.74	4.02	2.1	8.2	1.34	0.51	49.8	11.7
Media	3.24	1.92	0.86	3.71	0.65	0.27	15.70	3.30
Mediana	2.84	1.73	0.89	3.46	0.58	0.24	15.65	3.26
Desviación estándar	1.26	0.75	0.36	1.48	0.25	0.10	7.10	1.63
Coefficiente de variación	0.39	0.39	0.42	0.40	0.39	0.37	0.45	0.49
N° Poblaciones	4	4	4	4	4	4	3	4

	Sm_ppm	Tb_ppm	Tm_ppm	Yb_ppm
Mínimo	0.57	0.05	0.03	0.21
Máximo	9.67	1.12	0.55	3.55
Media	3.81	0.53	0.27	1.79
Mediana	3.64	0.48	0.24	1.60
Desviación estándar	1.52	0.21	0.10	0.68
Coefficiente de variación	0.40	0.39	0.39	0.38
N° Poblaciones	3	4	4	4

Es importante destacar que alrededor del 55% de los datos presentan una ley mayor al 10% de Fe y el 25% de los datos una ley sobre 20% de Fe. Lo anterior puede tener una gran influencia en los resultados del análisis multivariable.

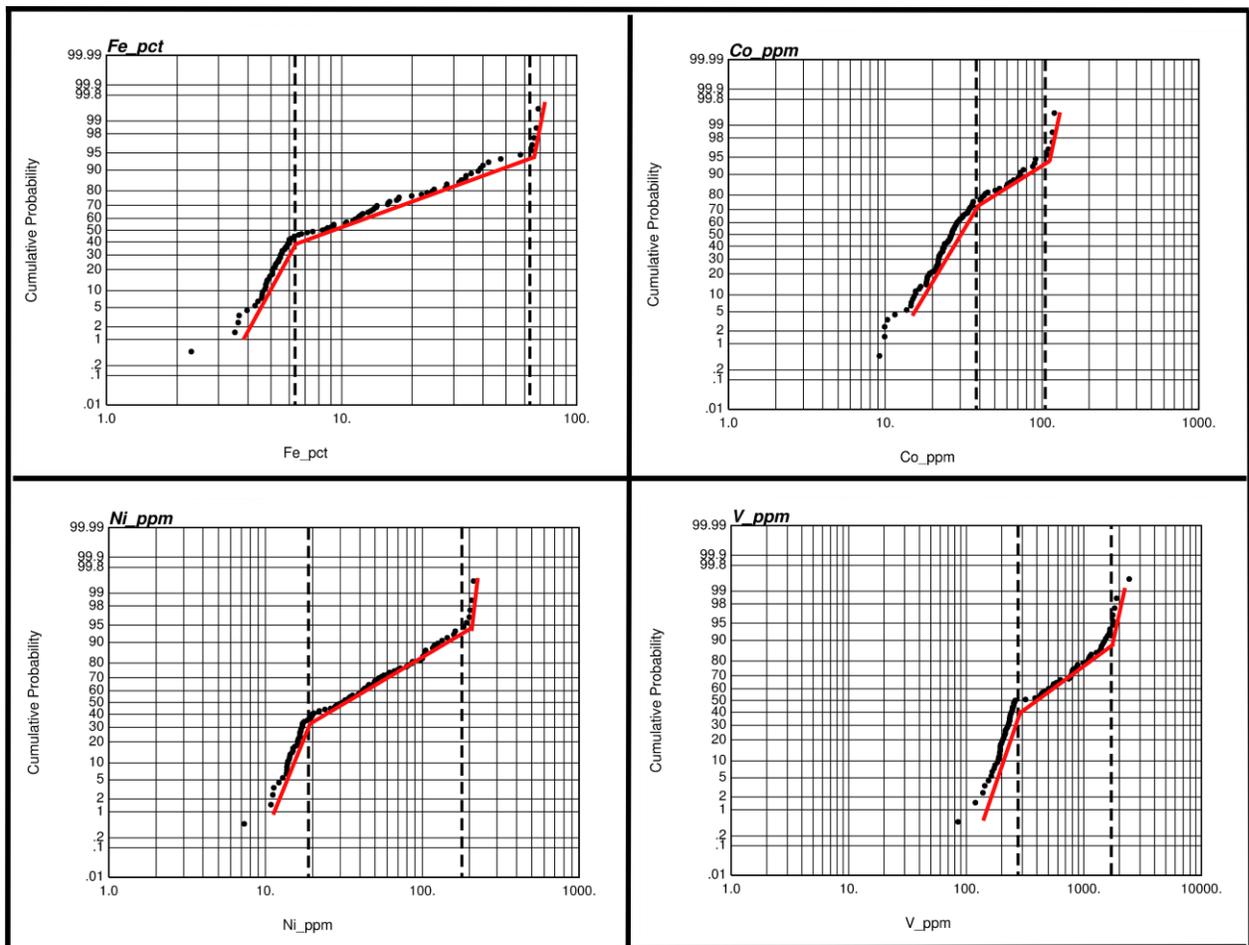


Figura 3-24. Gráficos de probabilidad lognormal de: Fe, Co, Ni y V.

3.3.3. Geoquímica de las unidades geológicas

Elementos mayores

En la Figura 3-25, se observan los diagramas de cajas por elemento, en los cuales los datos se encuentran agrupados según unidad geológica. Las estadísticas univariadas por unidad geológica se encuentran en el ANEXO E. A continuación se hace un resumen de la distribución de elementos:

Diorita (Dr)

Destaca por tener concentraciones bajas de Ca y Mg (75% de los datos presentan concentraciones bajo el 6% de Ca y 3.4% de Mg), además de exhibir valores más altos de Na y Al (75% de los datos presentan concentraciones sobre el 3% de Na y 7% de Al). Esta unidad muestra concentraciones de elementos mayores similares a la unidad

Volcanosedimentaria (VS), con la diferencia que la primera presenta mayor variabilidad. Además, las concentraciones de Fe son relativamente mayores en promedio; aproximadamente el 60% de los valores se encuentra en el rango de 5% a 12.35% Fe.

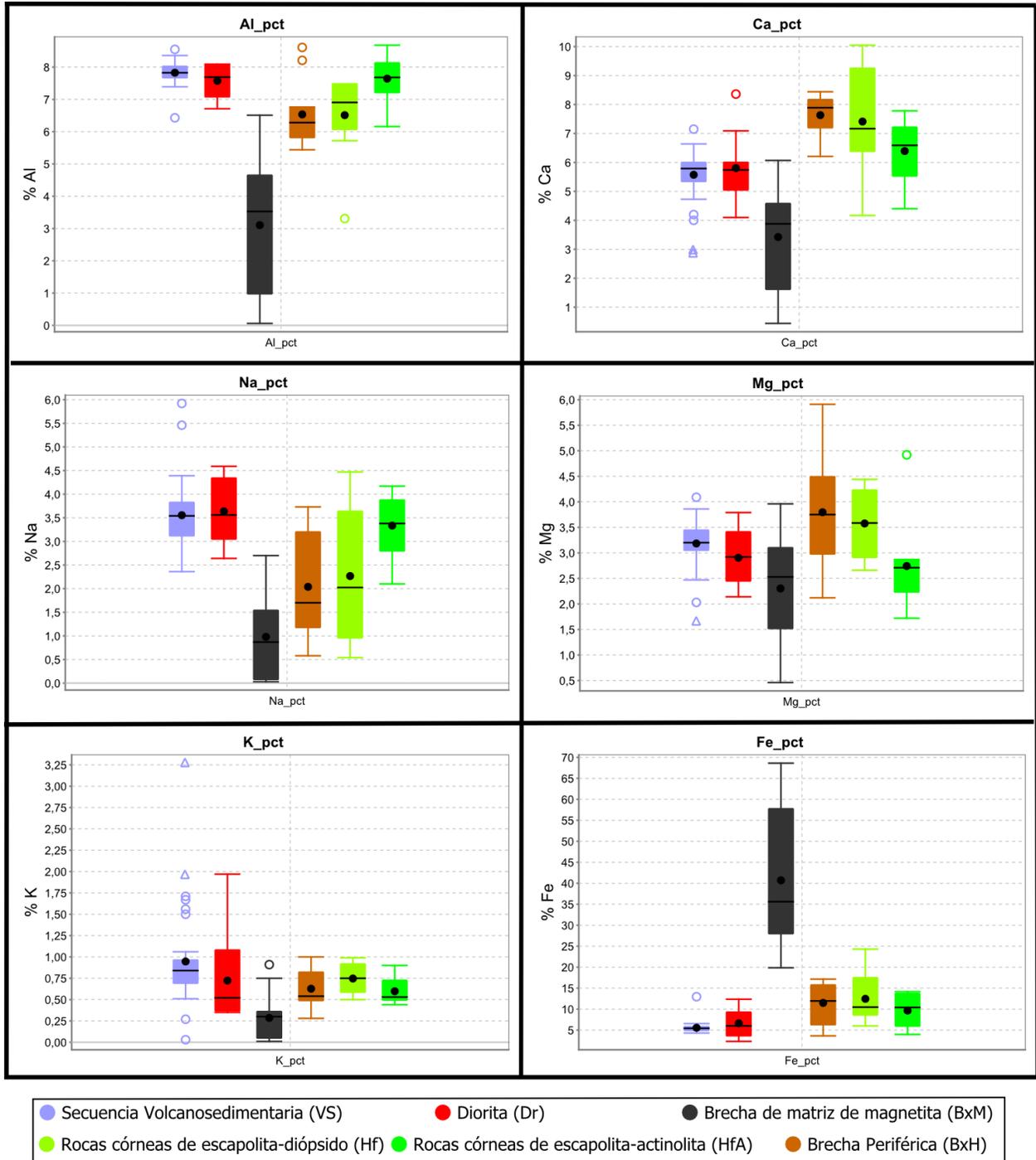


Figura 3-25. Diagramas de caja de los elementos mayores analizados, clasificados según unidad geológica.

Secuencia Volcanosedimentaria (VS)

Presenta altas concentraciones relativas a las otras unidades de Al, K y Na (75% de los datos presentan concentraciones sobre el 7.7% de Al, 0.7% de K y 3.1% de Na). Por el contrario, esta unidad exhibe concentraciones bajas de Ca, Fe y Mg (75% de los datos presentan concentraciones bajo el 6% de Ca, 5.8% de Fe y 3.4% de Mg). Esta unidad se destaca por tener las concentraciones de Fe más bajas de todas unidades.

Rocas Córneas de escapolita-diópsido (Hf)

Junto con la unidad Brecha Periférica (BxH), son las que presentan una desviación mayor con respecto a la media total (sin contar a los datos de la unidad de brecha de matriz de magnetita) de las concentraciones de Al, Ca y Mg. Se encuentra fuertemente enriquecida en Ca, Mg y Fe (75% de los datos presentan concentraciones sobre el 6.4% de Ca, 3% de Mg y 8.6% de Fe), mientras que el Al está empobrecido; todos los análisis presentan valores menores a 7.5% Al, teniendo una media de 6.5% Al. Además, se observa una alta variabilidad en Na.

Rocas Córneas de escapolita-actinolita (HfA)

Esta unidad presenta concentraciones levemente mayores que el promedio en los elementos Ca, Na, Al y Fe (75% de los valores se encuentran sobre 5.5% de Ca, 2.8% Na, 7.2% Al y 6% Fe). Por el contrario, se encuentra empobrecida en K y Mg (todos los valores bajo los 0.9% de K y 4.92% de Mg).

Brecha Periférica (BxH)

Exhibe concentraciones de elementos mayores similares a la unidad de Rocas Córneas de escapolita-diópsido (Hf). Muestra fuerte enriquecimiento de Ca, Mg y Fe con respecto a las otras unidades (75% de los valores por sobre los 7.2% de Ca, 3% de Mg y 6.3% Fe). Además, contiene bajas concentraciones de Na y Al (75% de los valores bajo 3.2% de Na y 6.76% de Al).

Brecha de matriz de magnetita (BxM)

Muestra concentraciones menores para todos los elementos mayores (exceptuando el Fe) respecto a las otras unidades. No obstante, es posible notar que el Mg es el elemento

que presenta concentraciones más cercanas a la media general (2.5% Mg en BxM y 3.1% Mg en el total de las muestras).

Esta unidad de brecha mineralizada presenta leyes de entre 19.85 y 68.62 % Fe. Dentro de las muestras de esta unidad existen 5 muestras que tienen valores mayores al 64.4 % Fe, indicando que estas rocas se componen de hasta un 89% a 95% de magnetita. Las altas leyes de Fe que presenta esta unidad que son el reflejo de la abundante magnetita presente como matriz-cemento implican una dilución del resto de los elementos.

Elementos menores y trazas

En la Figura 3-26 se muestra un diagrama spider de los elementos menores y trazas normalizado con respecto a las medias de cada elemento de la unidad Volcanosedimentaria (VS). Cada serie de color sólido representa la media de una unidad geológica. El objetivo de este gráfico es representar los contrastes que existen respecto a la unidad Volcanosedimentaria e identificar los posibles patrones asociados a la mineralización. De este gráfico es posible hacer las siguientes observaciones:

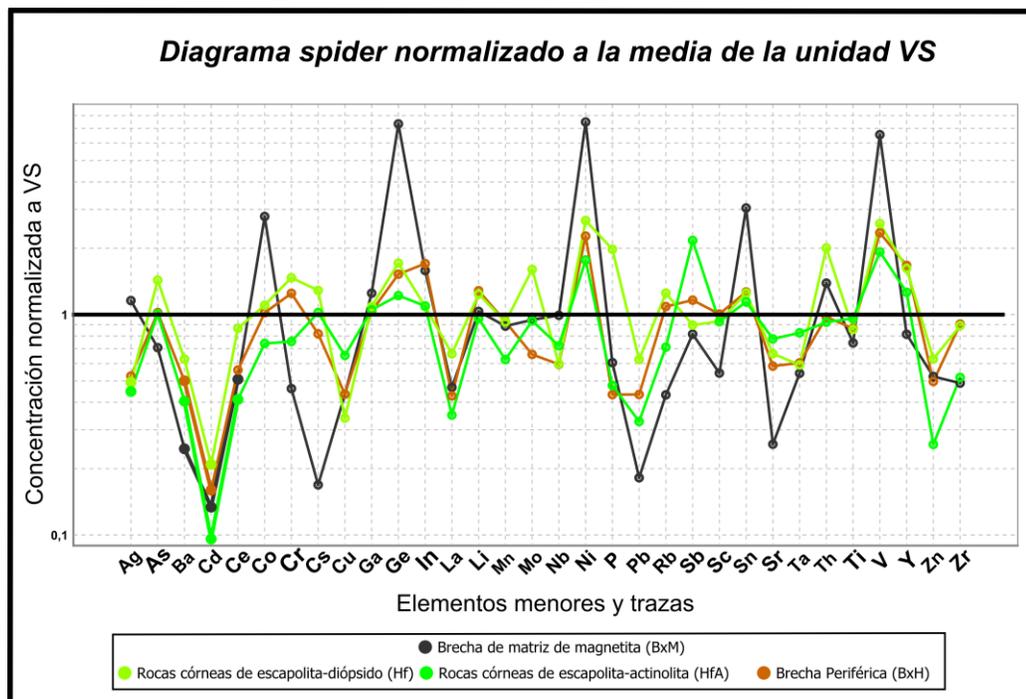


Figura 3-26. Diagrama spider de elementos menores y trazas normalizado a la media de la unidad VS.

La unidad de Brecha de matriz de magnetita (BxM) exhibe altos contrastes positivos de: Co, Ge, Ni, Sn y V. Es probable que estos elementos se encuentren asociados a la magnetita, por lo que se consideran que están relacionados al proceso de mineralización, y además, se destaca que estos elementos presentan factores de correlación con el hierro mayores a 0.5 en las muestras de la unidad de brecha de matriz de magnetita (Figura 3-27).

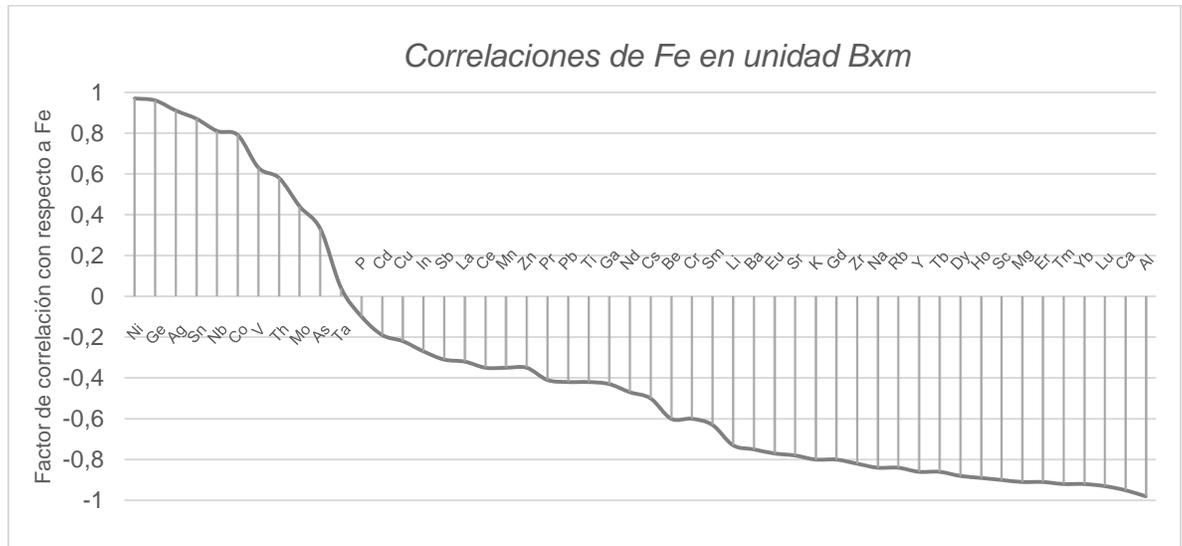


Figura 3-27. Gráfico de factores de correlaciones del Fe, en la Brecha de Magnetita.

- Las unidades de Brecha Periférica (BxH) y de Rocas Córneas de escapolita-diópsido (Hf), reproducen el patrón de la unidad de Brecha de matriz de magnetita (BxM), es decir, siguen en cierta medida las tendencias de contrastes positivos y negativos con respecto a la unidad Volcanosedimentaria (VS).
- Se observan mayores contrastes negativos, en la unidad de brecha de matriz de magnetita (BxM), de los elementos Ba, Cd, Cs, Pb y Sr.
- Los patrones de las unidades de Brecha Periférica (BxH) y de Rocas Córneas de escapolita-diópsido (Hf) se encuentran estrechamente relacionados excepto en los elementos P, Mo y Th, los cuales presentan una correlación mayor a 0.5 entre ellos (Tabla 3-13).

Tierras Raras

Las Figura 3-28 muestra 2 diagramas spider de tierras raras (REE; normalizados a composición de condrita de Sun y McDonough [1995]), donde las líneas de color sólido representan la media de cada unidad geológica.

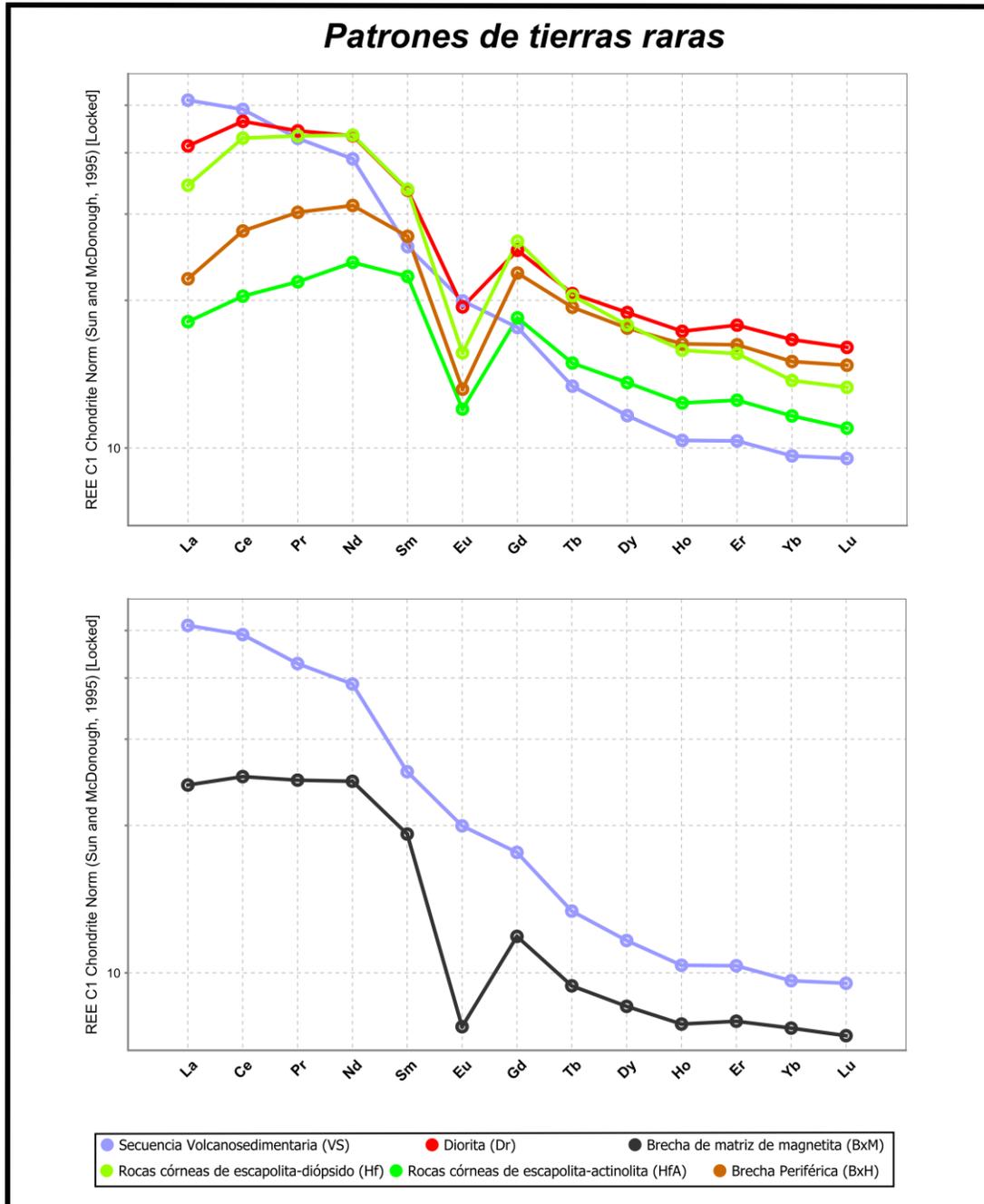


Figura 3-28. Diagrama spider de tierras raras. Cada línea representa la media de cada unidad.

Al comparar los patrones de tierras raras de las unidades Volcanosedimentaria (VS), Rocas Córneas de escapolita-diópsido (Hf), Rocas Córneas de escapolita-actinolita (HfA), Brecha Periférica (BxH) y Diorita (Dr), es posible distinguir que la tendencia de la primera unidad mencionada es completamente diferente al resto, ya que esta presenta una pendiente más pronunciada, es decir, una mayor razón $(La/Yb)_N$, y además, no presenta una anomalía negativa de Eu. Las otras 4 unidades exhiben tendencias similares entre ellas: una razón $(La/Nd)_N < 1$, una marcada anomalía negativa de Eu y un enriquecimiento de tierras raras pesadas (HREE) con respecto a la Secuencia Volcanosedimentaria (VS).

En cuanto a la unidad de Brecha de matriz de magnetita (BxM), exhibe una pendiente más suave que las demás unidades, exhibiendo un patrón plano de tierras raras livianas (LREE) y de HREE, junto con una moderada anomalía negativa de Eu. Asimismo, se hace notar el empobrecimiento de tierras raras en comparación a todas las unidades mencionadas en el párrafo anterior. Sin embargo, el patrón de esta unidad es similar a los de las unidades de Rocas Córneas de escapolita-diópsido (Hf), Rocas Córneas de escapolita-actinolita (HfA), Brecha Periférica (BxH) y Diorita (Dr).

Análisis Multivariable

Con el fin de reconocer posibles interacciones entre las variables analizadas se realiza un análisis multivariable. Se toma en cuenta que al considerar distintos subconjuntos de datos, los resultados del análisis pueden variar drásticamente.

En las Tablas 3-11 y 3-12, se muestran las matrices de correlación de los elementos mayores. En la primera se consideran todas las muestras, y en la segunda se excluyen las muestras de la unidad de Brecha de Matriz de magnetita (BxM). Al comparar estas dos matrices, es posible observar que los resultados difieren notoriamente: muestras con altas leyes de Fe, en general mayores a 20% Fe, diluyen las cantidades presentes de otros elementos originando correlaciones altas y positivas entre elementos presentes en altas concentraciones en la matriz de la brecha, y correlaciones bajas y negativas entre aquellos elementos encontrados en bajas concentraciones en la brecha (BxM). Por

ejemplo, los pares Al-Ca y Al-K presentan correlaciones positivas al considerar todos los análisis (Tabla 3-11), en cambio, al excluir los análisis de la unidad de brecha de matriz de magnetita, el par Al-Ca presenta una correlación negativa y el par Al-K muestra un factor cercano a 0 (Tabla 3-12).

Tabla 3-11. Matriz de correlación de elementos mayores, considerando todos los análisis.

Correlación	Al_pct	Ca_pct	Fe_pct	K_pct	Mg_pct	Na_pct
Al_pct	1	0.58	-0.97	0.52	0.42	0.83
Ca_pct		1	-0.65	0.22	0.71	0.19
Fe_pct			1	-0.52	-0.53	-0.8
K_pct				1	0.36	0.28
Mg_pct					1	0.041
Na_pct						1

Tabla 3-12. Matriz de correlación de elementos mayores, sin considerar las muestras pertenecientes a la unidad de Brecha de Matriz de magnetita (BxM).

Correlación	Al_pct	Ca_pct	Fe_pct	K_pct	Mg_pct	Na_pct
Al_pct	1	-0.51	-0.84	0.17	-0.54	0.7
Ca_pct		1	0.55	-0.25	0.5	-0.75
Fe_pct			1	-0.17	0.4	-0.75
K_pct				1	0.11	-0.14
Mg_pct					1	-0.69
Na_pct						1

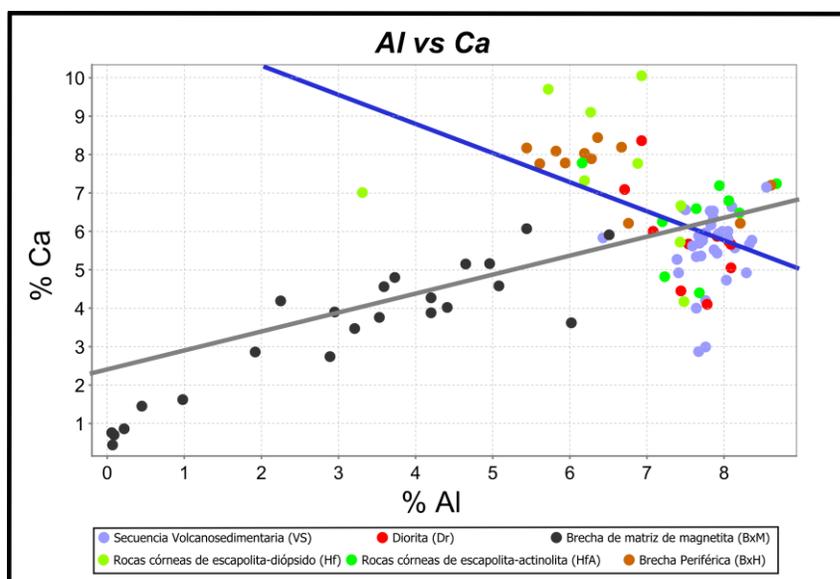


Figura 3-29. Gráfico de dispersión Al vs Ca, junto con dos regresiones lineales: la gris toma en cuenta todos los datos y la azul excluyen a aquellos pertenecientes a la unidad de brecha de matriz de magnetita.

Lo anterior se puede observar en la Figura 3-29, que corresponde a un gráfico de dispersión Al vs Ca, en el cual se han incluido 2 regresiones lineales: la recta de color gris considera todos los datos, en cambio, la azul excluyen a las muestras de la unidad de brecha de matriz de magnetita (BxM).

Con el objetivo de identificar grupos de elementos que presenten una distribución o comportamiento geoquímico similar, tomando en consideración lo expuesto con anterioridad, se presentan en la Tabla 3-13 los pares que muestran un coeficiente de correlación de Pearson mayor o igual a 0.5, excluyendo de este análisis a las muestras de la unidad de brecha de matriz de magnetita y las variables de REE.

Tabla 3-13. Pares de correlaciones de elementos, clasificados por intervalos.

<i>1-0.9</i>	<i>0.9-0.8</i>	<i>0.8-0.7</i>	<i>0.7-0.6</i>	<i>0.6-0.5</i>		
K-Ba	Ni-Ge	Na-Al	Cu-Ag	Fe-Ca	Nb-Na	Th-P
V-Fe	V-Ge	Zn-Cd	Li-Co	Fe-Co	Ni-Ca	Ti-Nb
Ni-Fe		Rb-K	Rb-Ba	Fe-Ga	Ni-Co	V-Ca
Ge-Fe		Zr-Ta	Sc-Cr	Ga-Ge	P-As	V-Co
Ta-Nb		Zr-Th	Sr-Al	Ge-Co	P-Ce	V-Ga
V-Ni			Zr-Nb	Mg-Ca	P-Mo	Y-Ca
			Y-Th	Mg-Cr	Pb-Cd	Y-Fe
			Th-Ta	Mn-Co	Ta-Na	Y-Ge
				Y-Sn	Zn-Mn	Zn-Sr

Posteriormente se analizan las correlaciones entre los elementos que presenten pares en común para formar grupos de variables:

- Grupo I: Fe, V, Ni, Co, Ga, Ge, Cr, Sn, Ca, Mg y HREE.

Estos elementos se encuentran relacionados al proceso de mineralización, donde se observa una estrecha relación con las leyes de Fe (Figura 3-31). Dentro de este grupo existen dos subgrupos de elementos que presentan comportamientos diferentes en relación al hierro; Ni-V-Co-Sn-Ge presentan una correlación positiva con respecto al Fe en todo rango de leyes y unidades geológicas; en cambio Ca-Mg-Y-Ga-Cr muestran correlaciones positivas en el subconjunto de muestras que excluyen a las muestras pertenecientes a la unidad de Brecha de matriz de magnetita (BxM), por el contrario, en el subconjunto de muestras pertenecientes a la unidad de Brecha de

matriz de magnetita, estos elementos presentan correlaciones negativas con respecto al hierro. Además, en este último subgrupo se incluyen las tierras raras pesadas (HREE; Gd, Tb, Dy, Y, Ho, Er, Tm, Yb y Lu) ya que presentan el mismo comportamiento en lo que respecta al Fe.

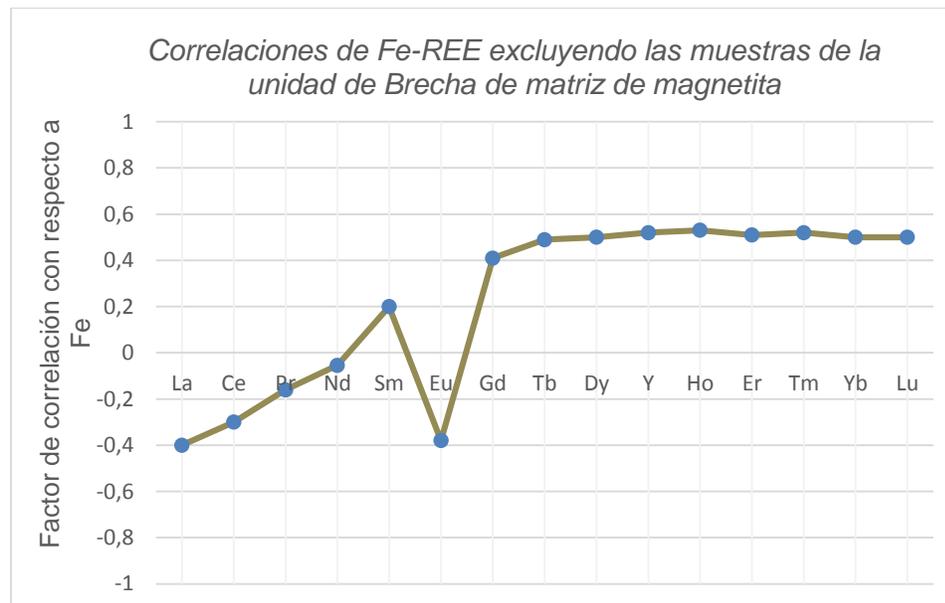


Figura 3-30. Factor de correlación de las tierras raras con respecto al hierro, considerando las muestras de las unidades volcanosedimentaria, Rocas Córneas de escapolita-diópsido, Rocas Córneas de escapolita-actinolita, Brecha Periférica y Diorita.

En la Figura 3-30 se presentan las correlaciones de las tierras raras (incluyendo al Y) con el Fe, en el subconjunto de muestras donde se excluyen las muestras de la unidad de Brecha de matriz de magnetita, donde se observa que las correlaciones de las tierras raras livianas (LREE; La, Ce, Pr, Nd, Sm y Eu) son negativas y/o cercanas a cero, a diferencia de las tierras raras pesadas que exhiben factores de correlación entre 0.4 y 0.6.

- Grupo II: Na, Al, Sr, Zn, Pb y Cd.

En la Figura 3-32 se observa que estos elementos presentan altas concentraciones, relativas a las demás unidades, en las muestras de la unidad Volcanosedimentaria.

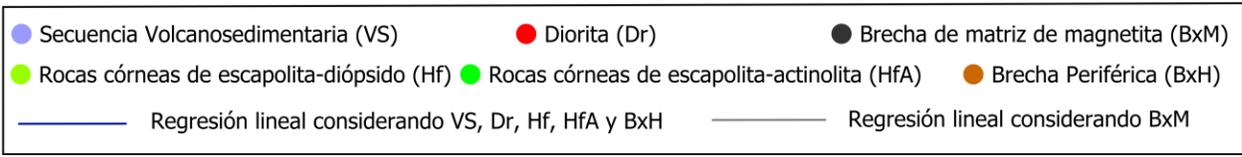
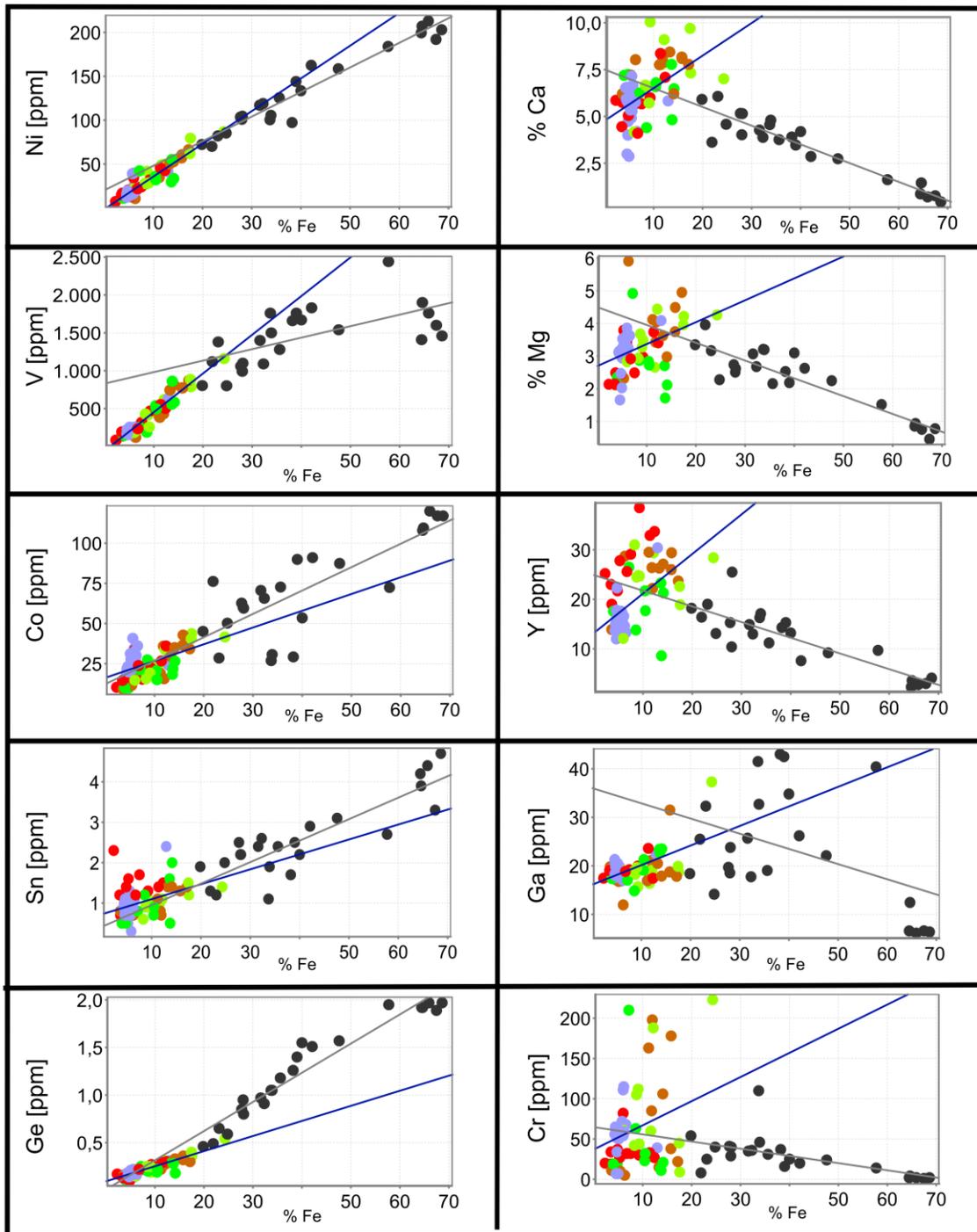


Figura 3-31. Gráficos de dispersión de los elementos del grupo I contra el Fe.

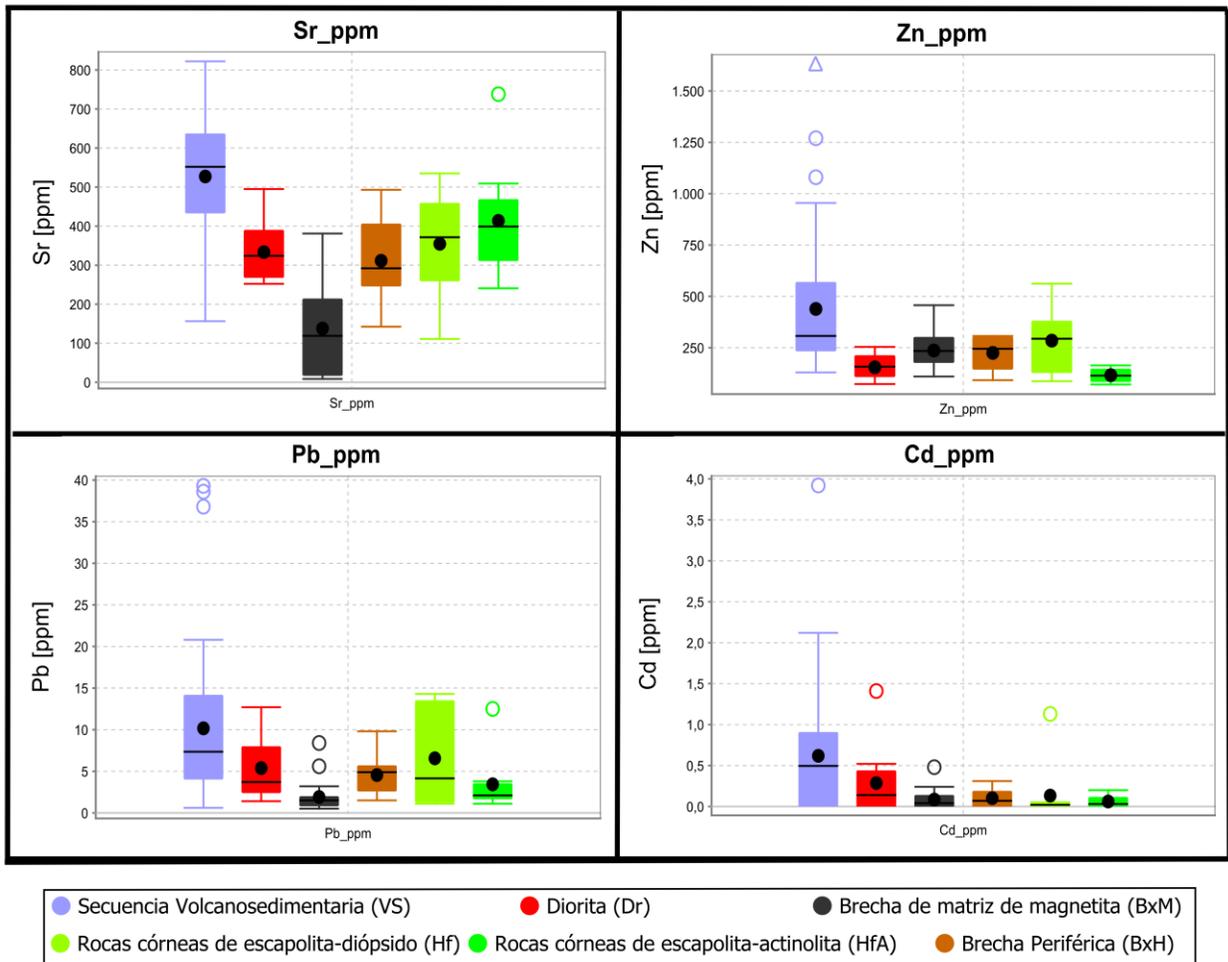


Figura 3-32. Diagramas de caja de algunos elementos del grupo II.

- Grupo III: Na, Ta, Th, Nb y Zr.

Los elementos pertenecientes a este grupo presentan mayores concentraciones relativas en la unidad Diorita (Dr). Cabe mencionar que los elementos Ta, Th, Nb y Zr corresponden a elementos incompatibles de alta carga (*HFSE*; acrónimo en inglés), por lo que concentraciones relativas más altas, con respecto a los basaltos de la unidad Volcanosedimentaria (Figura 3-33), indica que las rocas de la unidad Diorita provienen de un magma más diferenciado.

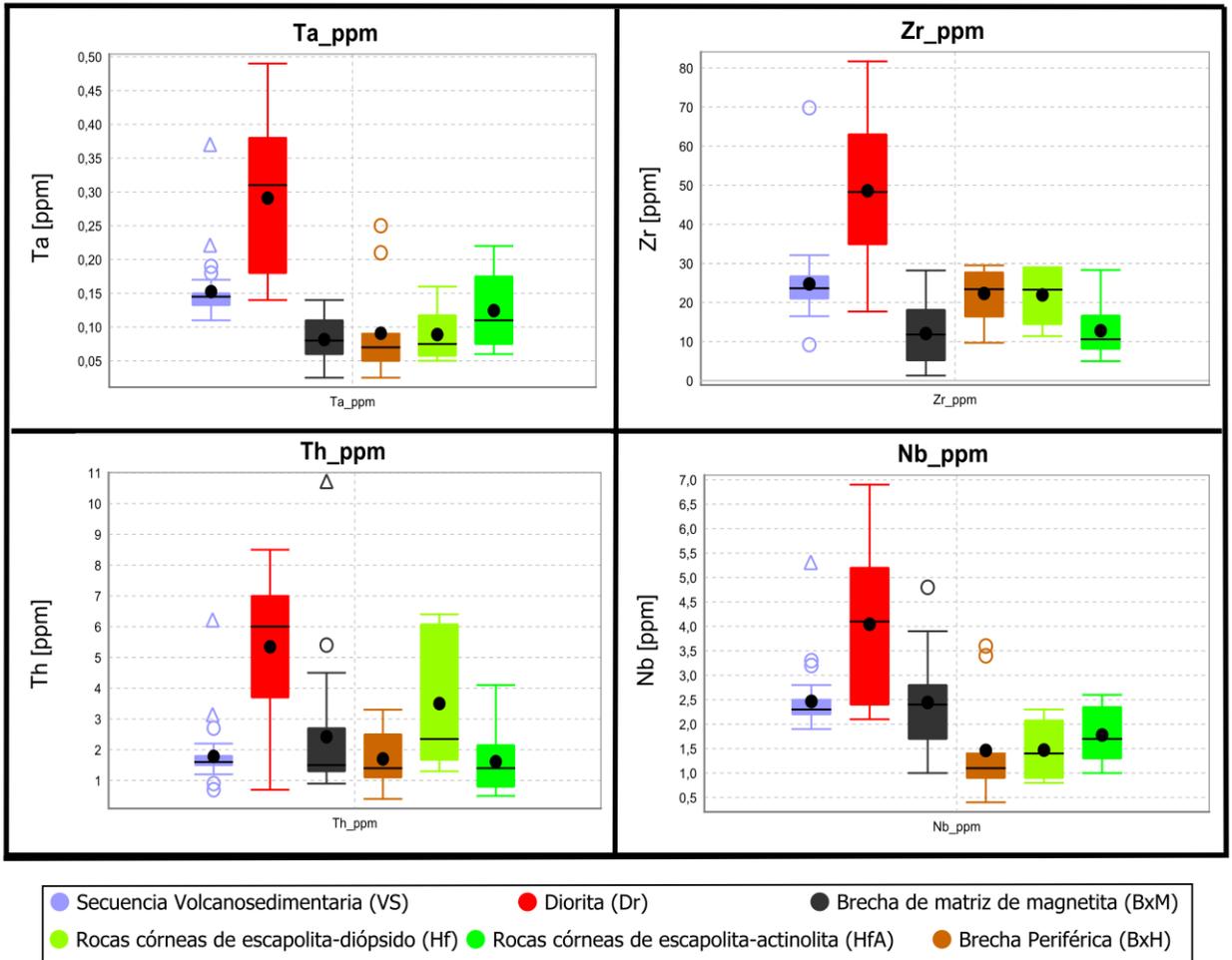


Figura 3-33. Diagramas de caja de algunos elementos del grupo III.

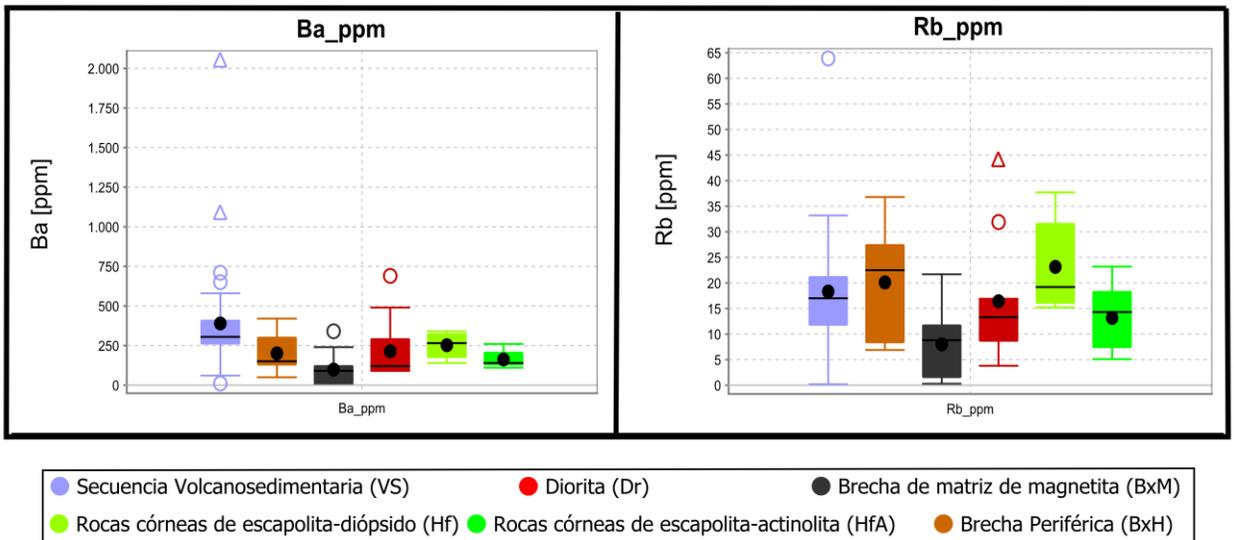


Figura 3-34. Diagramas de caja de algunos elementos del grupo IV.

- Grupo IV: K, Ba y Rb

Este grupo no contrasta ninguna unidad en particular, sin embargo, los valores de K y Ba muestran mayores concentraciones en las muestras de la unidad Volcanosedimentaria (VS). La unidad de Rocas Córneas de escapolita-diópsido muestra una concentración promedio más elevada que el resto de las unidades (Figura 3-34).

- Grupo V: P, Th, As y Mo.

En general, estos elementos muestran mayores concentraciones en las unidades Diorita (Dr) y Rocas Córneas de escapolita-diópsido (Hf). Cabe destacar que los valores altos de fósforo (>1500 ppm) se presentan frecuentemente en la unidad de Rocas Córneas de escapolita-diópsido.

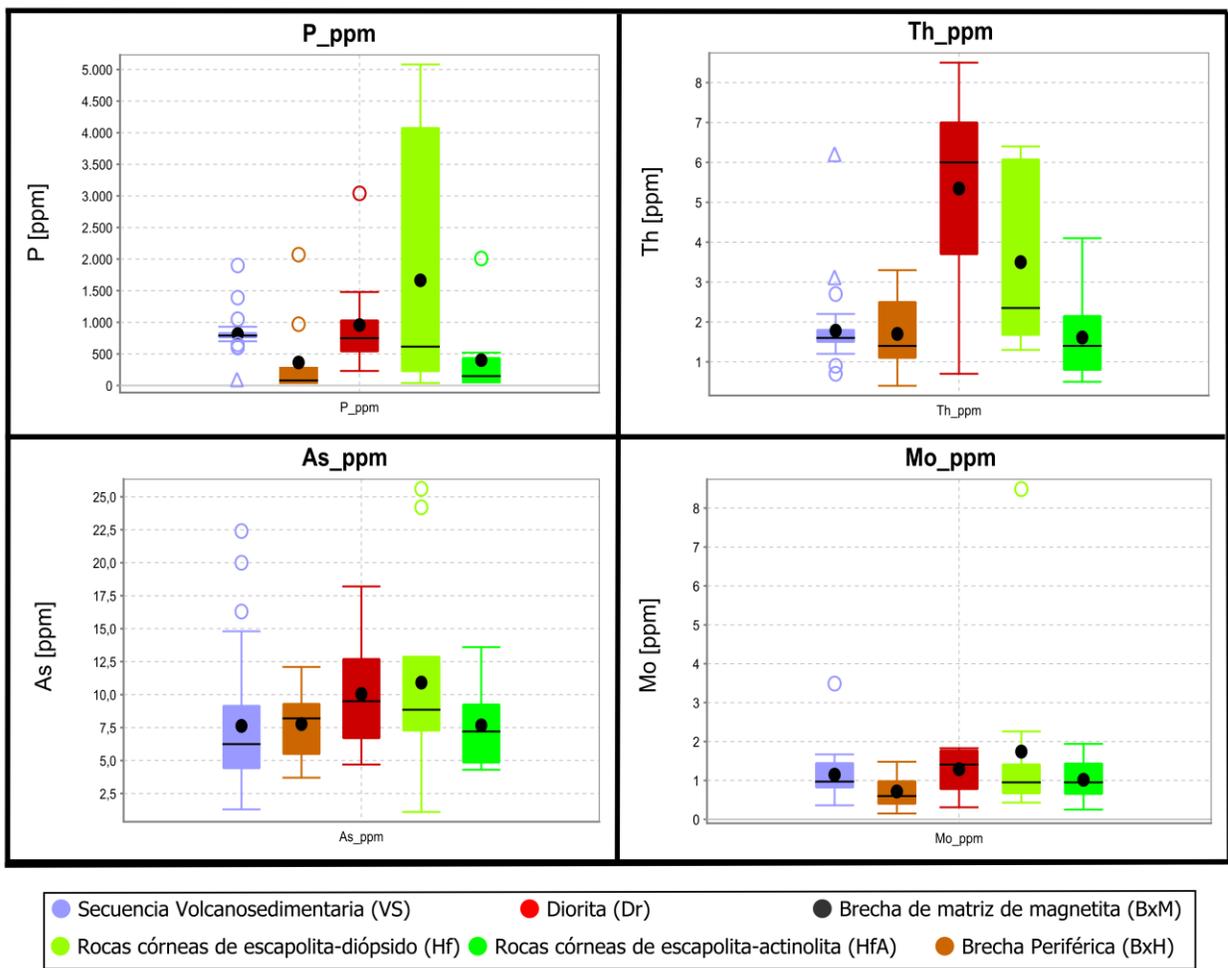


Figura 3-35. Diagramas de caja de algunos elementos del grupo V.

4. DISCUSIONES

Paragénesis mineral

Los estudios realizados en este trabajo han permitido distinguir diversos minerales metamórficos/metasomáticos, tanto en la unidad mineralizada (BxM) como en las unidades de las rocas de caja (BxH, Hf, HfA, Dr y Vs). Tales minerales se agruparon en distintas asociaciones de metamorfismo/metasomatismo, en base a su conjunta ocurrencia y/o en texturas en las cuales se manifiestan en las rocas. En secciones transparentes se han observado texturas de reemplazo entre minerales de distintas asociaciones; los minerales de las asociaciones *actinolita-epidota*, *epidota-sericita* y *clorita-sericita*, en ocasiones se observan en reemplazo, parcial a total, de los minerales de las asociaciones *escapolita-clinopiroxeno* y *feldespato-clinopiroxeno* (e.g. actinolita en reemplazo de diópsido y sericita en reemplazo de feldespatos). También durante el mapeo geológico del sondaje de diamantina (DSGA-11), se observaron relaciones de corte entre vetillas: las de magnetita-actinolita son cortadas por las de actinolita-turmalina-especularita y las vetillas de ceolitas +/- calcita cortan a todas las vetillas salvo a las de calcita. Todos estos antecedentes permiten realizar una paragénesis mineral, que nos indica la temporalidad relativa de la formación de estos neominerales (Figura 4-1).

Minerales Secundarios	Temprano → Tardío				
Diópsido					
Escapolita					
Albita					
Feldespato K					
Magnetita					
Apatito					
Actinolita					
Epidota					
Zoisita					
Muscovita					
Sericita					
Especularita					
Turmalina					
Clorita					
Arcillas					
Ceolitas					
Calcita					
Anhidrita					
Hematita					

Figura 4-1. Paragénesis de minerales secundarios del Yacimiento San Gabriel.

Modelo Geológico

El modelo geológico elaborado en este trabajo (Figura 3-13, Figura 3-14 y Figura 3-15), refleja e integra las características más relevantes del Yacimiento San Gabriel, tales como: disposición y geometría de los cuerpos mineralizados y rocas de caja, estilos de mineralización, distintas etapas de metamorfismo/metasomatismo y estructuras.

El cuerpo con mineralización de magnetita (unidad BxM), que constituye la mena de este yacimiento, consiste en un cuerpo irregular de brecha. Se encuentra a una profundidad entre los 50 a 120 m, bajo una cobertura de lavas de composición basáltica perteneciente a la unidad Volcanosedimentaria (VS). Está hospedado principalmente en las unidades de Rocas Córneas de escapolita-diópsido (Hf) y Brecha Periférica (BxH). La matriz de esta brecha está conformada principalmente por magnetita. Además, dentro de este cuerpo de brecha existen lentes subhorizontales de magnetita maciza.

En los flancos laterales del cuerpo de Brecha de matriz de magnetita, se encuentra la unidad de Brecha Periférica (unidad BxH). Las relaciones de contacto, además de la litología de los fragmentos de la unidad Brecha periférica (meta-basaltos y dioritas), sugieren que los eventos que dieron origen a este cuerpo de brecha fueron posteriores al emplazamiento de la unidad Diorita (Dr), puesto que las texturas y la mineralogía de los fragmentos de diorita de la unidad Brecha Periférica, son similares a las de las rocas de la unidad Diorita. En cuanto a su relación temporal con la mineralización, es posible inferir que este cuerpo se desarrolló previo a la génesis de la brecha de matriz de magnetita (unidad BxM), esto debido a que la unidad Brecha Periférica se encuentra afecta a la brechización de matriz de magnetita, y además se dispone en torno a la unidad de Brecha de matriz de magnetita.

Las rocas de caja (unidades Hf, BxH y HfA) muestran diversas etapas de metasomatismo (Figura 4-1), por lo que se definieron distintas asociaciones de minerales metamórficos/metasomáticos (Tabla 3-4). Las asociaciones minerales *feldespato-clinopiroxeno*, *escapolita-clinopiroxeno* y *clorita-sericita*, en general, se presentan restringidas a una cierta unidad geológica (BxH, Hf y Vs; respectivamente). Por el contrario, las asociaciones *actinolita-epidota* y *epidota-sericita*, se presentan en más de una unidad geológica. Cabe señalar que estas asociaciones (*act-ep* y *ep-ser*) se

sobreimponen a las asociaciones anteriormente mencionadas. Es por esto que las zonas de alteración definidas para el modelo geológico del Yacimiento San Gabriel (Figura 3-13, Figura 3-14 y Figura 3-15), solo consideran las asociaciones minerales *actinolita-epidota* y *epidota-sericita*, ya que el resto (en general *scp-cpx*, *feld-cpx* y *chl-ser*) quedan intrínsecamente representadas en la definición de unidad geológica.

En el modelo geológico se postula una falla inferida, de cinemática desconocida, basado en las siguientes observaciones:

- La presencia de brechas y diques subverticales, de orientación similar, concentrados en un espacio reducido (zona de debilidad y favorable para el ascenso de fluidos).
- Existen lineamientos en superficie de orientación similar a las brechas y diques. En particular se observa un lineamiento, el cual extrapolado hacia el NW coincide con el máximo espesor de la unidad Aluvios y Coluvios (Qa), esto posiblemente indica una zona de menor competencia de la roca.
- Intruyendo a la unidad Volcanosedimentaria se presenta un dique subhorizontal, observado en todos los sondajes estudiados, excepto en los dos que se encuentran más hacia el NE (RSGA31 y RSGA32), por lo que la existencia de una falla podría estar actuando como barrera para la propagación de este dique en dirección NE
- La Zona de Falla de Atacama en esta zona presenta una orientación paralela a la de los cuerpos de brechas e intrusivos.

Etapas de mineralización y metamorfismo/metasomatismo

En las rocas de la unidad Volcanosedimentaria (VS) se desarrolla un metamorfismo/metasomatismo, evidenciado por blastos de diópsido y porfidoblastos de escapolita. La ocurrencia de estos minerales aumenta en las zonas cercanas al cuerpo de brecha de matriz de magnetita, llegando a desarrollar rocas córneas de escapolita-diópsido en los flancos del cuerpo de brecha. Estos antecedentes, sumado a que la

mineralogía de las rocas córneas y la mineralogía que acompaña a la mineralización (diópsido en la matriz de la brecha de matriz de magnetita y vetillas rellenas de magnetita-diópsido-escapolita) es similar, indican que probablemente el metamorfismo/metasomatismo que dio origen a las rocas córneas de escapolita-diópsido fue producto de un metasomatismo debido al emplazamiento de este cuerpo de brecha de matriz de magnetita.

En cuanto a las rocas córneas de escapolita-actinolita, es probable que sus protolitos, durante la formación de los cuerpos que originaron los lentes de magnetita maciza, hayan sido sometidos a un metamorfismo/metasomatismo de contacto que desarrolló minerales de la asociación *escapolita-clinopiroxeno*. Luego, el segundo evento de mineralización, habría sobreimpuesto las asociaciones *epidota-sericita* y *actinolita-epidota*. Lo anterior es consistente con la distribución espacial de los minerales de la asociación *actinolita-epidota*, ya que coincide con la transición entre las rocas córneas de escapolita-diópsido y las de escapolita-actinolita.

La unidad de Brecha Periférica (BxH) presenta una matriz principalmente compuesta por diópsido, plagioclasa y feldespato. Esta asociación mineral sugiere que su origen es más bien del tipo magmático.

La mineralización de magnetita se encuentra asociada principalmente con diópsido o con actinolita. Ambos tipos de mineralización (magnetita-diópsido y magnetita-actinolita) se pueden encontrar en diversos estilos como: relleno de vetillas, en matriz de brecha y diseminado. Como se muestra en el modelo de alteración (Figura 3-13, Figura 3-14 y Figura 3-15), estos dos tipos de mineralización se presentan espacialmente en distintos dominios. Las evidencias anteriores, junto con la paragénesis mineral sugieren que hubo más de un evento mineralizador:

- I. Evento asociado a la formación de los lentes de magnetita de altísima ley (> 60% Fe), junto a cuerpos de brecha de matriz de magnetita y menor diópsido.
- II. Segundo evento atribuido a la génesis de cuerpos de brecha de matriz de magnetita-actinolita y sobreimposición de la asociación actinolita-epidota y epidota-sericita tanto en las brechas como en las rocas de caja.

- III. El tercer evento generó vetas y vetillas pobremente mineralizadas de actinolita-turmalina-especularita.

Geoquímica de las Unidades Geológicas

Como resultado de los análisis de la base de datos geoquímica se formaron 5 grupos de variables, agrupadas según su concentración en unidades geológicas específicas y los factores de correlación que presentan entre sí. Con el objetivo de resaltar los contrastes geoquímicos entre las unidades geológicas se muestran a continuación algunas variables sintéticas, generadas a partir de la multiplicación entre dos variables del mismo grupo, y luego normalizadas en una escala aritmética de 0 a 1.

- Grupo I: Fe, V, Ni, Co, Ga, Ge, Cr, Sn, Ca y Mg.

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, existen dos subgrupos de elementos según su factor de correlación con el hierro:

- Ca-Mg-Y-Ga-Cr-HREE: Estos elementos si bien muestran correlaciones positivas con el hierro en el conjunto de muestras que excluyen a las pertenecientes a la unidad Brecha de matriz de magnetita, presentan factores de correlación negativos con el Fe dentro del conjunto de muestras de la unidad Brecha de matriz de magnetita. En la Figura 4-2 se muestran los diagramas de caja de las variables sintéticas C_{xMg} y Y_{xCr} , donde es posible notar que tanto la unidad Brecha periférica como la unidad de Rocas Córneas de escapolita-diópsido se destacan por tener valores mayores que el resto de las unidades. Además, la unidad Brecha de matriz de magnetita muestra valores más bajos que el resto de las unidades. Lo anterior revela que estos elementos se encuentran asociados al evento de mineralización de magnetita pero probablemente se encuentran alojados principalmente en silicatos como diópsido, epidota, zoisita y actinolita, entre otros.

- Ni-V-Co-Sn-Ge: Este subgrupo presentan factores de correlación con el hierro mayores a 0.9 tomando en consideración todas las muestras. Las variables sintéticas F_{eV} y C_{oNi} (Figura 4-2) destacan por sus altos valores en las muestras de la unidad Brecha de matriz de magnetita (B_{xM}) y en menor medida

en las unidades Rocas Córneas de escapolita-diópsido, Brecha periférica y Rocas Córneas de escapolita-actinolita (Hf, BxH y HfA, respectivamente). El comportamiento de estos elementos indica que son compatibles con la estructura de la magnetita, ya que estos elementos presentan las concentraciones más elevadas en las muestras de leyes >60% Fe.

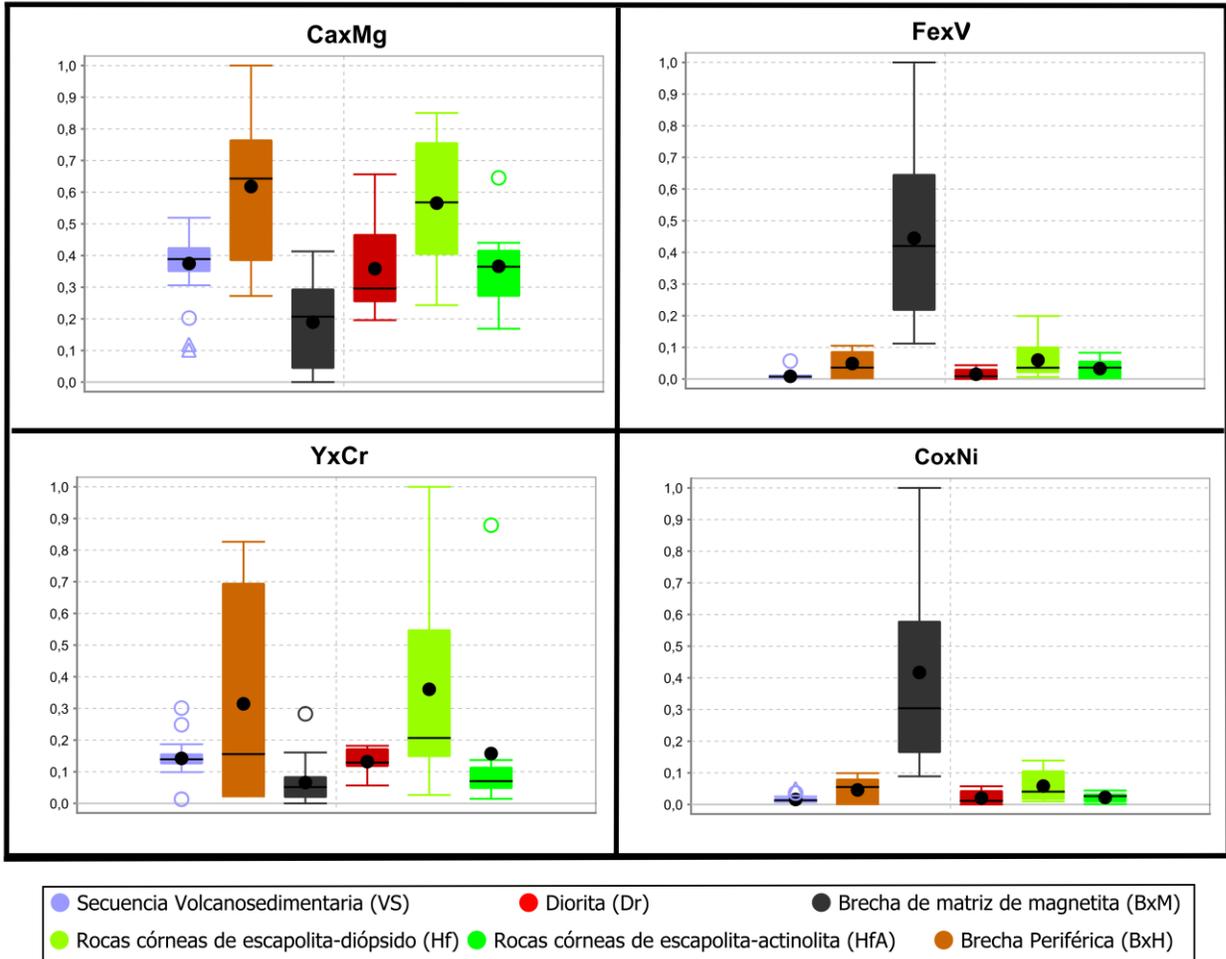


Figura 4-2. Diagramas de caja de variables sintéticas del grupo I.

- Grupo II: Na, Al, Sr, Zn, Pb y Cd.

Estos elementos se encuentran en mayores concentraciones en la unidad Volcanosedimentaria (VS). En la Figura 4-3 se muestran los diagramas de caja de las variables sintéticas AlxSr y ZnxB, donde se observa que ambas variables destacan por tener valores altos en la unidad Volcanosedimentaria, sin embargo, la segunda también resalta la unidad de Rocas Córneas de escapolita-diópsido.

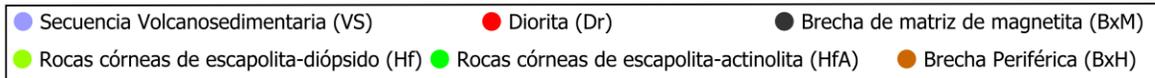
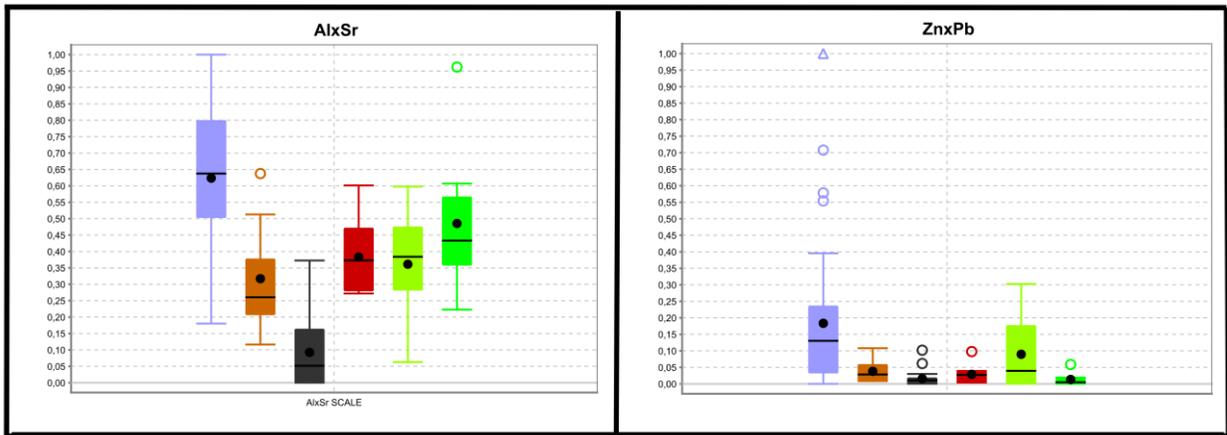


Figura 4-3. Diagramas de caja de variables sintéticas del grupo II.

- Grupo III: Na, Ta, Th, Nb y Zr

Este grupo de elementos se destaca por tener mayores concentraciones en las muestras de la unidad Diorita (Dr). Las variables sintéticas NaxNb y TaxZr (Figura 4-4) corroboran el hecho de que estos elementos incompatibles (Ta, Th, Nb y Zr) junto con Na, se presentan en concentraciones mayores en la unidad Diorita.

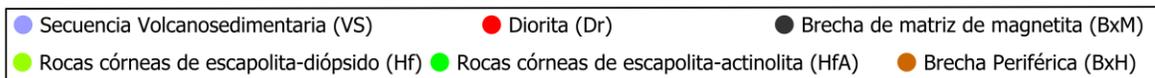
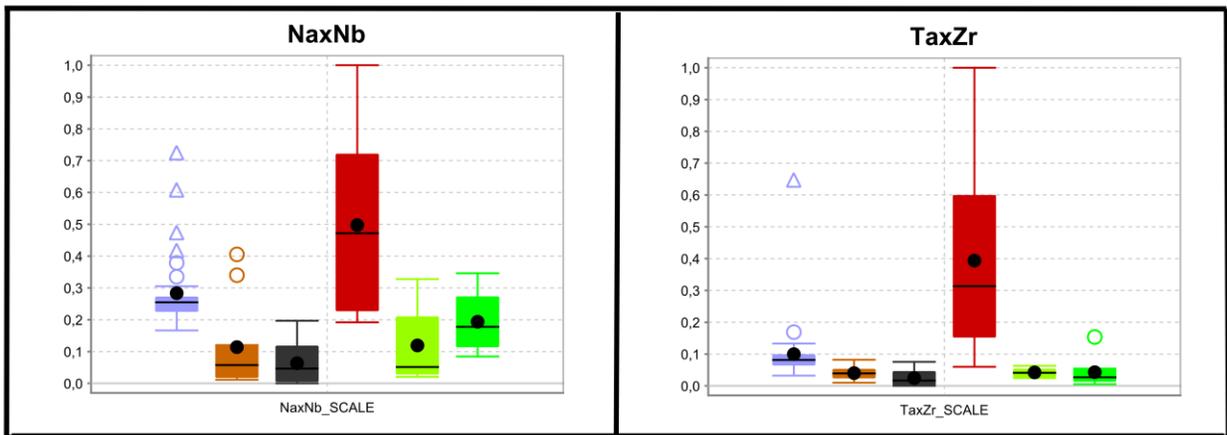


Figura 4-4. Diagramas de caja de variables sintéticas del grupo III.

- Grupo IV: K, Ba y Rb

Para este grupo de variables se generaron las variables KxRb y BaxRb (Figura 4-5). Estas variables destacan levemente las unidades Volcanosedimentaria, Brecha Periférica y Rocas Córneas de escapolita-diópsido. Es importante notar que durante el estudio de microscopía se observó feldespatos K en las muestras de la unidad Brecha Periférica, Rocas Córneas de escapolita-diópsido y Diorita. Por el contrario, en las muestras de la unidad Volcanosedimentaria no se observó este mineral.

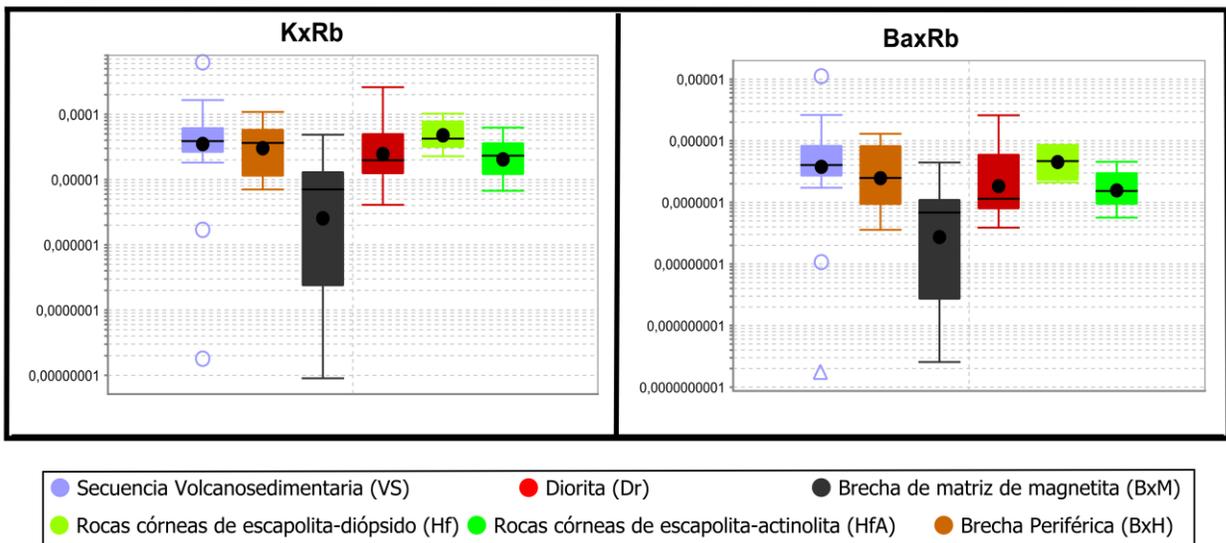


Figura 4-5. Diagramas de caja de variables sintéticas del grupo IV.

- Grupo V: P, Th, As y Mo.

Estos elementos se muestran en altas concentraciones en las Rocas Córneas de escapolita-diópsido y Diorita (Hf y Dr respectivamente) relativas a las demás unidades. En la Figura 4-6 se muestra la sección SG_06 junto a un gráfico de fósforo vs. cota, donde es posible observar que los valores de P superiores a 2000 ppm se encuentran entre las cotas 900 y 825, preferencialmente en las rocas de escapolita-diópsido. Esta zona coincide con el contacto superior del cuerpo de brecha, por lo que es probable que las altas concentraciones de fósforo se deban al evento mineralizador. El hecho de que este elemento tenga un factor de correlación cercano a cero con otros elementos, sugiere que el apatito cristalizó preferentemente en la roca caja y no en la matriz de la brecha de magnetita.

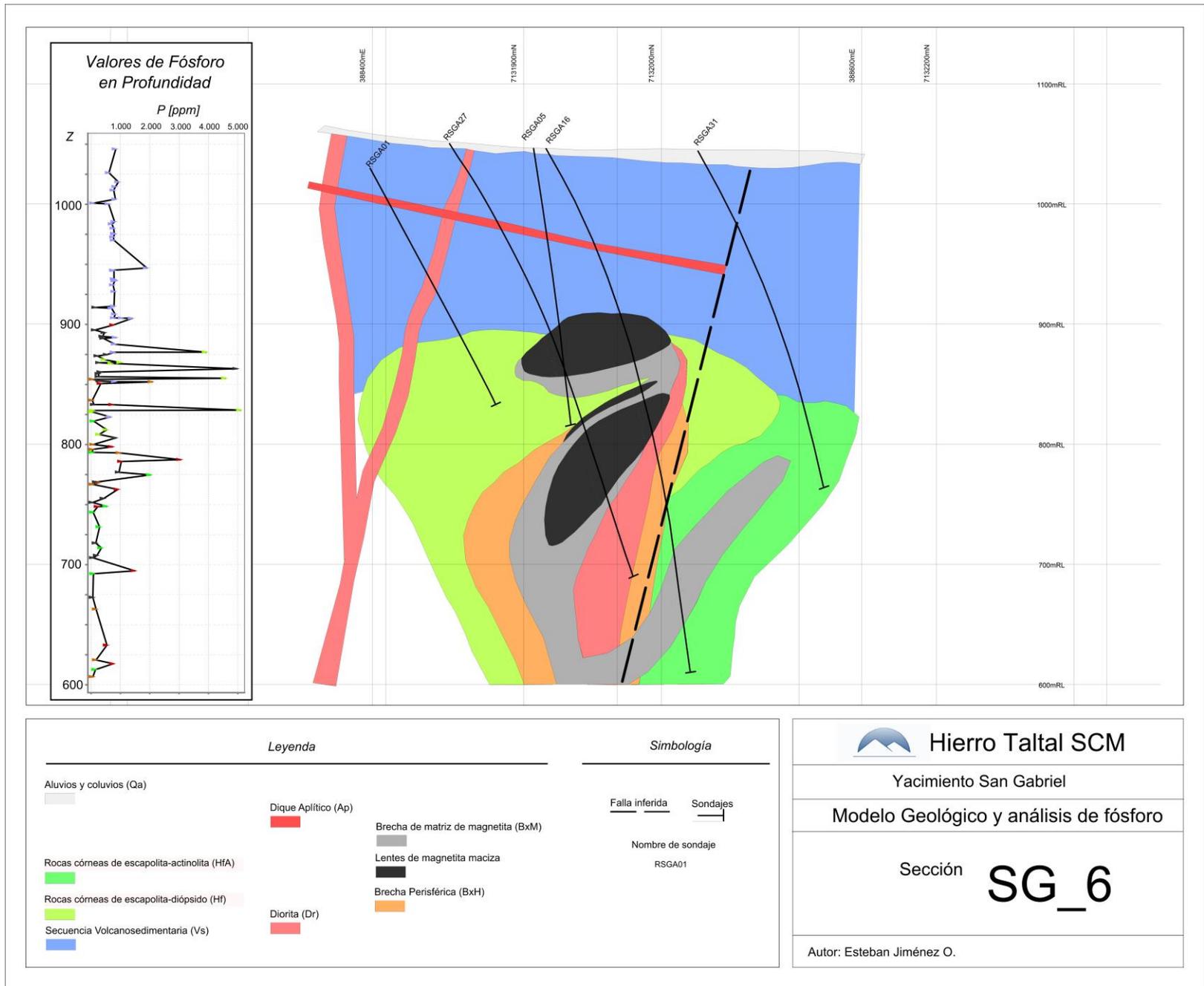


Figura 4-6. Sección geológica SG_06 junto a los valores de fósforo de todas las muestras según la cota.

Uno de los problemas metalúrgicos más relevantes que se presentan en los yacimientos de magnetita, en especial cuando el producto final corresponde a concentrados de magnetita para *sinter feed*, es el de las impurezas (elementos químicos no deseados). Estas impurezas tienen un fuerte impacto en el precio de venta y por ende en las utilidades de la compañía. Es por esto que a la hora de realizar los planes mineros de largo, mediano y corto plazo, se debe tener un buen entendimiento de la distribución geoquímica del yacimiento.

Los grupos de elementos y las variables sintéticas definidas en este trabajo, nos corroboran las relaciones existentes entre ellos y las diferentes unidades geológicas. Los puntos más interesantes a discutir respecto a esto, de acuerdo al párrafo anterior, son los siguientes:

- Los elementos que se encuentran fuertemente relacionados con el Fe en la unidad de Brecha de matriz de magnetita son: Ni, V, Co, Sn y Ge. Si es que estos elementos se consideran como impurezas se recomienda hacer un estudio detallado para caracterizar su distribución en el yacimiento.
- El subgrupo de elementos Ca-Mg-Y-Ga-Cr-HREE se presentan en mayores concentraciones relativas en las unidades de Rocas Córneas de escapolita-dióxido y Brecha Periférica. Estas unidades se encuentran en torno al cuerpo de brecha de magnetita, por lo que, en términos de procesamiento, estas rocas serán incorporadas (en menor medida) al procesamiento por efectos de dilución. Por ende, también se deberán tener en cuenta durante la evaluación de yacimiento, sin embargo, en menor medida.
- El fósforo es reconocido en la industria por ser uno de los contaminantes más indeseados en la mena de hierro. Las altas concentraciones de fósforo (> 2000 ppm), se encuentran preferentemente en unidad de Rocas Córneas de escapolita-dióxido. El apatito se presenta en esta unidad generalmente en vetillas de *magnetita-clinopiroxeno±escapolita±apatito±sericita*. La unidad de Rocas Córneas de escapolita-dióxido se encuentra en contacto con el cuerpo de brecha de matriz

de magnetita, por lo que se recomienda realizar un estudio detallado de la distribución de este elemento en el yacimiento.

Clasificación geoquímica de las rocas volcánicas

A modo de clasificar el tipo de magma de las rocas ígneas menos alteradas, se presenta un diagrama AFM (Figura 4-7), donde se grafican las muestras de las unidades Volcanosedimentaria y Diorita (VS y Dr respectivamente), junto a las curvas de clasificación de series de magmas (Rollinson, 1993). Como se observa en la Figura 4-7, gran parte de las muestras caen en el campo calcoalcalino, salvo dos muestras de dioritas y una de basalto, las cuales presentan vetillas de magnetita. Asimismo, se muestra un diagrama de clasificación composicional según elementos inmóviles (como aproximación a un diagramas TAS); todas las muestras son de composición basáltica/diorítica.

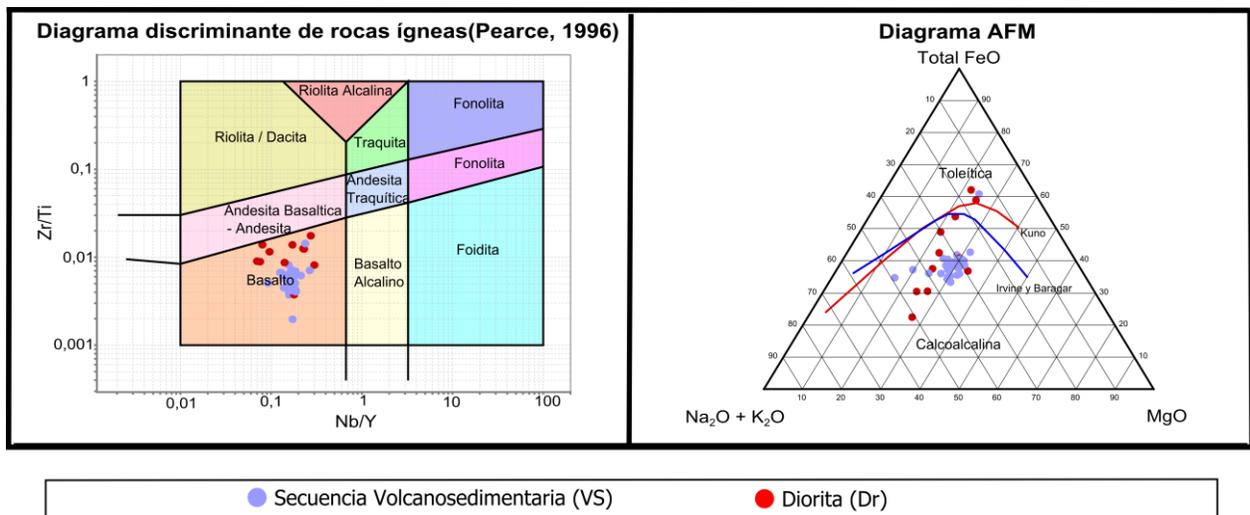


Figura 4-7. Diagramas de clasificación de rocas ígneas.

Tipo de yacimiento

El cuerpo de brecha de magnetita del Yacimiento San Gabriel se encuentra emplazado en una secuencia volcánica calcoalcalina, asociada al arco volcánico del Cretácico, en el contacto con un intrusivo de composición diorítica, inmediatamente al este de la Zona de Falla de Atacama. Como consecuencia del emplazamiento de la mena se ha desarrollado un metamorfismo de contacto en las rocas aledañas, caracterizado por una alteración penetrativa de la mineralogía y de las texturas primarias, dejando como evidencia

principal la presencia de abundante diópsido, escapolita, plagioclasa, feldespato potásico y menor apatito, además de una superposición de actinolita, epidota y zoisita.

Algunas de las características del Yacimiento San Gabriel se han observado en otros yacimientos en Chile y el mundo; El Laco (II Región, Chile) y Kiruna (Suecia), en los cuales la mayor parte de los estudios se han enfocado en la formación de magnetita-apatito del tipo Kiruna. Estos depósitos se encuentran asociados con rocas calcoalcalinas o pobremente alcalinas (Frietsch y Perdahl, 1995; Nyström y Henríquez, 1994) y muestran alteración hidrotermal abundante e intensa caracterizada por un reemplazo total de lavas dacíticas y andesíticas y de rocas piroclásticas por escapolita, diópsido y magnetita (Mungall, 2007), junto a cantidades variables de apatito. Se consideran dentro de los yacimientos de magnetita de bajo Ti (Nyström y Henríquez, 1994). El emplazamiento de estos depósitos está relacionado a fallas regionales y ocurre en diversos ambientes geológicos (Hildebrand, 1986).

Otros yacimientos de magnetita-apatito como los de la Franja Ferrífera Chilena (e.g Cerro Imán, Cerro Negro y El Romeral) comparten similitudes con el Yacimiento San Gabriel, en cuanto al estilo de mineralización de la magnetita, las dimensiones y forma de los cuerpos de magnetita. En cuanto a la mineralogía y alteración, los yacimientos Cerro Negro Norte y Cerro Imán se caracterizan por presentar una zonación de los minerales de alteración; en la zona interna, próxima a la mena, presenta una intensa actinolitización acompañada de cantidades variables de plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico, junto a epidota, clorita, titanita y magnetita como minerales accesorios. En el halo externo existen rocas andesíticas con distinto grado de silicificación, en ocasiones acompañada de turmalina y/o albita (Vivallo et. al, 1995). El depósito El Romeral se encuentra hospedado en el Pórfido Andesítico La Liga, el cual, cercano al cuerpo de mena, presenta un intenso metamorfismo de oligoclasa-diópsido con texturas primarias parcialmente obliteradas (semejante a una roca córnea). Sin embargo, en el contacto estas rocas se encuentran fuertemente actinolitizadas junto a plagioclasa secundaria, con escapolita, magnetita y clinzoisita. (Bookstrom, 1977). En general, la mineralogía y las asociaciones de minerales coinciden, en cierta manera, con las del Yacimiento San Gabriel, exceptuando por la silicificación (postmineral), generalmente acompañada de turmalina,

que presentan algunos yacimientos de la Franja Ferrífera Chilena (e.g. Cerro Imán y Cerro Negro).

Los depósitos de magnetita-apatito del tipo Kiruna Washan, Nashan y Taocun pertenecen a la franja metalogénica Cretácica del Valle del Río Yangtze, en China oriental. Estos depósitos se encuentran emplazados en una secuencia volcánica andesítica intruída por pórfidos subvolcánicos de composición diorítica-gabroica. En las rocas de caja de los cuerpos de magnetita se desarrollan diversas asociaciones de metamorfismo: albita-diópsido, apatito-diópsido-escapolita, diópsido-escapolita-albita, albita-magnetita y actinolita-apatito-albita (Jinjie Yu, 2011). También en estos yacimientos se ha reportado la existencia de rocas escapolitizadas junto a magnetita y rocas de apatito-diópsido-escapolita, en contacto con los cuerpos de mena, de la misma forma en que ocurren en el Yacimiento San Gabriel.

Las similitudes en cuanto a la geometría de los cuerpos, los tipos de rocas, la mineralogía de alteración y las texturas de las rocas alteradas del Yacimiento San Gabriel, concuerdan con la de los yacimientos de magnetita-apatito del tipo Kiruna mencionados, por lo que este yacimiento se podría clasificar como tal.

5. CONCLUSIONES

Como resultado final de este estudio, se definió un total de 8 unidades, de las cuales 5 se estudiaron en detalle: Secuencia Volcanosedimentaria (VS), Rocas de escapolita-diópsido (Hf), Rocas de escapolita-actinolita (HfA), Brecha periférica (BxH), Diorita (Dr) y Brecha de matriz de magnetita (BxM). Además, se definieron 5 asociaciones de minerales metamórficos/metasomáticos, las cuales se encuentran resumidas en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Asociaciones de minerales metamórficos/metasomáticos.

Nombre de Asociación	Abreviación	Minerales
Feldespato-Clinopiroxeno	<i>feld-cpx</i>	plagioclasa-diópsido-magnetita ± feldespato K ± apatito
Escapolita-Clinopiroxeno	<i>scp-cpx</i>	escapolita-diópsido±magnetita±feldespato K
Actinolita-Epidota	<i>act-ep</i>	actinolita-epidota±magnetita±muscovita±sericita±zoisita
Epidota-Sericita	<i>ep-ser</i>	epidota-zoisita-sericita±arcillas±muscovita
Clorita-Sericita	<i>chl-ser</i>	clorita-sericita-arcillas
Calcita-Ceolita	<i>cal-ceo</i>	calcita-ceolita

A continuación se sintetiza la petrografía de cada una de las 5 unidades estudiadas:

- Secuencia Volcanosedimentaria (VS): se caracteriza por basaltos de composición máfica a intermedia; exhiben textura porfírica, con fenocristales y microlitos de plagioclasa, y textura traquítica. Los minerales máficos corresponden a hornblendas o piroxenos. Las asociaciones de minerales (secundarios) más frecuentes son *clorita-sericita* y/o *escapolita-diópsido*.
- Rocas Córneas de escapolita-diópsido (Hf): Las rocas de esta unidad presentan texturas completamente obliteradas. En pocos casos es posible distinguir protolitos, los cuales corresponden a lavas porfíricas. Presentan texturas granoblásticas principalmente compuestas por escapolita; diópsido; plagioclasa; y feldespato K. Es común observar a la escapolita como poiquiloblastos, encerrando a diópsidos. Son comunes las asociaciones *escapolita-diópsido* y *clorita-sericita*.
- Rocas Córneas de escapolita-actinolita (HfA): Estas rocas son bastante similares a las rocas de escapolita-diópsido, en cuanto a las texturas y, en cierta medida, a la mineralogía. Sin embargo, los diópsidos se encuentran completamente

reemplazados por actinolitas. Las asociaciones de minerales dominantes son *actinolita-epidota* y *escapolita-diópsido*.

- Diorita (Dr): Corresponden a intrusivos porfíricos, donde los fenocristales corresponden a plagioclasa. La masa fundamental presenta textura consertal, formada por plagioclasa, menor magnetita, feldespato K y cuarzo. Además, se encuentra abundante diópsido.
- Brecha periférica (BxH): Esta brecha exhibe una matriz de grano muy fino compuesto por plagioclasa, diópsido, feldespato K y magnetita. Es polimíctica de clastos con bordes difusos y subredondeados, la litología de estos corresponden a rocas córneas, basaltos y dioritas. Presenta las asociaciones *feldespato-diópsido*, *actinolita-epidota* y *epidota-sericita*.
- Brecha de matriz de magnetita (BxM): El cuerpo formado por esta unidad es posible dividirlo en: una brecha de matriz de magnetita y lentes de magnetita. La brecha presenta una matriz de magnetita maciza, la cual en profundidad se encuentra junto con actinolita, y en las zonas altas del sistema se observa con diópsido. Esta brecha es polimíctica con fragmentos de todas las unidades de roca. En cuanto a los lentes, estos se componen entre un 85 a 99% de magnetita.

Se confeccionaron 3 secciones para representar el modelo geológico del depósito, que da cuenta de la intrusión de un intrusivo diorítico y de dos eventos de brechización que dieron origen a la unidad de Brecha periférica y posteriormente a la unidad de Brecha de matriz de magnetita. Posiblemente estos sucesos gatillaron el desarrollo de rocas córneas (Hf y HfA) en las rocas de edad Cretácica pertenecientes a la secuencia volcánica de la Formación Aeropuerto; principalmente producto de un metamorfismo/metasomatismo de contacto asociado al gradiente de temperatura y en menor medida de una alteración hidrotermal tardía.

Se crearon 5 grupos de distintos elementos químicos, además, se crearon variables sintéticas en base a productos entre los elementos. Luego se analizó el comportamiento

diferencial que presentan estas variables entre las distintas unidades geológicas. Con este estudio se concluyó lo siguiente:

- Grupo I: Fe, V, Ni, Co, Ga, Ge, Cr, Sn, Ca y Mg:
Existe un aporte metasomático de estos elementos. Este grupo es posible dividirlo en dos:
 - Ca-Mg-Y-Ga-Cr-HREE: Las unidades de rocas de caja con intenso metasomatismo (BxH y Hf) se encuentran enriquecidas en estos elementos.
 - Ni-V-Co-Sn-Ge: Elementos compatibles con la estructura interna de la magnetita. Se encuentran fuertemente enriquecidos en la unidad de Brechas de matriz de magnetita y en menor medida en las unidades Rocas Córneas de escapolita-diópsido, Brecha Periférica y Rocas Córneas de escapolita-actinolita.
- Grupo II: Na, Al, Sr, Zn, Pb y Cd: Destacan mayores concentraciones en la unidad Volcanosedimentaria (VS).
- Grupo III: Na, Ta, Th, Nb y Zr: Destacan mayores concentraciones en la unidad Diorita (Dr).
- Grupo IV: K, Ba y Rb: Presentan mayores valores en las unidades Volcanosedimentaria y Rocas Córneas de escapolita-diópsido.
- Grupo V: P, Th, As y Mo: Muestran concentraciones mayores en las unidades de Diorita y Rocas Córneas de escapolita-diópsido. El fósforo específicamente se encuentra en mayores concentraciones (> 2000 ppm) en esta última unidad.

En los patrones de tierras raras (REE) es posible notar que las muestras de las unidad Volcanosedimentaria presentan una tendencia completamente distinta al resto de las unidades, ya que su patrón de REE posee una pendiente más pronunciada y no presenta anomalía negativa de Eu. En cambio, el resto de las unidades muestran patrones similares entre ellas: una razón $(La/Nd)_N < 1$, una marcada anomalía negativa de Eu y un enriquecimiento de tierras raras pesadas (excepto en la brecha de matriz de magnetita) con respecto a las muestras de la secuencia volcanosedimentaria. Esto indica que existe

un intenso metasomatismo de REE en las unidades Rocas Córneas de escapolita-dióxido, Brecha Periférica, Rocas Córneas de escapolita-actinolita y Diorita, asociado con los eventos mineralizadores del depósito.

A partir de los diagramas de clasificación de rocas ígneas, se concluye que las muestras de las unidades Volcanosedimentaria y Diorita pertenecen a la serie calcoalcalina y son de composición basáltica/diorítica.

La comparación de San Gabriel con yacimientos de tipo Kiruna, permite establecer similitudes en cuanto a: ambiente geológico, estructuras, mineralogía, texturas metamórficas e hidrotermales y geoquímica de la mena. Por lo tanto, el Yacimiento San Gabriel se puede clasificar como un depósito de magnetita-apatito del tipo Kiruna.

6. BIBLIOGRAFÍA

Boric, P. R., Diaz, F. F., Maksaev, J. V., 1990. Geología y yacimientos metalíferos de la región de Antofagasta. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería.

Cembrano, J.; Lavenu, A.; Arancibia, G.; Sanhueza, A., and Reynolds, P., 1997. Coeval transpressional and transtensional magmatic arc tectonics in the southern Andes. VIII Congreso Geológico Chileno, Actas V. III, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, p 1613-1616.

Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P., 2007. Tectonostatigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. En: Moreno, T., Gibbons, W. (eds) The Geology of Chile. The Geological Society, London, p. 21-114.

Deer, W.A., Howie, R. A. y Zussman, J., 1966. An Introduction to the Rock Forming Minerals: Longman, London, 528 pp.

Easdon, M., 2008. Technical Report on the San Gabriel Iron Project. San Gabriel, Esperanza And Antonia Zones, Region II, Chile. Informe Privado preparado para SBX Consultores.

Espinoza, S., 1990. The Atacama-Coquimbo Ferriferous Belt, Northern Chile. In: Fontboté. L.; Amstutz, G.C.; Cardozo, M.; Cedillo, E. and Frutos, J. (Editores) Stratabound Ore Deposits in the Andes. Special Publication N° 8 of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Springer-Verlag, p. 353-364

Frietsch, R., Perdahl, J.A., 1995. Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types. Ore Geol. Rev. 9, 489–510.

García, F., 1967. Geología del Norte Grande de Chile. In Simposium sobre el Geosinclinal Andino 1962, Sociedad Geológica de Chile, 138 p.

Hildebrand, R., 1986. Kiruna-type deposits: their origin and relationship to intermediate subvolcanic plutons in the Great Bear Magmatic Zone, Northwest Canada. *Econ. Geol.* 81, p. 640–659.

Maksaev, V., 1990. Metallogeny, geological evolution, and thermochronology of the Chilean Andes between latitudes 21° and 26° South, and the origin of major porphyry copper deposits. Unpublished Ph.D. Thesis, Halifax, Nova Scotia, Canada, Dalhousie University, p 554.

Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C., Camus, F. Metallic ore deposits. En: Moreno, T. y Gibbons, W. *The Geology of Chile*. London, The Geological Society Publishing House, 2007. 395p.

Ménard, J.J., 1995. Relationship between altered pyroxene diorite and the magnetite mineralization in the Chilean Iron Belt, with emphasis on the El Algarrobo iron deposits (Atacama Region, Chile). *Mineralium Deposita*, V. 30, p. 268-274.

Mercado, M., 1978. Geología de la Cordillera de la Costa entre Chañaral y Caldera, Región de Atacama. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 73 p.

Mungall, J.E., 2007. Magmatic Ore Deposits, En: Holland, H. y Turekian, K. *Treatise on Geochemistry*, Pergamon, Oxford, 2007, p. 1-33.

Naranjo, J.A. y Puig, A., 1984. Hojas Taltal y Chañaral, Regiones de Antofagasta y Calama. Carta Geológica de Chile, No. 62-63. Servicio Nacional de Geología y Minería, escala 1:250.000.

Nyström, J., Henríquez, E., 1994. Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden: ore textures and magnetite geochemistry. *Econ. Geol.* 89, 820–839.

Olcay, L., Pérez, M., 2008. Informe Geológico Proyecto San Gabriel. Informe Privado preparado para SBX Consultores.

Oliveros, V., 2005. Étude géochronologique des unités jurassiques et Crétacé Inférieur du Nord du Chili (18°30'-24°S, 60°30'-70°30'W): Origine, mise en place, altération, métamorphisme et minéralisations associées. Thesis, Université de Nice-Sophia Antipolis y Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 305 p.

Oyarzún, J., 1985. Magmatismo y metalogénesis andina en Chile. In: Frutos, J., Oyarzún, R. and Pincheira, M. (Editors), Geología y Recursos Minerales de Chile. Editorial de la Univ. de Concepción, pp. 441-468.

Rollinson, H.R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman, UK. p 352 p.

Shaw, D. M. 1960. The geochemistry of scapolite. Part I. Previous work and general mineralogy. Journal of Petrology I, 218-260.

Scheuber, E. y Andriessen, P.A.M., 1990. The kinematic and geodynamic significance of the Atacama Fault Zone, northern Chile. J. Struct. Geol., 12: 243-257.

Sillitoe, R.H., 1976. Andean mineralization a model for the metallogeny of convergent plate margins. In: Strong, D.F. (Editor) Metallogeny and plate tectonics, Geol. Assoc. Canada, Special Paper, N°14, pp. 59-100.

Sun, S. y McDonough, W. F., 1995. The composition of the Earth. Chemical Geology, Vol. 120, 223–253p.

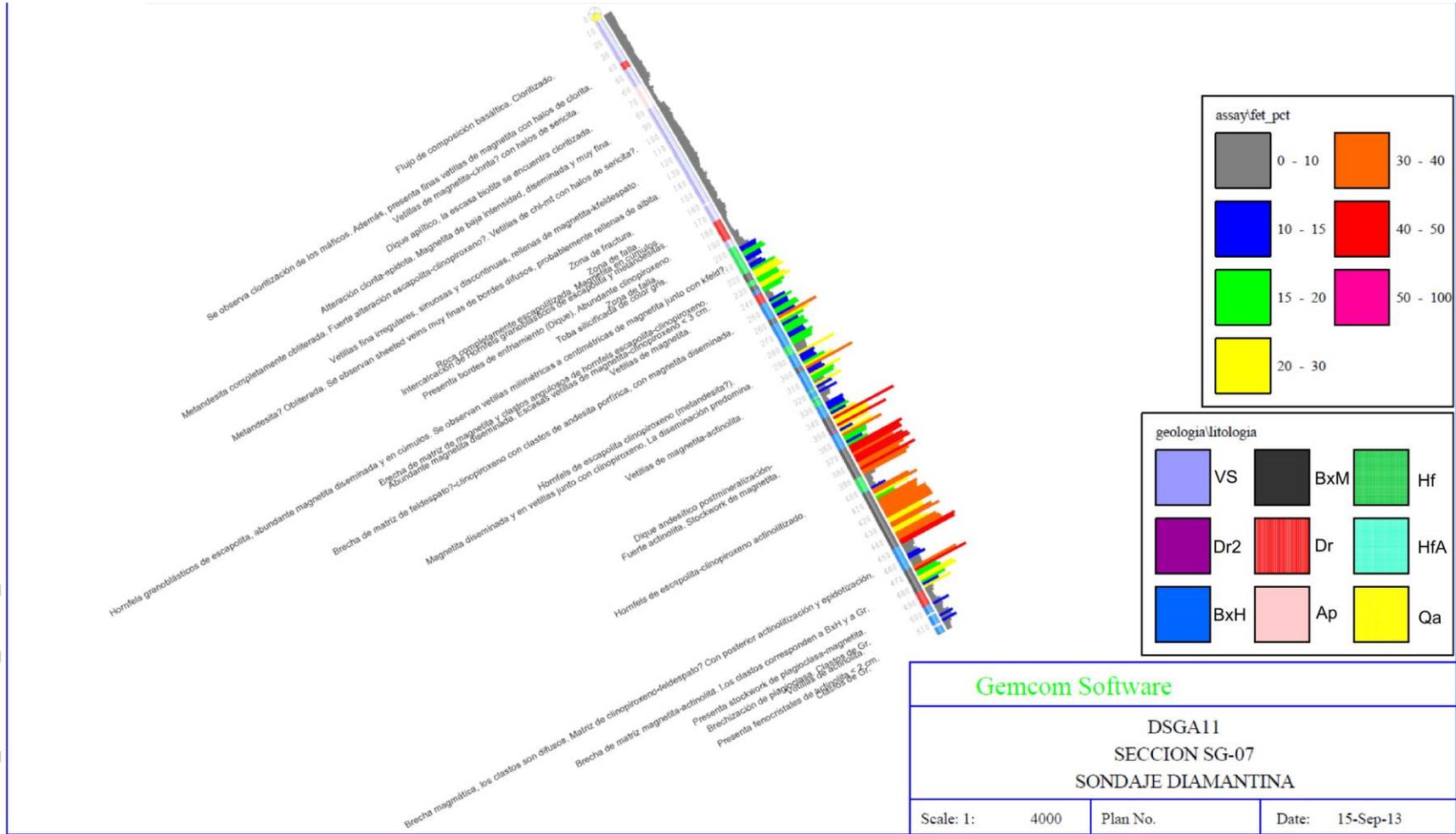
Ulriksen, C., 1973. Hojas Cifuncho y Cerro El Pingo, provincia de Antofagasta, escala 1:100.000. SERNAGEOMIN.

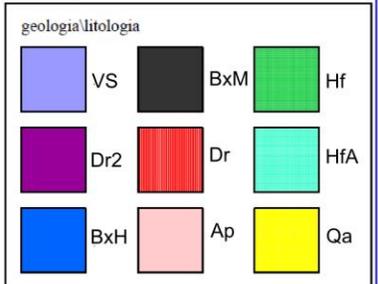
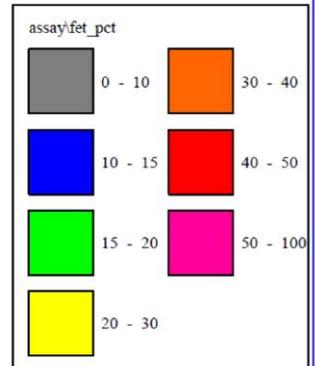
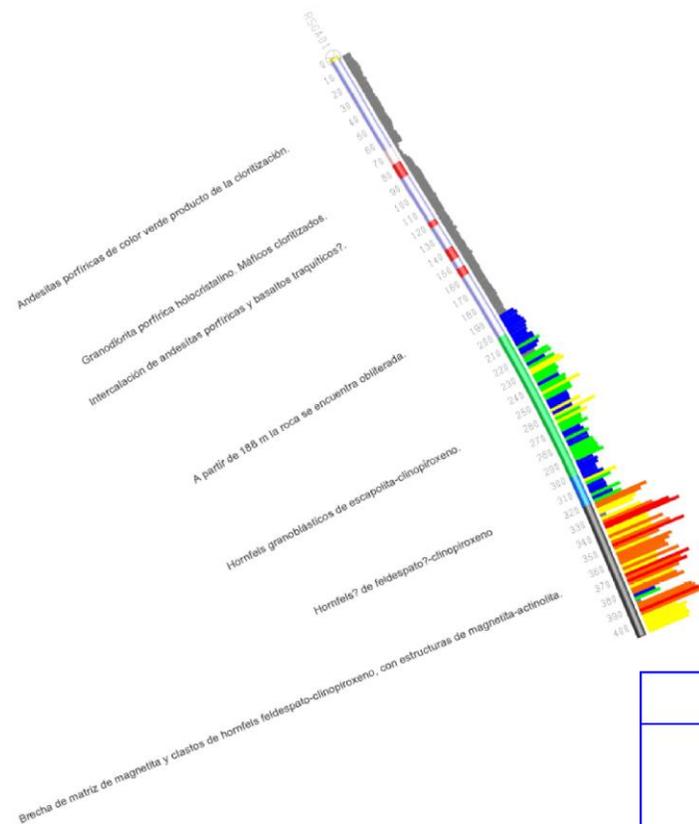
Ulriksen, C., 1979. Regional geology, geochronology and metallogeny of the Coastal Cordillera of Chile between 25°30' and 26°00' south. M. Sc. Thesis, Dalhousie Univ., 221 p. Canada.

Vivallo, W., Espinoza, S. y Henríquez, F., 1995. Metasomatismo y alteración hidrotermal en el Distrito Ferrífero Cerro Negro Norte, Copiapó, Chile, Revista Geológica de Chile 22, 75-88.

ANEXO A

Striplogs y descripción de sondajes.

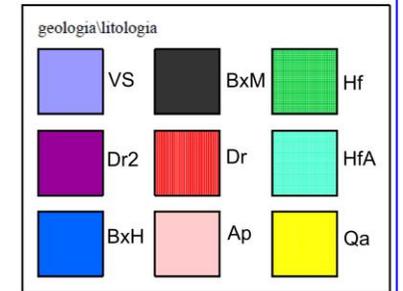
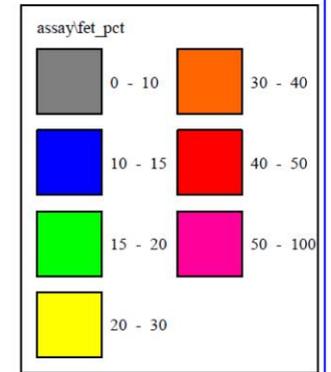
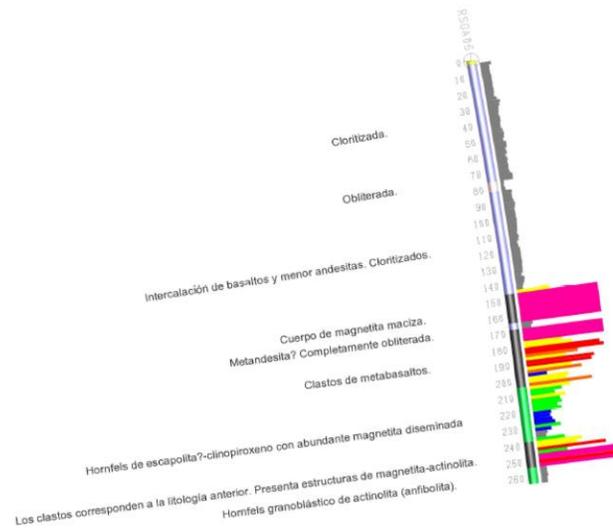




Gemcom Software

RSGA01
SECCIONES SG-06 Y SG06A
SONDAJE DE AIRE REVERSO

Scale: 1:	4000	Plan No.	Date: 15-Sep-13
-----------	------	----------	-----------------



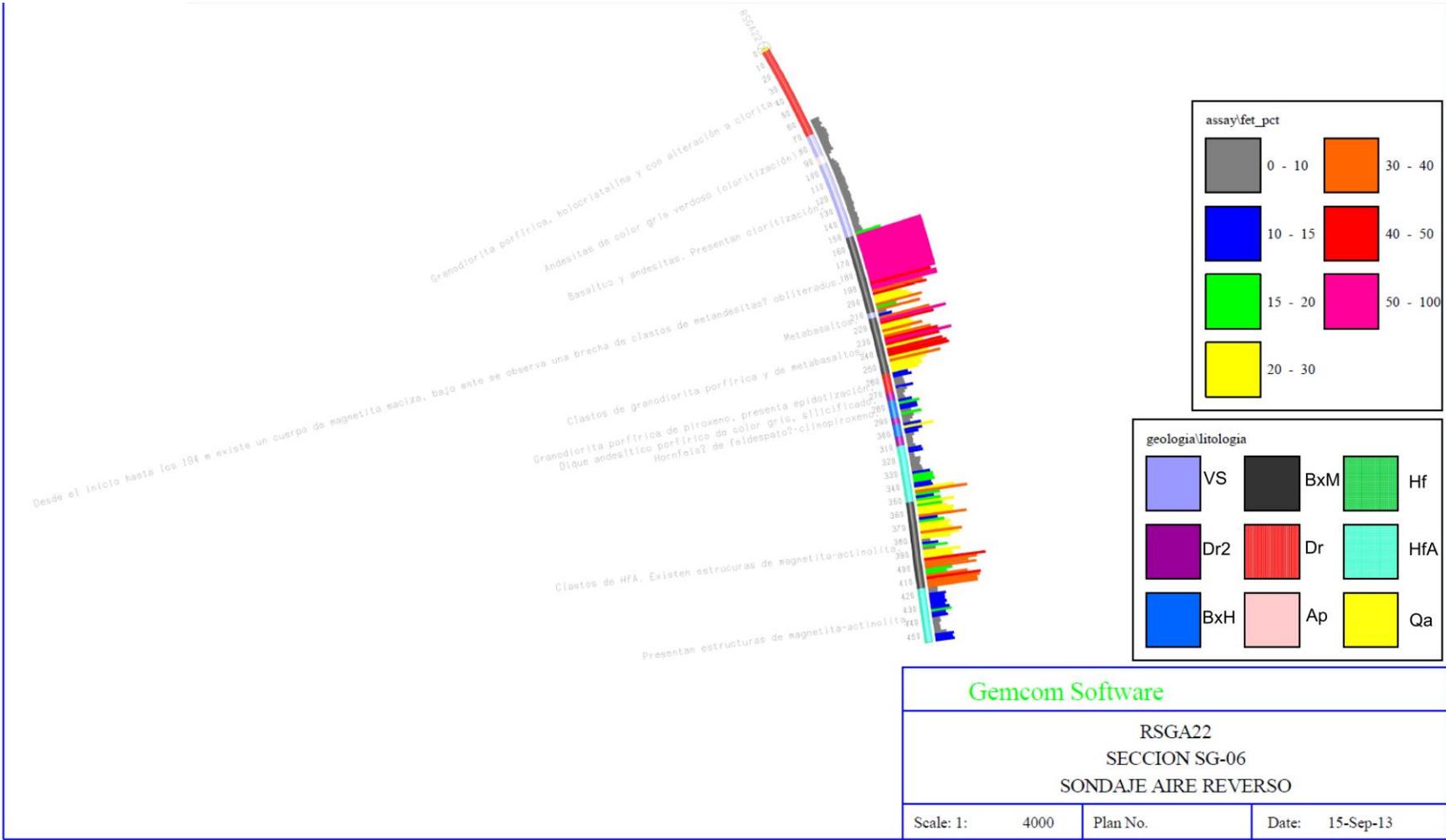
Gemcom Software

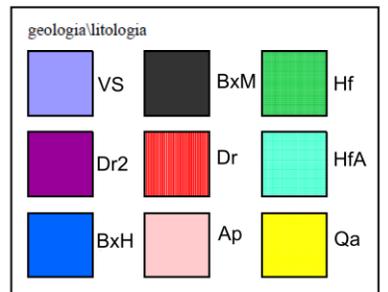
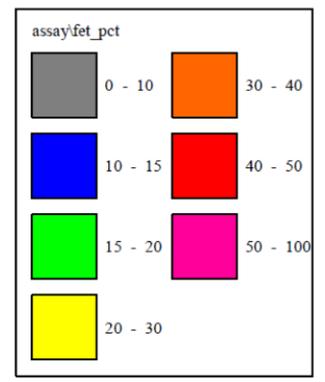
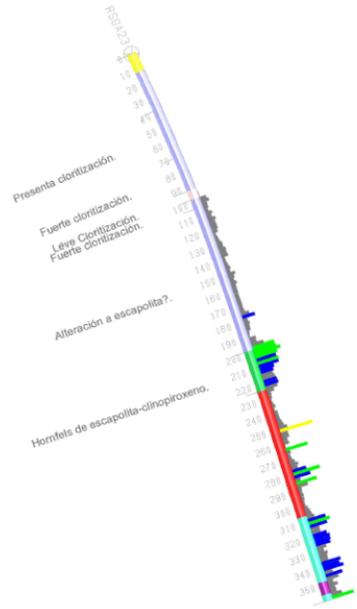
RSGA05
SECCIONES SG-06 Y SG06-A
SONDAJE AIRE REVERSO

Scale: 1: 4000

Plan No.

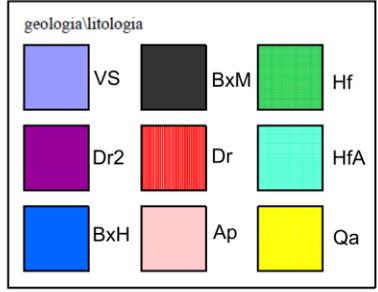
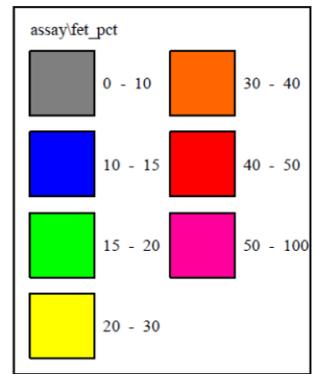
Date: 15-Sep-13





Gemcom Software		
RSGA23 SECCION SG-07 SONDAJE AIRE REVERSO		
Scale: 1:	4000	Date: 14-Sep-13
Plan No.		

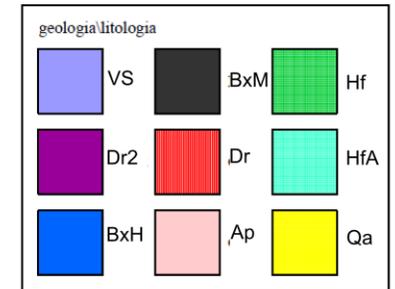
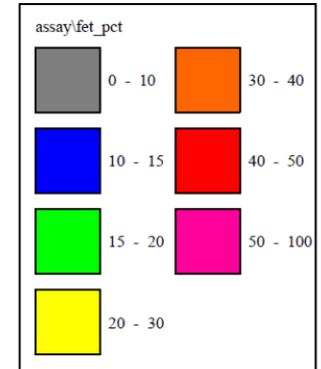
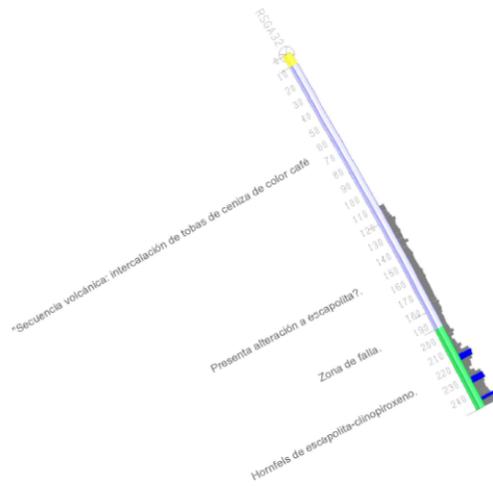




Gemcom Software

RSGA31
SECCION SG-06
SONDAJE AIRE REVERSO

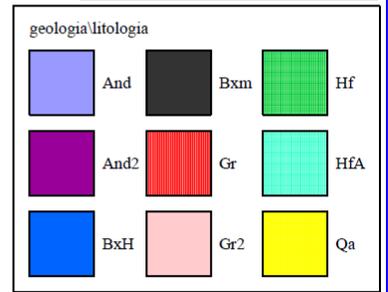
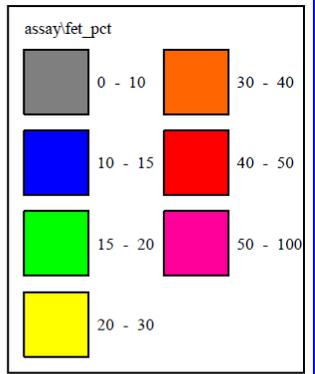
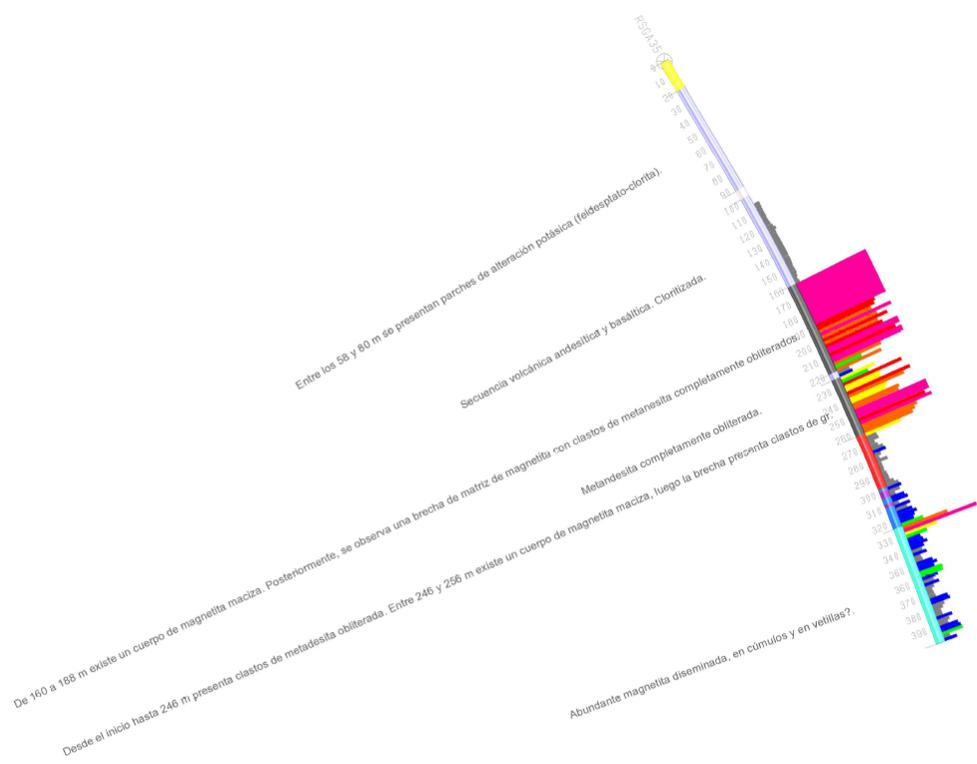
Scale: 1:	4000	Plan No.	Date: 15-Sep-13
-----------	------	----------	-----------------



Gemcom Software

RSGA32
SECCION SG-07
SONDAJE AIRE REVERSO

Scale: 1:	4000	Plan No.	Date: 14-Sep-13
-----------	------	----------	-----------------



Gemcom Software

RSGA35
SECCION SG-06a
SONDAJE AIRE REVERSO

Scale: 1: 4000	Plan No.	Date: 14-Sep-13
----------------	----------	-----------------

Sección SG06

RSGA01

Este sondaje es oblicuo a las secciones; intersecta primero a la sección SG06 (0 – 268 m) y luego a la sección SG – 06a (268 – 408 m). Presenta 2 metros de cobertura (aluvios). Las rocas corresponden a una secuencia de andesitas porfíricas de color negro verdusco con alteración clorítica. Esta secuencia se encuentra cortada por dos tipos de diques, que también son observados en otros sondajes, y se describen de la siguiente manera:

- i) Diques Aplíticos: Roca holocristalina de color rosado, de textura sacaroidal. Se componen principalmente por feldespatos potásicos, cuarzo y menor biotita, esta última fuertemente cloritizada. La magnetita es escasa.
- ii) Diques Dioríticos: Roca gris de textura porfírica; fenocristales de plagioclasa. Se observa diseminación de magnetita.

A partir del metraje 188 se observa un cambio en la textura y en la mineralogía de la secuencia: comienza una leve argilización junto con diseminación fina de clinopiroxeno y mineralización diseminada de magnetita, las texturas porfíricas desaparecen gradualmente y comienzan a ser obliteradas. Desde el metro 240 hasta 320 existe un fuerte aumento del grado metamórfico, evidenciado por rocas córneas granoblásticas de feldespato-clinoproxeno. A los 320 m intersecta una brecha de magnetita con menor actinolita, en donde los clastos corresponden a la litología anterior. Esta litología continúa hasta el fin de pozo (408 m).

RSGA27

El techo de roca se encuentra a los 8 m. Estas rocas corresponden a una secuencia volcánica compuesta principalmente de basaltos porfíricos. Ambas litologías presentan un color negro verdusco y una leve alteración de los máficos a clorita. Se encuentran intruídas por diques de composición aplítica y diorítica. Entre los 178 y 190 m ocurre un cuerpo de magnetita maciza (~ 95% magnetita) con escasos clastos de meta-basaltos completamente obliterados. Desde el metro 190 hasta el 242 existe una brecha de matriz de magnetita con clastos de metabasaltos. La litología siguiente corresponde a una roca

córnea granoblástica de escapolita-clinopiroxeno y mineralización de magnetita diseminada y en cúmulos. A partir de los 256 m se observa una brecha polimíctica de matriz de magnetita; los clastos corresponden a meta-basalto, diorita y rocas córneas. Dentro de la unidad anterior se presentan tramos (cuerpos lenticulares) de magnetita maciza (< 10 m). La proporción de clastos de diorita aumenta gradualmente en profundidad hasta el metro 332, donde se encuentra el contacto con la diorita. Esta litología continúa hasta el fin de pozo (400 m).

RSGA05

Este sondaje es oblicuo a las secciones; intersecta primero a la sección SG06 (0 – 226 m) y luego a la sección SG06a (226 – 264 m). Al igual que el sondaje RSGA27, este comienza con una fina cobertura de sedimentos no consolidados y luego atraviesa una secuencia volcánica cloritizada, compuesta principalmente de flujos basálticos (- 140 m de potencia), cortada por diques aplíticos y dioríticos. Entre los 144 y 192 m se distingue un cuerpo de magnetita maciza, sobreyaciendo a una brecha de magnetita con clastos de meta-basaltos. A los 212 m existe una roca córnea de escapolita-clinopiroxeno con mineralización de magnetita diseminada y en vetillas, además de vetillas magnetita-actinolita con menor plagioclasa. Esta unidad presenta una fuerte brechización de matriz de magnetita a partir del metro 238. Desde el metro 252 hasta el final del pozo (264 m) se halla una anfibolita (principalmente actinolita).

RSGA22

Comienza con una fina cobertura de aluvios de 2 metros, bajo la cual se encuentra el techo de roca que corresponde a una secuencia volcánica andesítica cloritizada (también se observan basaltos, sin embargo, son escasos). En el metro 152 existe un contacto brusco con un cuerpo de magnetita maciza, el cual a su vez, se encuentra en contacto a los 194 m con una brecha con matriz de magnetita con clastos de meta-basaltos y de dioritas. En el tramo 250 a 270 m existe la presencia de un intrusivo porfírico diorítico, con presencia de minerales secundarios, en general clinopiroxeno y epidota. A partir del metro 270, se distingue una intercalación de rocas córneas de clinopiroxeno-feldespato con rocas córneas de actinolita-plagioclasa, ambos de textura granoblástica, intruídos por una serie de diques negros de composición andesítica. El contacto siguiente se halla a

los 352 m, donde aparecen rocas córneas de actinolita-plagioclasa, presentando mineralización diseminada y en vetillas de magnetita junto con actinolita. La litología anterior persiste hasta el final el pozo (456 m).

RSGA31

Inicia con una gruesa cobertura aluvial, de 40 m de potencia, seguida de una secuencia volcánica, principalmente compuesta de lavas basaltos porfíricos, con alteración clorítica. A partir de los 224 m hasta el término del sondaje (300 m) se encuentran rocas córneas granoblásticas de actinolita-plagioclasa, con presencia de otros minerales secundarios como epidota, clorita y calcita. En la litología anterior se encuentran zonas con importante mineralización de magnetita diseminada.

Sección SG06A

RSGA35

El techo de roca se ubica a los 20 m. Estas rocas corresponden a una secuencia de basaltos porfíricos, los cuales en algunos sectores presentan vetillas de feldespato potásico y una cloritización asociada. Esta secuencia es intruída por dique aplítico. A partir de los 100 m, se observa una alteración de la matriz de las rocas volcánicas, posiblemente a escapolita. En el tramo 160-214 se ubica un cuerpo de magnetita maciza, que en ocasiones presenta clastos de la litología sobreyacente, sin embargo, son bastante escasos. Más abajo se distingue una brecha con matriz de magnetita y clastos de meta-basaltos (a partir del metro 256, los clastos corresponden a diorita); esta litología presenta lentes de magnetita maciza. El contacto siguiente se encuentra a los 264 m, donde se ubica un intrusivo diorítico, el cual presenta escasas vetillas de magnetita. A los 294 m hasta los 320 aparece una brecha de matriz de feldespato-clinopiroxeno con magnetita (diseminada y en cúmulos) y menor epidota. Esta litología se encuentra intruída por diques andesíticos. La última litología reconocida en este sondaje son rocas córneas de plagioclasa-actinolita con magnetita diseminada y en cúmulos.

Sección SG07

DSGA11

Corresponde al único sondaje de diamantina presente en las tres secciones estudiadas. Presenta 5 metros de cobertura aluvial, dando paso a una secuencia volcánica que exhibe una intercalación de basaltos porfíricos y tobas de ceniza, estas últimas en menor proporción. Además, se observan intrusiones de diversos diques de composición aplítica, diorítica y diorítica. Esta secuencia anterior exhibe una moderada cloritización de los minerales máficos presentes, además de vetillas rellenas con clorita y menor magnetita con halos de sericita. Es posible distinguir un leve aumento del grado metamórfico en estas rocas, el cual es progresivamente mayor en profundidad, evidenciado por un aumento en la presencia y tamaño de los siguientes minerales metamórficos: escapolita, clinopiroxeno y epidota. Incluso cercano al próximo contacto se presentan rocas completamente escapolitizadas. A partir del metro 200 se encuentra el contacto, donde se observa la aparición de rocas córneas granoblásticas de escapolita-clinopiroxeno con mineralización de magnetita diseminada y en cúmulos y menor magnetita en vetillas junto con clinopiroxeno. A mayor profundidad la escapolita no ocurre y se observa feldespato anhedral junto con clinopiroxeno. A los 298 m, existe una brecha matriz soportada con clastos subredondeados de basaltos porfíricos y matriz compuesta de un agregado mineral de grano muy fino de feldespato, clinopiroxeno, epidota y magnetita. Además, se observan vetillas irregulares, sinuosas y discontinuas de magnetita-actinolita, las cuales en profundidad son más abundantes. Luego, se presenta una brecha de matriz de magnetita-actinolita junto con una intensa actinolitización de los clastos. Esta brechización ocurre en dos intervalos, de 366 a 448 m y de 466 a 484 m, en este último es posible distinguir clastos de un intrusivo diorítico porfírico, pertenecientes a la litología siguiente en aparecer, la cual desde el metro 450 hasta el final de pozo (519 m) presenta un stockwork de vetillas sinuosas, irregulares y discontinuas de plagioclasa-clinopiroxeno con menor actinolita.

RSGA 16

Comienza con una cobertura aluvial, presente hasta los 16 m. La subyace una secuencia volcánica compuesta por basaltos en su mayoría porfíricos y algunos afaníticos, las que presentan cloritización de los máficos, y en algunos casos se observa epidota. Esta

secuencia se encuentra intruída por diques de composición diorítica y aplítica. En el metro 92 se identifica un cambio en la alteración: la matriz se encuentra alterada a escapolita, además de una leve cloritización y epidotización. Posteriormente, en el intervalo 134 a 178 m se identifica un cuerpo de magnetita maciza, acompañado de menor clinopiroxeno, con escasos clastos obliterados de la litología anterior. Este cuerpo sobreyace a una brecha de matriz de magnetita con clastos dioríticos microporfíricos. A partir de los 242 m hasta los 256 nuevamente aparece una meta-basalto porfírico, en contacto con una brecha con matriz de feldespato-clinopiroxeno con clastos completamente obliterados aparentemente de rocas córneas de escapolita-clinopiroxeno. En el intervalo siguiente, de 286 a 422 m, se aprecia una rebrechización de magnetita-actinolita de la litología anterior. A continuación, de los 422 m hasta los 460 m, se observa una brechización de la misma naturaleza, sin embargo, los clastos corresponden a un intrusivo diorítico porfírico con moderada albitización.

RSGA 23

Los primeros 12 metros se componen de sedimentos aluviales no consolidados. Bajo estos se ubica una secuencia volcánica formada principalmente por basaltos porfíricos cloritizados, intruídas por diques dioríticos y aplíticos. Desde los 104 a los 192 m se identifica escapolitización de la masas fundamental. A partir de los 192 m se observan rocas córneas con textura granoblástica compuestas de plagioclasa, clinopiroxeno, actinolita y magnetita. Posteriormente, desde los 224 a los 306 m se presenta un intrusivo diorítico porfírico moderadamente albitizado. En el contacto inferior es posible distinguir hornfels granoblásticos de plagioclasa-actinolita con mineralización de magnetita diseminada y en cúmulos.

RSGA 32

Inicia con 8 m de aluvios no consolidados, subyacidos por una secuencia volcánica, en su mayoría compuesta por andesitas porfíricas y menores tobas de ceniza, con diversos grados de cloritización, y en algunos casos, con epidotización. Desde los 194 m hasta el final de pozo (250 m) se distinguen rocas córneas de plagioclasa-actinolita con mineralización de magnetita diseminada.

ANEXO B

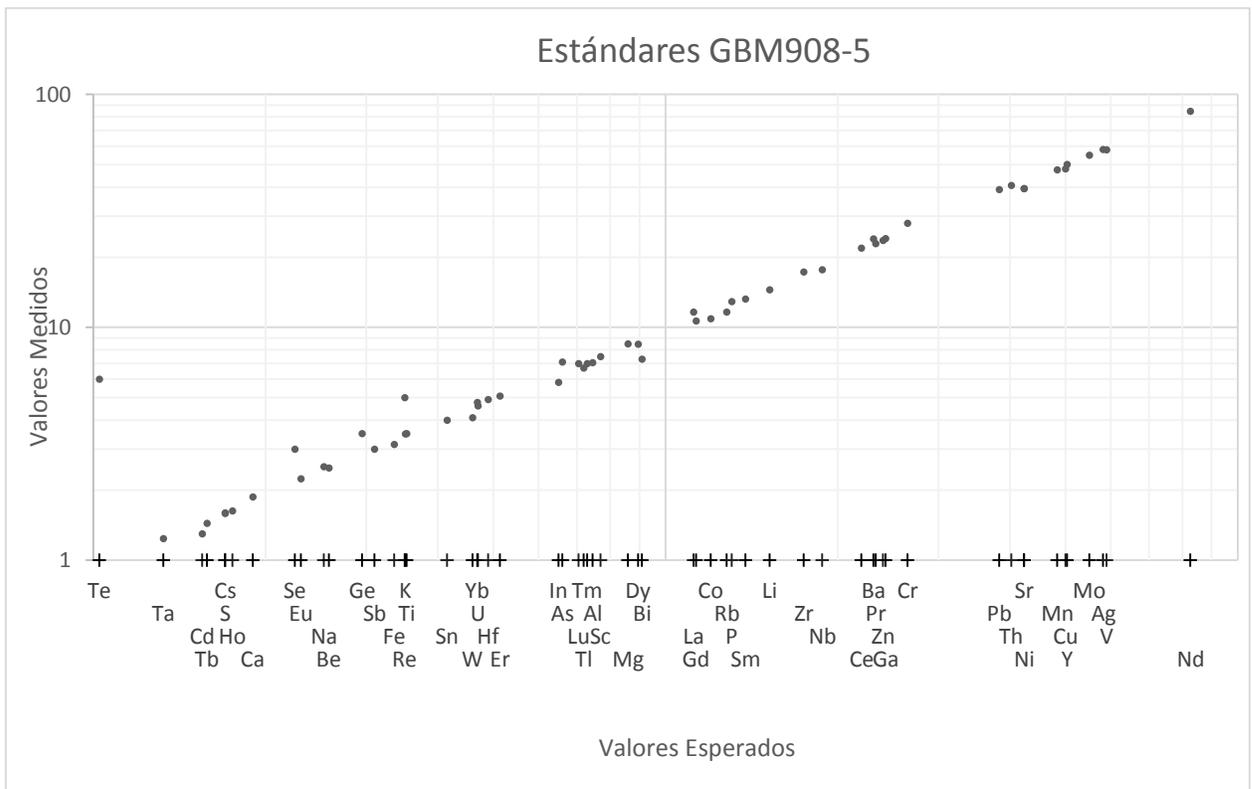
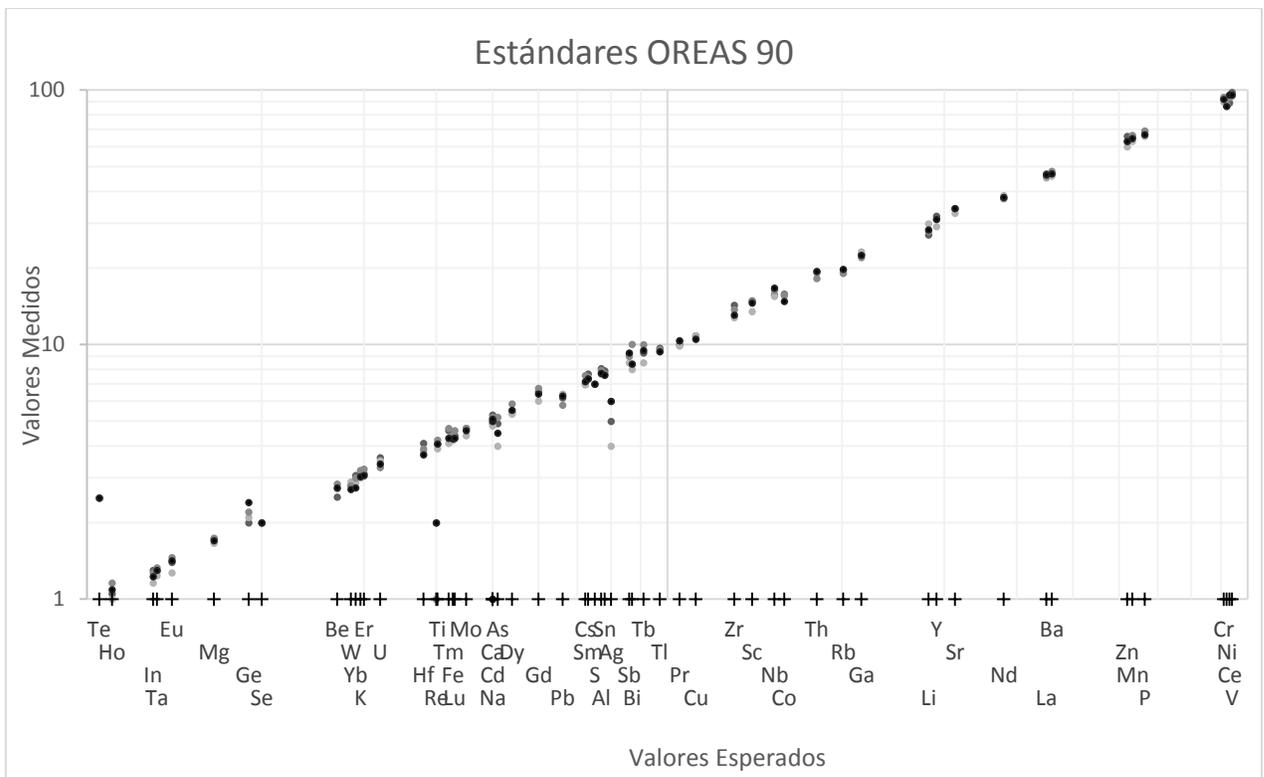
Descripciones de secciones pulidas y transparentes.

Este anexo se encuentra de forma digital.

ANEXO C

Gráficos de Control de calidad y Certificados de análisis geoquímicos.

Los certificados se encuentran de forma digital.



ANEXO D

Gráficos de probabilidad lognormal e histogramas.

A continuación se presentan los gráficos de probabilidad lognormal (confeccionados en GSLIB) junto a los histogramas para cada variable de la base de datos. La leyenda para los histogramas se presenta en la figura siguiente.

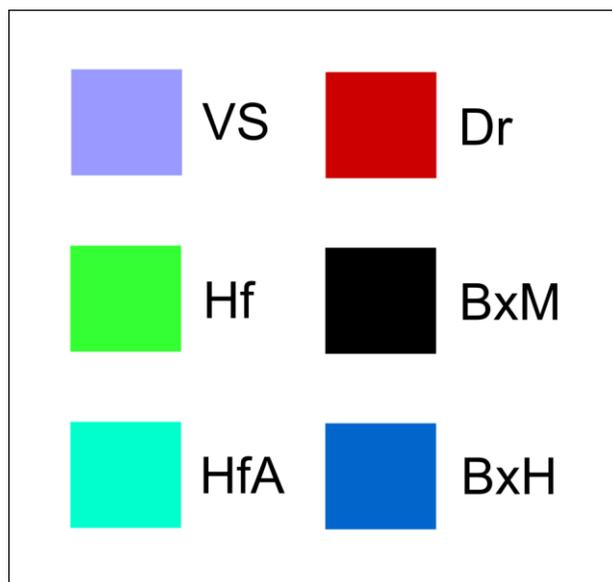
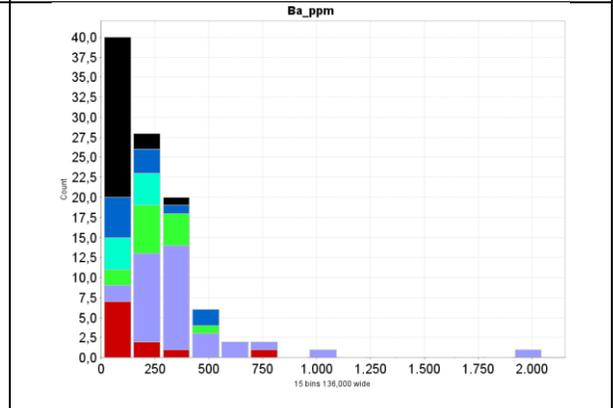
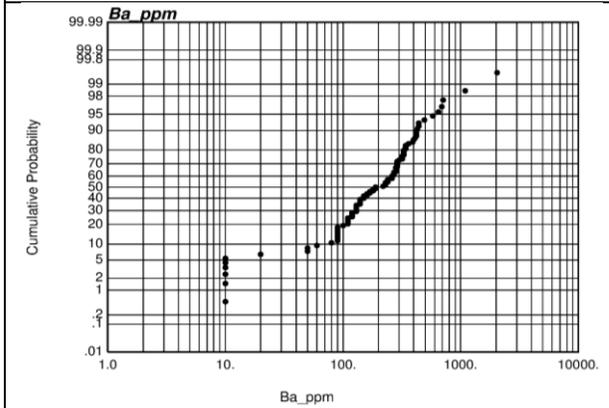
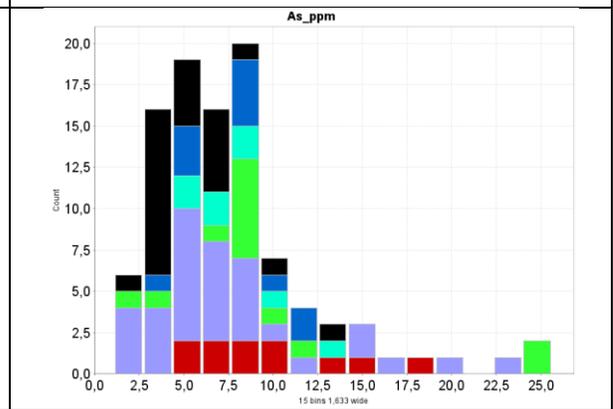
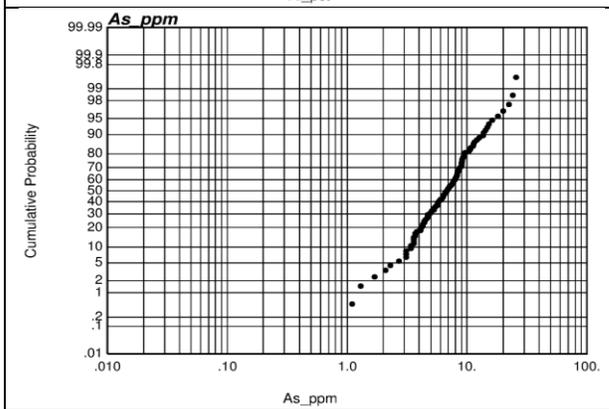
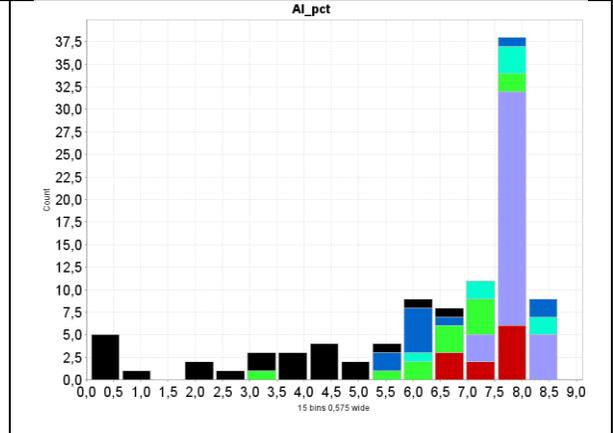
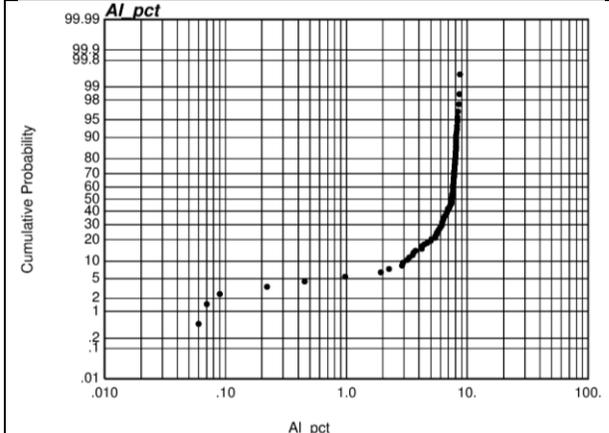
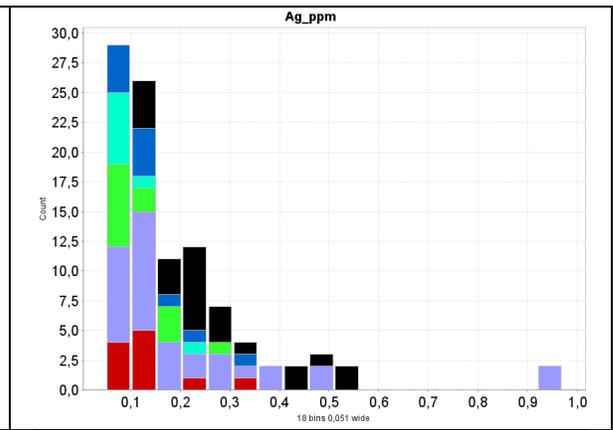
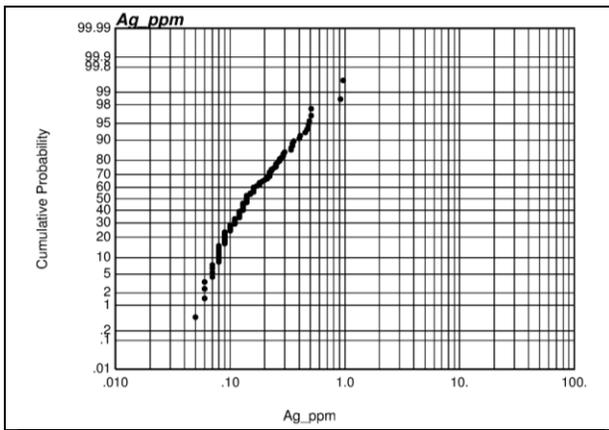
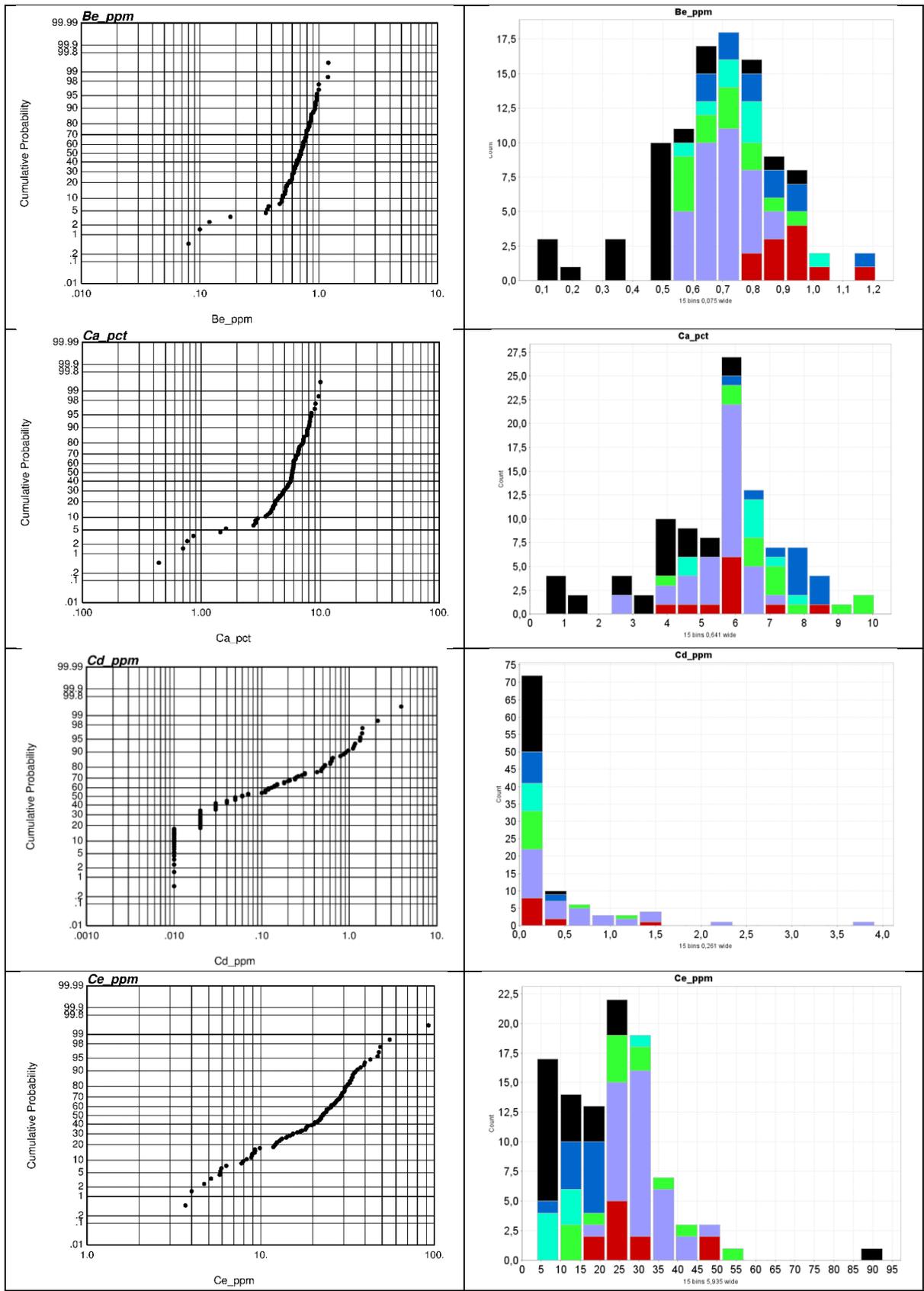
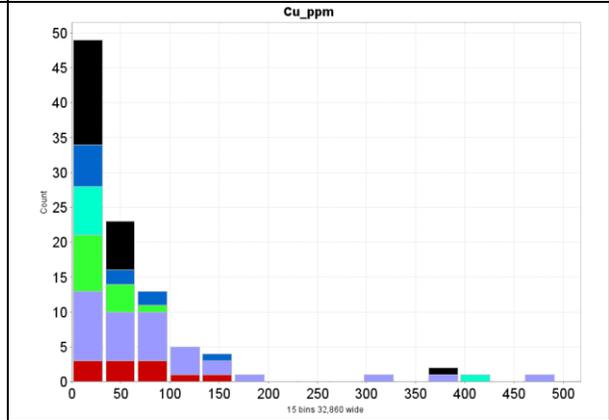
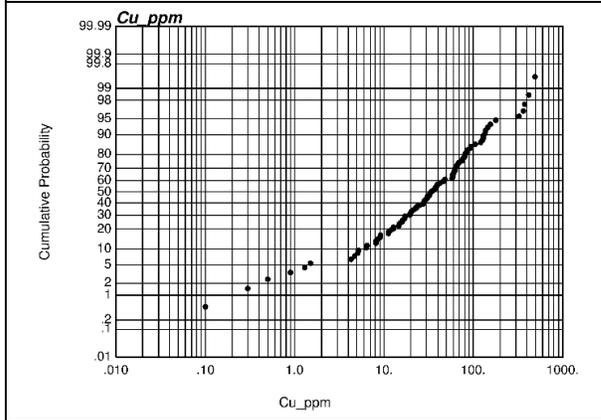
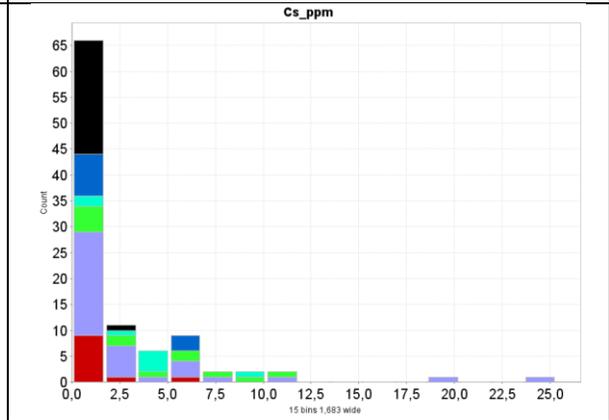
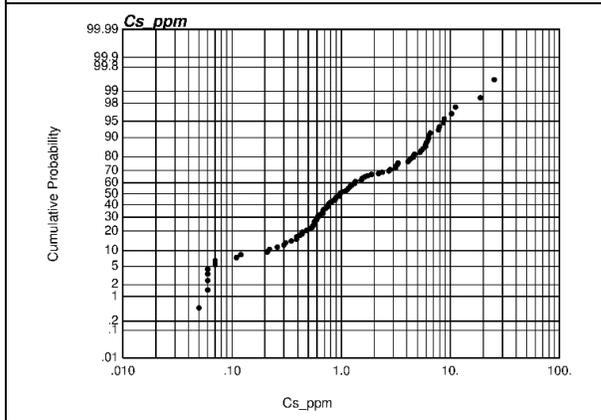
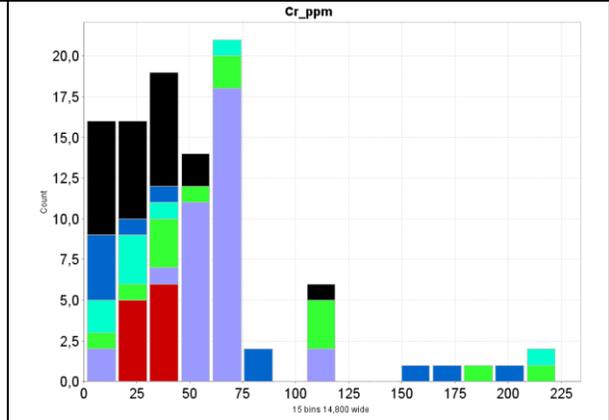
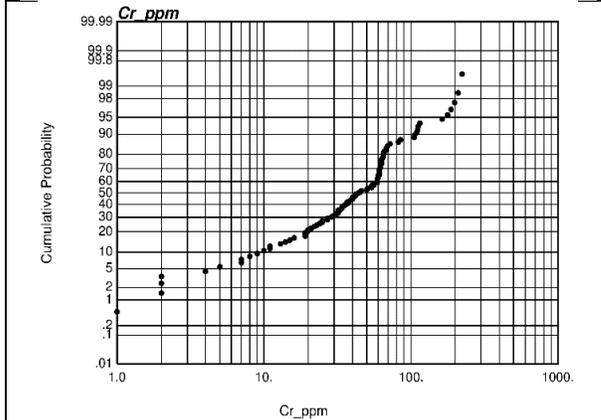
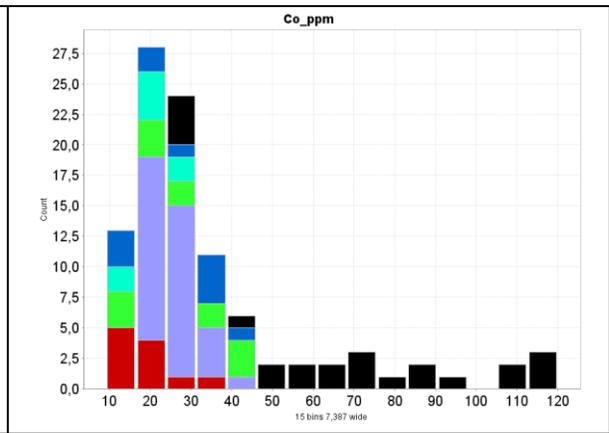
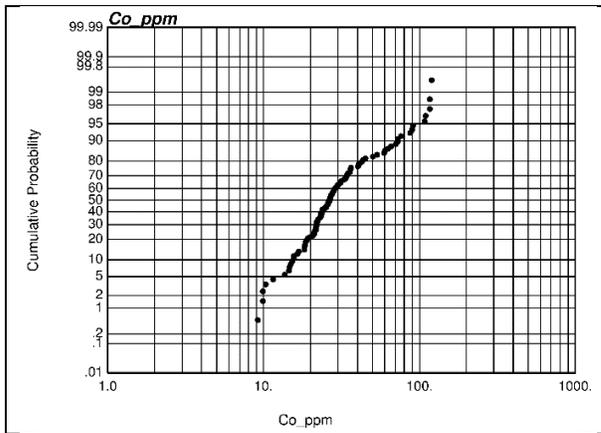
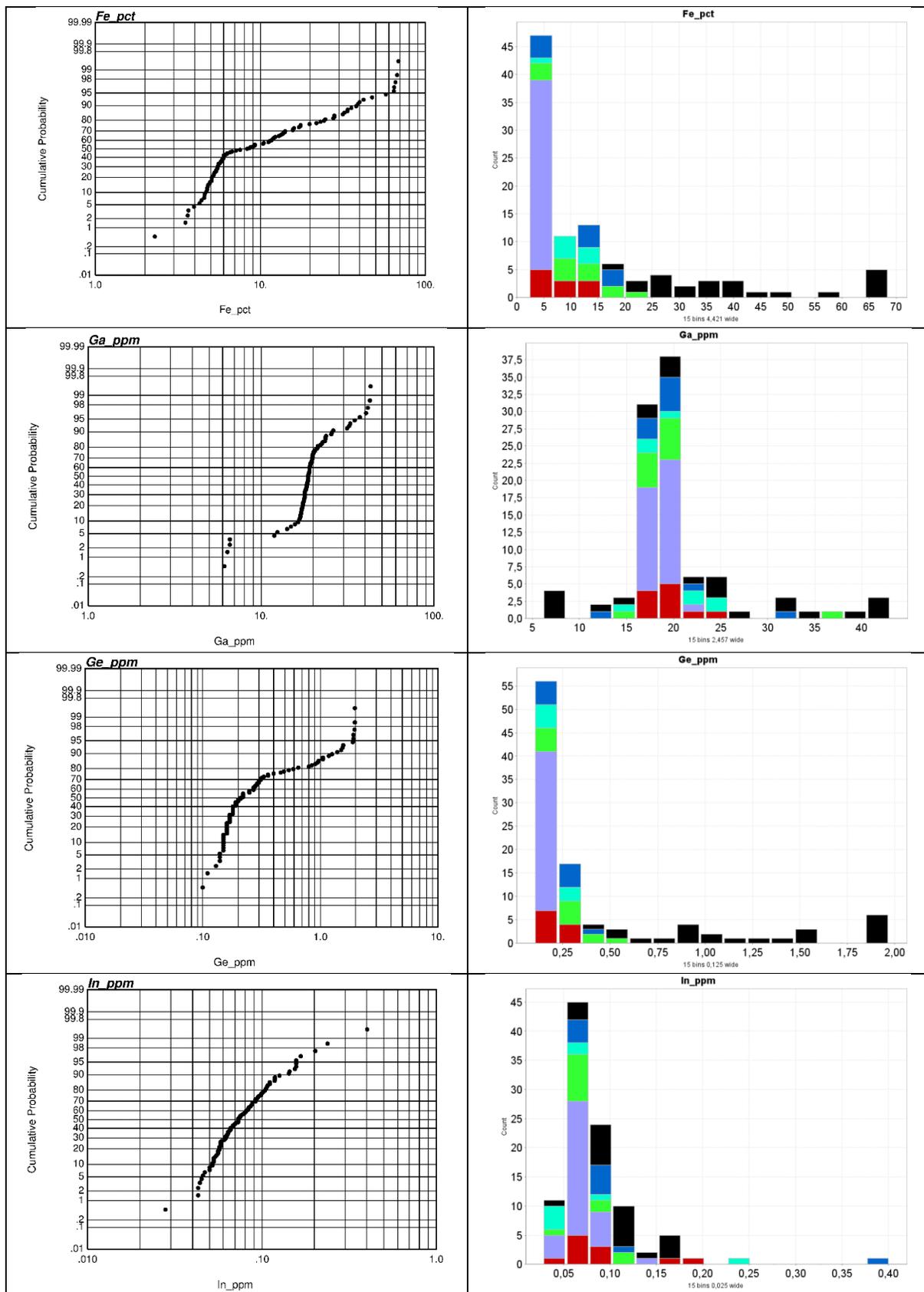


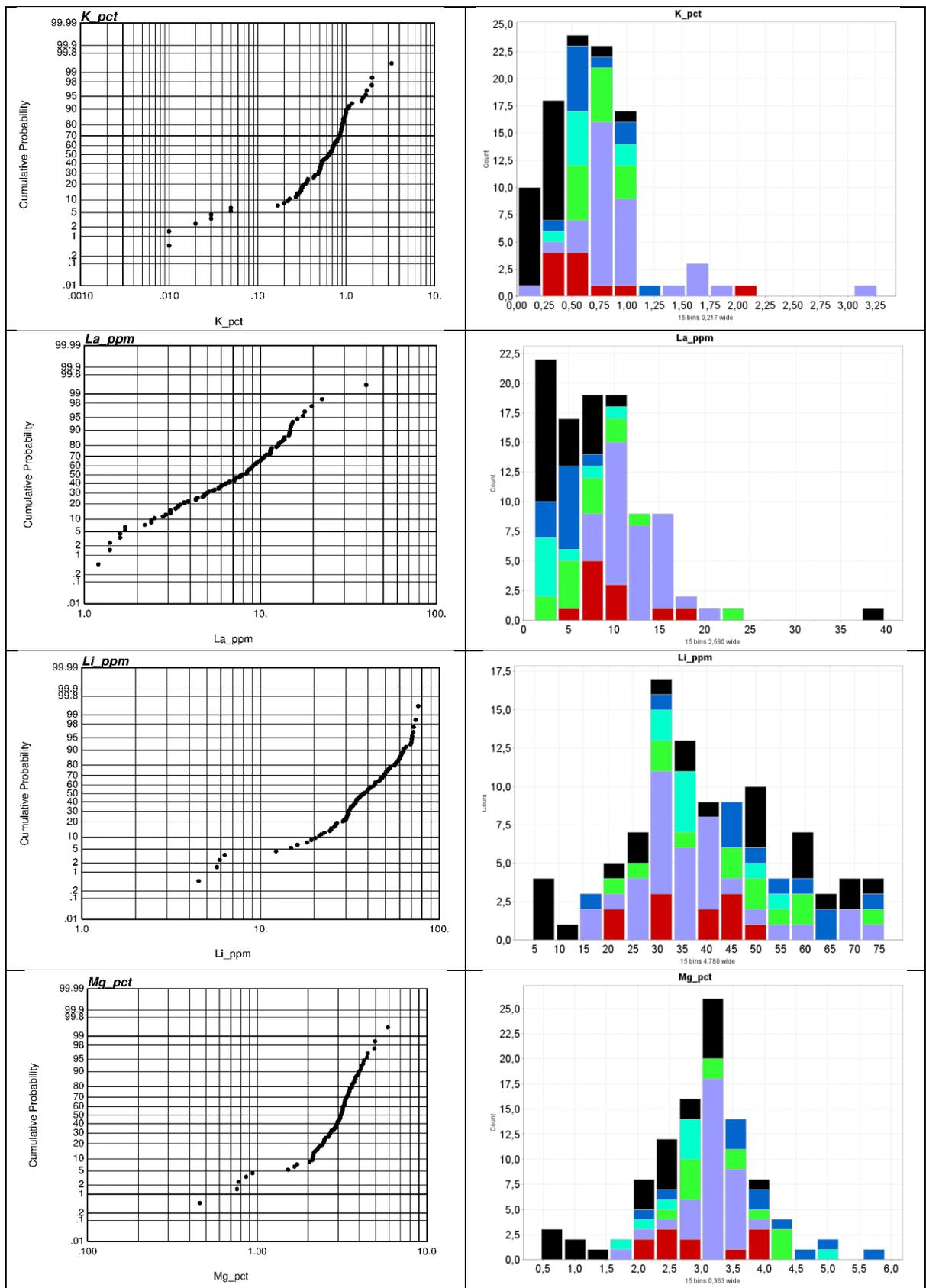
Figura A. Leyenda de los histogramas.

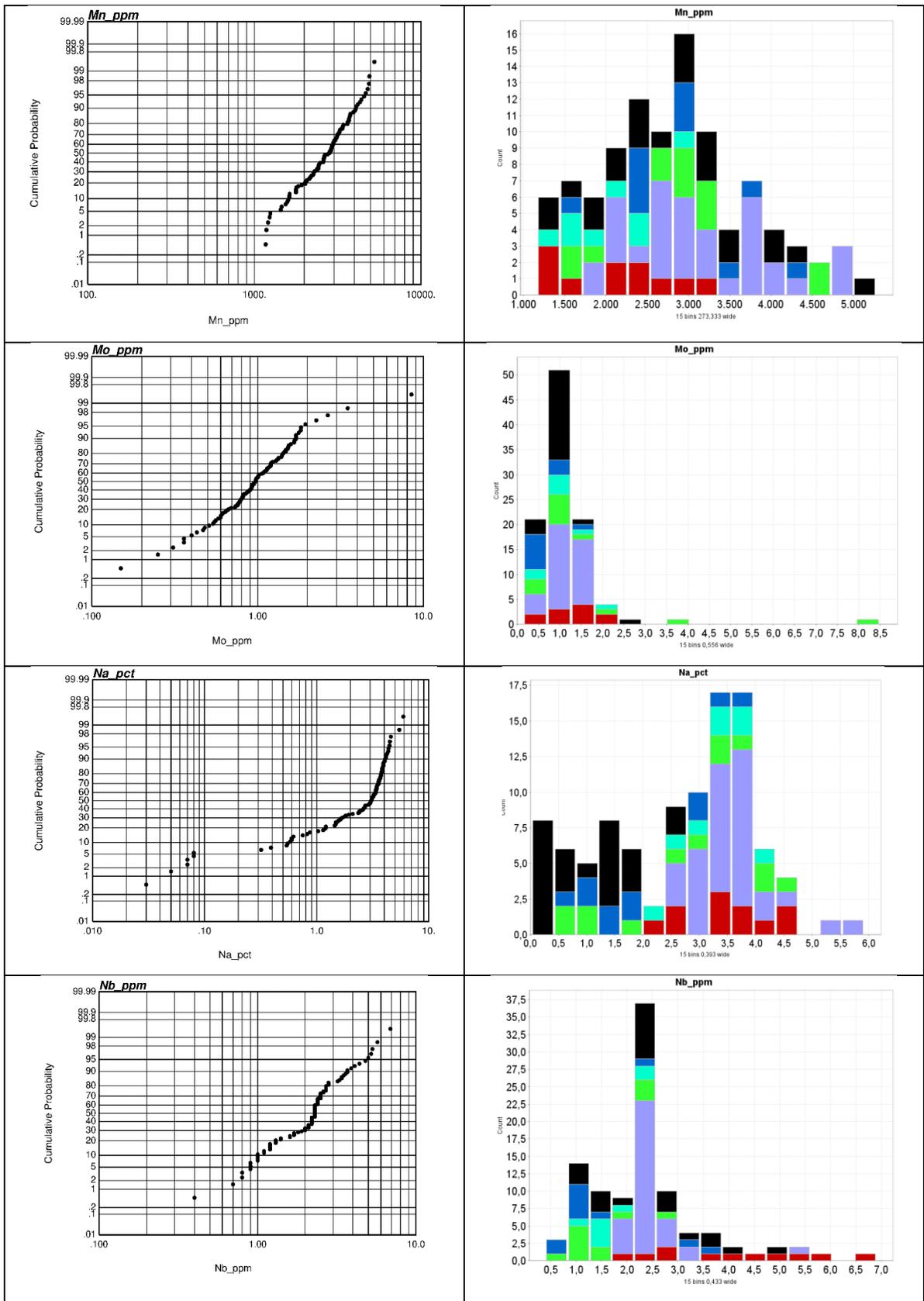


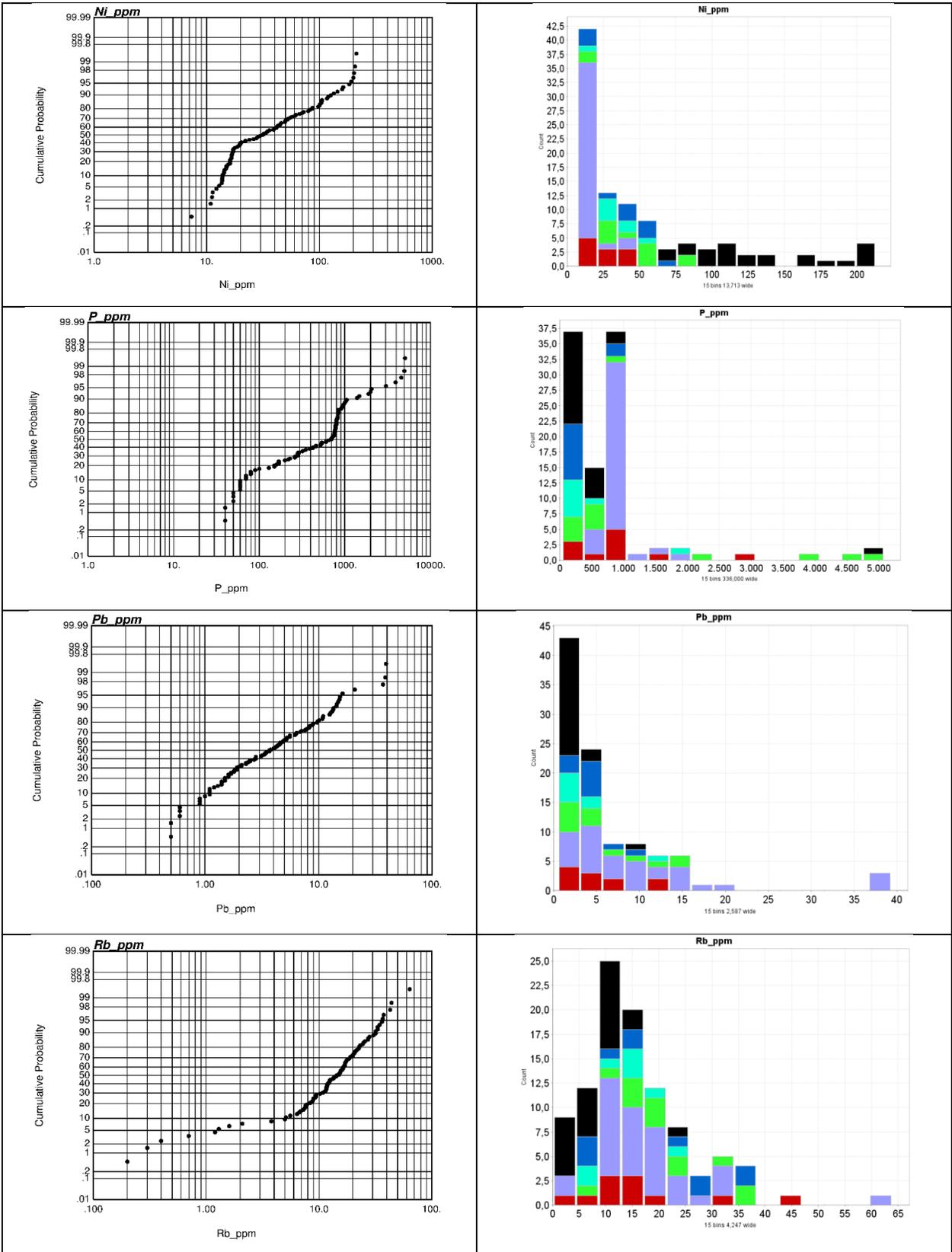


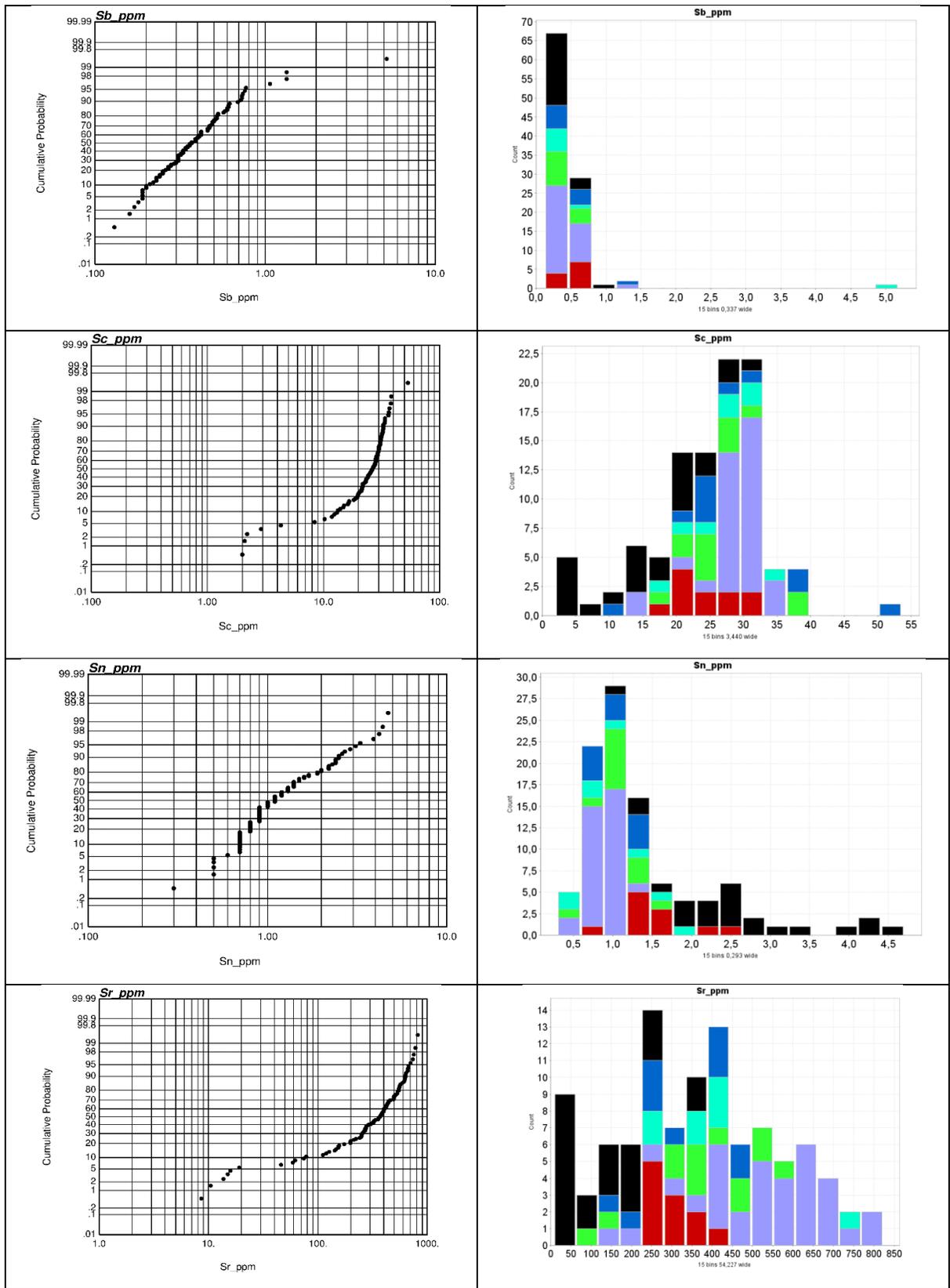


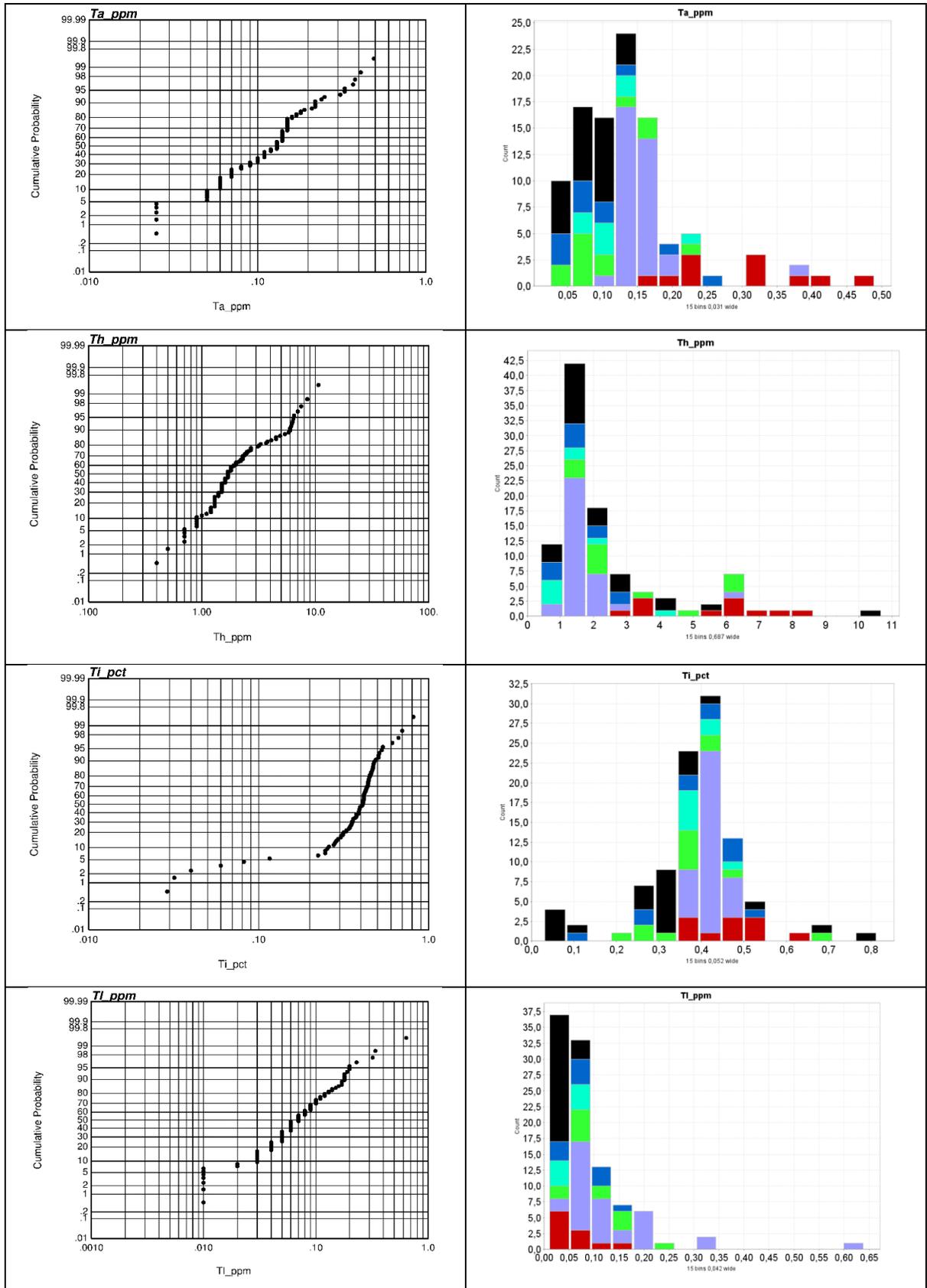


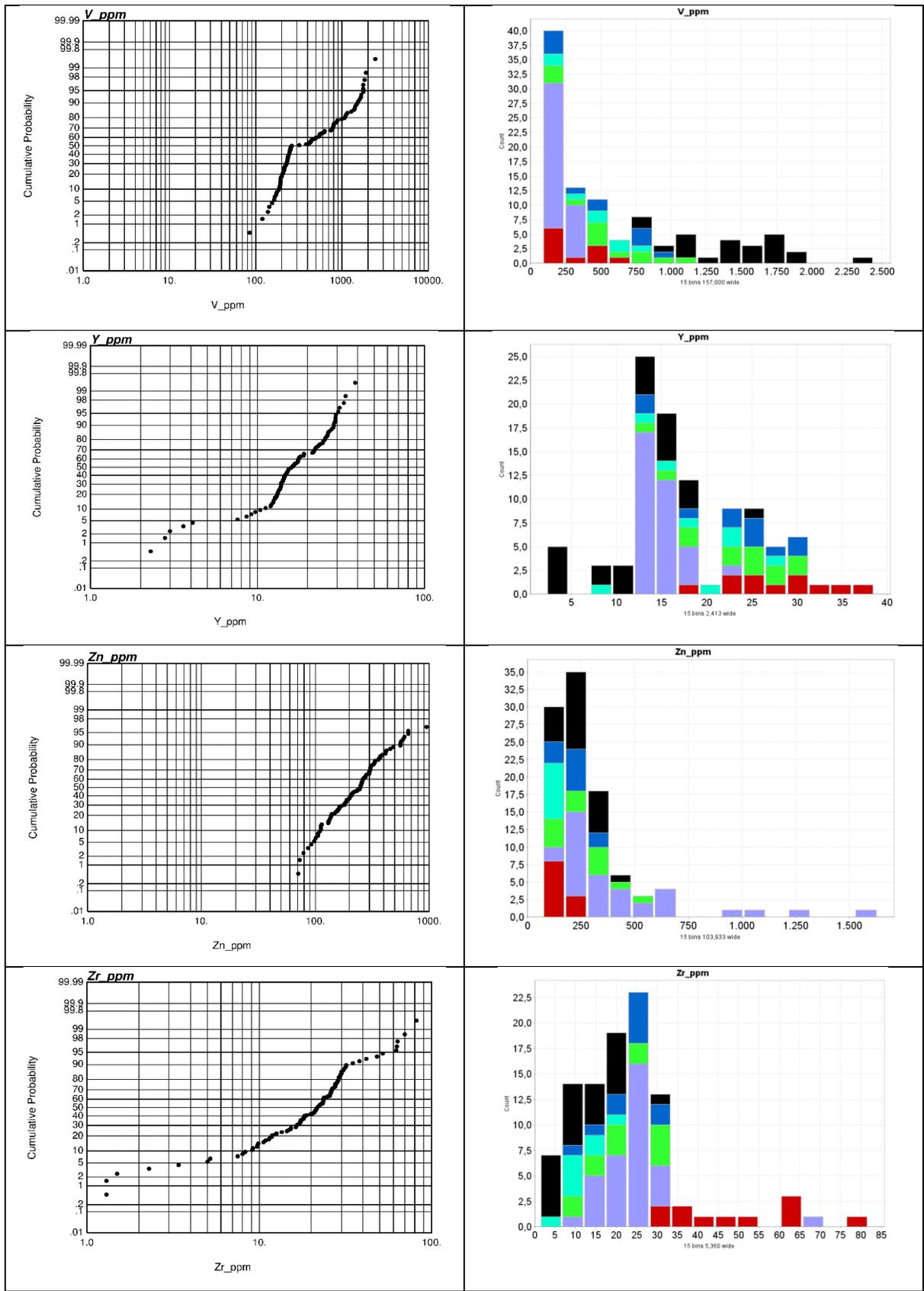


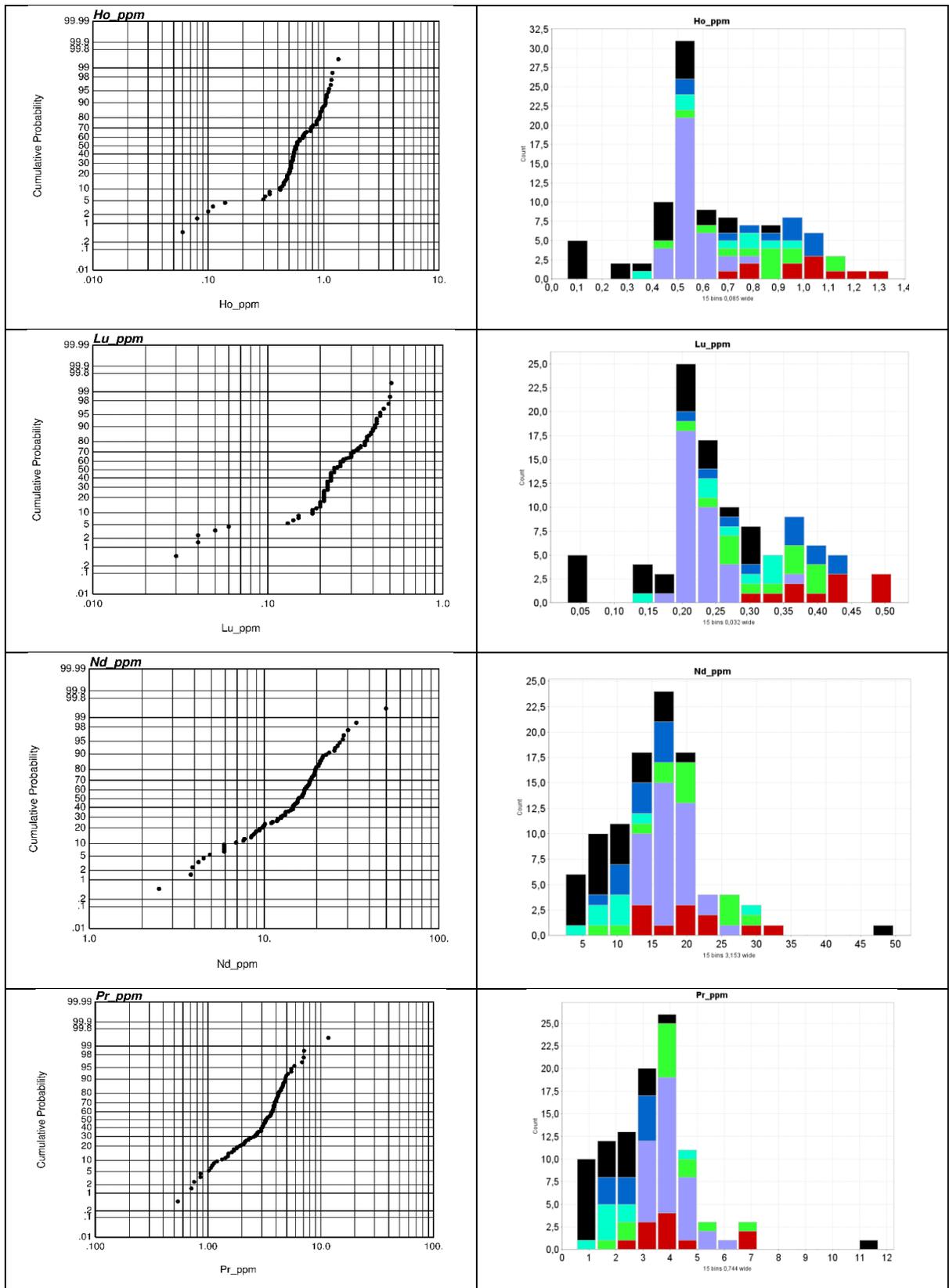


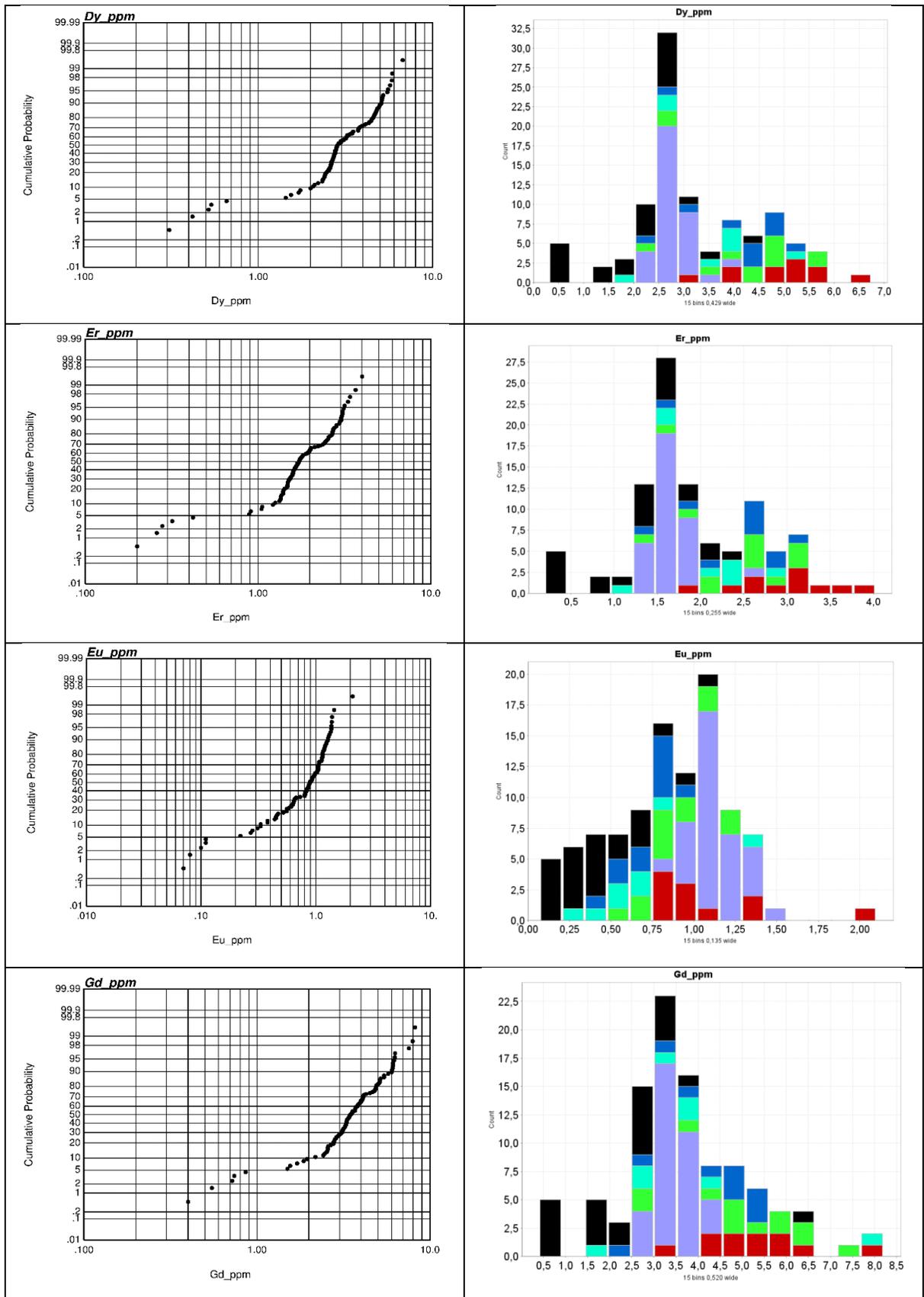












ANEXO E

Estadísticas univariadas por unidad geológica.

UG	Estadígrafos	Fe %	Ga ppm	Ge ppm	In ppm	K %	La ppm	Li ppm	Mg %	Mn ppm	Mo ppm	Na %	Nb ppm
Dr	No. Muestras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	Valores únicos	11	10	10	11	11	11	10	10	11	11	11	11
	Mínimo	2.3	17.45	0.1	0.044	0.35	5.8	19.2	2.14	1170	0.31	2.36	2.1
	Máximo	12.95	23.6	0.31	0.202	1.97	17.5	51.3	4.09	3160	1.83	4.59	6.9
	Media	7.26	19.40	0.21	0.09	0.67	9.78	35.59	2.97	2090.00	1.30	3.57	4.08
	Mediana	6.74	19.05	0.22	0.074	0.52	8.7	38.1	2.92	2260	1.41	3.56	4.1
	Desviación estándar	3.76	1.99	0.07	0.05	0.48	3.55	10.52	0.69	692.43	0.53	0.77	1.53
Vs	No. Muestras	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
	Valores únicos	34	28	9	26	30	29	33	26	33	32	33	13
	Mínimo	4.29	16.9	0.14	0.045	0.03	7.7	14.8	1.66	1790	0.36	2.51	1.9
	Máximo	6.56	21.3	0.22	0.144	3.27	19.6	74	3.86	4900	1.67	5.92	5.3
	Media	5.33	18.64	0.17	0.07	0.96	12.26	37.80	3.16	3158.82	1.09	3.59	2.46
	Mediana	5.325	18.575	0.17	0.0635	0.85	11.95	34.45	3.2	3050	0.97	3.54	2.3
	Desviación estándar	0.57	1.06	0.02	0.02	0.56	2.87	14.32	0.42	848.12	0.36	0.70	0.58
Hf	No. Muestras	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
	Valores únicos	13	11	12	13	13	13	13	13	13	13	13	10
	Mínimo	3.97	15.7	0.11	0.05	0.5	2.8	21.3	2.35	1460	0.43	0.54	0.8
	Máximo	24.3	37.3	0.54	0.119	0.99	22.4	72	4.44	4670	8.49	4.47	2.6
	Media	11.39	19.72	0.27	0.07	0.73	8.46	44.93	3.40	2916.92	1.78	2.60	1.59
	Mediana	9.29	18.75	0.25	0.066	0.71	7.1	46.8	3.28	2900	1.01	3.08	1.6
	Desviación estándar	5.73	5.42	0.12	0.02	0.16	5.14	15.31	0.67	966.45	2.17	1.42	0.65
HfA	No. Muestras	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	Valores únicos	8	8	8	8	8	7	8	8	8	8	8	7
	Mínimo	4.77	14.85	0.15	0.028	0.44	1.6	30.5	1.72	1440	0.25	2.1	1
	Máximo	14.15	23.5	0.3	0.238	0.9	9.8	53.4	4.92	2970	1.94	4.03	2.4
	Media	10.37	19.88	0.22	0.08	0.60	4.39	38.10	2.79	2038.75	1.03	3.23	1.68
	Mediana	10.45	20.2	0.21	0.0525	0.52	3.25	34.9	2.72	1970	0.915	3.345	1.55
	Desviación estándar	3.41	3.31	0.05	0.07	0.18	2.61	8.66	0.95	533.62	0.57	0.63	0.51
BxH	No. Muestras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	Valores únicos	11	11	10	9	10	10	11	11	11	10	11	10
	Mínimo	3.63	11.95	0.15	0.064	0.28	3.1	18.2	2.12	1600	0.15	0.58	0.4
	Máximo	17.15	31.5	0.36	0.401	1.17	8.8	76.2	5.91	4190	1.48	3.73	3.6
	Media	10.75	19.36	0.24	0.11	0.66	4.80	49.82	3.83	2827.27	0.67	2.01	1.58
	Mediana	11.8	18.75	0.27	0.084	0.54	4.7	49	3.75	2840	0.6	1.7	1.2
	Desviación estándar	4.72	4.72	0.07	0.10	0.27	1.54	16.30	1.08	717.16	0.35	1.05	1.07
BxM	No. Muestras	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
	Valores únicos	23	23	20	20	19	20	23	23	22	21	20	17
	Mínimo	19.85	6.14	0.46	0.043	0.01	1.2	4.5	0.46	1180	0.55	0.03	1
	Máximo	68.62	43	1.97	0.167	0.91	39.9	71.6	3.96	5270	2.65	2.7	4.8
	Media	40.71	23.32	1.25	0.11	0.29	5.73	39.07	2.30	2799.57	1.03	0.98	2.44
	Mediana	35.6	22.1	1.18	0.105	0.3	3.4	39.6	2.53	2880	0.98	0.87	2.4
	Desviación estándar	16.14	11.97	0.52	0.03	0.23	7.90	22.46	0.97	1026.04	0.41	0.81	0.95

UG	Estadígrafos	Ni ppm	P ppm	Pb ppm	Rb ppm	Sb ppm	Sc ppm	Sn ppm	Sr ppm	Ta ppm	Th ppm	Ti %	V ppm
Dr	No. Muestras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	Valores únicos	11	11	11	11	10	10	9	9	9	11	11	11
	Mínimo	7.3	80	0.9	3.8	0.31	16.7	0.7	250	0.17	3.1	0.345	85
	Máximo	45.6	3040	12.7	44	0.76	32.8	2.4	428	0.49	8.5	0.611	633
	Media	25.47	895.45	5.15	17.00	0.51	24.62	1.52	311.18	0.30	5.56	0.46	317.91
	Mediana	22	730	3.7	13.3	0.5	23.4	1.4	314	0.31	6	0.452	234
	Desviación estándar	13.11	811.76	3.92	11.72	0.16	5.08	0.49	57.77	0.10	1.85	0.08	188.82
VS	No. Muestras	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
	Valores únicos	28	18	34	32	23	29	8	33	10	14	28	32
	Mínimo	12.2	600	0.6	0.2	0.19	13.1	0.3	156.5	0.11	0.7	0.354	155
	Máximo	39.7	1900	39.3	63.9	1.34	34	1.3	822	0.37	6.2	0.488	262
	Media	17.91	841.18	10.49	18.49	0.42	28.80	0.85	533.43	0.15	1.74	0.42	221.21
	Mediana	16.6	795	7.35	17	0.375	29.9	0.9	552	0.14	1.6	0.417	227
	Desviación estándar	6.02	226.57	10.04	11.03	0.21	4.83	0.18	155.40	0.04	0.86	0.03	26.73
Hf	No. Muestras	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
	Valores únicos	13	13	13	13	13	13	8	13	10	10	12	13
	Mínimo	11.1	40	1.1	7.6	0.17	18.2	0.5	111	0.05	1.3	0.224	144
	Máximo	86.8	5080	14.3	37.7	0.73	38.3	1.5	592	0.22	6.4	0.7	1160
	Media	42.98	1493.08	6.23	20.94	0.38	26.78	1.04	382.58	0.10	3.26	0.37	530.46
	Mediana	41.8	650	4.6	17.7	0.32	25.5	1	372	0.08	2.4	0.359	442
	Desviación estándar	23.30	1820.62	5.15	9.05	0.17	5.77	0.30	144.44	0.05	1.93	0.12	309.78
HfA	No. Muestras	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	Valores únicos	8	8	8	8	8	8	7	7	6	7	8	8
	Mínimo	17.7	70	1.1	5.1	0.23	18.8	0.5	241	0.06	0.5	0.355	188
	Máximo	55.2	2010	12.5	23.2	5.18	36.3	2	738	0.22	4.1	0.474	863
	Media	34.26	445.00	3.61	13.85	0.96	27.16	1.03	401.75	0.11	1.51	0.40	461.13
	Mediana	32.8	220	2.45	14.9	0.355	27.2	0.85	393	0.11	1.15	0.393	518
	Desviación estándar	11.01	651.90	3.69	6.33	1.71	6.09	0.54	150.75	0.05	1.15	0.04	231.73
BxH	No. Muestras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	Valores únicos	11	8	11	11	10	11	6	11	8	9	11	11
	Mínimo	10.8	40	1.5	6.9	0.3	11.8	0.7	142.5	0.025	0.4	0.082	120
	Máximo	66.3	970	9.8	36.8	1.34	53.6	1.4	495	0.25	2.5	0.539	874
	Media	39.00	244.55	4.40	19.32	0.52	28.59	1.03	326.73	0.10	1.46	0.37	466.73
	Mediana	44.7	80	3.5	14.2	0.42	25.7	0.9	292	0.07	1.3	0.403	430
	Desviación estándar	19.91	316.71	2.42	11.23	0.29	11.12	0.28	119.22	0.07	0.75	0.13	279.54
BxM	No. Muestras	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
	Valores únicos	23	22	17	22	19	23	18	22	11	14	21	21
	Mínimo	70.2	50	0.5	0.3	0.13	2	1.1	8.6	0.025	0.9	0.029	802
	Máximo	213	4960	8.4	21.7	1.07	31.3	4.7	381	0.14	10.7	0.814	2440
	Media	133.95	509.13	1.91	7.99	0.34	15.63	2.58	137.67	0.08	2.42	0.31	1448.61
	Mediana	119	260	1.5	8.8	0.25	16.2	2.4	119	0.08	1.5	0.313	1460
	Desviación estándar	46.56	996.99	1.80	5.59	0.22	8.87	0.99	117.29	0.03	2.18	0.19	389.58

UG	Estadígrafos	Zn ppm	Zr ppm	Dy ppm	Er ppm	Eu ppm	Gd ppm	Ho ppm	Lu ppm	Nd ppm	Pr ppm	Sm ppm	Tb ppm
Dr	No. Muestras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	Valores únicos	9	11	11	11	10	11	9	10	11	10	11	9
	Mínimo	73	30.7	3.22	1.95	0.82	3.25	0.67	0.3	13.2	2.61	3.16	0.51
	Máximo	215	81.7	6.74	4.02	2.1	8.2	1.34	0.51	33.7	7.09	7.77	1.12
	Media	146.45	49.80	4.89	3.00	1.10	5.27	1.00	0.41	20.44	4.21	5.21	0.78
	Mediana	158	48.3	5.1	3.06	0.94	5.18	1.04	0.42	19.4	3.75	5.53	0.82
	Desviación estándar	47.48	16.36	1.01	0.58	0.39	1.34	0.20	0.07	6.65	1.50	1.40	0.18
VS	No. Muestras	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
	Valores únicos	34	29	29	26	25	29	16	11	30	31	33	18
	Mínimo	130	9.2	2.34	1.35	0.88	2.77	0.46	0.18	12.8	2.82	2.94	0.4
	Máximo	1630	69.8	4.07	2.5	1.44	4.49	0.8	0.36	25.5	5.8	4.95	0.62
	Media	452.26	24.64	2.80	1.61	1.13	3.45	0.55	0.23	17.74	3.98	3.74	0.47
	Mediana	333	23.65	2.735	1.565	1.13	3.4	0.54	0.22	17.6	3.96	3.68	0.46
	Desviación estándar	336.77	9.33	0.35	0.22	0.14	0.41	0.07	0.03	2.71	0.70	0.46	0.05
Hf	No. Muestras	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
	Valores únicos	13	13	13	13	12	12	12	10	12	13	13	11
	Mínimo	71	11.4	2.33	1.36	0.56	2.57	0.45	0.2	8.7	1.69	2.45	0.37
	Máximo	562	29	5.84	3.13	1.2	7.55	1.11	0.41	28.5	7.04	7.13	0.99
	Media	267.38	22.03	4.18	2.41	0.89	5.00	0.83	0.32	19.32	3.94	4.82	0.70
	Mediana	272	22.4	4.33	2.56	0.88	4.9	0.87	0.34	19.6	3.83	5.15	0.71
	Desviación estándar	139.73	6.43	1.08	0.59	0.20	1.44	0.20	0.07	6.47	1.45	1.44	0.19
HfA	No. Muestras	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	Valores únicos	8	8	8	8	8	8	8	6	8	8	8	8
	Mínimo	79	5	1.71	1.05	0.31	1.56	0.34	0.15	3.9	0.71	1.27	0.25
	Máximo	164	18.8	5.22	2.76	1.32	7.94	0.97	0.33	28.2	4.85	8.24	0.96
	Media	122.13	10.84	3.41	2.03	0.68	3.76	0.68	0.27	11.20	2.07	3.39	0.55
	Mediana	122	9.85	3.565	2.16	0.635	3.58	0.715	0.285	9.45	1.72	2.92	0.55
	Desviación estándar	28.42	4.32	1.09	0.55	0.30	1.89	0.20	0.06	7.30	1.23	2.11	0.21
BxH	No. Muestras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	Valores únicos	11	11	11	11	10	11	10	10	11	11	11	9
	Mínimo	92	9.7	2.43	1.43	0.38	2.47	0.49	0.22	8.5	1.63	2.22	0.4
	Máximo	307	29.5	5.06	3.03	0.92	5.44	1.04	0.44	16.7	3.2	5.07	0.84
	Media	220.36	22.44	4.09	2.45	0.71	4.23	0.84	0.35	12.97	2.56	3.74	0.66
	Mediana	245	23.4	4.5	2.69	0.8	4.77	0.92	0.37	14.6	2.73	3.82	0.74
	Desviación estándar	69.67	6.56	0.94	0.56	0.16	1.03	0.20	0.07	2.98	0.57	0.93	0.15
BxM	No. Muestras	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
	Valores únicos	22	21	23	22	20	23	19	16	18	22	23	21
	Mínimo	110	1.3	0.31	0.2	0.07	0.4	0.06	0.03	2.5	0.54	0.57	0.05
	Máximo	457	28.2	4.46	2.42	1.15	6.12	0.87	0.3	49.8	11.7	9.67	0.77
	Media	236.70	12.04	2.10	1.27	0.44	2.36	0.43	0.18	11.25	2.30	2.84	0.34
	Mediana	234	11.8	2.21	1.36	0.45	2.53	0.45	0.21	9.4	1.7	2.3	0.37
	Desviación estándar	81.31	7.33	1.08	0.64	0.28	1.31	0.22	0.09	9.72	2.27	1.92	0.18

UG	Estadígrafos	Ti %	V ppm	Y ppm	Zn ppm	Zr ppm	Dy ppm	Er ppm	Eu ppm	Gd ppm	Ho ppm	Lu ppm	Nd ppm
Dr	No. Muestras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	Valores únicos	11	11	11	9	11	11	11	10	11	9	10	11
	Mínimo	0.345	85	19	73	30.7	3.22	1.95	0.82	3.25	0.67	0.3	13.2
	Máximo	0.611	633	38.5	215	81.7	6.74	4.02	2.1	8.2	1.34	0.51	33.7
	Media	0.46	317.91	27.90	146.45	49.80	4.89	3.00	1.10	5.27	1.00	0.41	20.44
	Mediana	0.452	234	27.8	158	48.3	5.1	3.06	0.94	5.18	1.04	0.42	19.4
	Desviación estándar	0.08	188.82	5.77	47.48	16.36	1.01	0.58	0.39	1.34	0.20	0.07	6.65
VS	No. Muestras	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
	Valores únicos	28	32	27	34	29	29	26	25	29	16	11	30
	Mínimo	0.354	155	12	130	9.2	2.34	1.35	0.88	2.77	0.46	0.18	12.8
	Máximo	0.488	262	22.3	1630	69.8	4.07	2.5	1.44	4.49	0.8	0.36	25.5
	Media	0.42	221.21	14.71	452.26	24.64	2.80	1.61	1.13	3.45	0.55	0.23	17.74
	Mediana	0.417	227	14.3	333	23.65	2.735	1.565	1.13	3.4	0.54	0.22	17.6
	Desviación estándar	0.03	26.73	2.06	336.77	9.33	0.35	0.22	0.14	0.41	0.07	0.03	2.71
Hf	No. Muestras	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
	Valores únicos	12	13	13	13	13	13	13	12	12	12	10	12
	Mínimo	0.224	144	12.1	71	11.4	2.33	1.36	0.56	2.57	0.45	0.2	8.7
	Máximo	0.7	1160	31	562	29	5.84	3.13	1.2	7.55	1.11	0.41	28.5
	Media	0.37	530.46	22.94	267.38	22.03	4.18	2.41	0.89	5.00	0.83	0.32	19.32
	Mediana	0.359	442	24.5	272	22.4	4.33	2.56	0.88	4.9	0.87	0.34	19.6
	Desviación estándar	0.12	309.78	5.68	139.73	6.43	1.08	0.59	0.20	1.44	0.20	0.07	6.47
HfA	No. Muestras	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	Valores únicos	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	6	8
	Mínimo	0.355	188	8.6	79	5	1.71	1.05	0.31	1.56	0.34	0.15	3.9
	Máximo	0.474	863	26.5	164	18.8	5.22	2.76	1.32	7.94	0.97	0.33	28.2
	Media	0.40	461.13	18.70	122.13	10.84	3.41	2.03	0.68	3.76	0.68	0.27	11.20
	Mediana	0.393	518	19.5	122	9.85	3.565	2.16	0.635	3.58	0.715	0.285	9.45
	Desviación estándar	0.04	231.73	5.72	28.42	4.32	1.09	0.55	0.30	1.89	0.20	0.06	7.30
BxH	No. Muestras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	Valores únicos	11	11	11	11	11	11	11	10	11	10	10	11
	Mínimo	0.082	120	13.4	92	9.7	2.43	1.43	0.38	2.47	0.49	0.22	8.5
	Máximo	0.539	874	29.5	307	29.5	5.06	3.03	0.92	5.44	1.04	0.44	16.7
	Media	0.37	466.73	23.36	220.36	22.44	4.09	2.45	0.71	4.23	0.84	0.35	12.97
	Mediana	0.403	430	26	245	23.4	4.5	2.69	0.8	4.77	0.92	0.37	14.6
	Desviación estándar	0.13	279.54	5.93	69.67	6.56	0.94	0.56	0.16	1.03	0.20	0.07	2.98
BxM	No. Muestras	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
	Valores únicos	21	21	22	22	21	23	22	20	23	19	16	18
	Mínimo	0.029	802	2.3	110	1.3	0.31	0.2	0.07	0.4	0.06	0.03	2.5
	Máximo	0.814	2440	25.5	457	28.2	4.46	2.42	1.15	6.12	0.87	0.3	49.8
	Media	0.31	1448.61	11.98	236.70	12.04	2.10	1.27	0.44	2.36	0.43	0.18	11.25
	Mediana	0.313	1460	13.1	234	11.8	2.21	1.36	0.45	2.53	0.45	0.21	9.4
	Desviación estándar	0.19	389.58	6.03	81.31	7.33	1.08	0.64	0.28	1.31	0.22	0.09	9.72

UG	Estadígrafos	Pr ppm	Sm ppm	Tb ppm	Tm ppm	Yb ppm
Dr	No. Muestras	11	11	11	11	11
	Valores únicos	10	11	9	10	11
	Mínimo	2.61	3.16	0.51	0.29	1.89
	Máximo	7.09	7.77	1.12	0.55	3.55
	Media	4.21	5.21	0.78	0.42	2.83
	Mediana	3.75	5.53	0.82	0.42	2.77
	Desviación estándar	1.50	1.40	0.18	0.08	0.53
VS	No. Muestras	34	34	34	34	34
	Valores únicos	31	33	18	10	24
	Mínimo	2.82	2.94	0.4	0.18	1.24
	Máximo	5.8	4.95	0.62	0.33	2.38
	Media	3.98	3.74	0.47	0.22	1.51
	Mediana	3.96	3.68	0.46	0.22	1.5
	Desviación estándar	0.70	0.46	0.05	0.03	0.21
Hf	No. Muestras	13	13	13	13	13
	Valores únicos	13	13	11	13	12
	Mínimo	1.69	2.45	0.37	0.19	1.32
	Máximo	7.04	7.13	0.99	0.42	2.75
	Media	3.94	4.82	0.70	0.33	2.18
	Mediana	3.83	5.15	0.71	0.35	2.21
	Desviación estándar	1.45	1.44	0.19	0.07	0.49
HfA	No. Muestras	8	8	8	8	8
	Valores únicos	8	8	8	5	8
	Mínimo	0.71	1.27	0.25	0.15	1.02
	Máximo	4.85	8.24	0.96	0.36	2.34
	Media	2.07	3.39	0.55	0.28	1.87
	Mediana	1.72	2.92	0.55	0.3	2.01
	Desviación estándar	1.23	2.11	0.21	0.08	0.47
BxH	No. Muestras	11	11	11	11	11
	Valores únicos	11	11	9	8	10
	Mínimo	1.63	2.22	0.4	0.21	1.46
	Máximo	3.2	5.07	0.84	0.46	3.13
	Media	2.56	3.74	0.66	0.35	2.30
	Mediana	2.73	3.82	0.74	0.37	2.44
	Desviación estándar	0.57	0.93	0.15	0.08	0.54
BxM	No. Muestras	23	23	23	23	23
	Valores únicos	22	23	21	15	22
	Mínimo	0.54	0.57	0.05	0.03	0.21
	Máximo	11.7	9.67	0.77	0.34	2.14
	Media	2.30	2.84	0.34	0.18	1.24
	Mediana	1.7	2.3	0.37	0.2	1.41
	Desviación estándar	2.27	1.92	0.18	0.09	0.62

ANEXO F

Análisis SEM.

Este anexo se encuentra de forma digital.