



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

PROSPECTO BRAHMA, PÓRFIDO DE COBRE-MOLIBDENO EN LOS ANDES DE CHILE
CENTRAL (~35°45'S): GEOLOGÍA, GEOCRONOLOGÍA E ISOTOPIA DE COBRE

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS MENCIÓN GEOLOGÍA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

VALENTINA ANDREA DÍAZ ARTIGAS

PROFESOR GUÍA:
BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

PROFESORA CO-GUÍA
MARCIA ALEJANDRA MUÑOZ GÓMEZ

MIEMBRO DE LA COMISIÓN:
KATJA DECKART

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos Fondecyt 1161360 y 11140012

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
GEÓLOGA Y MAGÍSTER EN CIENCIAS MENCIÓN GEOLOGÍA
POR: VALENTINA ANDREA DÍAZ ARTIGAS
FECHA: DICIEMBRE 2019
PROFESOR GUÍA: BRIAN TOWNLEY**

PROSPECTO BRAHMA, PÓRFIDO DE COBRE-MOLIBDENO EN LOS ANDES DE CHILE CENTRAL (~35°45'S): GEOLOGÍA, GEOCRONOLOGÍA Y ANÁLISIS ISOTÓPICO DE COBRE

El prospecto Brahma es un depósito tipo pórfido cuprífero Neógeno ubicado en Los Andes de Chile Central a los ~35°45'S. Esta zona es de especial interés ya que se encuentra a ~200 km al sur del límite meridional de la franja metalogénica del Mioceno-Plioceno. De esta manera, el estudio del evento magmático-hidrotermal Brahma es relevante para la evaluación de la posible extensión de esta franja más al sur de lo que se reconoce actualmente. En este trabajo de tesis se presentan los resultados de un detallado estudio del prospecto basado en el mapeo de sondajes, petrografía, geoquímica isotópica (Os y Cu en sulfuros) y determinaciones geocronológicas (U-Pb en circón y Re-Os en molibdenita, pirita y calcopirita), con el objetivo de determinar el origen y evolución del sistema magmático-hidrotermal y contextualizar su formación en el marco metalogénico de la región.

El prospecto Brahma se encuentra hospedado en rocas intrusivas equigranulares dioríticas y granodioríticas mineralizadas por fluidos hidrotermales relacionados con el emplazamiento de intrusivos porfídicos y brechas hidrotermales. Los sondajes de exploración realizados en el prospecto interceptan la zona superior del sistema porfídico, coherente con la predominancia de alteraciones filica y argílica, y mineralización de pirita, esfalerita, calcopirita y molibdenita. De acuerdo a determinaciones previas, las principales unidades litológicas reconocidas en el prospecto corresponden a rocas ígneas intrusivas, con afinidades de arco magmático, y presentan edades de ~17 Ma, 14 Ma, y 9 Ma. Estas edades son concordantes con los análisis Re-Os en molibdenita de este trabajo que otorgaron edades de mineralización de ~14 Ma, 12 Ma y 10 Ma. Estos resultados sugieren que la mineralización en Brahma se formó como resultado de más de un evento hidrotermal, comenzando a los ~14 Ma y estando el sistema activo por al menos 4 a 5 Ma. Por otro lado, los datos geocronológicos en conjunto con la geoquímica de roca total, indican que los magmas asociados a la génesis del prospecto están relacionados a un reservorio magmático profundo complejo que alimentó al sistema hidrotermal por un largo período de tiempo.

En complemento a las determinaciones geocronológicas mencionadas, el análisis Re-Os en pirita y calcopirita indica que el principal evento de mineralización tuvo lugar entre los ~10.2 y ~8.9 Ma. Por otro lado, las razones de Os inicial en la mineralización evidencian una evolución de los fluidos hidrotermales, desde magmáticos-mantélicos (coherente con determinaciones previas de isotopía de Hf) a magmáticos-corticales en etapas de mineralización tardía. Adicionalmente, los valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ argumentan a favor de la participación de aguas meteóricas oxidantes durante el enfriamiento del sistema hidrotermal.

Finalmente, los datos isotópicos de Cu revelan la ocurrencia de procesos de enriquecimiento secundario de Cu en el prospecto. Estos son de carácter cíclico y de escala local, generando zonas de enriquecimiento secundario irregulares e incipientes que se desarrollaron de manera preferencial en zonas de brecha y fallas. Lo anterior sugiere que la mineralización de Cu de interés económico en el prospecto está relacionada principalmente a sulfuros hipógenos.

En memoria de mis amadas tías

Nena y Moni

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado por CONICYT a través de los proyectos Fondecyt 1161360 y 11140012. Especial agradecimiento al Centro Avanzado de Tecnologías para la Minería (AMTC) a través del proyecto CONICYT AFB180004 por facilitar sus instalaciones para el desarrollo de esta tesis, y también a la Unidad de Vinculación del Departamento de Postgrado de la Universidad de Chile por brindar el financiamiento para la realización de una pasantía de 2 meses en Estados Unidos. Agradezco a Patrick Burns y a Cándor Resources por permitir el acceso a los sondeos del Prospecto Brahma y por permitir publicar la información.

Quisiera agradecer a los profesores Brian Townley, Marcia Muñoz y Katja Deckart por darme la oportunidad de realizar este proyecto junto a ustedes. Gracias Brian por guiarme durante este largo proceso y también por las múltiples oportunidades que me diste para participar en instancias que me hicieron crecer profesionalmente. Marcia, me siento muy agradecida por todo el tiempo que dedicaste a revisar de manera crítica cada uno de mis avances y que se ve reflejado finalmente en la calidad de este trabajo, el aprendizaje que obtuve trabajando contigo ha significado un aporte invaluable para mí. Gracias profe Katja por siempre tener buena disposición para recibirme en su oficina y discutir largamente acerca de los resultados de la tesis y también conversar cosas de la vida. Quiero agradecer también al Dr. Ryan Mathur por recibirme en Estados Unidos, por su eterna paciencia en explicarme cada uno de los pasos a seguir en los análisis químicos, por su preocupación y por ser tan buen investigador como buena persona.

Agradezco a mi familia. A mis padres Sergio y Andrea por entregarnos a mí y a mis hermanos todas las herramientas y el cariño para convertirnos en las personas que somos ahora. A mis hermanos Javiera y Sergio por la compañía, apoyo y todos los buenos momentos vividos. Gracias hermana por siempre haber sido un ejemplo a seguir para nosotros. Los amo infinitamente.. todo esto es por ustedes.

Agradezco a todas las personas que me han acompañado durante ese tiempo en la Universidad. A mis compañeros y amigos de pregrado (mis queridas georatas) Nachito, Spiess, Mati, Nicha y Seba. A mi gran amigo Rodri Perez, por todas las conversaciones y buenos momentos. A mis amigos Fonseca, Mauro, España y Fonsi, el grupo más heterogéneo de la vida, los quiero un montón! Gracias por todas las cervezas, risas y tallas malas. A mis amigas del colegio, por estos casi 20 años de amistad incondicional. Mención honrosa a mis queridas chiquillas del AMTC, gracias por todos los almuerzos, tecitos, cervezas y buenas conversaciones que hicieron de esta etapa algo único. En especial a la Claudia, agradezco mucho a la vida por haberte conocido y trabajar codo a codo contigo. Te convertiste en una gran amiga, gracias por todas las risas, consejos, desahogos y por todas las zumbas que bailamos! espero que vengan muchas mas.

Finalmente agradecer a Hugo, por ser un apoyo fundamental en mi vida durante todos estos años de Universidad. Gracias por tu compañía, por animarme a tomar nuevos desafíos, por apoyarme en tiempos difíciles, por siempre tener una sonrisa y darme mucho cariño.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1	Introducción.....	1
1.1	OBJETIVOS.....	2
1.1.1	Objetivo General	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
1.2	UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO.....	2
Capítulo 2	The Miocene Brahma Porphyry Cu-Mo prospect in Central Chilean Andes (35°45'S): Geology, geochronology (U-Pb, Re-Os) and geochemistry.....	3
2.1	INTRODUCTION	4
2.2	GEOLOGICAL BACKGROUND	5
2.2.1	Tectonic Setting and Geology of the Study Area	5
2.2.2	Cenozoic Geodynamic Setting	7
2.2.3	Metallogenic Background.....	7
2.3	SAMPLING AND ANALYTICAL PROCEDURES	8
2.3.1	U-Pb geochronology and Hf isotopic determinations	8
2.3.2	Re-Os geochronology	9
2.3.3	Whole rock geochemical analyses.....	10
2.4	RESULTS.....	10
2.4.1	Geology of the deposit.....	10
2.4.2	Alteration and mineralization	14
2.4.3	Geochronology	19
2.4.4	Geochemistry of igneous units	23
2.5	DISCUSSION.....	30
2.5.1	Main geological features of the Brahma prospect	30
2.5.2	Temporal development of the deposit	30
2.5.3	Igneous petrogenetic processes	32
2.5.4	The Brahma prospect in the context of Andean Metallogensis	32
2.6	SUMMARY AND CONCLUSIONS.....	34
	ACKNOWLEDGMENTS	35
	BIBLIOGRAPHY	35
Capítulo 3	Estudio Re-Os de minerales sulfurados del Prospecto Brahma	42
3.1	ASPECTOS PRELIMINARES	42
3.2	MARCO TEÓRICO	43
3.2.1	Datación mediante Re-Os.....	43
3.2.2	Re-Os como trazador de metales.....	46

3.3	MUESTREO Y PROCEDIMIENTOS ANALÍTICOS.....	46
3.4	RESULTADOS	50
3.4.1	Clasificación de muestras y resultados.....	50
3.4.2	Isocronas de muestras post-brecha PBX	52
3.4.3	Isocronas de muestras tardías	54
3.5	DISCUSIÓN.....	54
3.5.1	Calidad del método.....	54
3.5.2	Geocronología del prospecto Brahma	56
3.5.3	Fuente de los metales.....	58
3.6	RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	60
3.7	BIBLIOGRAFÍA	61
Capítulo 4	Variaciones isotópicas de Cu en el prospecto Brahma.....	66
4.1	ASPECTOS PRELIMINARES	66
4.2	MARCO TEÓRICO	66
4.2.1	Generalidades y tipos de fraccionamiento.....	66
4.2.2	Variaciones isotópicas de Cu en sistemas de pórfido de Cu-Mo	68
4.3	MUESTREO Y PROCEDIMIENTOS ANALÍTICOS.....	70
4.4	RESULTADOS	74
4.5	DISCUSIÓN.....	75
4.5.1	Origen de las calcosinas	75
4.5.2	Procesos de fraccionamiento en mineralogía hipógena.....	78
4.5.3	Evolución de fluidos hidrotermales en el Prospecto Brahma.....	79
4.6	RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	80
4.7	BIBLIOGRAFÍA	81
Capítulo 5	Resumen y Conclusiones.....	85
Anexos.....		89
	ANEXO A: Resultados de las determinaciones de edad U-Pb e isotopía de Hf en cristales de circón mediante LA-ICP-MS.....	89
	ANEXO B: Descripciones petrográficas.....	98
	ANEXO C: Abstracts/Resúmenes en congresos.....	159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa con ubicación y vía de acceso al prospecto Brahma.....	2
Figure 2.1 (a) Main tectonic features of the Central Chilean margin. (b) Regional scale geology of the western slope of the Andes Cordillera nearby the Colbún area (35°46'S).....	6
Figure 2.2 Local geology of the Brahma Prospect. (a) Geologic map of the Brahma prospect. (b) Geologic cross section along the A-A' line.....	12
Figure 2.3 Photographs of each lithologic unit recognized in the studied area.....	14
Figure 2.4 Summary of vein paragenesis in the Brahma prospect.....	15
Figure 2.5 Photographs of each vein type recognized in the Brahma prospect.....	19
Figure 2.6 U-Pb age determinations in primary zircons of igneous units from the Brahma prospect.....	21
Figure 2.7 General compositional features, in terms of major element data, of the main intrusive units of the Brahma prospect. (a) TAS, (b) %SiO ₂ vs. FeO/MgO ratio and (c) MgO vs. %SiO ₂ .	25
Figure 2.8 General compositional features, in terms of trace element data, of the main intrusive units of the Brahma prospect. (a) Chondrite normalized REE diagram and (b) multi-element spider diagram. (d) Chondrite normalized REE diagram. (d) Hf isotopic composition. (e) and (f) display fertility diagrams of respectively La/Yb vs. Yb and Sr/Y vs. Y.....	26
Figure 2.9 (a) Summary of the primary and secondary mineral age determination performed in the Brahma prospect in this work and (b) location of the corresponding samples.....	31
Figure 2.10 Summary of geochronological data for the main porphyry Cu-Mo deposits belonging to the Miocene-Pliocene metallogenic belt in Central Chile.....	33
Figura 3.1 Isocrona del sistema Re-Os de 3 muestras cogenéticas a1, a2 y a3.	44
Figura 3.2 Procedimiento analítico Re-Os en pirita y calcopirita.	47
Figura 3.3 Distribución de las muestras datadas en la sección transversal A-A'.....	50
Figura 3.4 Comparación de valores Re-Os en distintos depósitos.....	51
Figura 3.5 (a) Muestras graficadas en el diagrama ¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os vs ¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os en escala logarítmica. (b) Textura de reactivación de vetilla tipo IV en la muestra B02373..	52
Figura 3.6 Isocronas de pirita y calcopirita pertenecientes al grupo de muestras post-brecha PBX.	53
Figura 3.7 Isocronas de pirita y calcopirita perteneciente al grupo de muestras tardías.....	54

Figura 3.8 (a) Resumen de todas las dataciones realizadas en el prospecto Brahma y (b) ubicación de las muestras correspondientes.	57
Figura 3.9 Paragénesis de vetillas del Prospecto Brahma actualizada según nuevos datos geocronológicos.....	58
Figura 3.10 Distintos modelos esquemáticos sobre la proveniencia del Os (y por inferencia otros metales como el Cu y Mo) durante la última etapa de mineralización del prospecto Brahma (10.2-8.9 Ma).	59
Figura 4.1 Valores de composición isotópica de metales de transición en roca total reportados en la literatura.....	67
Figura 4.2 Rangos de $\delta^{65}\text{Cu}$ medidos en distintas rocas ígneas (arriba) y depósitos minerales (abajo).....	68
Figura 4.3 Compilación de valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ reportados en la literatura clasificados según las distintas zonas minerales presentes en un yacimiento de Cu expuesto a condiciones supérgenas.....	69
Figura 4.4 Fotomicrografías representativas de la mineralización analizada.....	70
Figura 4.5 Procedimiento analítico para isótopos de Cu.....	71
Figura 4.6 Distribución espacial de las muestras seleccionadas en la sección transversal A-A'.	72
Figura 4.7 Resultados de análisis isotópico de Cu según mineralogía (a) y alteración (b). (c) Diagrama $\delta^{65}\text{Cu}$ vs. Ley de Cu.....	75
Figura 4.8 (a) Distribución espacial de valores de $\delta^{65}\text{Cu}$. (b) Delimitación de zona de sulfuros mixtos (hipógenos y supérgeno) y proposición de nuevas zonas de fallas.	77
Figura 4.9 Diagrama $\delta^{65}\text{Cu}$ vs. Edad de mineralización.	80
Figura 1.1 Modelos de alteración y mineralización asociados a un yacimiento de tipo pórfido cuprífero. En rojo se marca la zona interceptada por los sondajes mapeados del Prospecto Brahma.....	85
Figura 5.2 Concentración promedio de Re en molibdenitas pertenecientes a depósitos tipo pórfido de Cu-Mo (línea verde). En azul se muestra un diagrama tipo boxplot que representa las concentraciones de Re en molibdenitas del prospecto Brahma (n=6)	86

ÍNDICE DE TABLAS

Table 2.1 Summary of the main vein types identified in this study in the Brahma prospect and their characteristics.	17
Table 2.2 Summary of principal characteristics of the main lithological units identified in this study in the Brahma prospect.	22
Tabla 2.3 Results from Re-Os analyses in molybdenite from the Brahma prospect.	23
Tabla 2.4 Results of whole rock chemical analyses.	27
Tabla 3.1 Resultados Re-Os en pirita y calcopirita de muestras tardías y post-brecha PBX	49
Tabla 4.1 Resultados de análisis isotópico de Cu en muestras con mineralización únicamente hipógena (calcopirita-esfalerita) y con mineralización supérgena (presencia de calcosina).	73

Capítulo 1 Introducción

El margen chileno corresponde a una de las provincias cupríferas más enriquecidas en el mundo, donde la mayor parte del recurso proviene de depósitos de tipo pórfido de Cu-Mo-Au. En él, los depósitos se encuentran alineados en franjas metalogénicas de dirección N-S. La más joven de estas corresponde a la franja metalogénica del Mioceno-Plioceno, que incluye depósitos de pórfido de clase mundial como Los Pelambres, Rio Blanco-Los Bronces y El Teniente. Formalmente esta franja se extiende aproximadamente hasta la latitud de El Teniente (34°S), sin embargo, en la última década ha habido interés por comprender la posible extensión de esta franja más al sur. A pesar de que se han identificado varios prospectos, estos se encuentran en etapas tempranas de exploración y por lo tanto el potencial económico de esta zona no está determinado. Dentro de estos prospectos, se encuentra Brahma, depósito tipo pórfido Cu-Mo ubicado en la vertiente occidental de la Cordillera Principal Andina de la región del Maule, aproximadamente a 200 km al sur-suroeste de El Teniente.

En el Prospecto Brahma se han realizado escasos estudios previos que corresponden a 3 informes de exploración y que incluyen además la realización de 7 sondajes de diamantina relativamente cortos (~450 m). Con el objetivo de entregar valor adicional a esta información disponible, se realizó un detallado estudio geológico del prospecto a partir del mapeo y muestreo de dichos sondajes. Este estudio incluye además la aplicación de diversos sistemas isotópicos que permiten determinar el origen y evolución del sistema magmático-hidrotermal Brahma, permitiendo así contextualizar su formación dentro del marco metalogénico de la región.

El contenido de este trabajo se divide en 4 capítulos, el primero de ellos entrega información acerca de los objetivos del trabajo, ubicación y vías de acceso al prospecto. El segundo capítulo corresponde a un artículo titulado “The Miocene Brahma Porphyry Cu-Mo prospect in Central Chilean Andes (35°45’S): Geology, geochronology (U-Pb, Re-Os) and geochemistry”, actualmente en fase de revisión en la revista *Ore Geology Reviews*. En este capítulo se expone la geología del prospecto (litología, alteración y mineralización), en conjunto con geocronología U-Pb en circón, geoquímica de roca total, datos isotópicos de Hf y geocronología Re-Os en molibdenita. Los datos de alteración, mineralización y geocronología Re-Os provienen de este trabajo de tesis.

El Capítulo 3 presenta los resultados de un estudio isotópico Re-Os en pirita y calcopirita, realizado con el objetivo de obtener mayor información geocronológica e identificar procesos que puedan favorecer la formación de un yacimiento del tipo pórfido cuprífero. Finalmente el Capítulo 4 presenta los resultados de un estudio isotópico de Cu en minerales sulfurados con el objetivo de identificar y evaluar el potencial de procesos de enriquecimiento secundario en el prospecto. En complemento a lo anterior, las características de dicho sistema isotópico permiten caracterizar procesos hidrotermales de baja temperatura, entregando así información adicional acerca de la evolución del sistema hidrotermal. Finalmente se incluye un último capítulo donde se expone el resumen y las principales conclusiones de todo el trabajo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

Los objetivos generales de este trabajo son; (i) determinar la génesis y evolución del sistema hidrotermal Brahma para luego establecer/explorar su inserción dentro del contexto metalogénico regional, y (ii) evaluar el potencial exploratorio del prospecto.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para llevar a cabo los objetivos generales se estableció una serie de objetivos específicos. Estos consisten en caracterizar la litología, alteración y mineralización del prospecto Brahma y posterior realización de un modelo geológico. En segundo lugar se busca determinar las edades de las principales unidades de intrusivos, alteración y mineralización, en conjunto con determinar la fuente de la mineralización y la evolución de los fluidos hidrotermales. Finalmente se pretende definir distintas zonas minerales en el prospecto y explorar la ocurrencia de procesos de enriquecimiento secundario de Cu.

1.2 UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El Prospecto Brahma se encuentra a 320 km al sur de Santiago y 70 km al sur-sur este de Talca, en la zona de Colbún Alto, Región del Maule. Está ubicado en la vertiente occidental de la Cordillera de Los Andes a una altura aproximada de 1000 m s.n.m, en las coordenadas geográficas 35°46'06'' latitud sur y 71°12'05'' longitud oeste. El acceso al prospecto desde Santiago se realiza por la Ruta 5 Sur hasta Talca, luego se toma la salida en dirección San Clemente. Se recorren aproximadamente 65 km por la ruta 115, se gira al suroeste en dirección a la ruta L-391 y se prosigue recto por 7.4 km (Fig. 1.1).



Figura 1.1 Mapa de ubicación y vía de acceso al prospecto Brahma. Tomado de Google Maps, el 4/10/19.

Capítulo 2 The Miocene Brahma Porphyry Cu-Mo prospect in Central Chilean Andes (35°45'S): Geology, geochronology (U-Pb, Re-Os) and geochemistry

Valentina Díaz^{1,2}, Marcia Muñoz-Gómez^{2,3*}, Katja Deckart^{1,2}, Brian Townley^{1,2}, Ryan Mathur⁴, Osvaldo Martínez¹

¹Departamento de Geología, Universidad de Chile, Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile

²Advanced Mining Technology Center (AMTC), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Av. Tupper 2007, Santiago, Chile,

³Escuela de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Universidad Andres Bello, Campus República, Salvador Sanfuentes 2357, Santiago, Chile

⁴Department of Geology, Juniata College, Huntingdon, PA16652, United States of America

*Corresponding author. Telephone: 56 9 53854658. E-mail address: marcia.munoz@unab.cl.

ABSTRACT

The Brahma prospect is a Neogene porphyry copper type deposit located in the main Chilean Andes at ~35°45'S, that is beyond the southerly extension of the Mio-Pliocene Metallogenic Belt of Central Chile. The latter corresponds to a highly endowed Andean copper province, thus making the study of the Brahma magmatic-hydrothermal event most relevant to assess the possible extension of the latter belt further south than presently recognized. We present the results of a comprehensive study of this prospect based on drill core mapping, petrography, geochemical and geochronological determinations, with the aim of determining its genetic history and of framing its formation within the metallogenic background of the region. The Brahma prospect is hosted by dioritic and granodioritic equigranular intrusive rocks that were mineralized by fluids associated with at least two hydrothermal pulses related with the emplacement of porphyric intrusives and hydrothermal breccias. Existing exploration drill cores only intercepted the upper phyllic-advanced argillic zone of the system, consistent with the scarce presence of potassic alteration and the dominance of pyrite, sphalerite, chalcopyrite and molybdenite mineralization. Zircon U-Pb determinations in the main lithologic units of the Brahma prospect yielded emplacement ages of ~17 Ma, 14 Ma, and 9 Ma. Mineralization ages of ~14 Ma, 12 Ma, and 10 Ma were obtained by Re-Os determinations in molybdenite samples chosen by their relative temporality in the different vein types recognized. These data indicate that (i) the prospect hosts at least 3 magmatic events, (ii) early mineralization is associated with the ~14 Ma magmatic pulse, and (iii) economic mineralization occurred at ~10 Ma and extended at least until 9 Ma. The latter is indicated by the presence of a younger mineralized porphyric unit of such age. These results suggest that the mineralization present in the Brahma prospect formed from more than one event, beginning at ~14 Ma and being active for at least 4 to 5 m.y. Such range of ages correspond to the same as those reported for the Los Pelambres deposit, a Cu-Mo porphyry located at 31°43'S and belonging to the Mio-Pliocene Metallogenic Belt of Central Chile. For the main intrusive units recognized in the Brahma prospect, whole rock geochemical analyses reveal arc affinities and the involvement of amphibole in the fractionating assemblages. In addition, zircon Hf isotopic determinations in these units indicate little crustal involvement in the genesis of the corresponding magmas. In a whole, geochemical and geochronological evidence supports

the existence of a complex deep magmatic reservoir that fed the magmatic-hydrothermal system for a long period, a common characteristic in other Miocene-Pliocene deposits in Chile and also in porphyry Cu deposits worldwide. Results from this work highlight an interesting exploratory potential for the Brahma prospect, a long-lived Cu-Mo porphyry deposit of early Miocene age which southerly expands until $\sim 36^{\circ}\text{S}$ the Mio-Pliocene Metallogenic Belt of Central Chile.

Keywords: *Central Chilean Andes, Miocene Metallogenic belt, Porphyry Cu deposit, Mapping, U-Pb and Re-Os geochronology, Geochemistry.*

2.1 INTRODUCTION

The Chilean Andes margin corresponds to one of the most richly endowed copper provinces in the world and most of such resources derive from Porphyry Cu (-Mo, -Au) style mineralization. The latter includes the largest deposits of this type discovered up to date in the world, as Chuquicamata ($22^{\circ}16'\text{S}$), Río Blanco-Los Bronces ($33^{\circ}12'\text{S}$), and El Teniente ($34^{\circ}05'\text{S}$), along with numerous other comparatively smaller deposits currently under exploitation (Fig. 2.1a; e.g. Camus, 2003; Maksaev et al., 2007). These characteristics have historically made the Chilean margin a particularly attractive area for exploration activities oriented to the discovery of porphyry Cu type deposits. Given the vigorous and long-standing development of such activities, currently there seems to be no exposed resources left, which has led to both: (i) a change in the exploration techniques towards a more penetrative and integral approach and (ii) the search for new target areas from those previously disregarded as highly fertile.

Porphyry Cu deposits correspond to large volumes of hydrothermally altered rocks centered in porphyry stocks, the latter which are in turn associated to late volcano-plutonic arc activity (e.g. Richards, 2003, 2005; Sillitoe, 2010). They are inferred to result from the favorable confluence of a series of specific geological factors and/or processes which, operating altogether, prompt their formation (e.g. Richards, 2003, 2005; Sillitoe, 2010). Throughout its evolution, regional scale formation of porphyry deposits has occurred repeatedly along the Chilean Andes margin, but during relatively short time spans and at specific moments during the lifetime of the coeval hosting magmatic arc (for reviews see Camus, 2003; Maksaev et al., 2007). As resulting from such specific tectono-magmatic episodes, porphyry deposits in the area have been classically grouped in metallogenic belts which distribute along strike of the Chilean margin likewise the records of the volcanic arc to which the associated mineralizing stocks belong (for reviews see Camus, 2003; Maksaev et al., 2007). The youngest of these corresponds to the Miocene-Pliocene metallogenic belt, which hosts highly endowed Cu-Mo porphyry deposits between $\sim 32^{\circ}$ and 34°S and Au-rich porphyry and epithermal deposits further north (Fig. 2.1a), and its formation is directly related to the construction of the modern Andean orogen (e.g. Camus, 2003; Maksaev et al., 2007). The southern termination of this belt is marked by the El Teniente mega-deposit ($34^{\circ}05'\text{S}$) but the look for previously underestimated exploration areas has attracted interest in the late decade in the possible extension of this metallogenic belt further south. In the latter area several prospects have been found (Fig. 2.1a), but they remain under early exploration activities and their full metallogenic and economic potential remains yet to be determined. One of these and the focus of the present study corresponds to the Brahma porphyry Cu-Mo prospect, a Miocene deposit located in the Andean main range in the Maule region at $\sim 36^{\circ}\text{S}$ (Fig. 2.1).

The Brahma prospect is located in the western slope of the Chilean Andes, at 35°46'S, 55 km to the southeast of the Talca city and 200 km south-southwest of the El Teniente Cu-Mo mega-deposit (Fig. 2.1a). In this contribution we present the results of a comprehensive study of this prospect based on drill core mapping, petrography, primary U-Pb and secondary Re-Os age determinations, Lu-Hf isotopic composition and geochemical analyses in the main lithologic and alteration/mineralization units identified in the deposit. The aim of this study is to use this characterization to determine the evolution of the Brahma magmatic-hydrothermal system and to contextualize this deposit-forming event within the metallogenic frame of the Central Andes.

2.2 GEOLOGICAL BACKGROUND

2.2.1 *Tectonic Setting and Geology of the Study Area*

The Chilean Andes runs along an active continental margin characterized by the eastward subduction of the Nazca oceanic plate beneath the South American continental plate (Fig. 2.1a). Such configuration has been continuous, but not steady, at least since early Jurassic times and is the first order control of the geological evolution of the upper continental plate (e.g. Charrier et al., 2007, 2015). The Brahma prospect is located in Chile in the western slope of the modern Andean orogen, at 35°46'S, in the southern shore of the Maule river (Fig. 2.1b). This area corresponds to the Southern Central Andes, which is distributed between ~33°-46°S, immediately south of the so called flat-slab segment (~27°-33°S; Fig. 2.1a). The current tectonic configuration of the study region is characterized by a convergence rate of ~7 cm/yr with an obliquity of ~20° (Somoza and Ghidella, 2005) and a subduction dip angle of ~27° (Fig. 2.1a; Pardo et al., 2002). The active volcanic arc of this area runs along the highest summits of the Andean range which marks the drainage divide and delineates the Chile-Argentina international border (Fig. 2.1a).

The geology of the western slope of the Andes Principal Cordillera, where the Brahma prospect is located, is dominated by outcrops of Cenozoic and Mesozoic series. These distribute in nearly NS-trending belts, parallel to the orogen main strike, and become older towards the east (e.g. Sernageomin, 2003). The widest outcrops, and those that host the Brahma prospect, correspond to the Cenozoic belt which is comprised by variably deformed volcano-sedimentary series ranging in age from late Eocene to Miocene (Fig. 2.1b; González and Vergara, 1962; Vergara et al., 1999; Sernageomin, 2003; Cabezas et al., 2018). Younger volcano-sedimentary sequences and numerous Cenozoic intrusive units of variable sizes are also present in this area and in that further east dominated by the outcrops of Mesozoic series rocks (Fig. 2.1b). Available radiometric age determinations suggest that the Cenozoic intrusives become progressively younger to the east (Vergara et al., 1999; Spikings et al., 2008; Astaburuaga, 2014; Cabezas et al., 2018), a characteristic feature that has also been recognized in the western slope of the Andes further to the north (e.g. Stern and Skewes, 1995; Kay et al., 2005). All of these Cenozoic igneous series and their intrusive counterparts are related to arc activity lasting from at least 36 to 6 Ma (e.g. Vergara et al., 1999; Spikings et al., 2008; Astaburuaga, 2014; Cabezas et al., 2018). The geology is completed by the outcrops of Late Cretaceous plutons, both present in the Cenozoic and Mesozoic belt areas, whose ages have been identified through radiometric determinations (Nelson et al., 1999; Spikings et al., 2008; Cabezas et al., 2018).

The Brahma prospect is emplaced in the westernmost part of the Cenozoic belt that dominates the western Principal Cordillera. The hosting unit corresponds to a volcanic and minor sedimentary continental series grouped in the Colbún Formation (~35-36°S; Karzulovic et al.,

1972). This formation is subdivided into three units: (i) a lower one composed of volcanoclastic and pyroclastic breccia deposits, (ii) a middle one composed of sandstones and limestones of a lacustrine environment, and (iii) an upper one composed of mainly andesitic to dacitic lava flows. In the area, the Colbún Formation shows an average thickness of 1900 m (González and Vergara, 1962) and, according to radiometric age determinations, shows a late Eocene to middle Miocene age (~35-15 Ma; Vergara et al., 1999).

The main intrusive bodies in nearby areas of the prospect location include (Fig. 2.1b): (1) El Indio pluton, a biotite and hornblende granodiorite of ~79 Ma (Nelson et al., 1999), (2) La Invernada pluton, a multiphase body whose composition varies from a hornblende granodiorite to a biotite granite (~14.2 to 6.2 Ma; Drake, 1976; Astaburuaga, 2014; Cabezas et al., 2018), (3) Risco Bayo pluton, a silicic granite of ~7.0 to 6.4 Ma (Nelson et al., 1999; Astaburuaga, 2014) and (4) El Melado Batholith, a hornblende granodiorite showing both Miocene and Late Cretaceous ages (Nelson et al., 1999, Spikings et al., 2008; Cabezas et al., 2018). The latter unit outcrops immediately to the east of the Brahma prospect location and radiometric determinations have revealed ages between ~23.8 and 14.2 Ma (Drake et al., 1982a; Nelson et al., 1999; Spikings et al., 2008; Cabezas et al., 2018) and between ~85.5 and 83.9 Ma (Spikings et al., 2008; Cabezas et al., 2018). The latter ages apparently dominate the westernmost part of the El Melado Batholith unit (Fig. 2.1b).

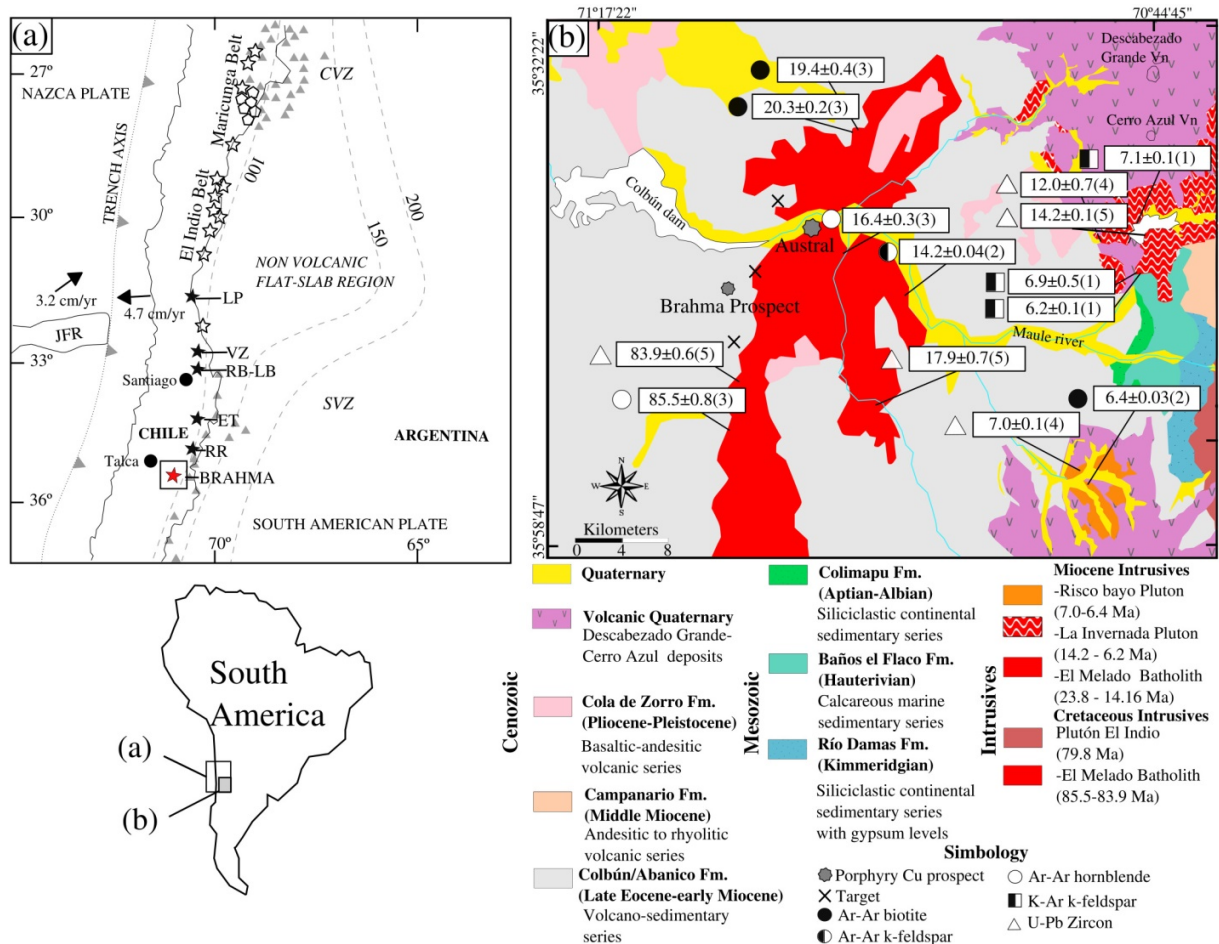


Figure 2.1(a) Main tectonic features of the Central Chilean margin modified from Charrier et al. (2007). The map shows the distribution of volcanoes (gray triangles) constituting the Central and Southern

volcanic zones (CVZ and SVZ) and the depth contours of the Wadati-Benioff plane (Cahill and Isacks, 1992). The zone between 27°S to 33°S corresponds to the non-volcanic flat-slab region. The black stars show the location of the Neogene porphyry copper deposits in central Chile, white stars indicate precious metal epithermal deposits and white pentagons indicate Au porphyries (Maksaev et al., 2007). JFR: Juan Fernández ridge, LP: Los Pelambres, VZ: Viscachitas, RB-LB: Río Blanco-Los Bronces, ET: El Teniente, RR, Rosario de Rengo. (b) Regional scale geology of the western slope of the Andes Cordillera nearby the Colbún area (35°46'S). Simplified map from Sernageomin (2003) and Astaburuaga (2014). Geochronological data of the main intrusive units taken from (1) Drake (1976), (2) Nelson et al. (1999), (3) Spikings et al. (2008), (4) Astaburuaga (2014) and (5) Cabezas et al. (2018).

2.2.2 Cenozoic Geodynamic Setting

In the Maule region scarce studies have been performed in Cenozoic units and the coeval evolution of this particular area is poorly constrained. However, this can be approached by the much better characterized area further north. The Cenozoic rocks present in the western slope of the Principal Cordillera are part of an (Eocene?) Oligocene-Miocene magmatic belt that can be followed continuously to the north at least up to ~33°S. In the latter area, the stratified volcanic and volcanoclastic series comprising such belt have been grouped in the Abanico Formation (late Eocene-early Miocene age; e.g. Charrier et al., 2002) and the overlying Farellones Formation (Miocene age; Nyström et al., 2003). Towards the south this and other denominations have been used in correlatable units to refer to such deposits. The Cenozoic evolution of the margin that these units represent is characterized by the early development of an intra-arc extensive basin, the so called Abanico Basin, which during late Eocene-early Miocene accumulated more than 3000 m of volcanic and subordinated sedimentary deposits over a thin crust (~35 km; e.g. Charrier et al., 2002, 2007; Nyström et al., 2003; Kay et al., 2005). During the early Miocene (~20 Ma), the basin was inverted leading to the deposition of the c.a. 2000 m of the mainly volcanic and volcanoclastic series of the Farellones Formation (e.g. Charrier et al., 2002; Nyström et al., 2003; Kay et al., 2005). Throughout this period the arc magmatic activity developed over a progressively thickening crust and the volcanic activity was systematically reduced until almost complete exhaustion by late Miocene (e.g. Stern and Skewes, 1995; Charrier et al., 2002, 2007; Kay et al., 2005). In addition, such processes proceeded along with a progressive eastward migration of the magmatic loci until reaching the currently active arc area near the Chilean-Argentinean border (e.g. Charrier et al., 2002, 2007; Kay et al., 2005). This period encompasses the formation of the giant porphyry copper deposits that comprise the Miocene metallogenic belt between 32°-34°S (Fig. 2.1a): (i) Los Pelambres-El Pachón (31°43'S), (ii) Río Blanco-Los Bronces (33°08'S), and (iii) El Teniente (34°04'S). All these deposits show a wide range of Miocene-Pliocene ages for their associated magmatic and hydrothermal activity, but the main mineralizing events have been bracketed between ~12-9 Ma for the northern one (Bertens et al., 2003, 2006) and between ~7-5 Ma for the two southerly ones (e.g. Deckart et al., 2005, Deckart et al., 2014; Maksaev et al., 2004).

2.2.3 Metallogenic Background

The cross-cut relations of the Brahma prospect point it as part of a Neogene mineralizing event. The numerous porphyry and epithermal deposits of late Cenozoic age present in the Chilean margin have been grouped in the so called Miocene-Pliocene metallogenic belt, which contains Au-Ag-(Cu) epithermal deposits and Cu-Mo, Cu-Au and Au porphyry deposits (e.g. Camus, 2003; Maksaev et al., 2004, 2007). The Miocene epithermal precious metal deposits with economic value are concentrated mainly between 26°S and 33°S, in the El Indio-Maricunga belt,

which also includes Au-rich porphyries that are concentrated between 27°S and 28°S (Fig. 2.1a; e.g. Makshev et al., 2004, 2007). As mentioned earlier, the Cu-Mo porphyry deposits of this metallogenic belt are recognized along the western slope of the Central Chilean Andes between 32°S to 34°S (Fig. 2.1a; e.g. Camus, 2003, Makshev et al., 2007). Further south, roughly along the same belt, a series of Miocene deposits and prospects have been recognized (Fig. 2.1a), but their full economic and metallogenic potential remains to be determined. The Cu-Mo deposits of this metallogenic belt are typically related to multi-phase porphyritic stocks and are associated to magmatic-hydrothermal breccia complexes (e.g. Camus, 2003; Makshev et al., 2007). At a regional scale, their intrusive units vary from plutonic to hypabyssal bodies corresponding to the pre-, syn- and post-mineralization units and show ages between 21.6 to 4.6 Ma (e.g. Camus, 2003; Bertens et al., 2003, 2006; Makshev et al., 2004, 2007; Deckart et al., 2013, 2014; Muñoz, 2008). As mentioned earlier, this porphyry belt runs subparallel to the main strike of the Andean orogen in the area, yet the associated structural control is not evident. Unlike the scenario in northern Chile, the area hosting the Miocene porphyry Cu belt in Central Chile shows no exposed regional scale structures that can be related to the deposit emplacement (e.g. Camus, 2003; Makshev et al., 2007). However, at local scales in each deposit different sets of structures have been reported to condition the emplacement and evolution of the porphyry Cu systems (for a review see Camus, 2003).

At the Maule region, where the Brahma prospect is located, no economically relevant deposits have been reported yet and up to date only minor informal mining activities have been developed in some areas. Exploration activities have been active for the last decade and besides the Brahma prospect other complementary targets have been defined, as Ancoa, Teatinos, Calabozos and Roblería, in addition to the Austral porphyry prospect which is located ~9 km to the northeast of Brahma (Fig. 2.1b). The geology of all such target areas and the prospect is very similar, characterized by the presence of granodioritic intrusives, andesitic and rhyodacitic porphyritic dikes, and polymictic breccias with a hydrothermal matrix, all hosted in volcanic rocks assigned to the Abanico Formation (Sanchez and Motta, 2013). Alteration associated to these intrusive bodies is mainly represented by the association of epidote-chlorite-albite-actinolite-magnetite along with an overprint of a quartz-sericite-pyrite association. In addition to this, some areas also show supergene argillic alteration overimposed (Burns et al., 2008; Sanchez and Motta, 2013). Mineralization in most of these targets corresponds to pyrite and less chalcopyrite in veinlets of quartz, and particularly the Austral prospect and the Ancoa target also show the presence of Cu oxides as chrysocolla and malachite. The targets and the Austral prospect are controlled by structures of NW-SE, NS and subordinately NE-SW directions (Burns et al., 2008; Sanchez and Motta, 2013).

2.3 SAMPLING AND ANALYTICAL PROCEDURES

All the samples collected for geochronology analyses in this study were taken from the BRA002, BRA003, BRA004 and BRA006 drill cores. The latter, in turn, correspond to the drill cores over which the cross-section A-A' has been constructed (Fig. 2.2). For the geochemical analyses samples were collected in addition from the BRA005 and BRA007 drill cores (Fig. 2.2a).

2.3.1 U-Pb geochronology and Hf isotopic determinations

U-Pb geochronological determinations were performed in-situ in single zircon crystals in 5 samples belonging to the main intrusive units identified in the Brahma prospect (Anexo A: item

1; Fig 2.2). The same crystals were then used for determination of Hf isotopic concentrations (Anexo A: item 2). Both analyses were performed by the laser ablation method at the Centro de Geociencias - Universidad Autónoma de México (UNAM), Mexico. Zircon grains were first separated from total rock samples using standard crushing, washing, heavy liquid, and paramagnetic procedures.

U–Pb analyses were performed employing a Thermo ICap Qc quadrupole ICP-MS coupled with a Resolution M050 excimer laser workstation. U and Th concentrations were calculated employing external standard zircons, 91500 (1065.4 ± 0.6 Ma; Wiedenbeck et al., 1995) and Plešovice (337.13 ± 0.37 Ma; Sláma et al., 2008), as in Paton et al. (2010). The isotopic ratios, ages and errors were calculated according to Petrus and Kamber (2012). In the data tables analytical determinations are reported at 2σ uncertainties, which were propagated according to Paton et al. (2010). Analyzed spots were $23 \mu\text{m}$, using an analytical protocol modified from Solari et al. (2010), and these were selected after the study of transmitted light and cathodoluminescence images. For each spot a set of trace elements was also measured, in order to monitor possible inclusions in zircon crystals, using the NIST-SRM 610 glass as a reference standard and ^{29}Si as an internal standard (15.323% assumed stoichiometric value). Ages were calculated as weighted averages for the statistically coherent population (Ludwig, 2008). The presented concordia plots, probability density plots with stacked histograms, and weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age calculations were carried out using ISOPLOT/EX 4.15 (Ludwig, 2008).

Hf isotopes were determined employing a Thermo Neptune Plus multi-collector ICP-MS coupled with the mentioned laser workstation. An analytical spot of $44 \mu\text{m}$ was used, locating it in homogeneous CL zones, right on top of the previous U–Pb analytical spot to ensure that the same dated domain was assessed and thus correctly recalculating the $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios relative to the zircon crystallization age. The external reproducibility of standard zircon grains broadly varied by ± 1 epsilon unit. Each ablation was run for 40 s, with repetitions at 5 Hz rate and an energy density of $6 \text{ J}/\text{cm}^2$. The isobaric interferences of ^{176}Lu and ^{176}Yb on the ^{176}Hf signal were corrected by monitoring ^{175}Lu , ^{172}Yb and ^{173}Yb and applying independent mass bias corrections as described in Solari et al. (2018).

2.3.2 Re-Os geochronology

Re-Os geochronological determinations were performed on 6 samples in molybdenite minerals (Fig. 2.2). Analyzed samples were carefully selected after a detailed study of paragenetic vein relations in the prospect (Table 2.1). Mineral samples of molybdenite were crushed, handpicked and powdered at Juniata College, United States. Since the distribution of Re and Os is heterogeneous in sulfide minerals (e.g. Freydier et al., 1997; Mathur et al., 1999; Stein et al., 2001; Barra et al., 2003), grains were collected in different places within the same domain (e.g. vein, disseminated) in order to homogenize the variability in Re-Os ratios.

For molybdenite analyses samples were collected from vein types II, V, VII and IX (Table 2.1). Considering that for such analyses the amount of mineral is not critical (0.1-0.05 g), samples for each one of the molybdenite bearing veins were considered, including the fine ones ($\sim 1 \text{ mm}$), and also from disseminated mineralization. The alteration assemblages present in the sampled veins and their halos (Table 2.1) suggest that the molybdenite mineralization has not been disturbed by local and high temperature ($>350^\circ\text{C}$) subsequent hydrothermal events. No clay

inclusions were found in molybdenite grains that could give erroneously young ages due to an excess of Re (Ruiz and Mathur, 1999a).

For performing the analyses approximately 0.04-0.06 gr of each molybdenite sample was loaded in a Carius tube. Spikes of ^{185}Re and ^{190}Os were added along with 3 ml of aqua regia following the procedure described in Shirey and Walker (1995). About 1 ml of H_2O_2 was added to the acid mixture to ensure the complete oxidation of the samples and spike equilibration (Shirey and Walker, 1995; Frei et al., 1998; Mathur et al., 2000a). The tubes were placed in a stainless-steel jacket and heated overnight in an oven at 180-220°C. The Carius tube solution was later treated in a two-stage distillation process for Os separation similar to that described by Shirey and Walker (1995) and Frei et al. (1998). Os was further purified using a microdistillation technique (Birck et al., 1997) and then loaded on a platinum filament with $\text{Ba}(\text{OH})_2$ to enhance ionization. The Re that remains in solution of the first distillation was extracted and purified through a two-stage ion exchange chromatography process. Finally, Re was loaded on nickel filament. All the samples were analyzed by negative thermal ion mass spectrometry (NTIMS; Creaser et al., 1991), a VG 54 mass spectrometer at the University of Arizona.

2.3.3 Whole rock geochemical analyses

For chemical whole rock analyses, samples were crushed in a reciprocating steel crusher and subsequently reduced to the powder used for analyzing major and trace elements (15 samples; Fig. 2.2). Analyses were performed at Activation Laboratories, Ontario - Canada, by the procedure 4Litho (www.actlabs.com) which respectively combines ICP-OES and ICP-MS techniques for geochemical determinations. Samples were fused by lithium metaborate/tetraborate and lately diluted for analyses in a Perkin Elmer Sciex ELAN 6000, 6100 or 9000 ICP-MS. Three blanks and five controls (three before sample group and two after) were analyzed per group of samples, duplicates were fused and analyzed every 15 samples, and instrument was recalibrated every 40 samples. Data quality was controlled by running several standards, relative standard deviations are generally $\leq 5\%$, and the detection limits are indicated in Table 2.4.

2.4 RESULTS

2.4.1 Geology of the deposit

The Brahma prospect covers an area of around 62 Km^2 and was discovered through a geochemical stream sediment study. Scarce previous studies have been performed in it, which correspond to three exploration technical reports (Culbert, 2007; Burns et al., 2008; Sanchez and Motta, 2013), and they included the perforation of seven diamond drill cores with lengths varying between 474 m and 353 m, reaching a total of 2094 m drilled. In this study a lithologic and alteration model of the prospect was made from the detailed mapping of the 4 drill cores BRA002, BRA003, BRA004, and BRA006 along with considering information from the remaining drill cores and previous studies (Fig. 2.2a). Such model is displayed in the A-A' section presented in Fig. 2.2b. Most of the samples collected for our characterization of the prospect, in terms of petrography, geochronology and geochemistry, were taken from the drill cores present in the same cross-section (Fig. 2.2b). Therefore, the following description of spatial distribution of the units, alteration, and mineralization are mainly related to the herein studied A-

A' cross-section and the geology in plant to that described by Burns et al. (2008) and Sanchez and Motta (2013).

Overall, the geology of the Brahma prospect is dominated by a wide extension granodioritic unit which hosts numerous comparatively minor and mostly porphyritic intrusives and breccia bodies (Fig. 2.2a). For the area, a series of NW striking structures are dominant and these are in turn cut by a main NE striking structure (Fig. 2.2a; Burns et al., 2008). Mineralization/alteration assemblages are mainly hosted by intrusive units (Fig. 2.2b). A wide and well-developed zone of phyllic alteration (quartz-sericite-pyrite±chlorite) is recognized which is superimposed locally by a supergene argillic alteration (clays, limonites, and dominant hematite) with intense stockwork of quartz-limonite (Fig. 2.2a; Burns et al., 2008; Sanchez and Motta, 2013). Towards the outer limits of the prospect propylitic alteration predominates and extends for several kilometers (Burns et al., 2008). This alteration is characterized mainly by an epidote-chlorite-calcite-pyrite assemblage with stockworks of quartz-magnetite-pyrite, in the vicinities of the phyllic center, and it grades to an assemblage of quartz-sericite-chlorite-pyrite with veinlets of epidote-chlorite (Burns et al., 2008).

2.4.1.1 Lithology

A total of 6 main lithologic units are recognized within the Brahma prospect. These correspond to two equigranular intrusives, two porphyric intrusives, and two hydrothermal breccia units (Table 2.2; Fig. 2.2b).

(1) Granodiorite unit (GRD)

According to cross-cut relations the oldest unit corresponds to a granodiorite body, of wide surface and subsurface extension, mostly intercepted by the BRA006 drill core, and which hosts all the later units in the prospect (Fig. 2.2b). It is characterized by a phaneritic, equigranular and hypidiomorphic texture showing a homogeneous structure and isotropic fabric (Fig. 2.3a). The color index varies between leucocratic to mesocratic with a mafic minerals content of 25% in volume. The main primary mineral phases correspond in average to 45% plagioclase, 20% quartz, 15% alkali feldspar, 10% hornblende and 10% biotite. Grain sizes are variable ranging mostly between 2 and 5 mm. Occasionally, particular textures shown by this rock include zonation in plagioclase crystals and a consertal texture developed by quartz, alkali feldspar and plagioclase.

(2) Feldspar and rounded hornblende porphyry unit (FRHP)

This intrusive body intrudes the GRD and, at least on the A-A' cross-section, it has both a limited surface expression and a scarce occurrence along the drill core BRA003 (Fig. 2.2b). It shows an inequigranular, hypocrySTALLINE and porphyric texture and a leucocratic color index. The phenocrysts are hypidiomorphic and reach in average 35% of the rock volume. They correspond to two populations of hornblende grains, a rounded one (5 to 10 mm; Fig. 2.3b) and a tabular one (1 to 5 mm), reaching 10% of rock volume, 20% plagioclase (0.2 to 4 mm), and 5% of quartz and alkali feldspar both commonly of anhedral shapes (0.2 to 2 mm). The plagioclase crystals are usually zoned and show glomeroporphyric texture. In addition, scarce plagioclase and quartz crystals are fragmented and show reabsorption textures. The groundmass (~65% in volume) is composed by fine-grained (less than 0.1 mm) quartz and alkali feldspar, in the same proportion, showing felsitic texture and arranged in a homogeneous mosaic.

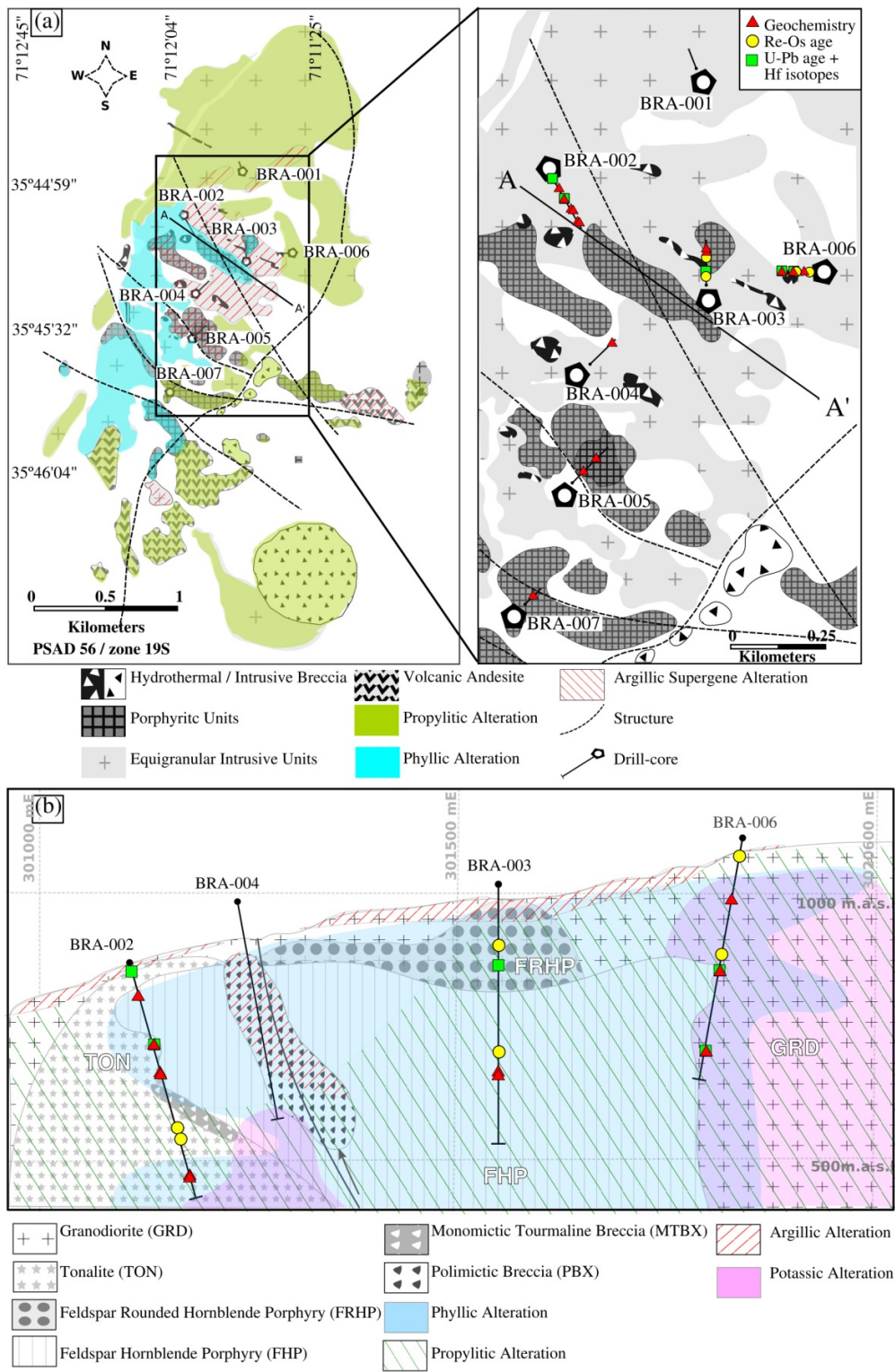


Figure 2.2 Local geology of the Brahma Prospect. The symbols (red triangles, yellow circles and green squares) show the location of all samples with geochemical and geochronological determinations. (a) Geologic map of the Brahma prospect according Burns et al. (2008). The map shows the location of 7 diamond drill cores and the section line A-A'. The map on the right shows a zoom of the central area of the map on the left. (b) Geologic cross section along the A-A' line (this study). The lithology and alteration is based on the mapping of the BRA-002, BRA-004, BRA-003 and BRA-006 drill cores.

(3) Tonalite unit (Ton)

This unit is cut by drill cores of the western sector of the study section and has no surficial expression (Fig. 2.2b). The TON is very similar to the GRD, yet it is distinguished because it is comparatively more leucocratic, shows slightly smaller grain sizes and contains scarce to non-alkali feldspar (Fig. 2.3c). The crystal grains are hypidiomorphic and occur in an isotropic fabric, however flow textures are locally developed in the contact with the FRHP. On average, this rock unit is composed by 60% plagioclase, 30% quartz, and 10% of the mafic phases biotite, hornblende and magnetite. Grain sizes are variable ranging mostly between 0.5 and 4 mm. Some plagioclases show zoned texture. Consertal texture between quartz and some plagioclase crystals it is also observed.

(4) Feldspar and hornblende porphyry unit (FHP)

This intrusive unit distributes at subsurface levels approximately in the center of the study area and is cutting all the units mentioned before (Fig. 2.2b). It is characterized by an inequigranular, hypocrystalline porphyric texture and it shows, in general, a homogenous and isotropic fabric and a leucocratic color index (Fig. 2.3d). Phenocrysts reach mainly between 1 and 4 mm in size and correspond in average to 35% plagioclase (2-8 mm), 15% hornblende (0.4 to 6 mm), and 5% of quartz and alkali feldspar (2-8 mm). The groundmass is composed mainly by a fine grained (<0.1 mm) assemblage of quartz and alkali feldspar (44%), and minor apatite and pyrite (<1%). Commonly, the plagioclase crystals show zonation and occur forming glomerocrysts in clusters of up to 5 mm. The latter feature is also observed in the FRHP but in this unit (PHF) is much more frequent. Occasionally, some plagioclase and quartz crystals are fragmented and show reabsorption texture.

(5) Hydrothermal breccias (MTBX, PBX)

In addition to intrusive units, at least two hydrothermal breccia bodies occur in the prospect. The first one distributes in the middle part of the BRA002 drill core, in the contact between the TON and FHP units (Fig. 2.2b). It corresponds to a monomictic clast-supported breccia, with sub-angular shaped TON fragments, cemented by rock-flour, sericite, quartz, tourmaline and disseminated pyrite (henceforth called MTBX: monomictic tourmaline breccia) (Fig. 2.3e). Fragments vary in size from 5 mm to 15 cm. The second breccia body has a broader expression in the study section and appears in most part of the BRA004 drill core, an area that also constitutes a fault zone (Fig. 2.2b). It corresponds to a polymictic clast-supported breccia with sub-angular shaped fragments of 5 mm up to 10 cm in size (henceforth called PBX: polymictic breccia; Fig. 2.3f-h). Due to pervasive alteration it is difficult to identify the protolith of the clasts present in this breccia body. However, at least the FHP, FRHP and GRD/TON fragments have been recognized in addition to fragments from an unidentified porphyry unit which could correspond to another intrusive unit associated to prospect (Fig. 2.3g, h). In general, the clasts present in this breccia body are cemented by rock-flour, quartz, clays, and disseminated pyrite. In contrast with the MTBX, the PBX body is highly permeable and its porosity is filled by abundant calcite, anhydrite, and gypsum, responsible for its friable condition. The latter characteristic progressively diminishes towards the deeper parts where the PBX becomes more competent and the size of its clasts become larger (up to 15 cm; Fig. 2.3h).

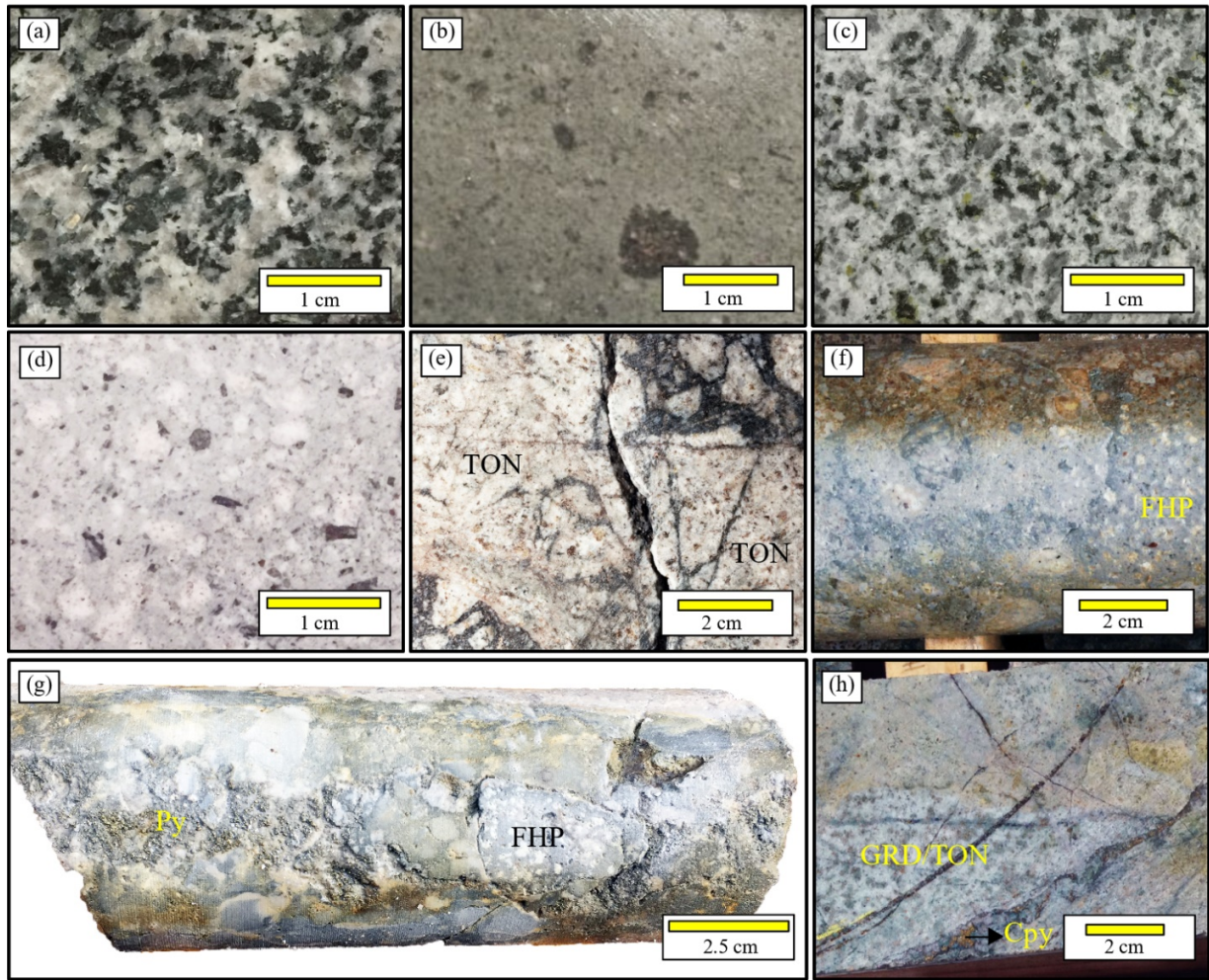


Figure 2.3 Photographs of each lithologic unit recognized in the studied area (Fig. 2.2b). (a) Granodiorite (GRD). (b) Feldspar rounded hornblende porphyry (FRHP). (c) Tonalite (TON). (d) Feldspar hornblende porphyry (FHP). (e) Monomictic tourmaline breccia (MTBX), with clasts of TON with a pervasive phyllic alteration. (f) Polymictic breccia (PBX). (g) PBX with clasts of FHP and other undetermined intrusive units. The breccia is strongly altered by phyllic and argillic alterations. It also shows abundant clays, carbonates, rock flour and pyrite mineralization in the matrix. (g) PBX with chlorite-sericite alteration. Comparatively, it shows larger clasts and a more competent aspect.

2.4.2 Alteration and mineralization

The existing exploration technical reports indicate that alteration and mineralization at the Brahma prospect are similar to those present in porphyry Cu deposits worldwide (Burns et al., 2008; Sanchez and Motta, 2013). The early hydrothermal stages are associated to a potassic alteration event (quartz-K-feldspar) with scarce mineralization, while most of the hypogene mineralization intercepted by the drill cores is associated mainly with a phyllic alteration (chlorite-sericite and quartz-sericite-illite assemblages) and a propylitic alteration (chlorite-epidote) to a lesser extent. Mineralization as evidenced in drill cores occurs disseminated and in veins and corresponds to pyrite, sphalerite, chalcopyrite, molybdenite, and minor galena, bornite and secondary chalcocite. The intercepted Cu mineralization is low grade, the best intercepts with

average grades of 0.24% Cu (8 m; BRA001 drill core), 0.21% Cu (14 m; BRA003 drill core), 0.14% Cu (184 m; BRA003 drill core) and 0.19% Cu (32 m; BRA004 drill core), however, some shorter intersections reach 0.5 to 1% Cu (Burns et al., 2008). Regarding Mo mineralization, the best intercepts have average grades of 0.02% (20 m; BRA006 drill core) and 0.01% (46 m, 16 m and 14 m; BRA002, BRA003 and BRA001 drill cores respectively), reaching values of up to 0.07 to 0.1% in shorter intersections (Burns et al., 2008). In the present study, a relative temporality of alteration and its associated mineralization events was determined based on both the mapping of alteration from drill cores (detailed below) and a description and classification of the veins (detailed in Table 2.1 and Fig. 2.4, 2.5).

Vein Type	Mineralogy	Early	Late	Supergene
I	Bt	██████		
II	Qz-K-spar±(Py-Cpy-Mo)	██████		
III	Qz-Anh-Gyp-Py		██████	
IV	Qz-Anh-Gyp-Py±Sph±Tour		██████	
V	Mo-Gyp±Py		██████	
VI	Qz-Gyp-Anh-Chl-Py±Cpy		██████	
VII	Mo-Qz-Ser		██████	
VIII	Qz-Py-Bn-Cc±(Gn-Sph-Cpy)		██████	-----
IX	Chl-Ep-Py±(Cpy-Mo)		██████	
X	Py-Qz±Sph		██████	-

Figure 2.4 Summary of vein paragenesis in the Brahma prospect. The relative temporality of each vein was determined by crosscut relations. Veins type I and II correspond to early mineralization, vein type III corresponds to a transitional mineralization stage and veins type IV to X are related to late stage mineralization. Veins type VIII and X show supergene sulfide replacement. Anh: anhydrite; Bn: bornite; Cc: chalcocite; Chl: chlorite; Cpy: chalcopyrite; Ep: epidote; Gn: galena; Gyp: gypsum; K-spar: K-feldspar; Mo: molybdenite; Py: pyrite; Qz: quartz; Sph: sphalerite; Tour: tourmaline.

(1) Potassic Alteration

This alteration is very scarce within the studied area and was mainly intercepted by the BRA006 drill core (Fig. 2.2b) and the last meters of the BRA002 and BRA004 drill cores. The potassic alteration is overprinted by a pervasive phyllic alteration so the only evidence of it is the presence of early veins. It is characterized by a slight biotitization and the occurrence of thin veins of chloritized biotite (type I) cut by thick quartz±K-feldspar veinlets (type II) (Table 2.1; Fig. 2.5a, b). Type II veins show occasional presence of chalcopyrite and molybdenite patches. Overall the abundance of the copper and molybdenum mineralization associated with this early alteration stage is scarce.

(2) Phyllic alteration

This alteration type is by far the most abundant and well developed in the prospect zone, both at surface and in depth (Fig. 2.2b). It is characterized by mineral assemblages of chlorite-sericite-pyrite in the deeper zones which grades into sericite-quartz±illite at shallower zones. Both assemblages occur either as a selective replacement of feldspar and mafic phases or pervasively altering the whole rock. There are thick veins of molybdenite-gypsum and minor pyrite (type V) (Table 2.1; Fig. 2.5e) and veinlets of quartz-gypsum-anhydrite-pyrite±chlorite±chalcopyrite with chlorite and sericite haloes (type III and VI) (Table 2.1; Fig. 2.5c, f), all of them associated with the chlorite-sericite-pyrite assemblage. The chlorite-sericite-pyrite alteration is also present in the deeper and most competent portions of the polymictic breccia body (Fig. 2.3h), thus reflecting higher temperature conditions during formation.

Associated with the sericite-quartz±illite assemblage, there are thick veins composed of quartz-anhydrite-gypsum-pyrite -minor sphalerite and tourmaline (type IV) (Table 2.1; Fig. 2.5d) and thin veinlets of molybdenite-quartz and sericite (type VII) (Table 2.1; Fig. 2.5g). The monomictic breccia body has a pervasive sericite-quartz±illite alteration and shows abundant disseminated pyrite mineralization with a slight replacement of chalcopyrite.

(3) Propylitic retrograde alteration

This alteration is mainly intercepted by de BRA006 drill core and mostly affects the GRD (Fig. 2.2b). Its occurrence is slightly pervasive and it is characterized by epidote alteration of plagioclase and a selective substitution of primary biotite and hornblende by pyrite and magnetite. In addition, this alteration is also represented in chlorite-epidote veinlets containing molybdenite-chalcopyrite and pyrite patches (type IX) (Table 2.1; Fig. 2.5i). These veins cut all the alteration assemblages described before and represent the retrograde cooling phase of the hydrothermal system.

(4) Argillic alteration

Supergene argillic alteration is associated with the leached cap and mainly comprises the first meters from surface down, as described in the A-A' cross-section. Its development at depth depends on the permeability of the host rock which is in turn directly related to the degree of the previous alteration. In BRA003 and BRA004 drill cores the rock has a pervasive phyllic alteration and the leached cap reaches between 18 and 40 m from surface, while in BRA002 and BRA006 drill cores the leached cap reaches between 12 and 18 m (Fig. 2.2b) since the rock is less altered and more competent. This alteration is characterized by abundant clays, limonite and pyrite box works. Jarosite is dominant at surface, giving an orange appearance to the rock. In the deepest areas, hematite and goethite associated with fractures predominate.

Highly pervasive hypogene argillic alteration is characterized by kaolinite-illite and hematite assemblage and affects the polymictic breccia body (Fig 2.2b). Associated to this alteration, there is abundant pyrite mineralization which occurs both disseminated (in clasts and matrix) and massive in veins (type X) (Table 2.1; Fig. 2.5j). The pyrite is partially to totally replaced by sphalerite (Fig. 2.5j, k) and galena in some areas.

(5) Supergene mineralization

This type of mineralization is scarce within the profile depicted in the A-A' cross-section. It is characterized by the presence of secondary enrichment Cu sulfides, mainly chalcocite partially replacing bornite, chalcopyrite and pyrite in a lesser degree (Fig. 2.5h, l). There are also traces of covellite replacing chalcocite and bornite micro-inclusions in pyrite. In general, secondary enrichment is irregular, occurs through fractures and is associated with areas of greater permeability, thus its presence seems to be null in the GRD and comparatively more abundant in fault zones, highly altered rocks, and breccia units. The best development of supergene mineralization is represented in the type VIII veinlets which are composed of quartz-sericite-pyrite-galena-sphalerite and minor chalcopyrite (Table 2.1; Fig. 2.5h). The latter sulfides present a medium degree of bornite, secondary chalcocite and minor covellite replacement. These veins cut the monomictic tourmaline breccia body, in a highly fragmented area that most probably corresponds to a fault zone.

Table 2.1 Summary of the main vein types identified in this study in the Brahma prospect and their characteristics.

Vein type	Mineralogy	Halo mineralogy	Shape and dimensions	Alteration
I	Bt	Without halo	Thin veins, of up to 0.25 cm in width and irregular shape.	Potassic
II	Qz-K-spar ±(Py-Cpy-Mo)	K-spar±Ab	Straight veins with fairly regular borders and widths of 1 to 3 cm. The halo (sometimes absent) is usually thin (1mm) and of irregular shape.	Potassic
III	Qz-Anh-Gyp-Py	Chl-Py± grey Ser	Slightly sinuous to straight veins with fairly regular borders and widths of 0.5 to 1 cm. Halo of irregular shape of 0.5 to 1.5 cm in width and dark appearance. The pyrite usually forms a straight but discontinuous suture.	Phyllic (Chl-Ser-Py)
IV	Qz-Anh-Gyp-Py±Sph±Tour	Ser-Py±Tour±clays	Straight veins with irregular to regular borders and widths of 0.5 to 3 cm. Halo of irregular shape of up to 2 cm in width. Some pyrites are partially replaced by sphalerite.	Phyllic (Ser-Qz±Ill)
V	Mo-Gyp±Py	Ser-Qz±Chl	Straight massive molybdenite veins with regular borders and widths of 0.5 to 1 cm. Halo of regular shape of up to 2 cm in width. These veins show micro-brecciation textures of the host rock in some areas.	Phyllic (Chl-Ser-Py)
VI	Qz-Gyp-Anh-Chl-Py±Cpy	Chl-Ser	Straight veins with regular to irregular borders and widths of 0.2 to 2.5 cm. Halo of irregular shape of up to 0.3 cm in width. The sulfides form a straight and continuous suture at the center of the vein.	Phyllic (Chl-Ser-Py)
VII	Mo-Qz-Ser	Without halo	Thin veins, of up to 0.15 cm in width and irregular shape.	Pyillic (Ser-Qz±Ill)
VIII	Qz-Py-Bn-Cc±(Gn-Sph-Cpy)	Ser+clays	Straight veins with regular border of about 0.7 cm in width. Halo of irregular shape of up to 0.5 cm in width. The pyrite is partial to totally replaced by bornite, galena and sphalerite, while the bornite is partially replaced by chalcocite. All the sulfides are forming a straight and continuous suture.	Pyillic (Ser-Qz±Ill)
IX	Chl-Ep-Py±(Cpy-Mo)	Chl-Ser	Straight thin veins, of about 0.4 cm in width and regular borders. Halo of irregular shape of up to 0.6 cm in width. The sulfides are disseminated.	Propylitic retrograde
X	Py-Qz±Sph	Clays	Massive pyrite veins of straight shape and regular border. About 0.5 cm in width. The pyrite is partially replaced by sphalerite in some areas.	Argillic
<p>OBS: - Mineral abbreviations as follows. Anh: anhydrite; Bn: bornite; Cc: chalcocite; Chl: chlorite; Cpy: chalcopyrite; Ep: epidote; Gn: galena; Gyp: gypsum; Ill: illite; K-spar: K-feldspar; Mo: molybdenite; Py: pyrite; Qz: quartz; Sph: sphalerite; Tour: tourmaline.</p>				

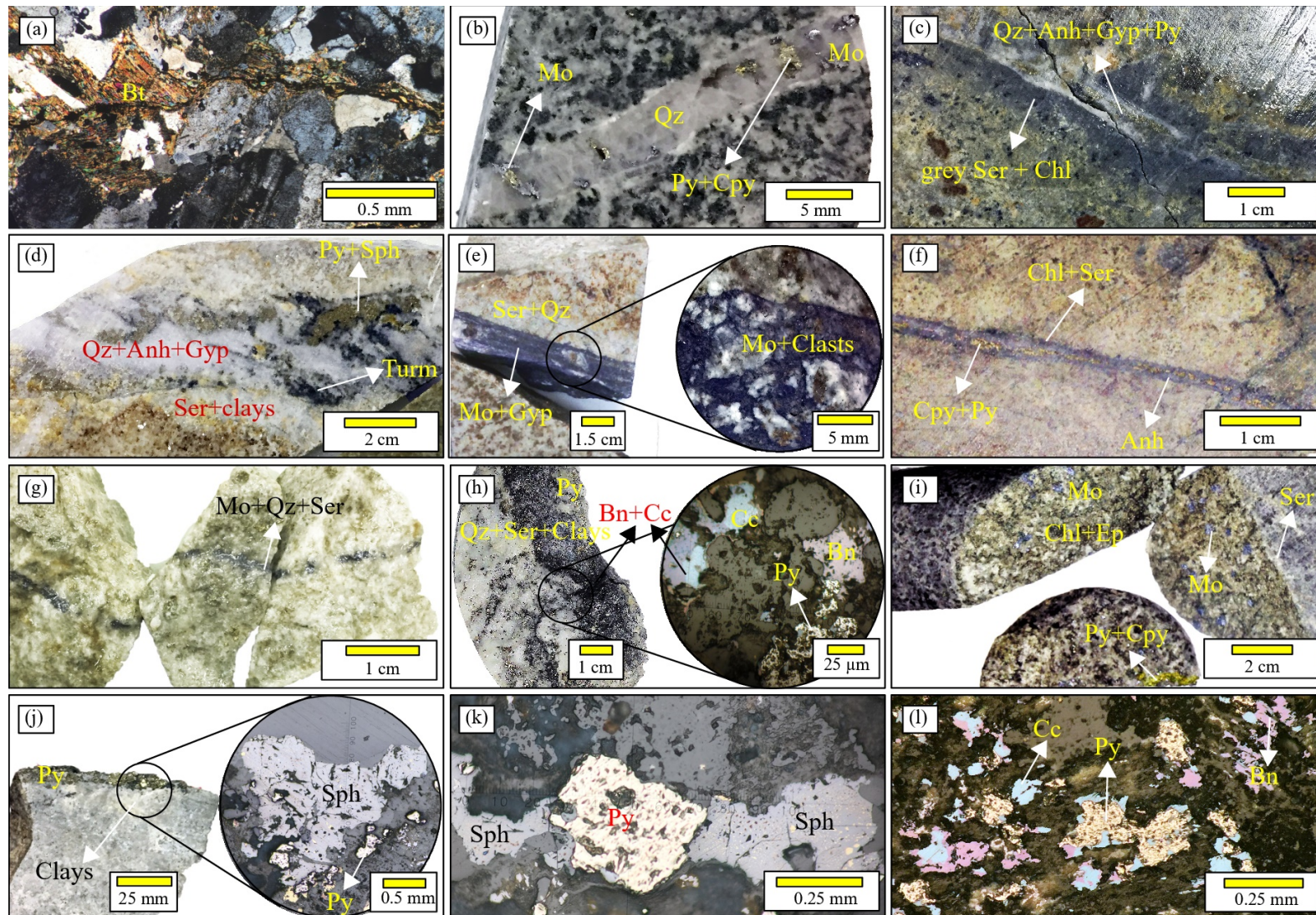


Figure 2.5 Photographs of each vein type recognized in the Brahma prospect. Mineral abbreviations are the same as in Fig. 2.4. (a) Early mineral biotite vein (type I) showing irregular borders. Cross polarized light photomicrograph. (b) Early mineral granular quartz vein (type II) with molybdenite, pyrite and chalcocite mineralization. (c) Vein type III showing a semi continuous pyrite suture, and irregular grey sericite+chlorite halo with a dark aspect. (d) Thick vein type IV with irregular halo of sericite and clays. (e) Thick massive molybdenite and minor gypsum vein (type V; left) showing regular borders and microbrecciation of the host rock in some areas (right). (f) Vein type VI showing a continue chalcocite and pyrite suture. (g) Thin molybdenite vein (type VII). (h) Quartz-sulphide vein (left) with replacement of secondary chalcocite (right; Reflected light photomicrograph in the same sample). (i) Fractures filled with epidote, chlorite and patches of molybdenite, pyrite and chalcocite (vein type IX). Thin sericite halo. (j) Vein type X. Fracture filled with subhedral pyrite (left) which shows partial to total replacement of sphalerite (right; Reflected light photomicrograph in the same sample). (k) Reflected light photomicrograph of a euhedral pyrite partially replaced by sphalerite. (l) Reflected light photomicrograph of disseminated pyrite partial to totally replaced by bornite and chalcocite.

2.4.3 Geochronology

2.4.3.1 Primary mineral determinations: U-Pb in zircon crystals

A total of 5 U-Pb geochronological determinations were performed in primary zircon crystals from the main intrusive units identified in the Brahma prospect (Table 2, Anexo A: item 1). Analyzed samples distribute along the full section studied in this work and were collected from different levels of the drill cores BRA002, BRA003 and BRA006 (Fig. 2.2). One determination was performed for each unit except for the unit TON for which two samples were analyzed. This was done to check if the slight variations in mineralogical and textural features observed along the drill core BRA002 corresponded to the same unit.

The oldest primary ages obtained are recorded by the units GRD and the FRHP (Table 2). For these, coherent populations with nearly unimodal distributions indicate weighted average ages of respectively 14.6 ± 0.4 Ma (MSWD = 2.2; all errors reported at 2σ) and 14.1 ± 0.2 Ma (MSWD = 1.2; Fig. 2.6). In addition, results for both units also show scarce ages of around 17 Ma (Fig. 2.6) which records the presence of older inherited material. The slightly older age of the GRD respect to that of the FRHP is consistent with the cross-cut relations observed in the Brahma prospect, where the former hosts all the later intrusions identified. However, ages obtained for both units are indistinguishable within error and thus this indicates that they correspond to mostly coeval intrusive pulses. Following in age, U-Pb determinations were performed on two samples of the TON (Table 2). For one sample (B02-09) an apparent bimodal distribution is described by the full data range obtained and this can be decomposed in two unimodal age populations with weighted average ages of 16.4 ± 0.5 Ma (MSWD=0.66) and 13.4 ± 0.4 Ma (MSWD=0.99; Fig. 2.6). For the second sample (B02_159) the full data range obtained describes an apparently mixed distribution which can be also decomposed in two unimodal age distributions with weighted averages of 18.1 ± 1.1 Ma (MSWD=2.3) and 13.8 ± 0.5 Ma (MSWD=1.5; Fig. 2.6). Two major observations must be highlighted from these results, first that the young and old age populations obtained in both samples agree within error and second that the old age populations coincide with the ~17 Ma inherited material recorded also by the units GRD and FRHP (Fig. 2.6). The youngest unit analyzed corresponds to the FHP, for which a coherent age population with nearly unimodal distribution indicates a weighted average of 9.3 ± 0.2 Ma (MSWD = 1.4; Fig. 2.6).

In summary, the results obtained from zircon U-Pb determinations indicate ages between ~9-14 Ma for the different intrusive units and they also record the presence of an inherited component of around ~17 Ma (Fig. 2.6). This assigns the magmatism present in the Brahma prospect to the middle Miocene which is consistent with the presence in this region of larger intrusive units such as the El Melado Batholith (Fig. 2.1b). The latter crops out ~2.6 km immediately to the east of the prospect location and ages between ~23.8 and 14.2 Ma have been reported for its Cenozoic portion (Drake et al., 1982a; Nelson et al., 1999; Spikings et al., 2008; Cabezas et al., 2018). In addition, given the short time difference between the oldest units present in the prospect and the age of the inherited material, this region seems to have hosted fairly continuous magmatism at least between 17 to 9 Ma.

2.4.3.2 Primary mineralization determinations: Re-Os in molybdenite

A total of 6 Re-Os geochronological analyses were performed on molybdenite from each type of molybdenite bearing veins (II, V, VII and IX; Table 3) and from disseminated mineralization. In this way, early to late primary mineralization was considered for age determinations. The samples were collected from the drill cores located within the cross-section A-A' (BRA002, BRA003, and BRA006; Fig. 2.2b). Unlike other sulfides, molybdenite does not incorporate initial ^{187}Os in its structure so a model age can be calculated from a single sample with the equation: $t = (1/\lambda) \ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})$, where λ is the decay constant of ^{187}Re , $1.666 \times 10^{-11} \pm 0.31 \text{ year}^{-1}$ (Smoliar et al., 1996). The uncertainties for the ages were calculated using error propagation, taking in consideration errors from spike calibrations, the uncertainty in the Re decay constant, and analytical errors. Blank corrections are insignificant for molybdenite.

Six Re-Os molybdenite age determinations gave a restricted range of dates from approximately 14 to 10 Ma, and these ages can be grouped in three: ~14, ~12 and ~10 Ma (Table 3). They correspond respectively to the following results: (i) 14.0 ± 0.07 and 13.9 ± 0.07 for vein type II and disseminated mineralization respectively, (ii) 12.4 ± 0.07 and 12.1 ± 0.07 for veins type V, and (iv) 10.14 ± 0.06 and 9.99 ± 0.05 for molybdenite hosted by veins type IX and VII. Stein et al. (2001) and Selby and Creaser (2004) point out that Re-Os ages obtained by Carius tube dissolution and NTIMS analysis are highly reproducible and successful dating depends on proper preparation of the mineral, specifically related to the grain size and amount of sample analyzed (aliquant). Molybdenite from samples B06038-1, B03310-2, B06221-3 (veins type II, VII and IX respectively; Table 3) was collected from thin veins which widths vary from 1.5 mm to 4 mm and grain sizes from 0.25 mm to 1.5 mm. Molybdenite from sample B03111-5 was collected from disseminated mineralization, and the grain size does not exceed 3 mm. On the other hand, molybdenite from samples B02315-7 and B02334-2 were collected from thick veins (10 to 20 mm of width; vein type V; Table. 3); however, the grain size does not exceed 1 mm. According to Selby and Creaser (2004), for coarse grain molybdenite (3 mm to 1.5 cm and larger) a greater amount of sample aliquant (> 0.04 g) is needed to avoid Re- ^{187}Os decoupling and to obtain reproducible ages, while for fine grain molybdenite reproducible ages can be determined from samples with aliquant as little as 0.001 g. Therefore, even though all the samples could be considered as fine-grained, an aliquant of 0.05 g (for each sample) was measured in order to obtain precise and accurate ages. In addition to the above mentioned observations, all the Re-Os ages are not only relatively well correlated with the U-Pb age determinations, they are also geologically coherent in terms of crosscut relationships of the different types of veins (Fig. 2.4). The early potassic sample (type II vein) records the oldest mineralization age (~14 Ma), and the propylitic retrograde sample (type IX vein; which cuts all the other veins analyzed) records the youngest (~10 Ma).

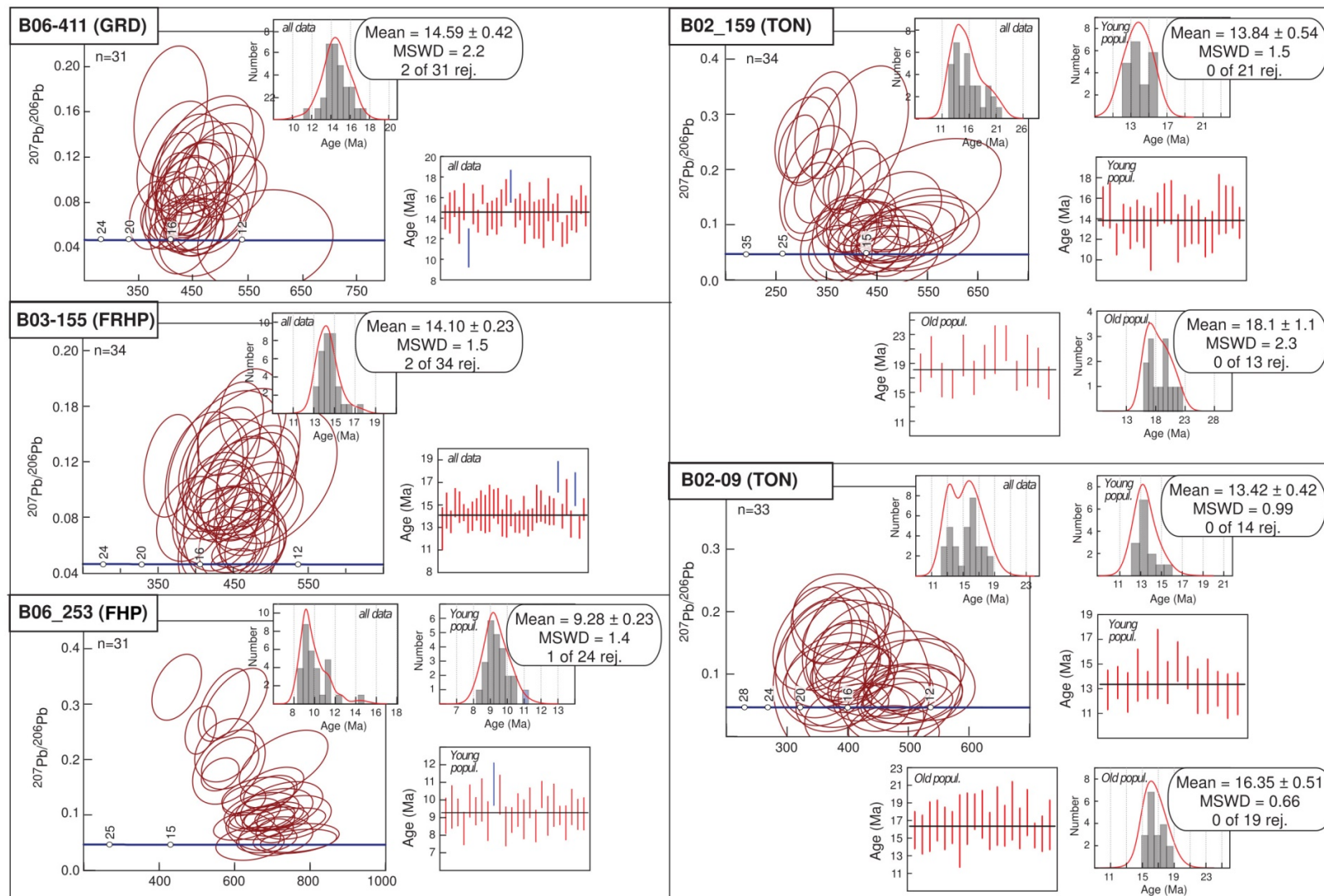


Figure 2.6 U-Pb age determinations in primary zircons of igneous units from the Brahma prospect. Tera-Wasserburg plots, frequency histograms, probability density plots and weighted average diagrams are presented. In all diagrams errors are considered at 2σ level; rej.: rejected; popul.: population.

Table 2.2 Summary of principal characteristics of the main lithological units identified in this study in the Brahma prospect.

Lithologic Unit	Age $\pm 2\sigma$ (Ma) [MSWD]	Cross cut relations	Spatial distribution	Main components	Alteration and mineralization
Granodiorite (GRD)	14.6 \pm 0.4 [2.2]	Hosts all the later units in the prospect.	Wide extension (about 70% of the exposed surface). Mostly intercepted by the BRA006 drill core.	Plg (45%), Qz (20%), K-spar (15%), Hbl (10%), Bt (10%), Mgt (<1%).	Weak early potassic alteration (represented by type I and II veins) without economic mineralization. Propylitic retrograde alteration superimposed. Py, Cpy and Mo disseminated and associated to IX veins.
Feldspar and Rounded Hornblende Porphyry (FRHP)	14.1 \pm 0.2 [1.2]	Intruding the GRD.	Little surficial expression. Intercepted in the first 200 meters of the BRA003 drill core.	Phenocrysts dominated by rounded and tabular Hbl (10%), Plg (20%), Qz and K-spar (5%).	Pervasive phyllic alteration with a weak propylitic retrograde alteration superimposed. In some areas shows brecciation texture. Py with minor Cpy and Mo disseminated and filling fractures.
Tonalite (TON)	13.4 \pm 0.4 [0.99] 13.8 \pm 0.5 [1.5]	Intruding the GRD and FRHP.	Little to no surficial expression. Intercepted mainly in the last 176 m of the BRA002 drill core.	Plg (60%), Qz (30%). The mafic phases (10%) are Bt, Hbl and Mgt.	Weak phyllic alteration (Ser-Qz \pm Ill \pm Chl). Abundant Py and Sph with minor Cpy. This mineralization occur both disseminated and associated to type IV veins. Abundant Mo disseminated and associated to thick type V veins with micro-brecciation characteristics.
Feldspar and hornblende porphyry (FHP)	9.3 \pm 0.2 [1.4]	Intruding all the previous units.	Wide distribution at subsurface levels approximately in the center of the cross section A-A'.	Phenocrysts dominated by Plg (35%), Hbl (15%), Qz and K-spar (5% in total).	Due to its wide extension in the studied cross-section, this unit shows low to high degree of alteration. In deeper areas a Chl-Ser phyllic assemblage predominates, whereas in micro brecciated and in shallower areas a Ser-Qz \pm Ill phyllic assemblage predominates. Abundant Py and lesser Cpy both disseminated and filling fractures. Strong Sph mineralization mostly associated to brecciated zones. This unit shows a better development of Cu mineralization compared to other ones. Occasional Mo associated to type VII veins.
Monomictic tourmaline breccia (MTBX)	-	In the contact between the TON and the PFH units.	Intercepted at the middle parts of the BRA002 drill core.	Angular to sub angular shaped TON clasts cemented by Ser, Qz and Tour.	Clasts show pervasive Ser-Qz \pm Ill phyllic alteration. Disseminated Py (in clasts and matrix) mineralization with minor Cpy, Bn, Sph and Gn. This mineralization is also associated to type VIII veins which show a highly secondary enrichment replacement.
Polymictic breccia (PBX)	-	Intruding the FHP.	Intercepted by most of the BRA004 drill core.	Sub-angular shaped PFH, minor FRHP, GRD, TON and other unidentified porphyry clasts. Fragments cemented by rock-flour, Qz and clays.	Highly pervasive argillic alteration (Kaol-Ill-Hmt). Porosities filled by abundant Calc, Anh and Gyp. Associated to this alteration there is abundant disseminated and vein related (type X) Py mineralization, partially replaced by abundant Sph, Gn and Cc in traces. In deeper parts of the body a Chl-Ser-Py phyllic alteration with type VI veins predominates.

OBS: -Listed ages correspond to zircon U-Pb determinations from this work.

-Mineral abbreviations as follows. Anh: anhydrite; Bt: biotite; Bn: bornite; Calc: calcite; Cc: chalcocite; Chl: chlorite; Cpy: chalcopyrite; Ep: epidote; Gn: galena; Gyp: gypsum; Hbl: hornblende; Hmt: hematite; Ill: illite; K-spar: K feldspar; Kaol: kaolinite; Mo: molybdenite; Plg: plagioclase; Py: pyrite; Qz: quartz; Sph: sphalerite; Tour: tourmaline.

Table 2.3 Results from Re-Os analyses in molybdenite from the Brahma prospect.

Sample	Vein type	Alteration	Wall rock	¹⁸⁷ Re (ppm)	Re total (ppm)	¹⁸⁷ Os (ppb)	Age ± 2σ (Ma)
B06038-1	II	Potassic	GRD	485.15	771.69	112.80	14.00 ±0.07
B03111-5	Disseminated	Phyllic	FRHP	147.97	235.38	33.89	13.90 ±0.07
B02315-7	V	Phyllic (Chl-Ser-Py)	TON	33.38	53.10	6.64	12.40 ±0.07
B02334-2	V	Phyllic (Chl-Ser-Py)	TON	53.41	84.95	10.30	12.10 ±0.07
B06221-3	IX	Propylitic retrograde	GRD	1059.81	1685.76	179.18	10.14 ±0.06
B03310-2	VII	Phyllic (Ser-Qz±Ill)	FHP	189.32	301.15	31.03	9.99 ±0.05

2.4.4 Geochemistry of igneous units

Whole rock geochemical analyses were performed in 15 samples from the 4 main intrusive units of the Brahma prospect (Table 4) distributed along the BRA003, BRA004, BRA005, BRA006 and BRA007 drill cores (Fig. 2.2). Analyzed samples were selected after a petrographic study by standard optical microscopic techniques and they correspond to the least altered specimens. The latter is partly evidenced by LOI values <3.5% for 12 samples, while the remaining 3 show values of this parameter between 5.0% and 6.3% (Table 4). It has to be noted that despite the incipient alteration primary geochemical characteristics of the analyzed samples do not seem to have been altered. This is observed in the display of coherent patterns in different geochemical variation diagrams, both by the Brahma prospect samples themselves and between the latter and other Cenozoic igneous units present in the nearby localities (see the following). For the 5 samples with U-Pb geochronological determinations, Hf isotopic composition was also determined in-situ in the same zircon crystals previously analyzed (Anexo A: item 2). In the different geochemical diagrams presented in the following, studied samples from the Brahma prospect have been plotted along with other relevant igneous units for comparison. From nearby localities to the Brahma prospect, igneous rocks from Cenozoic stratified and intrusive units of ~24-17 Ma have been considered as representative of the regional background magmatism. These include (i) part of the Abanico Formation (*sensu* González and Vergara, 1962) that crops out nearly 20 km to the east (Rojas del Castillo, 2018), (ii) the upper section of the Colbún Formation cropping out nearly 15 km to the west (Vergara et al., 1999) and (iii) the Cenozoic portion of the El Melado Batholith (Rojas del Castillo, 2018). In addition, as relevant units of the Miocene-Pliocene metallogenic belt, the mineralized areas hosting the deposits of Los Pelambres (31°43'S) and El Teniente (34°04'S) have also been considered (Fig. 2.1a). For both areas, this includes the analyses reported for (i) the regional Miocene background magmatism (Kay et al., 2005; Bergoeing, 2016), (ii) the pre-mineralization stocks (Stern et al., 2011; Bergoeing, 2016) and (iii) the syn-mineralization stocks (Reich et al., 2003; Stern et al., 2011; Bergoeing, 2016).

Analyzed samples from the Brahma prospect cover a mostly continuous range in SiO₂ contents between ~61% and 70%, excepting for one anomalous sample of the GRD with a value

for this parameter of 55% (Fig. 2.7a). According to the plutonic TAS diagram (not shown), the former samples correspond to diorites and granodiorites and the latter to a gabbrodiorite. In addition, differences in composition are observed between units respect to silica contents, with most samples of the GRD and FRHP showing lower contents of this parameter (~61-64%) than the TON and FHP (66-69%; Table 4). According to different criteria, the samples show a sub-alkaline character with calc-alkaline affinities (e.g. Fig. 2.7a, b). In Harker variation diagrams these display collinear patterns for many elements, in particular in major elements basis (e.g. Fig. 2.7a, c), but subtle differences emerge between the equigranular (GRD, TON) and the porphyritic (FHP, FRHP) units. While covering a similar silica content, the latter show for numerous elements a more enriched/evolved character, as seen for example in the lower contents of elements such as MgO (e.g. Fig. 2.7c), Sc, V, Cr and Co. Compared against the background magmatism from nearby localities, in a whole the samples from the Brahma prospect display concordant patterns for the majority of the parameters previously discussed (e.g. Fig. 2.7) excepting for more marked calc-alkaline affinities (e.g. Fig. 2.7b).

In terms of REE (*rare earth elements*) composition all studied samples show an enriched signature, ranging between 2 and 60 times the chondritic value, with a preferential enrichment of LREE (*light REE*) over HREE (*heavy REE*; Fig. 2.8a). Notoriously, in the chondrite normalized diagram the studied units from the Brahma prospect configure two marked groups as it was previously noted for other geochemical parameters. This is seen in a more fractionated nature of the porphyritic units (FHP, FRHP) respect to the equigranular ones (GRD, TON), which results from lower HREE contents of the former at similar LREE contents of both groups (Fig. 2.8a). Within each group samples show fairly subparallel patterns and Eu anomalies are negligible (Fig. 2.8a). In N-MORB normalized multielement spider diagrams (Fig. 2.8b), studied samples show the typical characteristics of arc signatures, as a selective enrichment of LILE (*large ion lithophile elements*) over HFSE (*high field strength elements*) along with a marked Nb-Ta trough. Compared against the background and local magmatism, two main observations for the parameters described can be highlighted for the units of the Brahma prospect: (i) their higher degree of fractionation which also results from mostly lower HREE contents (Fig. 2.8a) and (ii) their apparently less enriched nature as seen from the lower contents of numerous HFSE elements they display at similar silica contents (Th, Nb, Ta, Ce, P₂O₅, Zr, Hf, Sm, Y, Yb; Fig. 2.8b). In terms of Hf isotopic composition studied units reveal juvenile signatures, with $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values between +8.6 and +11.2, and they also display a slight tendency towards lower values with decreasing age (Fig. 8d).

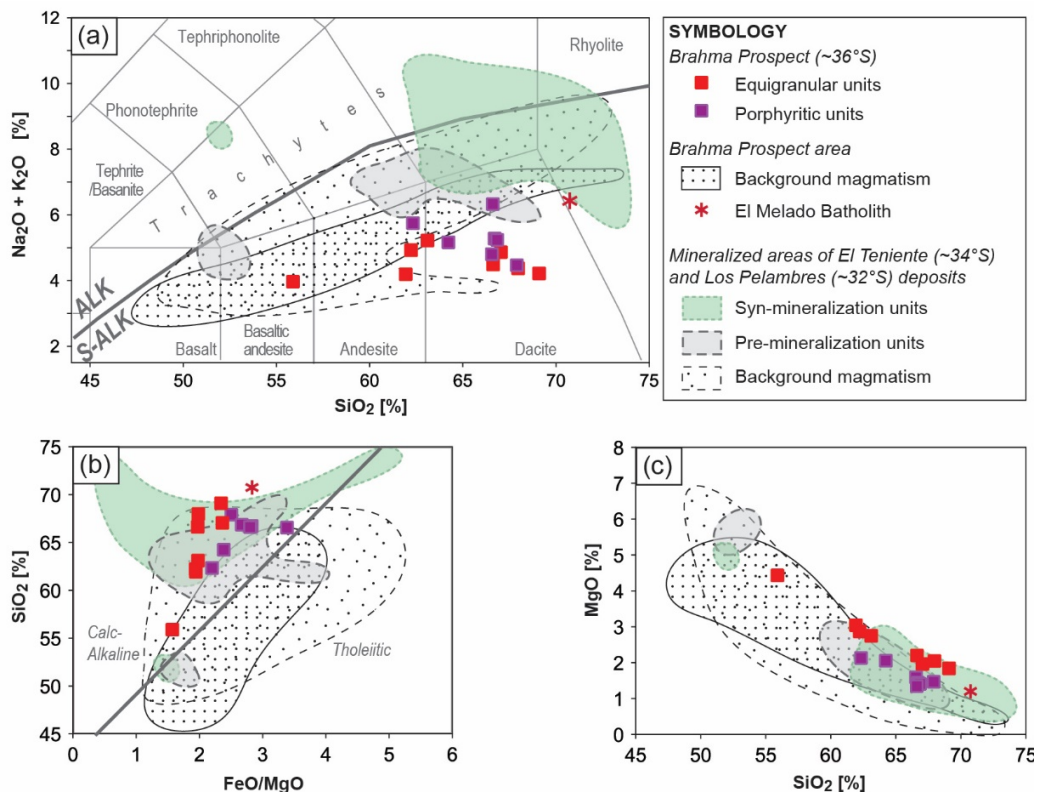


Figure 2.7 General compositional features, in terms of major element data, of the main intrusive units of the Brahma prospect. Shown diagrams correspond to: (a) TAS, (b) %SiO₂ vs. FeO/MgO ratio and (c) MgO vs. %SiO₂. In (a) and (b) the magmatic series subdivisions are respectively after Irvine and Baragar (1971; ALK: alkaline, S-ALK: subalkaline) and Miyashiro (1974). In all diagrams the fields defined by other relevant magmatic units from central Chile have been included for comparison. These correspond to the Miocene igneous units representing: (i) the background magmatism from the nearby areas of the Brahma prospect (~36°S; Vergara et al., 1999; Rojas del Castillo, 2018), and (ii) the background, pre-mineralization and syn-mineralization magmatism from the areas of El Teniente (~34°S; Kay et al., 2005; Stern et al., 2011) and Los Pelambres (~32°S; Reich et al., 2003; Bergoeing, 2016) deposits.

Igneous units from the Brahma prospect show several geochemical characteristics that indicate adakitic-like signatures, a feature widely recognized in intrusives related to mineralization in porphyry copper deposits (e.g. Kay and Mpodozis, 2001; Oyarzún et al., 2001; Reich et al., 2003; Kay et al., 2005; Stern et al., 2011; Perelló et al., 2012). This is seen in discriminating diagrams of La/Yb vs. Yb and Sr/Y vs. Y where most samples plot in the adakite-like rocks field (Fig. 2.8 e, f). This signature is much more pronounced for the porphyritic units (FHP, FRHP) than for the equigranular ones (GRD, TON), in accordance to the different patterns both groups display in normalized REE diagrams (Fig. 2.8a). In addition, altogether the intrusive units of the Brahma prospect separate clearly from the background igneous units of the nearby localities and the whole pattern is analogous to what is seen in the mineralized areas of the Los Pelambres and El Teniente deposits (Fig. 2.8e, f). However, the studied samples from the Brahma prospect do not reach the extremely high La/Yb and Sr/Y ratios documented for mineralized units from the latter two areas. Remarkable features are also observed comparatively in REE patterns displayed by all these units. The equigranular units from the Brahma prospect (GRD, TON) are similar to those of the pre-mineralization intrusives from the Los Pelambres and El Teniente deposits (Fig. 2.8c). In turn, patterns displayed by porphyritic units from the former (FHP, FRHP) are similar to those of syn-mineralization units from the latter areas (Fig. 2.8c).

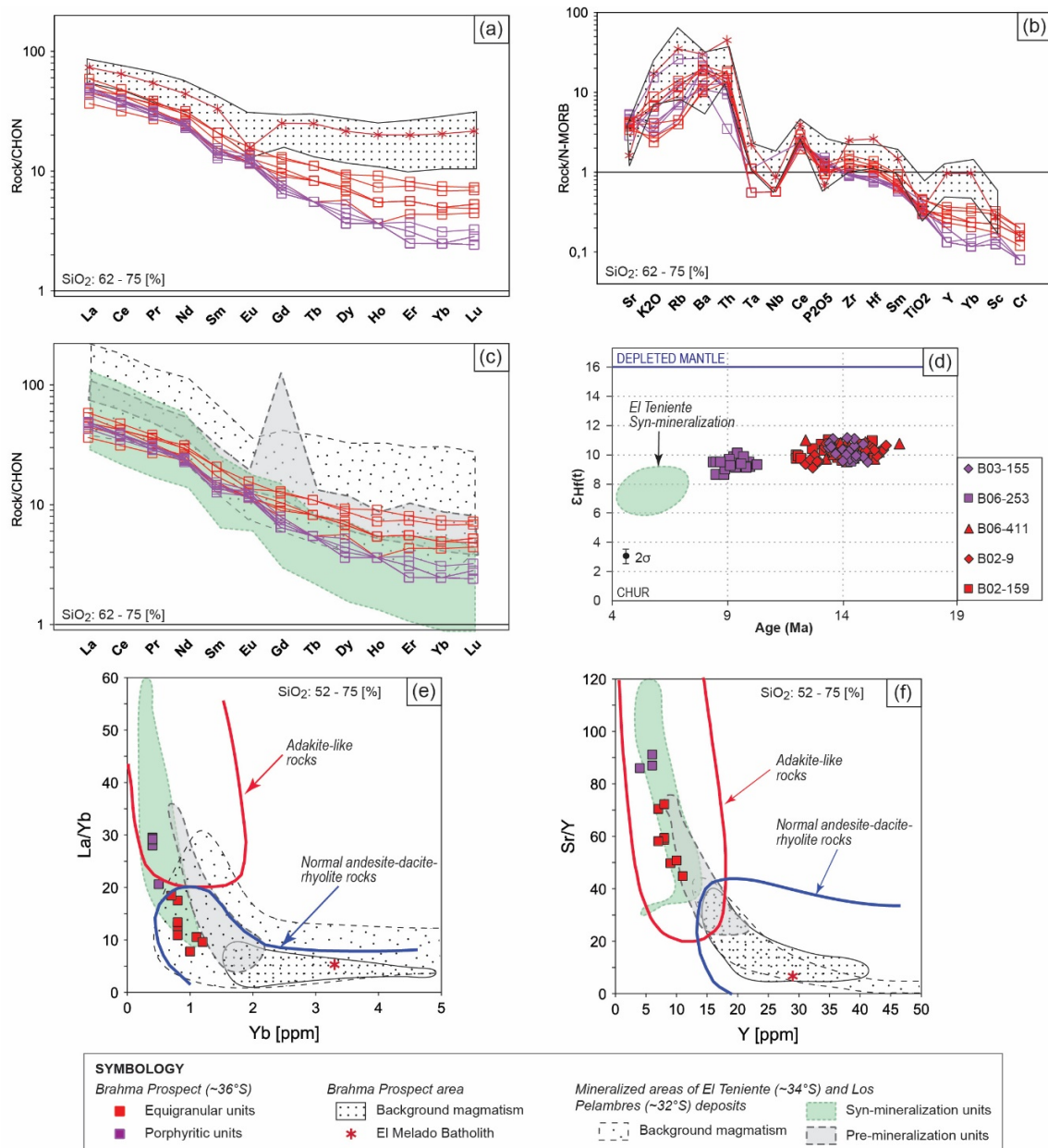


Figure 2.8 General compositional features, in terms of trace element data, of the main intrusive units of the Brahma prospect. (a) Chondrite normalized REE diagram and (b) multi-element spider diagram, both exclusively displaying data of the Brahma prospect region. (c) Chondrite normalized REE diagram including data from other mineralized relevant areas. (d) Hf isotopic composition. In the latter, chondritic (CHUR; Blichert-Toft and Albarède, 1997) and depleted mantle reservoirs (Vervoort and Blichert-Toft, 1999) are shown for reference, and data from El Teniente deposit has been included for comparison (Muñoz et al., 2012). (e) and (f) display fertility diagrams of respectively La/Yb vs. Yb and Sr/Y vs. Y. Fields for adakitic and normal andesite-dacite-rhyolite rocks after Richards and Kerrich (2007). Chondrite and N-MORB normalization respectively after McDonough and Sun (1995) and Pearce (1983). Displayed data for other relevant magmatic units from central Chile as in Fig. 2.7.

Table 2.4 Results of whole rock chemical analyses.

Sample	BO2_210	BO6_411	BO6_111-2	BO7_298	BO2_064	BO2_159	BO2_401	BO2-7_217	BO2_403	BO4_387	BO3_357	BO3_2.355	BO5_193	BO5_272	BO6_253	DL ²
Unit ¹	GRD	GRD	GRD	GRD	TON	TON	TON	TON	FRHP	FRHP	FHP	FHP	FHP	FHP	FHP	
Classification ²	Bt granodiorite	Bt granodiorite	Bt granodiorite	Bt-Hbl granodiorite	Hbl tonalite	Hbl tonalite	Hbl tonalite	Hbl tonalite	Bt dacitic porphyry	Hbl dacitic porphyry	Bt dacitic porphyry	Hbl dacitic porphyry	Hbl dacitic porphyry	Hbl dacitic porphyry	Hbl dacitic porphyry	
Comsposition ³	A	A	D	BA	D	D	D	D	D	A	D	D	D	D	D	
UTM-N	6,039,732	6,039,536	6,039,536	6,038,613	6,039,776	6,039,747	6,039,676	6,039,731	6,039,676	6,039,342	6,039,599	6,039,598	6,038,972	6,038,991	6,039,536	
UTM-E	301,151	301,769	301,822	301,065	301,126	301,142	301,184	301,152	301,183	301,286	301,550	301,550	301,210	301,229	301,797	
<i>Major Elements in wt.%</i>																
SiO ₂	60.42	60.51	62.26	54.23	65.76	65.19	63.83	66.85	59.68	58.20	64.46	64.00	62.90	64.03	64.22	0.01
Al ₂ O ₃	17.31	16.90	16.48	18.31	15.93	15.65	15.82	15.02	16.50	17.24	16.82	16.36	15.63	16.59	16.59	0.01
Fe ₂ O ₃ (T)	6.41	6.01	5.95	7.51	4.36	5.01	4.62	4.63	5.06	4.86	4.36	4.00	3.78	5.75	4.04	0.01
MnO	0.25	0.14	0.10	0.17	0.15	0.15	0.09	0.17	0.15	0.07	0.23	0.34	0.21	0.37	0.08	0.001
MgO	2.97	2.79	2.71	4.30	1.98	1.91	2.11	1.78	1.91	1.99	1.39	1.35	1.36	1.53	1.30	0.01
CaO	6.01	5.89	5.79	8.49	4.18	4.50	4.87	4.13	4.66	5.36	4.07	4.46	4.42	3.32	3.87	0.01
Na ₂ O	3.91	3.78	3.84	3.45	3.64	3.76	3.96	3.68	4.34	4.85	4.50	4.62	3.22	3.78	3.88	0.01
K ₂ O	0.18	1.01	1.31	0.40	0.59	0.97	0.34	0.40	0.46	0.52	0.60	0.40	0.92	0.84	2.22	0.01
TiO ₂	0.60	0.67	0.66	0.76	0.48	0.48	0.51	0.44	0.52	0.61	0.48	0.46	0.42	0.43	0.47	0.001
P ₂ O ₅	0.13	0.15	0.14	0.17	0.12	0.11	0.11	0.11	0.14	0.17	0.16	0.15	0.15	0.13	0.14	0.01
LOI	2.06	1.45	0.67	1.23	1.43	1.52	3.46	2.18	5.08	6.28	3.44	3.22	5.49	3.38	3.24	
Total	100.20	99.28	99.92	99.00	98.63	99.25	99.73	99.39	98.51	100.10	100.50	99.35	98.51	100.10	100.10	0.01
<i>Trace Elements in ppm</i>																
Sc	12	12	13	19	9	9	9	7	6	7	5	5	5	5	5	1
Be	< 1	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	1	1	1	1	1	1
V	130	125	123	183	84	84	88	75	89	94	68	66	63	63	65	5
Cr	50	50	50	60	40	40	40	30	20	20	20	< 20	20	20	20	20
Co	9	14	15	21	10	11	9	8	6	8	8	8	7	8	8	1
Ni	40	30	30	40	20	20	40	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	20
Cu	400	180	80	90	40	120	370	330	140	430	120	90	50	150	70	10
Zn	240	110	70	140	330	260	140	190	200	100	880	850	1410	210	200	30

Ga	19	19	18	20	18	18	17	17	20	18	19	20	18	19	19	1
Ge	1	< 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	< 1	< 1	< 1	1
As	13	16	< 5	< 5	9	10	8	46	24	29	35	17	81	52	84	5
Rb	3	24	28	8	9	18	8	8	14	15	14	9	26	23	52	2
Sr	493	508	493	578	469	448	475	407	547	637	617	636	344	556	522	2
Y	7	10	11	8	8	9	8	7	6	4	4	4	4	4	6	1
Zr	87	146	132	57	108	115	101	116	84	81	82	83	81	82	87	2
Nb	2	2	2	1	2	2	2	2	< 1	2	2	2	2	2	2	1
Mo	4	6	< 2	< 2	< 2	2	24	< 2	< 2	13	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2
Ag	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.5
Sn	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	2	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1
Sb	0.8	0.5	< 0.5	< 0.5	0.9	0.7	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.5
Cs	< 0.5	1.1	0.8	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.6	2.5	0.7	0.7	1.4	1.8	0.6	0.5
Ba	138	370	389	171	290	433	201	210	239	218	379	410	245	411	535	2
La	10.1	11.6	11.5	7.8	8.7	14.0	10.7	12.9	11.2	10.3	11.8	11.6	11.2	11.8	11.7	0.1
Ce	22.1	26.1	26.3	18.2	19.4	29.6	23.6	26.3	23.8	21.7	24.2	24.1	22.9	23.9	24	0.1
Pr	2.8	3.41	3.35	2.43	2.53	3.59	2.88	3.04	2.69	2.72	2.95	2.88	2.75	2.87	2.88	0.05
Nd	11.6	14.5	13.7	10.4	10.8	13.5	11.9	11.4	11.3	11.2	11.3	11.1	10.5	10.9	10.8	0.1
Sm	2.3	3.1	3.1	2.6	2.3	2.6	2.2	2.1	2.2	2.3	2.2	2.2	2.0	1.9	2.1	0.1
Eu	0.82	0.89	0.77	0.9	0.66	0.72	0.67	0.65	0.70	0.76	0.7	0.65	0.75	0.67	0.66	0.05
Gd	2	2.5	2.6	2.2	1.9	2.1	1.8	1.6	1.4	1.6	1.5	1.3	1.3	1.3	1.4	0.1
Tb	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
Dy	1.7	2.2	2.3	2.1	1.8	1.7	1.7	1.4	1.1	1.3	0.9	0.9	0.9	0.9	1	0.1
Ho	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
Er	0.9	1.2	1.3	1.1	0.9	0.9	0.9	0.7	0.5	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.1
Tm	0.13	0.18	0.19	0.16	0.13	0.13	0.12	0.1	0.07	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05
Yb	0.8	1.1	1.2	1	0.8	0.8	0.8	0.7	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.1
Lu	0.13	0.17	0.18	0.16	0.13	0.13	0.12	0.11	0.07	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.01
Hf	2.1	3.3	2.9	1.4	2.7	2.8	2.4	2.7	2.1	1.8	1.8	2	1.9	1.9	2	0.2
Ta	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1
W	2	2	1	3	3	5	5	2	2	3	5	4	2	3	3	1

Tl	< 0.1	0.2	0.2	< 0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.3	0.3	0.5	0.1
Pb	24	11	8	9	185	49	17	22	20	19	35	57	38	19	29	5
Th	2.3	2.7	3	1.7	3.7	3.5	2.7	3.7	0.7	1.9	2.2	2.2	2.6	2.9	2.1	0.1
U	0.7	0.8	0.9	0.4	0.9	1	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9	0.7	0.1

Notes:

- ¹Rock units. GRD: Granodiorite; TON: Tonalite; FRHP: Feldspar and Rounded Hornblende Porphyry; FHP: Feldspar and Hornblende Porphyry.

- ²Acronyms. Bt: Biotite; Hbl: hornblende; DL: detection limit.

- ³Chemical classification according to silica contents at anhydrous basis. BA: basaltic andesite; A: andesite; D: dacite, R: rhyolite.

2.5 DISCUSSION

2.5.1 *Main geological features of the Brahma prospect*

The Brahma hydrothermal system covers an approximate area of 6 Km² and is open horizontal and vertically (Burns et al., 2008; Fig 2). Surface rock outcrops and drill cores show the presence of Cu, Mo, Zn and Pb mineralization hosted in intrusive porphyric and equigranular rocks, and hydrothermal breccias. The phyllic assemblages correspond to the alteration with best development within the intercepted area and, together with the other alterations, superimpose the early potassic assemblages. The mineralization is present in disseminated and stockwork vein styles which are mostly related to phyllic alteration and, to a lesser extent, argillic and propylitic retrograde alterations.

Of the 10 identified types of veinlets, early potassic vein types I and II can be correlated with EB and A veins (respectively) as these defined by Gustafson and Hunt (1975) and Gustafson and Quiroga (1995) at the El Salvador porphyry Cu-Mo deposit. Type III veins, corresponding to chlorite-sericite-pyrite phyllic alteration, correlates with C veins (Gustafson and Quiroga 1995), while later veins associated to phyllic and argillic alterations (types IV, V, VI, VII, VIII and X) could be correlated with D veins (Gustafson and Hunt, 1975). In addition, vein types IV and X also show characteristics of type E polymetallic veins defined by Lang et al. (2013) at the Pebble porphyry Cu-Mo-Au deposit (Alaska), whereas propylitic retrograde vein type IX could be associated to H veins as defined in the same study.

Lithologic, alteration and mineralization characteristics indicate that the Brahma hydrothermal system corresponds to a porphyry Cu-Mo deposit with an incipient and irregular development of Cu secondary enrichment mineralogy, which is hosted preferably in most permeable zones. According to the typical alteration and mineral zonation of this kind of deposits (Lowell and Guilbert, 1970; Sillitoe, 2010), the studied area seems to correspond to an upper maybe lateral portion of a porphyry copper system, in the upper pyrite shell as described by Lowell and Guilbert (1970) and the Cu-Zn-Pb mineralization zone described by Sillitoe (2010) and Kouzmanov and Pokrovski (2012), the latter also agreeing with the predominance of late veins related to acidic alterations. Sulfide zonation is not only observed in the mineralized host rocks of the porphyry systems, but also in breccia bodies (Sillitoe, 2010). In view of this and despite the fact that the mineralization observed in both breccia bodies corresponds mainly to pyrite and sphalerite, it is not excluded that most of the hypogene copper mineralization is associated with breccias at depth, as observed in the other Chilean Miocene-Pliocene porphyry Cu deposits (Skewes and Stern, 1995; Serrano et al., 1998; Skewes et al., 2002; Maksaev et al., 2004).

2.5.2 *Temporal development of the deposit*

Samples B06038-1 (vein type II) and B03111-5 (disseminated) record the oldest mineralization ages in the studied area which occurred at ~14 Ma (Table 3). This hydrothermal event is well correlated with the ages of its intrusive host units (GRD and FRHP) which show similar ages (Fig. 2.9a). The latter indicates the presence of a ~14 Ma magmatic-hydrothermal event with associated early potassic and phyllic alteration assemblages, since the mineralization analyzed is related to such alteration types (Table 1). Molybdenite mineralization from type V veins (chlorite-sericite-pyrite phyllic alteration; samples B02315-7 and B02334-2; Table. 3)

represents a hydrothermal event of ~12 Ma. This is at least 1 m.y. younger than their intrusive host unit (TON; Fig. 2.9) and therefore this molybdenite mineralization is unlikely to be genetically correlated with this magmatic event. Molybdenite from type VII and IX veins (sericite-quartz±illite phyllic and propylitic retrograde alteration respectively; samples B03310-2 and B06221-3; Table 3) show ages of ~10 Ma and correspond to the youngest mineralization event recorded in the studied section. These ages correlate well with the cross-cutting relations observed in the veins, where type IX corresponds to one of the later veinlets described in the section analyzed (Fig. 2.4).

The vein type VII sample shows a mineralization age about 0.7 to 0.5 m.y. older than its host rock (FHP; 9.3 ± 0.2 Ma). It should be noticed that the sample where FHP unit was dated is located approximately 430 m from the sample where vein VII was dated (Fig. 2.9b). However, petrographic and geochemical evidence of samples located near the latter, would confirm that the host rock of the vein type VII sample corresponds to the FHP unit and not to other porphyric units. Moreover, 6 of the 23 analyzed zircons of the FHP sample have ages of about 10 Ma (Fig. 2.6) and it is the only analyzed unit that shows zircons of that age. In addition, it is important to note that the PBX body is composed, among other things, by FHP fragments (Fig. 2.3f, g) and thus the age of the FHP unit constitutes a maximum age for this breccia unit and its associated mineralization (veins type X). The latter suggest that the main mineralization event in the Brahma prospect is most likely related to the hydrothermal fluids exsolved from the FHP intrusion and the PBX event. This event occurred at ~10 Ma and it would have extended after 9.3 Ma which is the age of the younger mineralized porphyry (FHP). At this time the cooling of the hydrothermal system also began as it is represented by the retrograde propylitic alteration.

In summary, the results obtained from the Re-Os age determinations indicate that there are at least three mineralization events within the prospect which occurred at ~14, ~12 and ~10 Ma. These ages correlate relatively well with the magmatic pulses of ~14 and ~9 Ma (Fig. 2.9). These results indicate that the Brahma prospect formed by at least three magmatic-hydrothermal events and that the system was active for at least 4 to 5 m.y.

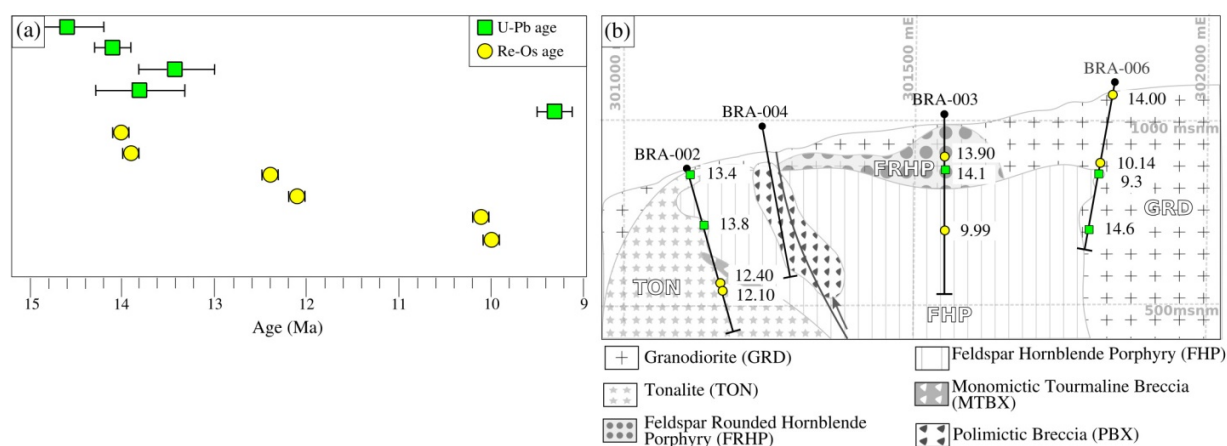


Figure 2.9 (a) Summary of the primary and secondary mineral age determination performed in the Brahma prospect in this work and (b) location of the corresponding samples. In (a) error bars are at 2σ level.

2.5.3 *Igneous petrogenetic processes*

The main intrusive units of the Brahma prospect show geochemical characteristics that assign them as part of the volcano-plutonic Miocene Andean arc of the Maule region. This is also supported by the prospect location as this is hosted by the Colbún Formation, the late Eocene-Miocene volcanic arc unit recognized in the area (Vergara et al., 1999). Additionally, isotopic characteristics reveal that the igneous rocks of the Brahma prospect correspond to rather juvenile additions, which is consistent with the primitive signature also displayed by igneous rocks of the Colbún Formation (Vergara et al., 1999). Respect to the local background magmatism in the area, which includes igneous rocks from the Colbún and Abanico formations along with the coeval intrusives, the Brahma prospect units are in general terms geochemically similar, yet they are markedly more evolved and fractionated. Geochemical and isotopic characteristics support a particular scenario for the magmatism associated to the Brahma prospect respect to that in the background region. On one hand, the juvenile signatures shown by both groups suggest similar geochemical components involved in their magma genetic processes, in particular a compositionally similar source and/or low degrees of crustal contamination. On the other hand, the markedly more evolved and fractionated character of the Brahma prospect units argues for extensive magmatic chamber processes as also supported by the intense, almost continuous, and long-lived record of magmatic activity in that area.

The mineralogy and geochemical and isotopic characteristics displayed by the intrusive units of the Brahma prospect indicate that they share a similar petrogenetic evolution dominated by the crystallization of plagioclase, quartz, amphibole and subordinated alkali feldspar and biotite. In particular, an important involvement of amphibole, as a fractionating assemblage and/or in the magmatic source, could explain the lower contents of MREE (*middle REE*) and HREE shown by such units respect to the local background magmatism. The latter characteristic is also partly responsible for their adakite-like signature, similarly to numerous intrusive units related to porphyry copper mineralization for which the role of amphibole in magma genesis has been pointed as a likely cause (e.g. Richards and Kerrich, 2007). In addition, such signature is in particular similar to that displayed by the mineralization related intrusives of the El Teniente and Los Pelambres deposits, two highly endowed Andean copper deposits of Cenozoic age located further north. It also has to be noted that the porphyritic units of the Brahma prospect show a more marked adakite-like signature than the equigranular units, despite other geochemical and isotopic similarities, a feature that also supports the existence of a complex deep feeding magmatic reservoir.

2.5.4 *The Brahma prospect in the context of Andean Metallogenesis*

The porphyry Cu deposits of Central Chile belong to one of the most enriched Cu provinces in the world, with more than 180 Mt of copper (resources plus production; Camus, 2003; Cannell et al., 2005) identified in 5 Miocene-Pliocene deposits (Fig. 2.1a). These deposits share many characteristics like being related to porphyric intrusions hosted in volcano-sedimentary rocks, magmatic-hydrothermal activity associated to main regional structures, copper mineralization hosted in breccia bodies, among others (e.g. Camus, 2003; Maksaev et al., 2007). From a geochronological point of view, one of the most remarkable features of these porphyry Cu deposits and of other giant porphyry deposits in the world, is their genetic relation to long term and multiple episodes of magmatism and associated mineralization (e.g. Butte, Montana, USA, Brimhall, 1979; El Salvador, Chile, Cornejo et al., 1997; Chuquicamata, Chile,

Reynolds et al., 1998; Bagdad, Arizona, USA, Barra et al., 2003; El Teniente, Chile, Maksaev et al., 2004). These syn-mineralization intrusive units usually show a spatial relation with precursor large polyphasic plutonic bodies such as Las Gualtatas Pluton near Los Pelambres (21,6-18,4 Ma; Bertens et al., 2006), Río Blanco Pluton and San Francisco Batholith in the area of Río Blanco-Los Bronces (14.7-8.2 Ma; Deckart et al., 2005; 2010) and El Teniente plutonic complex (12-7 Ma; Kurtz et al., 1997; Maksaev et al., 2004; Cannell et al., 2005). The results of our study evidence that all the mentioned characteristics are observed in the Brahma prospect: this represents a hydrothermal system that has been fed almost continuously by magmatism from at least 14 Ma until 9 Ma and which seems to be related with the older El Melado Batholith (Fig. 2.1b; 23.8-14.2 Ma; Drake et al., 1982a; Nelson et al., 1999; Spikings et al., 2008; Cabezas et al., 2018). The intrusive and mineralization/alteration ages determined for Brahma prospect are similar to those reported for the Los Pelambres deposit, where the magmatic activity started at ~13.9 Ma and the main mineralization event developed at ~11 Ma (Fig. 2.10; Bertens et al., 2003; 2006; Perelló et al., 2012).

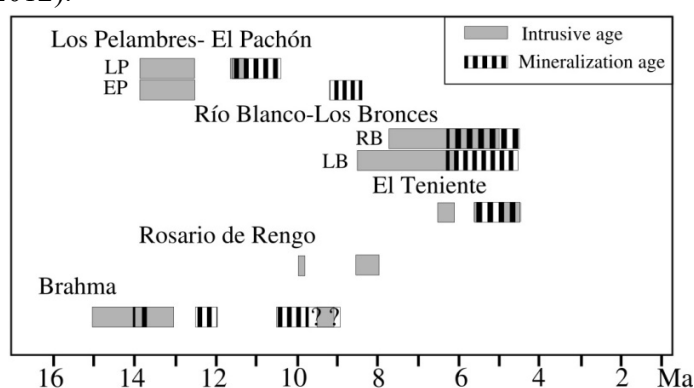


Figure 2.10 Summary of geochronological data for the main porphyry Cu-Mo deposits belonging to the Miocene-Pliocene metallogenic belt in Central Chile. The Brahma prospect shows similar ages to Los Pelambres-El Pachón deposit. The mineralization age in the Brahma prospect is not constrained, as indicated by the interrogation symbol, due to the presence of a younger porphyry unit with mineralization. Geochronological data taken from Bertens et al. (2003, 2006); Maksaev et al. (2004); Deckart et al. (2005, 2013, 2014), Muñoz (2008) and Perelló et al., 2012).

Another significant feature of the Miocene-Pliocene Cu deposits of Central Chile is the presence of regional NW and NE striking structures which seem to control the mineralization and also the emplacement of porphyritic stocks and breccia bodies (Camus, 2003; Cannell et al., 2005; Maksaev et al., 2007; Piquer et al., 2015). These structures would represent ancient normal faults that controlled second order tectonic compartments of the Abanico basin and which were reactivated as reverse faults during Mio-Pliocene east-west contraction (Camus, 2003; Piquer et al., 2015). For the Brahma prospect area there are no structural studies of regional scale to assess such observation. However, local studies at the deposit scale and its surroundings show that, like other Mio-Pliocene deposits in Chile, the Brahma prospect is also controlled by a series of NW striking structures and a major NS to NE striking fault (Fig. 2.2a) (Burns et al., 2008).

Compositional characteristics of the igneous units correspond to another feature in common between the Brahma prospect and the Mio-Pliocene porphyry copper deposits of central Chile (Figs. 7, 8). In particular, all these intrusive units show high La/Yb and Sr/Y ratios that constitute the adakite-like signature commonly recorded in porphyry Cu type deposits worldwide (e.g. Baldwin and Pearce, 1982; Kay and Mpodozis, 2001; Oyarzún et al., 2001; Cooke et al., 2005; Lopez, 2010; Sun et al., 2011; Stern et al., 2011; Chiaradia, 2014). The origin of such geochemical signature in mineralization related magmas is still a matter of debate and has been

variably attributed mainly to two processes. On one hand, this has been invoked to result from magma genesis under a crustal thickening scenario, where there is an increasing involvement of high pressure minerals in the residual and/or crystallizing assemblages (e.g. Kay & Mpodozis, 2001). Alternatively, the adakite-like signature in mineralization related magmas would result from extensive magma chamber fractionation of particular mineral assemblages (e.g. Richards and Kerrich, 2007; Stern et al., 2012). The first of these hypotheses is in part restricted for the Brahma case. The prospect currently sits in an Andean area overlying a 40 km thick crust (e.g. Tassara et al., 2006; Tassara and Echaurren, 2012), that is which never reached a sufficient thickness for garnet formation in the mineral assemblages at the crustal basal level. Interestingly, a similar scenario has been inferred in the case of the Los Pelambres deposit (e.g. Kay et al., 2001; Reich et al., 2003). The second hypothesis could be more appropriate given the relation of the Brahma prospect to a long-lived and complex magmatic reservoir previously inferred.

The geological evidence presented in this study allows to conclude that the Brahma prospect has geologic characteristics similar to other porphyry Cu-Mo deposits belonging to the Miocene-Pliocene metallogenic belt, and in particular, with the Los Pelambres deposit. It is also important to note that although the mean grades of Cu and Mo in the drill cores are sub-economic, the mineralization in the prospect confirms the presence of Cu and Mo within the hydrothermal system. The above in addition with the multiplicity and long-life of the magmatic hydrothermal events would indicate auspicious factors in the generation of a porphyry Cu-Mo deposit with a large endowment and that is currently underexplored. As a result, the Brahma porphyry copper prospect shows great exploration potential, at present only having been drilled in its upper phyllic zone, with minor potassic alteration intercepted so far. Based on all information, the present economic potential of this deposit is deemed undetermined.

2.6 SUMMARY AND CONCLUSIONS

(1) The Brahma prospect corresponds to a porphyry type deposit in which mineralization is hosted in and related to intrusive rocks. Four main intrusive lithologic units comprise the prospect: Granodiorite (GRD), Feldspar and rounded Hornblende Porphyry (FRHP), Tonalite (TON) and Feldspar and Hornblende Porphyry (FHP). In addition, related to the emplacement of the latter intrusives there are numerous syn-mineralization igneous and hydrothermal breccias which are mostly polymictic with rock flour and tourmaline matrix. The dominant alteration present in the studied area corresponds to phyllic alteration superimposed by a retrograde propylitic alteration and argillic alteration in the most permeable zones. The Brahma prospect presents mineralization of pyrite and less chalcopyrite, molybdenite, sphalerite and chalcocite, which occur mainly disseminated and in veinlets. According to the classic models that characterize these kind of deposits (Lowell and Guilbert, 1970; Sillitoe, 2010), the area intercepted by the drill cores would correspond to a distal upper portion of the porphyry system.

(2) Primary mineral age determinations reveal at least 3 main magmatic events at: ~17 Ma, ~14 Ma and ~9 Ma. The intrusion of the units GRD, FRHP and TON occurred almost simultaneously at ~14 Ma and were followed by the intrusion of the FHP at ~9 Ma. Alteration-mineralization age determinations reveal an early mineralization stage coeval and thus associated to the magmatic event of ~14 Ma. An intermediate mineralization stage of ~12 Ma was identified suggesting the presence of another intrusive unit not recognized in this study. Finally, the major mineralization event recorded in this study show ages of around 10 Ma, however, according to the presence of a younger mineralized porphyritic unit (FHP) and a strong mineralized polymictic breccia (PBX) with clasts of the latter unit, this event could have extended after 9.3 Ma (Fig. 2.10).

(3) Geochemical characteristics of igneous units from the Brahma prospect indicate that these are part of the continental arc magmatism developed in the continental margin during middle to late Miocene. The prospect is hosted in the fairly primitive volcanic rock series of the Colbún Formation (Vergara et al., 1999) and its intrusive units also show juvenile signatures. The latter suggests that both mineralization related magmas and the background magmatism share a similar source and/or involve low degrees of crustal contamination in their genesis. On the other hand, intrusive units from the Brahma prospect show a more evolved and fractionated nature than the background magmatism and they also show important geochemical variations within themselves. These characteristics along with the long-term record of magmatic activity in the deposits strongly support the existence of a long-lived and complex deep feeding magmatic reservoir.

(4) The Brahma prospect corresponds to a porphyry Cu-Mo deposit that has geological characteristics similar to those observed in other Miocene-Pliocene porphyry Cu deposits in Central Chile. Among the most important these include: (i) similar geochemical characteristics of the porphyritic units (FHRP, FHP) compared to the syn-mineralization units in Los Pelambres and El Teniente deposits, and (ii) multiple intrusions that resulted in a protracted period of hydrothermal activity. Moreover, the Miocene age determined for the prospect agrees with the age reported for other porphyry copper targets or deposits occurring along the western slope of the Andes south of the El Teniente deposit (34°05'S; Rosario de Rengo at 34°31'S, 9.89 – 8.43 Ma, Muñoz, 2008; Infiernillo, 35°09'S, 8.29±0.02 Ma, Vale-Exploraciones, 2017). Altogether, this suggests the continuation of the Miocene-Pliocene metallogenic belt southerly from the El Teniente deposit (34°05'S) to at least the location of the Brahma prospect (35°45'S).

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by CONICYT (Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica, Chile) through the projects Fondecyt 1161360 and 11140012. Additional support from the CONICYT projects PAI79160139 and AFB180004 and the Unidad de Vinculación del Departamento de Postgrado – Universidad de Chile is gratefully acknowledged. We thank Patrick Burns and Cónдор Resources for allowing access to the drill cores of the Brahma prospect and permission to publish the information.

BIBLIOGRAPHY

- Astaburuaga, D., 2014. Evolución estructural del límite Mesozoico-Cenozoico de la Cordillera Principal entre 35°30' y 36°S, Región del Maule, Chile, M. Sc. Thesis, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, p. 128.
- Baldwin, J.A., Pearce, J.A., 1982. Discrimination of productive and nonproductive porphyritic intrusions in the Chilean Andes. *Economic Geology* 77, 664-674.
- Barra, F., Ruiz, J., Mathur, R., Titley, S., 2003. A Re-Os study of sulfide minerals from the Bagdad porphyry Cu-Mo deposit, northern Arizona, USA. *Mineralium Deposita* 38, 585-596.
- Bergoeing, J.P., 2016. Evolución geoquímica del magmatismo de la región de Los Pelambres (31°S) entre el Cretácico Superior y el Mioceno Superior: Implicancias para la evolución tectónica y metalogénica de los Andes de Chile Central, Undergraduated Thesis, Departamento de Geología, Universidad de Chile, p. 111.

- Bertens, A., Clark, A., Barra, F., Deckart, K., 2006. Evolution of the Los Pelambres-El Pachón porphyry copper-molybdenum district, Chile/Argentina, in: XI Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, pp. 179-181.
- Bertens, A., Deckart, K., Gonzalez, A., 2003. Geocronología U-Pb, Re-Os y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ del pórfido Cu-Mo Los Pelambres, Chile central, in: X Congreso Geológico Chileno, Concepción, (CD-ROM): 5.
- Birck, J.L., Barman, M.R., Capmas, F., 1997. Re-Os Isotopic Measurements at the Femtomole Level in Natural Samples. *Geostandards newsletter* 21, 19-27.
- Brimhall, G.H., 1979. Lithologic determination of mass transfer mechanisms of multiple-stage porphyry copper mineralization at Butte, Montana; vein formation by hypogene leaching and enrichment of potassium-silicate protore. *Economic Geology* 74, 556-589.
- Blichert-Toft, J., Albarède, F., 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters* 148, 243-258.
- Burns, P., Marquez, E., Arias, S., 2008. Brahma Cu-Mo Porphyry, Chile: Unpublished report. Condor Resources Incorporated, p. 452.
- Cabezas, L.M., Muñoz, M., Rojas del Castillo, M., 2018. Nuevos antecedentes estratigráficos y dataciones radiométricas U-Pb en el valle superior del río Maule a los $\sim 35^{\circ}50'S$, Chile Central: Implicaciones en la evolución geológica Cenozoica, in: XV Congreso Geológico Chileno, Concepción, pp. 1099-1102.
- Cahill, T., Isacks, B.L., 1992. Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 97, 17503-17529.
- Camus, F., 2003. Geología de los Sistemas Porfíricos en los Andes de Chile., Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile, p. 267.
- Cannell, J., Cooke, D.R., Walshe, J.L., Stein, H., 2005. Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu-Mo deposit. *Economic Geology* 100, 979-1003.
- Cooke, D.R., Hollings, P., Walshe, J.L., 2005. Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls. *Economic Geology* 100, 801-818.
- Cornejo, P., Tosdal, R.M., Mpodozis, C., Tomlinson, A.J., Rivera, O., Fanning, C.M., 1997. El Salvador, Chile porphyry copper deposit revisited: Geologic and geochronologic framework. *International Geology Review* 39, 22-54.
- Creaser, R.A., Papanastassiou, D.A., Wasserburg, G.J., 1991. Negative thermal ion mass spectrometry of osmium, rhenium and iridium. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55, 397-401.
- Culbert, R., 2007. Technical report on the Brahma copper property of south-central Chile: Unpublished report. Condor Resources incorporated, p. 14.
- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J.J., Gans, P., Kay, S.M., Muñoz, N., Wyss, A.R., Zurita, E., 2002. Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile ($33-36^{\circ}\text{S.L.}$). *Journal of South American Earth Sciences* 15, 117-139.
- Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P., 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile, in: Moreno, T., Gibbons, W. (Eds.), *The Geology of Chile*. The Geological Society, London, pp. 21-114.
- Charrier, R., Ramos, V.A., Tapia, F., Sagripanti, L., 2015. Tectono-stratigraphic evolution of the Andean Orogen between 31° and 37°S (Chile and Western Argentina). *Geological Society, London, Special Publications* 399, 13-61.
- Chiaradia, M., 2014. Copper enrichment in arc magmas controlled by overriding plate thickness. *Nature Geoscience* 7, 43.

- Deckart, K., Clark, A., Cuadra, P., Fanning, M., 2013. Refinement of the time-space evolution of the giant Mio-Pliocene Río Blanco-Los Bronces porphyry Cu–Mo cluster, Central Chile: new U–Pb (SHRIMP II) and Re–Os geochronology and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology data. *Mineralium Deposita* 48, 57-79.
- Deckart, K., Clark, A.H., Celso, A.A., Ricardo, V.R., Bertens, A.N., Mortensen, J.K., Fanning, M., 2005. Magmatic and hydrothermal chronology of the giant Río Blanco porphyry copper deposit, central Chile: Implications of an integrated U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ database. *Economic Geology* 100, 905-934.
- Deckart, K., Godoy, E., Bertens, A., Jerez, D., Saeed, A., 2010. Barren Miocene granitoids in the Central Andean metallogenic belt, Chile: Geochemistry and Nd-Hf and U-Pb isotope systematics. *Andean Geology* 37.
- Deckart, K., Silva, W., Spröhnle, C., Vela, I., 2014. Timing and duration of hydrothermal activity at the Los Bronces porphyry cluster: An update. *Mineralium Deposita* 49, 535-546.
- Drake, R.E., 1976. Chronology of Cenozoic igneous and tectonic events in the central Chilean Andes-Latitudes 35°30' to 36°S. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 1, 265-284.
- Drake, R.E., Charrier, R., Thiele, R., Munizaga, F., Padilla, H., Vergara, M., 1982a. Distribución y edades K-Ar de volcanitas post-Neocomianas en la Cordillera Principal entre 32° y 36° LS, Implicaciones estratigráficas y tectónicas para el Meso-Cenozoico de Chile Central, in: III Congreso Geológico Chileno, Concepción, pp. 42-78.
- Frei, R., Nägler, T.F., Schönberg, R., Kramers, J.D., 1998. Re-Os, Sm-Nd, U-Pb, and stepwise lead leaching isotope systematics in shear-zone hosted gold mineralization: Genetic tracing and age constraints of crustal hydrothermal activity. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62, 1925-1936.
- Freydier, C., Ruiz, J., Chesley, J., McCandless, T., Munizaga, F., 1997. Re-Os isotope systematics of sulfides from felsic igneous rocks: Application to base metal porphyry mineralization in Chile. *Geology* 25, 775-778.
- González, O., Vergara, M., 1962. Reconocimiento Geológico de la cordillera de los Andes entre los paralelos 35 y 38 latitud sur. Instituto de Geología, Universidad de Chile, Santiago, p. 121.
- Gustafson, L.B., Hunt, J.P., 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology* 70, 857-912.
- Gustafson, L.B., Quiroga, J., 1995. Patterns of mineralization and alteration below the porphyry copper orebody at El Salvador, Chile. *Economic Geology* 90, 2-16.
- Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8, 523-548.
- Karzulovic, J., Hauser, A., Vergara, M., 1972. Edades K/Ar en rocas volcánicas e intrusivas del área de los proyectos hidroeléctricos Colbún-Machicura-Melado, Empresa Nacional de electricidad, SA, VII Región, in: II Congreso Geológico Chileno, Arica, pp. J127-J135.
- Kay, S.M., Godoy, E., Kurtz, A., 2005. Episodic arc migration, crustal thickening, subduction erosion, and magmatism in the south-central Andes. *Geological Society of America Bulletin* 117, 67-88.
- Kay, S.M., Mpodozis, C., 2001. Central Andes ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust. *GSA Today* 11, 4-9.
- Kay, S.M., Mpodozis, C., Coira, B., 1999. Neogene magmatism, tectonism and mineral deposits of the Central Andes (22°-33°S). *Geology and Ore Deposits of the Central Andes*. Society of Economic Geology, Special Publication 7, 27-59.

- Kouzmanov, K., Pokrovski, G.S., 2012. Hydrothermal controls on metal distribution in porphyry Cu (-Mo-Au) systems. *Society of Economic Geologists, Special Publication 16*, 573-618.
- Kurtz, A.C., Kay, S.M., Charrier, R., Farrar, E., 1997. Geochronology of Miocene plutons and exhumation history of the El Teniente region, Central Chile (34-35°S). *Andean Geology* 24, 75-90.
- Lang, J.R., Gregory, M.J., Rebagliati, C.M., Payne, J.G., Oliver, J.L., Roberts, K., 2013. Geology and magmatic-hydrothermal evolution of the giant Pebble porphyry copper-gold-molybdenum deposit, southwest Alaska. *Economic Geology* 108, 437-462.
- Lopez, L., 2010. Características geoquímicas de rocas ígneas asociadas con pórfidos cupríferos chilenos. *Andean Geology* 17, 3-19.
- Lowell, J.D., Guilbert, J.M., 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology* 65, 373-408.
- Ludwig, K.R., 2008. Isoplot 3.70, a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4, p. 77.
- Maksaev, V., Munizaga, F., McWilliams, M., Fanning, C.M., Mathur, R., Ruiz, J., Zentilli, M., 2004. New chronology for El Teniente, Chilean Andes, from U-Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Re-Os, and fission-track dating: implications for the evolution of a supergiant porphyry Cu-Mo deposit, in: Sillitoe, R.H., Perelló, J., Vidal, A. (Eds.), *Andean Metallogeny: New Discoveries, Concepts and Updates*. Society of Economic Geologists Special Publication, 11, pp. 15-54.
- Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C., Camus, F., 2007. Metallic ore deposits, in: Moreno, T., Gibbons, W. (Eds.), *The Geology of Chile*. The Geological Society, London, pp. 180-199.
- Mathur, R., Ruiz, J., Munizaga, F., 2000. Relationship between copper tonnage of Chilean base-metal porphyry deposits and Os isotope ratios. *Geology* 28, 555-558.
- Mathur, R., Ruiz, J., Tornos, F., 1999. Age and sources of the ore at Tharsis and Rio Tinto, Iberian pyrite belt, from Re-Os isotopes. *Mineralium Deposita* 34, 790-793.
- McDonough, W.F., Sun, S.-s., 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology* 120, 223-253.
- Miyashiro, A., 1974. Volcanic rock series in island arc and continental margins. *American Journal of Sciences* 274, 321-355.
- Muñoz, M., Charrier, R., Fanning, C.M., Maksaev, V., Deckart, K., 2012. Zircon trace element and O-Hf isotope analyses of mineralized intrusions from El Teniente ore deposit, Chilean Andes: constraints on the source and magmatic evolution of porphyry Cu-Mo related magmas. *Journal of Petrology* 53, 1091-1122.
- Muñoz, P., 2008. Antecedentes petrográficos, geoquímicos y geocronológicos de rocas intrusivas del sector Rosario de Rengo, Región del Libertador Bernardo O' Higgins., Undergraduated Thesis, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, p. 109.
- Nelson, S.T., Davidson, J.P., Heizler, M.T., Kowallis, B.J., 1999. Tertiary tectonic history of the southern Andes: The subvolcanic sequence to the Tatara-San Pedro volcanic complex, lat 36°S. *Geological Society of America Bulletin* 111, 1387-1404.
- Nyström, J.O., Vergara, M., Morata, D., Levi, B., 2003. Tertiary volcanism during extension in the Andean foothills of central Chile (33°15'-33°45'S). *Geological Society of America Bulletin* 115, 1523-1537.
- Oyarzún, R., Márquez, A., Lillo, J., López, I., Rivera, S., 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal calc-alkaline magmatism. *Mineralium Deposita* 36, 794-798.
- Pardo, M., Comte, D., Monfret, T., 2002. Seismotectonic and stress distribution in the central Chile subduction zone. *Journal of South American Earth Sciences* 15, 11-22.

- Paton, C., Woodhead, J., Hellstrom, J., Hergt, J., Greig, A., Maas, R., 2010. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 11, Q0AA06.
- Pearce, J.A., 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins, in: Hawkesworth, C.J., Norry, M.J. (Eds.), *Continental basalts and mantle xenoliths*. Shiva Publications, Nantwich, Cheshire, pp. 230-249.
- Perelló, J., Sillitoe, R.H., Mpodozis, C., Brockway, H., Posso, H., 2012. Geologic setting and evolution of the porphyry copper-molybdenum and copper-gold deposits at Los Pelambres, Central Chile, in: Hedenquist, J.W., Harris, M., Camus, F. (Eds.), *Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world: A tribute to Richard H. Sillitoe*. Society of Economic Geologist Special Publication, 16, pp. 79-104.
- Petrus, J., Kamber, B., 2012. VizualAge: a novel approach to laser Ablation ICP-MS U-Pb geochronology data reduction. *Geostandards and Geoanalytical Research* 36, 247–270
- Piquer, J., Skarmeta, J., Cooke, D.R., 2015. Structural evolution of the Rio Blanco-Los Bronces District, Andes of Central Chile: controls on stratigraphy, magmatism, and mineralization. *Economic Geology* 110, 1995-2023.
- Reich, M., Parada, M.A., Palacios, C., Dietrich, A., Schultz, F., Lehmann, B., 2003. Adakite-like signature of late Miocene intrusions at the Los Pelambres giant porphyry copper deposit in the Andes of Central Chile: metallogenic implications. *Mineralium Deposita* 38, 876-885.
- Reynolds, P., Ravenhurst, C., Zentilli, M., Lindsay, D., 1998. High-precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of two consecutive hydrothermal events in the Chuquicamata porphyry copper system, Chile. *Chemical Geology* 148, 45-60.
- Richards, J.P., 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists* 98, 1515-1533.
- Richards, J.P., 2005. Cumulative factors in the generation of giant calc-alkaline porphyry Cu deposits. *Super porphyry copper and gold deposits: A global perspective* 1, 7-25.
- Richards, J.P., Kerrich, R., 2007. Special paper: adakite-like rocks: their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology* 102, 537-576.
- Rojas del Castillo, M., 2018. Petrogénesis ígnea de las rocas miocenas del curso alto del valle del río Maule y el valle del río Melado (35°45'S), Cordillera Principal, Región del Maule, Chile, Undergraduated Thesis, Departamento de Geología, Universidad Andrés Bello, Santiago, p. 110.
- Ruiz, J., Mathur, R., 1999. Metallogenesis in continental margins: Re-Os evidence from porphyry copper deposits in Chile. *Economic Geology* 12, 59-72.
- Sanchez, J., Motta, H., 2013. Proyecto Brahma-Austral; Campaña de exploración de los targets Teatino-Calabozo-Roblería: Unpublished report. Geovectra, p. 40.
- Selby, D., Creaser, R.A., 2004. Macroscale NTIMS and microscale LA-MC-ICP-MS Re-Os isotopic analysis of molybdenite: Testing spatial restrictions for reliable Re-Os age determinations, and implications for the decoupling of Re and Os within molybdenite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68, 3897-3908.
- Sernageomin, 2003. Mapa geológico de Chile: versión digital, Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, Santiago.
- Serrano, L., Vargas, R., Stambuk, V., Aguilar, C., Galeb, M., Holmgren, C., Contreras, A., Godoy, S., Vela, I., Skewes, M.A., Stern, C.R., 1998. The late Miocene to early Pliocene Río Blanco-Los Bronces copper deposit, central Chilean Andes., in: Camus, F., Sillitoe, R., Petersen, R. (Eds.), *Andean Copper Deposits: New Discoveries, Mineralization, Styles and Metallogeny*. Society of Economic Geologists Special Publication, 5, pp. 119-130.

- Shirey, S.B., Walker, R.J., 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis. *Analytical Chemistry* 67, 2136-2141.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology* 105, 3-41.
- Skewes, A., Arévalo, A., Floody, R., Zúñiga, P., Stern, C., 2002. The giant El Teniente, breccia deposit: hypogene copper distribution and emplacement, in: Goldfarb, R.J., Nielsen, R.L. (Eds.), *Integrated Methods for Discovery: Global Exploration in the 21st Century*. Society of Economic Geologists Special Publication, 9, pp. 299-332.
- Skewes, M.A., Stern, C.R., 1995. Genesis of the giant late Miocene to Pliocene copper deposits of central Chile in the context of Andean magmatic and tectonic evolution. *International Geology Review* 37, 893-909.
- Sláma, J., Košlera, J., Condon, D., Crowley, J., Gerdes, A., Hanchar, J., Horstwood, M., Morris, G., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M., Whitehouse, M., 2008. Plešovice zircon - A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology* 249, 1-35.
- Smoliar, M.I., Walker, R.J., Morgan, J.W., 1996. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA, and IVB iron meteorites. *Science* 271, 1099-1102.
- Solari, L., Gómez-Tuena, A., P., B.J., Pérez-Arvizu, O., Tanner, M., 2010. U-Pb zircon geochronology with an integrated LA-ICP-MS microanalytical workstation: achievements in precision and accuracy. *Geostandards and Geoanalytical Research* 34, 5-18.
- Solari, L., González-León, C., Valencia-Moreno, M., Rascón-Heimpel, M., 2018. The Proterozoic of NW Mexico revisited: U-Pb geochronology and Hf isotopes of Sonoran rocks and their tectonic implications. *International Journal of Earth Sciences* 107, 845-861.
- Somoza, R., Ghidella, M.E., 2005. Convergencia en el margen occidental de América del Sur durante el Cenozoico: subducción de las placas de Nazca, Farallón y Aluk. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60, 797-809.
- Spikings, R., Dungan, M., Foeken, J., Carter, A., Page, L., Stuart, F., 2008. Tectonic response of the central Chilean margin (35-38 degrees S) to the collision and subduction of heterogeneous oceanic crust: a thermochronological study. *Journal of the Geological Society* 165, 941-953.
- Stein, H.J., Markey, R.J., Morgan, J.W., Hannah, J.L., Scherstén, A., 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: how and why it works. *Terra Nova* 13, 479-486.
- Stern, C.R., Skewes, A., Arévalo, A., 2011. Magmatic evolution of the giant El Teniente Cu-Mo deposit, Central Chile. *Journal of Petrology* 52, 1591-1617.
- Stern, C.R., Skewes, M.A., 1995. Miocene to present magmatic evolution at the northern end of the Andean Southern Volcanic Zone, Central Chile. *Andean Geology* 22, 261-272.
- Sun, W., Zhang, H., Ling, M.-X., Ding, X., Chung, S.-L., Zhou, J., Yang, X.-Y., Fan, W., 2011. The genetic association of adakites and Cu-Au ore deposits. *International Geology Review* 53, 691-703.
- Tassara, A., Echaurren, A., 2012. Anatomy of the Andean subduction zone: three-dimensional density model upgraded and compared against global-scale models. *Geophysical Journal International* 189, 161-168.
- Tassara, A., Götze, H.J., Schmidt, S., Hackney, R., 2006. Three-dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 111, B09404.
- Vale-Exploraciones, 2017. Proyecto Arcángel. Reporte Temporada 2016-2017: Unpublished report., Santiago, p. 62.

- Vergara, M., Morata, D., Hickey-Vargas, R., Lopez-Escobar, L., Beccar, I., 1999. Cenozoic tholeiitic volcanism in the Colbún area, Linares Precordillera, central Chile (35°35'-36°S). *Revista geológica de Chile* 26, 23-41.
- Vervoort, J.D., Blichert-Toft, J., 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63, 533-556.
- Wiedenbeck, M., Alle, P., Corfu, F., Griffin, W.L., Meier, M., Oberli, F., von Quadt, A., Roddick, J.C., Spiegel, W., 1995. 3 natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace-element and REE analyses. *Geostandards and Geoanalytical Research* 19, 1-23.

Capítulo 3 Estudio Re-Os de minerales sulfurados del Prospecto Brahma

3.1 ASPECTOS PRELIMINARES

Los isótopos radiogénicos se han utilizado en estudios geocronológicos desde comienzos del siglo 19. En particular, la primera datación radiométrica fue realizada por Boltwood (1907) al estimar la edad de una muestra de uraninita mediante U-Pb. Más tarde, con el desarrollo del espectrómetro de masas y las mejoras en precisión y sensibilidad de éste instrumento, se dio paso a la implementación del actual espectrómetro de masas de ionización térmica (*thermal ionization mass spectrometer*, TIMS), el cual permite un rápido y preciso análisis de muestras del orden de un nano gramo (Richards y Noble, 1998). En la datación de sistemas hidrotermales, se han utilizado métodos tales como el K-Ar y Ar-Ar para datación de minerales de alteración, y U-Pb para datación de cuerpos intrusivos asociados (e.g. Barra y Ruiz, 2003). Sin embargo, los eventos mineralizadores de mena no necesariamente coinciden con los eventos de magmatismo y/o alteración, es por eso que se han desarrollado otros métodos para datación directa de la mineralización. Dentro de estos sistemas se incluyen el Rb-Sr (e.g. Esfalerita, Nakai et al., 1993; Pirita aurífera, Yang y Zhou, 2001), Sm-Nd (e.g. uranio hidrotermal, Fryer y Taylor, 1984; Sulfuros masivos, Maas et al., 1986), Pb-Pb (e.g. Galena, Cumming et al., 1990), Ar-Ar (e.g. copper wad, Mote et al., 2001) y Re-Os, siendo este último la técnica más utilizada para estos fines y, si se implementa de manera correcta, ofrece el método más robusto en datación de minerales sulfurados (Suzuki et al., 1993; Stein et al., 2001; Lambert et al., 1999).

En el capítulo anterior, se presentaron resultados de geocronología en muestras pertenecientes al Prospecto Brahma (35°45'S), en él se determinó que dicho depósito corresponde a un yacimiento de tipo pórfido Cu-Mo perteneciente a la franja metalogénica del Mioceno-Plioceno de Chile Central. Mediante análisis U-Pb en circón, se identificaron edades de emplazamiento de alrededor de 17 Ma, 14 Ma y 9 Ma, mientras que los análisis Re-Os en molibdenita arrojaron edades de aproximadamente 14 Ma, 12 Ma y 10 Ma. Se concluye que el evento de mineralización de 14 Ma está relacionado genéticamente con los pulsos intrusivos de edad similar, mientras que el evento de mineralización de 12 Ma podría estar asociado con algún pulso intrusivo no identificado. Por otro lado, si bien el último evento de mineralización registrado es de 10 Ma, la presencia de un pórfido mineralizado datado en 9.3 Ma (Pórfido de Feldespato Hornblenda: FHP) indicaría que la mineralización podría haberse extendido por más tiempo. Aparentemente, el último evento magmático-hidrotermal registrado en el área de estudio (Fig. 2.2b) correspondería al cuerpo de brecha polimíctico PBX, el cual contiene (entre otras litologías) clastos del pórfido mineralizado FHP. En este capítulo se presentan los resultados de geocronología Re-Os en pirita de vetillas tardías que cortan a este cuerpo de brecha (tipo VI y X; Fig. 2.4; Tabla 2.2) con el objetivo de acotar la temporalidad del último evento de mineralización identificado en el prospecto.

Los datos geocronológicos en conjunto con la geoquímica de roca total, presentados en el capítulo anterior, indican que los magmas asociados a la génesis del prospecto están relacionados a un reservorio magmático profundo, complejo y que ha alimentado al sistema hidrotermal por un largo período de tiempo. En complemento, los isótopos de Hf indican que estos magmas tienen un bajo grado o nula contaminación cortical. Dado que el sistema isotópico Re-Os además de entregar información geocronológica también se utiliza como herramienta geoquímica para trazar la fuente de los metales, en este capítulo se busca correlacionar y complementar la información geoquímica presentada con el objetivo de identificar procesos magmáticos-hidrotermales profundos que puedan favorecer la formación de un yacimiento del tipo pórfido cuprífero.

3.2 MARCO TEÓRICO

3.2.1 Datación mediante Re-Os

El sistema Re-Os es la técnica más importante para datación de depósitos minerales (Stein, 1998), esto se debe a que el Re y el Os son elementos calcófilos y siderófilos a la vez, por lo tanto se incorporan fácilmente en la red cristalina de sulfuros y óxidos. Lo anterior no solo permite la datación directa de la mineralización metálica sino que además es un sistema relativamente insensible a eventos post-cristalización como la deformación y metamorfismo (Richards y Noble, 1998). Hoy en día, es posible obtener edades precisas con errores pequeños (generalmente en el rango de $\pm 0.05\%$; Barra y Ruiz, 2003).

El sistema isotópico Re-Os se basa en la desintegración del ^{187}Re en ^{187}Os mediante la liberación de una partícula β^- . La ecuación 3.1 describe el aumento del isótopo ^{187}Os de un mineral, en un tiempo t , una vez que dicho mineral ha alcanzado la temperatura de cierre (es decir, una vez que el mineral se ha convertido en un sistema cerrado para el Os).

$$^{187}\text{Os} = ^{187}\text{Os}_i + ^{187}\text{Re}(e^{\lambda t} - 1) \quad (\text{Ec. 3.1})$$

$^{187}\text{Os}_i$ es la cantidad inicial de ^{187}Os , λ es la constante de desintegración ($\lambda = 1,666 \times 10^{-11}$ años $^{-1}$; vida media= 41.606 Ga; Smoliar et al., 1996) y t es la edad del mineral. Sin embargo, la expresión utilizada para calcular la edad (Ec. 3.2) es una modificación de la ecuación 3.1, la cual se divide por la cantidad de ^{188}Os (constante, puesto que es un isótopo estable) ya que las razones isotópicas son determinadas con mayor exactitud por los espectrómetros de masas (Richards y Noble, 1998).

$$\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}} = \left(\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}} \right)_i + \frac{^{187}\text{Re}}{^{188}\text{Os}} (e^{\lambda t} - 1) \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Las razones $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ y $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ son medidas por el espectrómetro de masas (*negative ionization mass spectrometer*, NTIMS), mientras que la razón $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ inicial ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(i)}$) es obtenida a partir del método de la isócrona detallado a continuación.

3.2.1.1 Método de la isócrona

La ecuación 3.2 define una isócrona, que por definición corresponde a la línea recta que mejor aproxima la edad de muestras cogenéticas. Para poder obtener la edad se debe graficar la razón $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ en el eje de las ordenadas y la razón $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ en el eje de las abscisas, de esta manera se asume que la razón $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(i)}$ es la misma para todas las muestras. La ecuación 3.2 puede escribirse de la forma $y = mx + b$, donde $y = ^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$, $m = e^{\lambda t} - 1$, $x = ^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ y $b = ^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(i)}$. De esta manera, dadas 3 muestras cogenéticas a_1 , a_2 y a_3 , las ecuaciones serían las siguientes:

$$y_{a1} = b + mx_{a1}$$

$$y_{a2} = b + mx_{a2}$$

$$y_{a3} = b + mx_{a3}$$

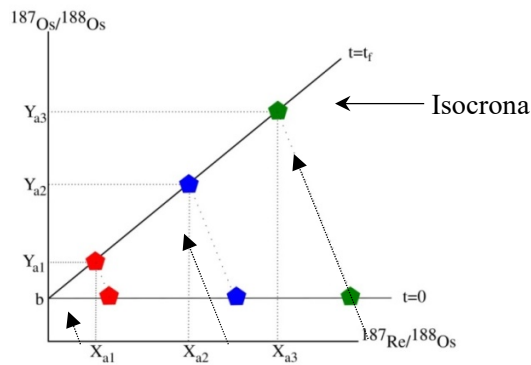


Figura 3.1 Isocrona del sistema Re-Os de 3 muestras cogenéticas a1, a2 y a3. Notar que con el paso del tiempo la isocrona va aumentando su pendiente debido a que la cantidad de ^{187}Os aumenta a medida que se desintegra el ^{187}Re .

Una vez graficados los valores $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ y $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ para cada muestra (Fig. 3.1), se traza la isocrona cuya intersección con el eje Y entrega el valor de b , es decir, la razón $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (i). La pendiente de la isocrona entrega el valor de m , es decir $e^{\lambda t} - 1$. Con lo anterior ya es posible calcular la edad de la muestra (Ec. 3.3).

$$t = \frac{\ln(m+1)}{\lambda} \text{ (Ec. 3.3)}$$

Una buena isocrona se debe construir con muestras que presenten razones de isótopo padre e hijo ($^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$) en un amplio rango y que además presenten una alta colinearidad. Esta última característica se mide a través del coeficiente MSWD (*mean square weighted deviation*), el cual evalúa el exceso de dispersión de los datos más allá de la incertidumbre analítica (Richards y Noble, 1998). El MSWD se calcula según la ecuación 3.4 como (Ver más en Wendt y Carl, 1991):

$$MSWD = \frac{\sum y_i}{f} \text{ (Ec. 3.4)}$$

Donde f es el grado de libertad (equivalente al número total de muestras menos 2), y_i es la desviación de la muestra i respecto de la isocrona (respecto al eje de las ordenadas) y σ_i es el error analítico de la muestra i (respecto a ambos ejes). En el caso ideal, el valor de MSWD debiera ser cercano a 1, esto indica que la isocrona está bien definida y que la dispersión de los datos se explica únicamente por la incertidumbre analítica. Sin embargo, como el MSWD depende del número de muestras, se han determinado los límites superiores e inferiores esperados para este coeficiente (Wendt y Carl, 1991) como:

$$1 - \sqrt{\frac{2}{f}} < MSWD < 1 + 2\sqrt{\frac{2}{f}}$$

De esta manera, valores de MSWD por sobre el límite superior indican que las muestras están excesivamente dispersas y conforman errorcronas en vez de isocronas. Esta dispersión puede explicarse por la existencia de incertidumbre geológica (e.g. muestras no co-genéticas o apertura del sistema isotópico) o también puede ser indicio de que la incertidumbre analítica está sub estimada. Se debe notar que las edades calculadas a partir de regresiones con altos valores de

MSWD aún pueden ser útiles si es que son geológicamente razonables. Estos datos deben ser contrastados con otros métodos de datación como U-Pb o Ar-Ar (Richards y Noble, 1998; Kalsbeek, 1992). Por otro lado, valores de MSWD bajo el límite inferior indican que la incertidumbre analítica está sobrestimada.

3.2.1.2 *Materiales y consideraciones prácticas del método*

En la datación de depósitos minerales, la molibdenita ha sido el mineral más utilizado y debido a su amplia ocurrencia se han podido datar diversos tipos de depósitos tales como cromititas, skarns, greisens, pegmatitas, vetas, pórfidos cupríferos, entre otros (e.g. Marcantonio et al., 1993; McCandless y Ruiz, 1991; Suzuki et al., 1993, 1996; Stein et al., 1997, 1998a). La molibdenita es especialmente útil para estos fines ya que posee una alta concentración de Re (del orden de 100 a más de 1000 ppm) y no incorpora Os en su estructura cuando cristaliza (McCandless y Ruiz, 1991; Stein, 1998a, 1998b). De esta manera, todo el Os medido corresponde a ^{187}Os originado por la desintegración del isótopo ^{187}Re y, por lo tanto, la edad puede ser calculada a partir de una sola muestra (Ec. 3.5). Otros minerales oxidados y sulfurados (como es el caso de la pirita y la calcopirita) contienen concentraciones de Re comparativamente más bajas y cantidades medibles de Os inicial, la cual, tal como se vio anteriormente, debe ser determinada para obtener la edad. En la construcción de isócronas Re-Os para datar depósitos se han utilizado minerales tales como pirita (e.g. Freydier et al., 1997; Stein et al., 2000; Selby et al., 2009), arsenopirita (e.g. Arne et al., 2001; Morelli et al., 2005), magnetita (e.g. Ruiz y Mathur, 1999b; Huang et al., 2014), calcopirita (e.g. Freydier et al., 1997; Selby et al., 2009), bornita (e.g. Freydier et al., 1997; Selby et al., 2009), galena (e.g. Liu et al., 2015), esfalerita (e.g. Freydier et al., 1997; Liu et al., 2015) pirrotina (e.g. Brenan et al., 2000) e incluso roca total (e.g. Walker et al., 1994). La incorporación de Re y Os en óxidos y sulfuros (exceptuando la molibdenita) no está condicionada por la fase mineral (Freydier et al., 1977), por lo tanto es posible utilizar distintos minerales para la construcción de isocronas.

$$t = \frac{\ln\left(1 + \frac{^{187}\text{Re}}{^{188}\text{Os}}\right)}{\lambda} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Tal como en cualquier otro método geocronológico, se debe tener especial precaución en el material elegido para datación, ya que el sistema Re-Os es susceptible a sufrir una apertura y/o re-inicio bajo ciertas circunstancias geológicas. En el caso de la molibdenita, a pesar de que corresponde al geocronómetro más confiable dentro de este método (e.g. Stein et al., 2001; Ruiz y Mathur, 1999b), se ha reportado pérdida de Re por alteración hidrotermal a bajas temperaturas (cerca a los 150°C) y que también puede producirse en presencia de fluidos supérgenos (McCandless et al., 1993). La pérdida de Re, luego de que una parte se haya desintegrado en ^{187}Os , genera edades mayores que las reales. Por otro lado la presencia de illita como micro-inclusión en molibdenita provoca un enriquecimiento en Re señalando edades erróneamente más jóvenes (McCandless et al., 1993; Ruiz y Mathur, 1999b). El mejor método para identificar la presencia de inclusiones de arcilla es con un microscopio electrónico (Ruiz y Mathur, 1999b). Adicionalmente se debe tener en consideración la distribución no homogénea del Re y Os que ocurre tanto en la molibdenita como en otros sulfuros (e.g. Freydier et al., 1997; Mathur et al., 1999; Stein et al., 2001; Barra et al., 2003). Lo anterior conlleva a edades incorrectas si es que se analiza solo una porción de un cristal o se selecciona solo algunos cristales de gran tamaño y de manera no homogénea dentro del dominio a datar (e.g. vetilla, mineralización diseminada). Otro factor a considerar es la temperatura de cierre de los minerales a datar (500°C en molibdenita, e.g. Suzuki et al., 1996; 300 a 400°C en pirrotina y 500°C en pirita, Brenan et al., 2000) por lo que se

debe tener precaución de corroborar que la muestra no haya sido alterada por eventos hidrotermales locales de alta temperatura.

3.2.2 *Re-Os como trazador de metales*

Otro asunto de importancia en metalogénesis, además de conocer la temporalidad de los eventos mineralizadores, corresponde a determinar la proveniencia de los metales. Lo anterior tiene especial relevancia en exploración y en el entendimiento acerca de la formación de distintos depósitos. Para estos fines, la naturaleza calcófila del Re y del Os pone en ventaja a este sistema isotópico en relación a otros como Rb-Sr, Sm-Nd e isótopos de Pb, los cuales, a excepción del último, son elementos esencialmente litófilos y por lo tanto se concentran en minerales silicatados en vez de sulfurados. Esta característica permite asumir que el comportamiento del Os se aproxima bastante al comportamiento de los metales de transición.

El Re es altamente incompatible en el manto comparado con el Os (e.g. Ruiz y Mathur, 1999b; Mathur et al., 2000a), en consecuencia, la razón Re/Os está más enriquecida en la corteza que en el manto (Drake y Jones, 1983; Fleet y Stone, 1991; Fleet et al., 1999). Debido a la desintegración del ^{187}Re en ^{187}Os a través del tiempo, la razón $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ de la corteza alcanza valores muy elevados en comparación con el manto (e.g. Lambert et al., 1999). Esser y Turekian (1993) determinaron que el valor actual de $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ en corteza continental erodada es de aproximadamente 10 a 11. Utilizando la normalización propuesta por Snow y Reisberg (1995), estos valores serían equivalentes a valores de $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ entre 1.204 y 1.324. Por otro lado, muestras provenientes del manto bajo un arco continental presentan valores entre 0.128 a 0.134 (Brandon et al., 1996; McInnes et al., 1999). De esta manera altas razones de $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (i) puede indicar de manera efectiva la contribución de Os de la corteza (e.g. Ruiz y Mathur, 1999b), comportamiento extrapolable a los metales que conforman los sulfuros analizados.

3.3 MUESTREO Y PROCEDIMIENTOS ANALÍTICOS

En este trabajo se realizaron análisis geocronológicos Re-Os en pirita y calcopirita en 14 muestras. Como el objetivo de estudio es delimitar el último evento de mineralización identificado en el prospecto, se escogieron muestras que representaran los eventos tardíos. En particular, se analizaron sulfuros pertenecientes a (i) vetillas de tipo IV, VI, IX y X, (ii) mineralización en pátina y (iii) mineralización disseminada. Todos los sulfuros analizados provienen de muestras con alteraciones argílica, fílica o propilítica (Tabla 3.1).

De cada muestra de mano los sulfuros fueron seleccionados manualmente con pinza. Con el objetivo de evitar contaminación con elementos del grupo del platino, las muestras de sulfuro fueron envueltas en papel antes de reducir las a polvo con un martillo. Este procedimiento se realizó en las dependencias del laboratorio de Geología de Juniata College, Estados Unidos. Para homogeneizar la variabilidad de las razones Re/Os, los granos fueron recolectados en diferentes partes del dominio (vetillas, pátina o mineralización disseminada). En algunas muestras, la pirita y la calcopirita se encuentran intercrecidas, haciendo la separación manual de las distintas fases difícil e incluso imposible. Sin embargo, mediante el estudio petrográfico no se encontró mineralización de molibdenita en ninguna de las muestras analizadas ni como inclusión en las fases sulfuradas.

Se recolectó alrededor de 1 g de sulfuro por cada muestra, del cual aproximadamente 0.4-0.6 g fueron cargados en un tubo de Carius (Fig. 3.2a), en conjunto con spikes¹ de ¹⁸⁵Re y ¹⁹⁰Os y una solución 1:2 de HCL y HNO₃ según el procedimiento descrito en Shirey y Walker (1995). Además se agregó ~1-1.5 ml de H₂O₂ a la mezcla ácida para asegurar la oxidación completa de las muestras y el equilibrio de los spikes (Shirey y Walker, 1995; Frei et al., 1998; Mathur et al., 2000a). Los tubos fueron protegidos por una cubierta de acero inoxidable y calentados en un horno a 180-220°C durante 12 horas. Luego, con el objetivo de separar el Os, la solución del tubo fue sometida a un proceso de destilación de 2 etapas similar al descrito en Shirey y Walker, (1995) y Frei et al. (1998) (Fig. 3.2b). El Os fue purificado mediante micro destilación (Birck et al., 1997) y luego cargado en un filamento de platino en conjunto con Ba(OH)₂ para intensificar la ionización. El Re remanente en la solución de la primera destilación fue extraído y purificado mediante un proceso de cromatografía de intercambio iónico de 2 etapas. Finalmente, el Re es cargado en un filamento de níquel. Todas las muestras fueron analizadas en un NTIMS (*negative thermal ionization mass spectrometer* modelo VG 54; Fig. 3.2c) en la Universidad de Arizona.

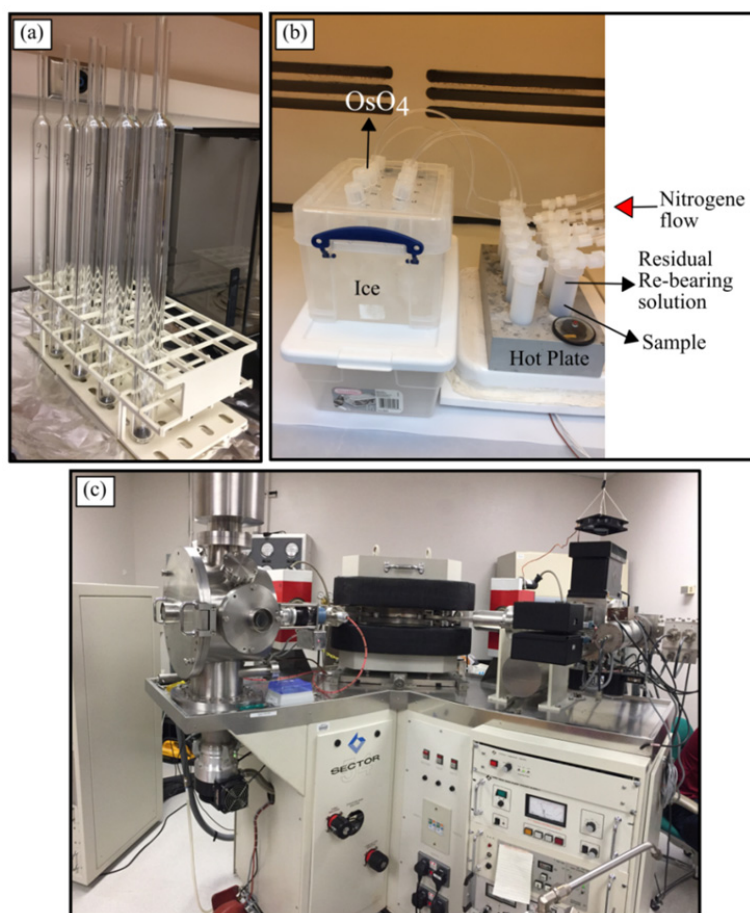


Figura 3.2 Procedimiento analítico Re-Os en pirita y calcopirita. (a) Tubos de Carius. (b) Proceso de destilación de 2 etapas para separar el Re y Os de cada muestra. (c) NTIMS (*negative thermal ionization mass spectrometer*) modelo VG 54. Todas las fotos fueron tomadas en las dependencias de la Universidad de Arizona, Estados Unidos.

¹ Spike: Sustancia que contiene una cantidad conocida de un elemento/isótopo de interés. Se utiliza en la técnica de dilución isotópica, la cual tiene por objetivo, mediante un espectrómetro de masas, determinar la cantidad de un isótopo de interés de una muestra.

Los blancos procedurales, muestras que permiten determinar y evaluar cualquier contaminación o interferencia causada por procedimiento de medición, varían entre 0.3-0.5 pg Os y 20-35 pg Re. La razón $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ de los blancos es de 0.23. Las variaciones en los blancos analíticos constituyen la mayor fuente de error en el análisis Re-Os de baja concentración (pirita y calcopirita) y no considerarlo conduce a una significativa subestimación de los errores (e.g. Mathur et al., 2000a). De esta manera, los errores de las razones $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ y $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ se calcularon variando la concentración del blanco de Os entre 0.5 a 1 pg durante la reducción de datos. Los errores calculados se muestran en la Tabla 3.1 como la desviación porcentual de la media. Las edades y razones $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ inicial son calculadas con el programa ISOPLOT 4.15 (Ludwig, 2008).

Tabla 3.1 Resultados Re-Os en pirita y calcopirita de muestras tardías y post-brecha PBX.

Muestra	Fase	Estilo de mineralización/ Tipo de vetilla	Alteración	Roca de Caja	Re (ppb)	Os (ppt)	¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os	±2σ	¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os	±2σ
<i>Muestras tardías</i>										
B02356	Py	Qz-Anh-Gyp-Py±Sph±Tour (IV)	Fílica (Ser-Qz±Ill)	TON	24.80	18.00	6539.00	392.34	2.42	0.10
B02364	Py	Qz-Anh-Gyp-Py±Sph±Tour (IV)	Fílica (Ser-Qz±Ill)	TON	63.72	24.00	20067.00	1003.35	4.23	0.17
B02373	Py	Qz-Anh-Gyp-Py±Sph±Tour (IV)	Fílica (Ser-Qz±Ill)	TON	1.26	14.00	446.00	31.22	0.34	0.02
B03115-7	Py	Diseminada	Fílica (Ser-Qz±Ill)	FRHP	28.76	5.00	79845.00	6387.60	14.82	1.04
B03470-4	Cpy+Py	Pátina	Fílica (Ser-Qz±Ill)	FRHP	2.90	8.00	2690.00	161.40	1.61	0.10
B06264-6	Cpy	Qz-Cpy-Py±Sph	Propilítica	GRD	2.95	8.00	2210.00	132.60	1.50	0.09
B06346-8	Cpy	Chl-Ep-Py-Cpy (IX)	Propilítica	GRD	2.51	12.00	23356.00	1634.92	4.48	0.27
<i>Muestras post-brecha PBX</i>										
B04158	Py	Py-Qz±Sph (X)	Argílica	PBX	2.89	4.00	6746.00	539.68	0.96	0.06
B04163-3	Py	Py-Qz±Sph (X)	Argílica	PBX	4.17	3.00	12931.00	1163.79	1.97	0.16
B04253	Py	Py-Qz±Sph (X)	Argílica	PBX	6.05	3.00	11424.00	1028.16	1.81	0.16
B04335-7	Cpy	Qz-Gyp-Anh-Chl-Py±Cpy (vi)	Fílica (Chl-Ser-Py)	PBX	69.80	13.00	60188.00	4213.16	10.29	0.62
B04379-2	Cpy	Qz-Gyp-Anh-Chl-Py±Cpy (vi)	Fílica (Chl-Ser-Py)	PBX	206.40	23.00	336411.00	16820.55	56.46	2.26
B04122-4	Py	Py-Qz±Sph (X)	Argílica	PBX		2.00		0.00	20.15	0.81
B04241	Py	Py-Qz±Sph (X)	Argílica	PBX	16.18	8.00	17547.00	1403.76	4.95	0.30
<p>OBS:- Abreviaciones minerales: Anh: anhidrita; Bn: bornita; Cc: calcosina; Chl: clorita; Cpy: calcopirita; Ep: epidota; Gn: galena; Gyp: yeso; Ill: illita; K-spar: feldespato K; Mo: molibdenita; Py: pirite; Qz: cuarzo; Sph: esfalerita; Tour: turmalina.</p> <p>- Abreviaciones litología: PBX: Brecha polimíctica; FRHP: Pórfido feldespato y hornblendas redondeadas; GRD: Granodiorita; TON: Tonalita</p>										

3.4 RESULTADOS

3.4.1 Clasificación de muestras y resultados

El total de muestras analizadas (14) se divide en dos grupos; (i) muestras post-brecha PBX y (ii) muestras tardías, de manera que las determinaciones geocronológicas se enfocan en acotar el que se sospecha es el principal y último evento de mineralización en el sistema. El grupo de muestras post-brecha PBX está conformada por 5 muestras de pirita proveniente de vetillas X (asociadas a alteración argílica) y 2 muestras de calcopirita proveniente de vetillas VI (asociadas a alteración filica clorita-sericita). Tal como se ha descrito en el capítulo anterior, ambos tipos de vetilla cortan al cuerpo de brecha PBX; las vetillas VI cortan a este cuerpo en profundidad mientras que las vetillas X lo cortan en zonas intermedias a someras. Todas las muestras pertenecientes a este grupo se distribuyen a lo largo del sondaje BRA004 (Fig. 3.3). Por otro lado, el grupo de muestras tardías está conformado por 4 muestras de pirita provenientes de vetillas IV y una muestra con mineralización diseminada (todas asociadas a alteración filica cuarzo-sericita-illita). Dentro de este grupo se incluyen además 3 muestras de calcopirita provenientes de mineralización en pátina (alteración filica cuarzo-sericita-illita) y vetillas tipo IX (alteración propilitica). Todas las muestras de este grupo (tardías) se distribuyen a lo largo de los sondajes BRA002, BRA003 y BRA006 (Fig. 3.3).

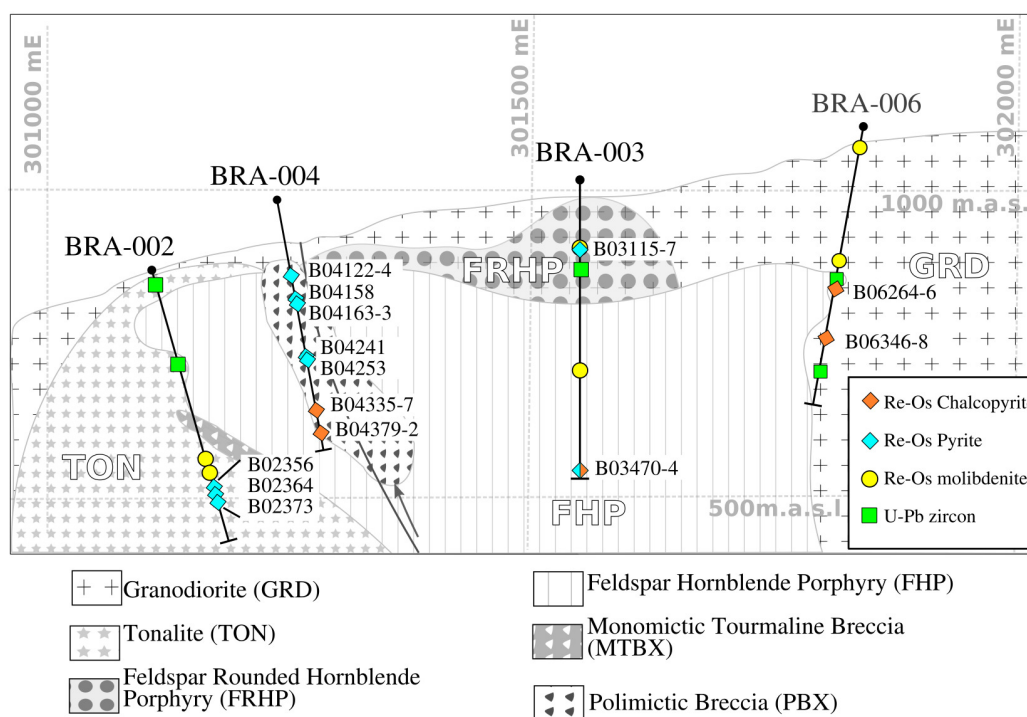


Figura 3.3 Distribución de las muestras datadas en la sección transversal A-A'.

Los resultados de ambos grupos de muestras (tardías y post-brecha PBX) se muestran en la Tabla 3.1. Las concentraciones de Re en pirita y calcopirita varían típicamente entre 1.26 y 28.76 ppm, con excepción de las muestras B02364, B04335-7 y B04379 que muestran valores considerablemente más altos (hasta 206.4 ppb). Las concentraciones de Os varían entre 2-24 ppt.

La mayoría de las muestras analizadas tienen valores dentro del rango de depósitos pórfido Cu-Mo Andinos (Fig. 3.4; 5-32 ppt Os y 0.18-100 ppb Re; Freydier et al., 1997; Mathur et al., 2000a). Sin embargo, a pesar de que las muestras analizadas fueron escogidas a partir de dominios mineralizados sin molibdenita y estudiadas mediante petrografía de luz reflejada, no se descarta que las muestras con mayor concentración de Re puedan tener micro-inclusiones de este mineral (Barra et al., 2017). La muestra B04122-4 no presentó un valor medible de Re, por lo que no se tomará en consideración en este estudio.

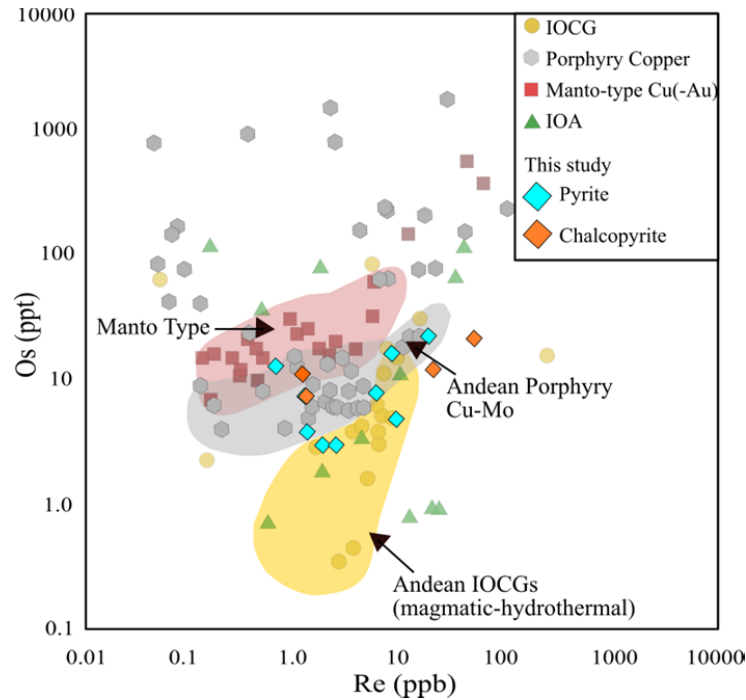


Figura 3.4 Comparación de contenidos de Re-Os en distintos depósitos minerales. Se observa que la mayoría de las muestras grafica en el campo de pórfidos Cu-Mo andinos. Modificado de Barra et al. (2017). Los campos fueron delimitados según los datos de Freydier et al. (1997), Ruiz et al. (1997), Mathur et al. (2000, 2002) y Barra et al. (2017).

La Figura 3.5a muestra un gráfico de razones $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ vs $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ donde se encuentran graficadas todas las muestras analizadas. Se observa que las muestras se alinean en 2 rectas (isocronas) distintas; una de mayor pendiente que corresponde a las muestras post-brecha PBX, y otra de menor pendiente correspondiente al grupo de muestras tardías. Se observa también que las muestras B04241, B03115-7 y B02373 no se alinean a estas isocronas. Según las relaciones de corte estudiadas en el prospecto, la muestra B04241 es coetánea al resto de las muestras del grupo post-brecha PBX (Anexo B), por lo tanto, el hecho de que esta muestra no grafique por sobre la recta implica que la pirita ha sufrido pérdida de Re por procesos post-cristalización. Con respecto a la muestra B03115-7, si bien la mineralización de pirita está asociada a alteración fílica (cuarzo-sericita-illita), esta al ser diseminada, la probabilidad de que realmente sea coetánea a las otras muestras del grupo es incierta. Lo anterior indica que esta muestra no se alinea en la isocrona de muestras tardías ya sea porque ha sufrido una pérdida de Re, o bien, porque no es coetánea. Por otro lado, la pirita analizada de la muestra B02373 fue obtenida a partir de una vetilla de tipo IV cercana en ubicación a otras 2 muestras de pirita provenientes del mismo tipo de vetilla (B02364 y B02356; 9 y 17 m de distancia respectivamente; Fig. 3.3) que sí se alinean a la isocrona de muestras tardías. Sin embargo, la

evidencia petrográfica muestra que la vetilla IV de la muestra B02373 presenta textura de reactivación² (Fig. 3.5b; Anexo B). Estos antecedentes sugieren que la muestra B02373 efectivamente es coetánea al grupo de muestras tardías, sin embargo, un evento hidrotermal posterior habría abierto el sistema Re-Os de la pirita, generando un exceso de Re. Ninguna de estas muestras (B04241, B03115-7 y B02373) son consideradas en este trabajo en la construcción de isocronas.

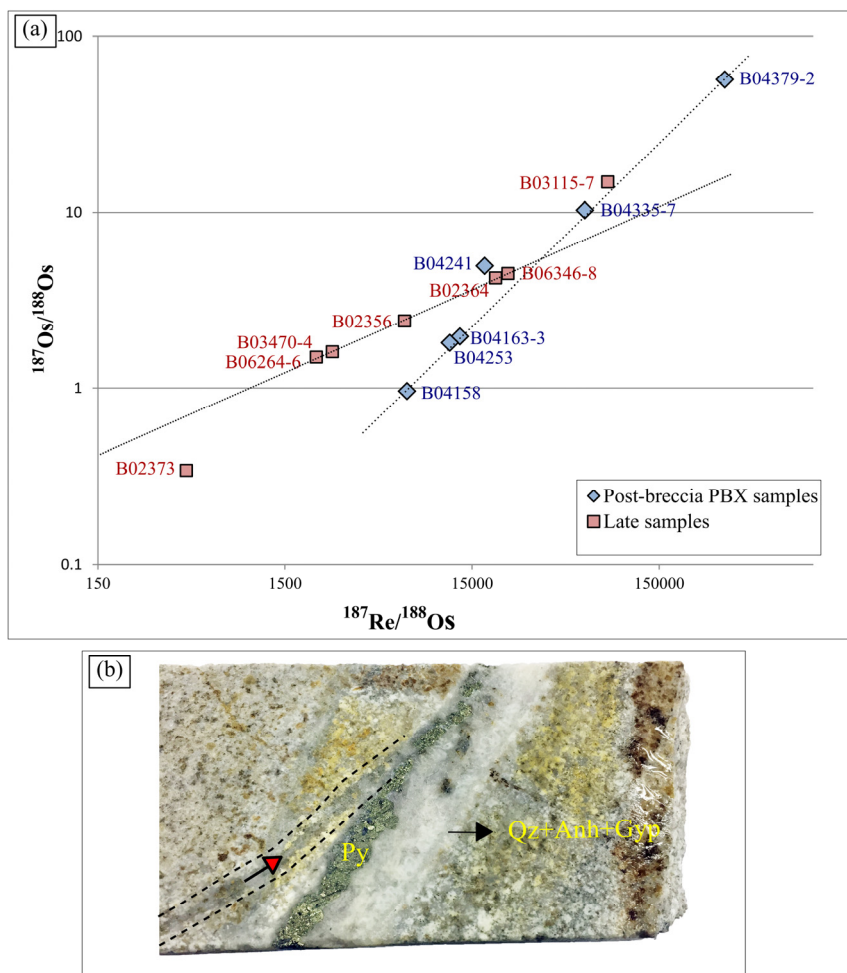


Figura 3.5 (a) Muestras graficadas en el diagrama $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ vs $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ en escala logarítmica. Se observa que las muestras tardías y post-brecha PBX se alinean en dos rectas distintas. Las muestras B03115-7 y B04241 presentan pérdida de Re, mientras que la muestra B02373 presenta exceso de Re. (b) Textura de reactivación de vetilla tipo IV en la muestra B02373. Abreviaciones minerales detalladas en la figura 2.4.

3.4.2 Isocronas de muestras post-brecha PBX

Las piritas y calcopiritas del grupo de muestras post-brecha PBX (B04158, B04163-3, B04253, B04335-7 y B04379-2) forman una isocrona de edad 10.21 ± 0.54 Ma (MSWD=0.22)

² Una vetilla corresponde a una zona de debilidad en la roca, por lo tanto los fluidos hidrotermales tienden a circular por dichas debilidades. Textura de reactivación hace referencia a la presencia de más de un pulso de mineralización dentro de una misma vetilla.

con una razón $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(i)}$ de -0.18 ± 0.12 (Modelo 1; Fig. 3.6a). A pesar de que generar una isocrona con muestras que presenten una gran variación en las razones de isótopos padre-hijo es favorable (e.g. Richards y Noble, 1998), se opta también por generar isocronas sin las muestras más radiogénicas con el objetivo de asegurar que estas muestras no estén controlando las edades (e.g. Barra et al., 2003). La isocrona sin la muestra B04379-2 (la más radiogénica del grupo) entrega una edad de 10.43 ± 0.98 Ma (MSWD=0.18) y una razón $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(i)}$ de -0.22 ± 0.17 (Modelo 1; Fig. 3.6b). La isocrona sin las muestras B04379-2 y B04335-7 (las dos más radiogénicas del grupo) entrega una edad de 10.2 ± 2.2 Ma (MSWD=0.31) y una razón $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(i)}$ de -0.19 ± 0.32 (Modelo 1; Fig. 3.6c).

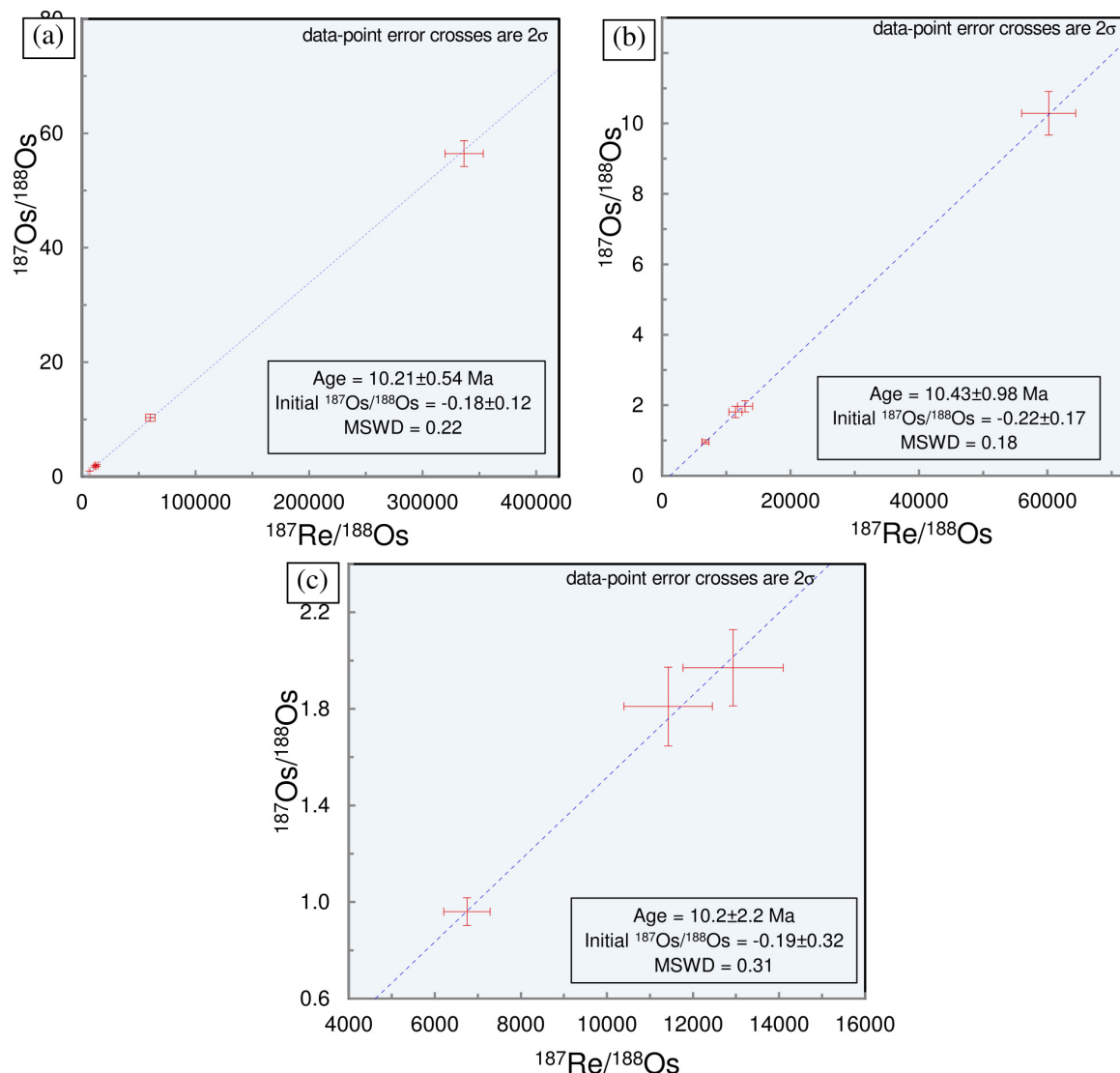


Figura 3.6 Isocronas de pirita y calcopirita pertenecientes al grupo de muestras post-brecha PBX. (a) Isocrona generada considerando todas las muestras (n= 5). (b, c) Isocronas generadas sin considerar las muestras más radiogénicas (n= 4 y n=3 respectivamente).

3.4.3 Isocronas de muestras tardías

Las piritas y calcopiritas del grupo de muestras tardías (B02356, B02364, B03470-4, B06264-6 y B06346-8) forman una errorcrona de edad 8.7 ± 1.7 Ma (MSWD=5.7) con una razón $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(i)}$ de 1.28 ± 0.34 (Modelo 3; Fig. 3.7a). Se observa que la muestra B02356 se encuentra levemente más a la izquierda de la errorcrona. La isocrona generada sin esta muestra otorga una edad de 8.88 ± 0.64 Ma (MSWD= 0.78) y una razón $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(i)}$ de 1.192 ± 0.079 (Modelo 1; Fig. 3.7b).

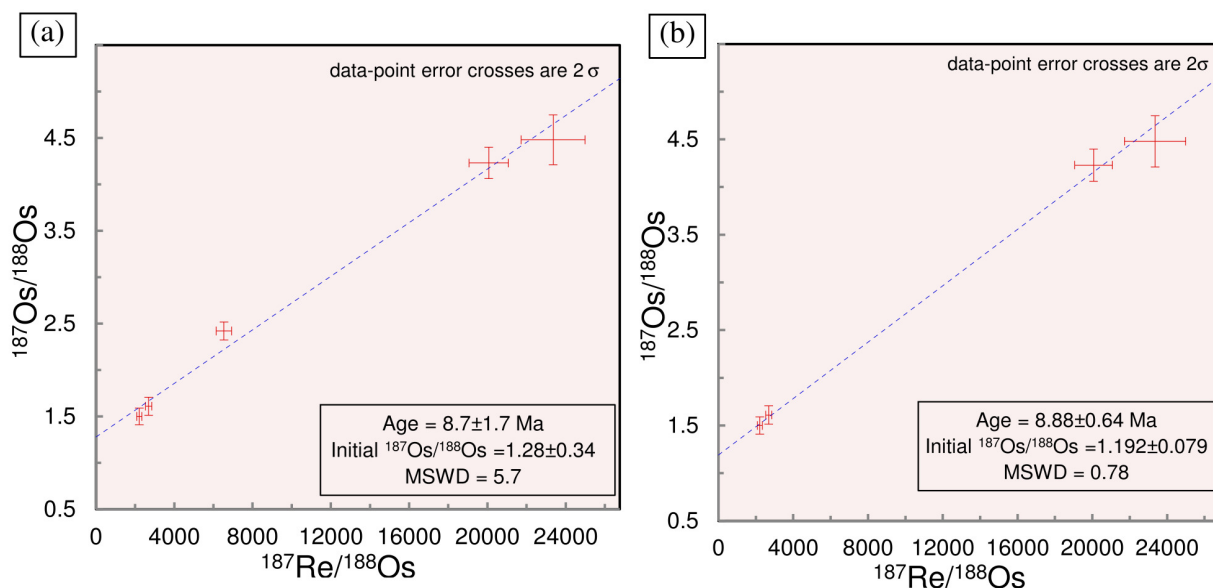


Figura 3.7 Isocronas de pirita y calcopirita perteneciente al grupo de muestras tardías. (a) Errorcrona generada considerando todas las muestras (n= 5). (b) Isocrona generada sin la muestra B02356 (n= 4).

3.5 DISCUSIÓN

3.5.1 Calidad del método

En el grupo de muestras tardías, tanto la calcopirita como la pirita presentan valores de $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ en un rango bastante variable y por lo tanto no se evidencia que alguna fase concentre preferentemente más ^{187}Re que otra. Por otro lado, en el grupo de muestras post-brecha PBX, la calcopirita presenta valores de $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ mucho más elevados en comparación a la pirita. Lo anterior podría sugerir que (i) durante el evento de brechización PBX la calcopirita adquiere preferentemente más Re que la pirita, (ii) la calcopirita es más susceptible a eventos tardíos de alteración y/o (iii) existe la presencia de micro inclusiones de molibdenita en los granos de calcopirita. Freydier et al. (1997) señala que la distribución del Re y Os en sulfuros de baja concentración aparentemente no está controlada por la fase mineral, y por lo tanto, una fase sulfurada puede adquirir una concentración de Re y Os bastante variable, característica que incluso favorece la robustez del método de la isocrona para el cálculo de edades. Dicho antecedente argumenta a favor de que en general el Re no se fracciona preferentemente en la calcopirita, y por lo tanto, tal como señala Freydier et al. (1997), los valores de la razón Re/Os dependen únicamente de la homogeneidad del sistema hidrotermal desde el cual precipita. Por otro lado, en ninguna de las isocronas obtenidas por las muestras post-brecha PBX se observa que la calcopirita presente ganancia o pérdida de Re (Fig. 3.6). Además, las edades otorgadas por las

isocronas que consideran estas muestras (10.21 ± 0.54 y 10.43 ± 0.98 ; Fig. 3.6a, b) y la única isocrona que no las considera (10.2 ± 2.2 ; Fig. 3.6c) son bastante similares. De esta manera, se descarta la presencia algún evento tardío de alteración que pueda haber producido una removilización de Re en la calcopirita, confirmando además que todas estas muestras son co-genéticas. Finalmente, la presencia de micro inclusiones de molibdenita co-genética (no identificada mediante petrografía) parece ser la razón más probable por la cual la calcopirita se ve notablemente enriquecida en Re con respecto a la pirita.

Stein et al. (2000) señala que aquellos sulfuros que presenten una razón $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os} \geq 5000$ (*LLHR; low level highly radiogenic sulfides*) deben ser graficados en un diagrama ^{187}Re versus ^{187}Os para obtener edades más significativas y precisas. Lo anterior se debe a que en este tipo de muestras el ^{188}Os está pobremente determinado conllevando a grandes incertidumbres analíticas. Sin embargo, se han realizado muchos estudios en los cuales este tipo de sulfuros (*LLHR*) son graficados en el diagrama tradicional $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ versus $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ otorgando edades geológicamente razonables (e.g. Chuquicamata, Chile, El Salvador, Chile, Mathur et al., 2000a; Grasberg, Indonesia, Mathur et al., 2000b; Bagdad, Arizona, Estados Unidos, Barra et al., 2003). Considerando lo anterior y en vista de que el diagrama ^{187}Re versus ^{187}Os propuesto por Stein et al. (2000) sirve únicamente para obtención de edades sin conceder información acerca de la fuente (razón $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(i)}$), en este trabajo se optó por realizar las isocronas mediante el diagrama tradicional.

A partir de la pirita y calcopirita perteneciente al grupo de muestras post-brecha PBX se obtuvieron 3 isocronas (Fig. 3.6). Todas otorgan edades similares entre 10.2 a 10.4 Ma, por lo que se puede confirmar que todas las muestras representan un mismo evento de mineralización. Adicionalmente, cabe destacar que todas las edades obtenidas por este grupo de isocronas son similares a las dataciones de Re-Os en molibdenita presentadas en el capítulo anterior (10.14 ± 0.06 y 9.99 ± 0.05 ; Tabla. 2.3). Estos antecedentes permiten afirmar que las isocronas del grupo de muestras post-brecha PBX entregan edades razonables. No obstante, ninguna de ellas entrega una razón $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(i)}$ mayor que 0. Richards y Noble (1998) señala que las edades asociadas a aquellas regresiones que otorguen valores de Os inicial no razonables, podrían no tener significancia alguna. Sin embargo, la isocrona que no considera las muestras más radiogénicas entrega un valor $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(i)}$ que podría llegar a 0.13 dentro del error (Fig. 3.6c; $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(i)} = -0.19 \pm 0.32$). Esta razón es geológicamente razonable y corresponde al valor aproximado del manto bajo un arco continental. Lo anterior permite concluir que dicha isocrona es la más certera dentro de las realizadas, a pesar de estar conformada por solo 3 muestras y por ende tener un alto error asociado a la edad (10.2 ± 2.2 Ma; Fig. 3.6c). Todos los valores de MSWD obtenidos están dentro del rango esperado para isocronas construidas por 5, 4 y 3 muestras (0.18-2.6, 0.0-3.0 y 0.0-3.8 respectivamente; Wendt y Carl, 1991).

A partir de los sulfuros pertenecientes al grupo de muestras tardías se obtuvieron 2 isocronas. La primera de ellas entrega una edad de 8.7 ± 1.7 Ma con un MSWD= 5.7. Este valor de MSWD está fuera del rango esperado para isocronas construidas por 5 muestras (0.18-2.6; Wendt y Carl, 1991). En la Figura 3.7a se observa que la muestra B02356 se ubica levemente a la izquierda de la isocrona de muestras tardías. Esta muestra de pirita proviene de una vetilla de tipo IV y se encuentra ubicada a 8 m de la muestra B02364 de características petrográficas similares (Fig. 3.3; Tabla. 3.1; Anexo B) y que forma parte de la isocrona de muestras tardías. Esto sugiere que es más probable que la muestra B02356 presente una pérdida de Re producto de algún evento posterior a que se trate de una muestra no co-genética. Por otro lado, la isocrona realizada sin considerar esta muestra, entrega una edad de 8.88 ± 0.64 Ma con un MSWD= 0.78 (Fig. 3.7b). Se

observa que ambas isocronas entregan una edad y una razón $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ⁽ⁱ⁾ similar. Dichos valores son geológicamente razonables, sin embargo, se considera a la isocrona que excluye la muestra B02356 como la más certera debido a que presenta un valor de MSWD más cercano a 1.

Tal como se mencionó anteriormente, un valor muy bajo del coeficiente MSWD implica que la incertidumbre analítica puede estar sobrestimada. En la mayoría de las isocronas obtenidas se observa que este coeficiente es menor a 1. Lo anterior se explica por la presencia de muestras con valores de $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ extremadamente altos, y por lo tanto, los errores asociados también lo son. Las isocronas obtenidas para ambos grupos (post-brecha PBX y muestras tardías) pueden mejorar al incorporar un mayor número de muestras. De esta manera, las isocronas se construirían a partir de muestras que abarquen de manera más homogénea el rango amplio de razones $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ mostrado en ambos grupos. Lo anterior ayudaría a definir de manera más certera la pendiente de la isocrona, mejorando así tanto el coeficiente MSWD como el error asociado a las edades.

3.5.2 Geocronología del prospecto Brahma

Las dataciones U-Pb en circón reportadas en el capítulo anterior dan cuenta de la presencia de 3 eventos magmáticos de ~17 Ma, 14 Ma y 9 Ma. Por otro lado, las dataciones Re-Os en molibdenita indican 3 eventos de mineralización de ~14 Ma, 12 Ma y 10 Ma. A partir del mapeo de sondajes, descripción geológica del prospecto y relaciones de cortes estudiadas, se ha inferido que el evento magmático-hidrotermal de 10 Ma corresponde al evento de mineralización más importante. Sin embargo, dada la presencia de un pórfido mineralizado más joven (FHP), la duración total de este evento no está muy bien acotada, pudiendo extenderse desde los 10 Ma hasta por lo menos 9.3 Ma. La mineralización datada en este capítulo es posterior a este último evento magmático, por lo tanto, los nuevos antecedentes geocronológicos presentados en este capítulo deberían delimitar de mejor manera el último evento de mineralización.

La figura 3.8a muestra todas las dataciones realizadas en el prospecto Brahma, en ella se observa que los nuevos datos geocronológicos de Re-Os en pirita y calcopirita se correlacionan dentro del error con el evento magmático-hidrotermal de ~10 Ma. Dentro de estos datos, la edad de la mineralización post-brecha PBX puede aproximarse a 10.2 Ma. Sin embargo, y tal como se mencionó anteriormente, el gran error asociado al bajo número de muestras consideradas en la construcción de la isocrona, no permite tener claridad acerca de la duración total de este evento. La isocrona construida por muestras con mineralización tardía otorga una edad aproximada de 8.9 Ma, esta edad es coherente en términos de relaciones de corte con la geocronología del prospecto.

El último evento magmático identificado en el prospecto Brahma corresponde a la intrusión de la unidad porfídica FHP a los 9.3 Ma. Sin embargo, los antecedentes geocronológicos Re-Os en molibdenita, pirita y calcopirita indican que parte de la mineralización hospedada en esta unidad tiene una edad de ~10 Ma (Fig. 3.8b). Esto sugiere que (i) la cristalización del pórfido FHP ocurrió durante un rango de tiempo respecto de la edad central de 9.3 Ma estimada o (ii) existe otro intrusivo porfídico de características petrográficas y geoquímicas similares, pero ligeramente más antiguo en edad. La primera afirmación está respaldada por la abundante presencia de circones de ~10 Ma en esta unidad (Fig. 2.6; Anexo A: ítem 1). Por otro lado, la muestra analizada del pórfido FHP está ubicada a aproximadamente 500 m de la mineralización datada (Fig. 3.8b), lo cual constituye un argumento a favor de que en realidad puede haber más de un pórfido de características similares dentro del área estudiada.

Para corroborar cualquiera de las dos hipótesis se sugieren realizar más dataciones de la unidad FHP en distintas áreas de la sección A-A' y también a los clastos porfídicos de la unidad de brecha PBX. No obstante, cualquiera sea la hipótesis correcta, los nuevos datos permiten confirmar que el último evento magmático-hidrotermal del sistema ocurrió alrededor de los 10 Ma y se habría extendido de manera continua al menos hasta los 8.9 Ma, confirmando el supuesto inicial de que la mineralización ocurre en un rango de aproximadamente 1 Ma.

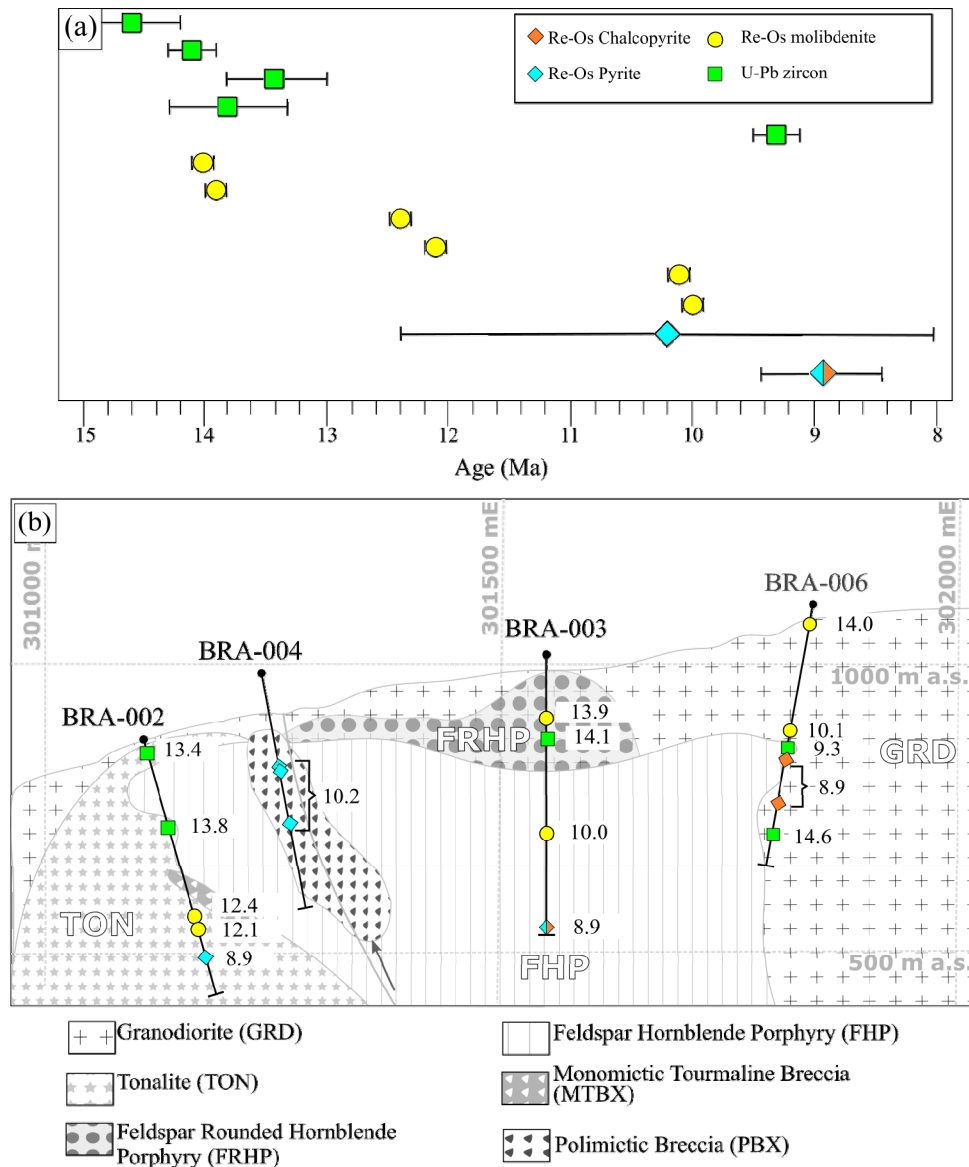


Figura 3.8 (a) Resumen de todas las dataciones realizadas en el prospecto Brahma (errores a 2σ) y (b) ubicación de las muestras correspondientes.

La figura 3.9 muestra la tabla paragenética de vetillas identificadas en el prospecto actualizada según la nueva información geocronológica. La mineralogía, textura, relaciones de corte y edad de estas vetillas dan cuenta de las distintas etapas de mineralización del sistema hidrotermal. Según la datación Re-Os en molibdenita, la etapa temprana ocurrió alrededor de los 14 Ma y está representada por vetillas temprana tipo I y II asociadas a alteración potásica (Tabla 2.3). Estas vetillas, tal como se mencionó en el capítulo anterior, se pueden correlacionar con

vetillas tipo EB y A (sensu El Salvador; Gustafson y Hunt, 1975). La etapa de mineralización transicional está representada por vetillas de tipo III y V, asociadas a alteración clorita-sericita. Estas vetillas se correlacionan con vetillas tipo C y D respectivamente (sensu El Salvador ; Gustafson y Hunt, 1975; Gustafson y Quiroga 1995). Según la datación Re-Os en molibdenita y relaciones de corte, este evento transicional ocurrió entre los 14 Ma y los 12 Ma. La etapa de mineralización tardía es la mejor documentada en la zona estudiada. Esta se extendió entre los 10 y 9 Ma, y está representada por vetillas de tipo IV, VI, VII, VIII, IX y X, asociadas a alteraciones cuarzo-sericita-illita, argílica moderada y propilítica retrógrada. Todas estas vetillas se correlacionan con vetillas tardías tipo D (sensu El Salvador; Gustafson y Hunt, 1975). Se corrobora finalmente que las edades de mineralización obtenidas presentan una buena correlación con la paragénesis de vetilla y relaciones de corte observadas.

Vein Type	Mineralogy	Early	Late	Supergene
		14 Ma	12 Ma	10.2-8.9 Ma
I	Bt	██████		
II	Qz-K-spar±(Py-Cpy-Mo)	██████		
III	Qz-Anh-Gyp-Py		██████	
IV	Qz-Anh-Gyp-Py±Sph±Tour			██████
V	Mo-Gyp±Py		██████	
VI	Qz-Gyp-Anh-Chl-Py±Cpy			██████
VII	Mo-Qz-Ser			██████
VIII	Qz-Py-Bn-Cc±(Gn-Sph-Cpy)			██████ - - - -
IX	Chl-Ep-Py±(Cpy-Mo)			██████
X	Py-Qz±Sph			██████ - -

Figura 3.9 Paragénesis de vetillas del prospecto Brahma actualizada según nuevos datos geocronológicos. Abreviaciones minerales detalladas en la figura 2.4.

3.5.3 Fuente de los metales

Las muestras post brecha PBX presentan una razón $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(i)}$ de -0.19 ± 0.32 . Esta razón puede alcanzar un valor de 0.13 dentro del error y corresponde al valor aproximado del manto bajo un arco continental (Brandon et al., 1996; McInnes et al., 1999). Lo anterior indica que los fluidos asociados a la mineralización posterior a la brecha PBX (y probablemente también a la mineralización co-genética a esta) presentan una contribución de Os cortical nula o extremadamente baja, implicando esencialmente un origen magmático de dichos fluidos. En consecuencia de lo anterior, el reservorio magmático profundo del cual provienen estos magmas habría adquirido una cantidad significativa de Os mantélico y, por lo tanto, metales como el Cu y Mo también tendrían un origen similar. Estos resultados son coherentes con la signatura juvenil obtenida a partir de los análisis isotópicos de Hf en cada una de las unidades intrusivas identificadas en el prospecto (Fig. 2.8d).

La mineralización correspondientes al grupo de muestras tardías, asociadas a alteración filica (cuarzo-sericita-illita) y propilítica retrógrada, presenta una razón $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(i)}$ de 1.192 ± 0.079 . Esta razón difiere bastante del valor del manto e indica una contribución de Os cortical en el sistema magmático-hidrotermal. En caso de que la contribución de Os se produzca a nivel de fluidos hidrotermales, se sugiere una mezcla de fluidos magmáticos con aguas meteóricas que hayan lixiviado Os de las rocas de caja durante la etapa tardía del sistema hidrotermal (Fig. 3.10a). Se debe considerar que el prospecto Brahma se encuentra emplazado en secuencias volcano-sedimentarias que presentan signatura primitiva (Vergara et al., 1999), por lo

tanto, es probable que gran parte del Os de estas secuencias también sea de origen mantélico. Esto podría explicar que la razón de $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (i), si bien sugiere una componente cortical, no alcanza valores extremadamente altos como en otros pórfidos Cu-Mo andinos, para los cuales se ha atribuido una importante componente de corteza (~3.8-6.2, Cerro Colorado, Chile, Agua Rica, Argentina; Mathur et al., 2000a).

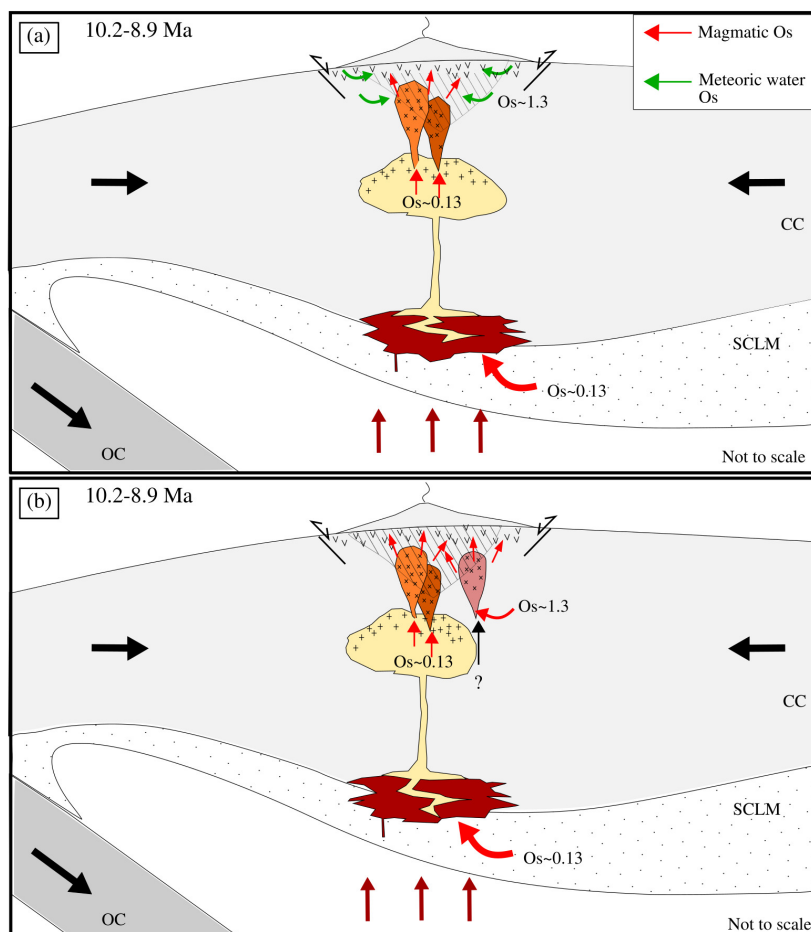


Figura 3.10 Distintos modelos esquemáticos sobre la proveniencia del Os (y por inferencia otros metales como el Cu y Mo) durante la última etapa de mineralización del prospecto Brahma (10.2-8.9 Ma). (a) La fuente magmática profunda adquiere el Os desde el manto. El magma asciende a niveles superficiales casi sin interacción con la corteza continental exsolviendo luego fluidos hidrotermales que generan mineralización de signatura mantélica. A medida que se enfría el sistema hidrotermal, hay predominancia de aguas meteóricas que lixivian metales desde las rocas de caja, generando mineralización con signatura cortical. (b) Mineralización de signatura cortical es producida por fluidos exsueitos de un magma de signatura cortical no identificado en este estudio. Este último habría adquirido los metales desde la corteza durante ascenso y/o emplazamiento. Escenario poco probable según contexto geológico de la zona (ver texto). CC: Corteza continental; OC: Corteza oceánica; SCLM: Manto litosférico subcontinental.

Las relaciones de corte estudiadas indican que el evento magmático-hidrotermal que ocurrió entre los ~10 y 9 Ma habría producido la mineralización de mayor importancia en el prospecto Brahma. Esta última etapa comienza cerca de los 10.2 Ma con mineralización dominada por fluidos magmáticos relacionados a la intrusión de las unidades FHP y brecha PBX. A medida que el sistema se va enfriando, el aporte de aguas meteóricas aumenta, tal como se

evidencia en la mineralización asociada a alteraciones filica y propilítica retrógrada datada en ~9 Ma. Una evolución similar en fluidos hidrotermales está evidenciada en otros pórfidos Cu-Mo chilenos tales como El Teniente, Andacollo y Chuquicamata (Freydier et al., 1997; Ruiz et al., 1997; Mathur et al., 2000a).

Una hipótesis alternativa es que el Os, y por inferencia metales como el Cu y Mo, hayan sido adquiridos por el magma parental de fluidos hidrotermales durante su ascenso y/o emplazamiento (Fig. 3.10b). Sin embargo, como todas las unidades intrusivas identificadas en el prospecto presentan signatura mantélica, esta hipótesis necesita de la presencia de otra unidad intrusiva no identificada (con componente cortical) que haya actuado como fuente de fluidos mineralizadores. Por otro lado, debido a los bajos contenidos de Re y Os en la corteza en relación a los fundidos mantélicos, es necesaria una importante componente de corteza félsica para modificar significativamente la razón de $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (i) de un magma (Freydier et al., 1997). Teniendo en cuenta lo anterior, esta hipótesis alternativa es improbable considerando el contexto geológico de la zona, donde las series volcánicas encajantes del prospecto Brahma (Formación Colbún; Eoceno Superior-Mioceno Medio) presentan afinidad toleítica y son isotópicamente las rocas más primitivas de Los Andes Chilenos (Vergara et al., 1999). Estos antecedentes permiten concluir que a pesar de que el aporte de aguas durante el enfriamiento del sistema hidrotermal es un supuesto no comprobado, parece ser la hipótesis más acertada (Fig. 3.10a).

Las diferentes fuentes de mineralización constituyen un indicio de la complejidad asociada a los sistemas magmáticos-hidrotermales. Mathur et al. (2000a) muestra una correlación entre el tonelaje de Cu y la razón de $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (i) en pórfidos Cu-Mo chilenos. Los depósitos más grandes presentan valores bajos de $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (i), indicando menos aporte de Os cortical en comparación con los depósitos más pequeños. El autor sugiere que las estructuras de escala regional asociadas a los grandes pórfidos permitirían el ascenso de magmas provenientes de una fuente primitiva profunda, sin interactuar significativamente con la corteza. Por el contrario, magmas con gran componente cortical podrían estar diluidos en metales base disminuyendo el potencial mineralizador (Mathur et al., 2000a). Según lo anterior, la signatura primitiva asociada tanto a la mineralización como a los intrusivos constituye otro antecedente que indicaría un interesante potencial exploratorio para el prospecto Brahma.

3.6 RESUMEN Y CONCLUSIONES

(1) Se realizó estudio isotópico Re-Os en muestras de pirita y calcopirita correspondiente al último evento de mineralización identificado en el prospecto Brahma. Estas fueron clasificadas en 2 grupos; muestras post brecha PBX y mineralización tardía. En general, la mayoría de las muestras presentan valores de Re y Os dentro del rango de depósitos de pórfidos Cu-Mo Andinos. Se presume la presencia de micro inclusiones de molibdenita co-genética en muestras con valores de $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ extremadamente altos.

(2) La isocrona generada para el grupo de muestras post brecha PBX entrega una edad de ~10.2 Ma. Sin embargo, el alto error producto del bajo número de muestras consideradas en la construcción de esta isocrona no permite tener claridad acerca de la duración total de este evento. La isocrona generada para el grupo de muestras tardías entrega una edad de ~8.9 Ma. Estas edades son coherentes, en términos de relaciones de corte, con las edades Re-Os en molibdenita presentadas en el capítulo 1. No obstante a lo anterior, la presencia de mineralización de pirita, calcopirita y molibdenita datada en ~10 Ma no es congruente con la edad de la roca de caja (9.3 Ma, pórfido FHP). Lo anterior sugiere que (i) el pórfido FHP cristalizó en un mayor rango de

tiempo o (ii) presencia de uno o más cuerpos intrusivos porfídicos de características similares pero más antiguos. Finalmente, a modo general, los antecedentes geocronológicos U-Pb en circón y Re-Os en piritita-calcopiritita y molibdenita registran la presencia de 3 eventos magmáticos-hidrotermales de aproximadamente 14 Ma, 12 Ma y 10 Ma. Las relaciones de corte estudiadas en el prospecto indican que el último evento habría producido la mineralización de mayor importancia, esta habría comenzado cerca de los 10.2 Ma extendiéndose de manera continua hasta los 8.9 Ma.

(3) La razón de $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (i) en piritita y calcopiritita de muestras post-brecha PBX evidencia un origen mantélico del Os, coherente con la signatura juvenil de las unidades intrusivas del prospecto. Por otro lado, la mineralización asociada a las alteraciones filica y propilitica retrógrada presenta una mezcla de Os mantélico y cortical. Los datos isotópicos Re-Os en sulfuros pertenecientes al último evento de mineralización evidencian una evolución relativamente continua de los fluidos hidrotermales. Este evento comenzaría a los ~10.2 Ma con predominancia de fluidos magmáticos de signatura mantélica y culminaría a los ~8.9 Ma con participación de aguas meteóricas durante el enfriamiento del sistema hidrotermal. Los bajos valores de $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (i) asociados a la principal etapa de mineralización develaría la presencia de procesos magmáticos-hidrotermales profundos propicios en la generación de un yacimiento tipo pórfido Cu-Mo de gran tonelaje (Mathur et al., 2000a).

3.7 BIBLIOGRAFÍA

- Arne, D.C., Bierlin, F.P., Morgan, J.W., Stein, H.J., 2001. Re-Os dating of sulfides associated with gold mineralization in central Victoria, Australia. *Economic Geology* 96, 1455-1459.
- Barra, F., Reich, M., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E., Palma, G., 2017. Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach. *Ore Geology Reviews* 81, 62-78.
- Barra, F., Ruiz, J., 2003. Contribuciones de la geocronología de Re-Os en molibdenitas al estudio de la longevidad de depósitos tipo pórfido cuprífero, in: X Congreso Geológico Chileno, Concepción.
- Barra, F., Ruiz, J., Mathur, R., Titley, S., 2003. A Re-Os study of sulfide minerals from the Bagdad porphyry Cu-Mo deposit, northern Arizona, USA. *Mineralium Deposita* 38, 585-596.
- Birck, J.L., Barman, M.R., Capmas, F., 1997. Re-Os Isotopic Measurements at the Femtomole Level in Natural Samples. *Geostandards newsletter* 21, 19-27.
- Boltwood, B.B., 1907. On the ultimate disintegration products of the radioactive elements, Part II. The disintegration products of uranium. *American Journal of Science* 23, 77-88.
- Brandon, A.D., Creaser, R.A., Shirey, S.B., Carlson, R.W., 1996. Osmium recycling in subduction zones. *Science* 272, 861-863.
- Brenan, J.M., Cherniak, D.J., Rose, L.A., 2000. Diffusion of osmium in pyrrhotite and pyrite: implications for closure of the Re-Os isotopic system. *Earth and Planetary Science Letters* 180, 399-413.

- Cumming, G.L., Kyle, J.R., Sangster, D.F., 1990. Pine Point; a case history of lead isotope homogeneity in a mississippi valley-type district. *Economic Geology* 85, 133-144.
- Drake, M.J., Jones, J.H., 1983. Partitioning of Re between metal and silicate phases. *Meteoritics* 18, 291.
- Esser, B.K., Turekian, K.K., 1993. The osmium isotopic composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57, 3093-3104.
- Fleet, M.E., Liu, M., Crocket, J.H., 1999. Partitioning of trace amounts of highly siderophile elements in the Fe–Ni–S system and their fractionation in nature. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63, 2611-2622.
- Fleet, M.E., Stone, W.E., 1991. Partitioning of platinum-group elements in the Fe-Ni-S system and their fractionation in nature. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55, 245-253.
- Frei, R., Nägler, T.F., Schönberg, R., Kramers, J.D., 1998. Re-Os, Sm-Nd, U-Pb, and stepwise lead leaching isotope systematics in shear-zone hosted gold mineralization: Genetic tracing and age constraints of crustal hydrothermal activity. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62, 1925-1936.
- Freydier, C., Ruiz, J., Chesley, J., McCandless, T., Munizaga, F., 1997. Re-Os isotope systematics of sulfides from felsic igneous rocks: Application to base metal porphyry mineralization in Chile. *Geology* 25, 775-778.
- Fryer, B.J., Taylor, R.P., 1984. Sm-Nd direct dating of the Collins Bay hydrothermal uranium deposit, Saskatchewan. *Geology* 12, 479-482.
- Gustafson, L.B., Hunt, J.P., 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology* 70, 857-912.
- Gustafson, L.B., Quiroga, J., 1995. Patterns of mineralization and alteration below the porphyry copper orebody at El Salvador, Chile. *Economic Geology* 90, 2-16.
- Huang, X., Qi, L., Wang, Y., Liu, Y., 2014. Re-Os dating of magnetite from the Shaquanzi Fe-Cu deposit, eastern Tianshan, NW China. *Science China Earth Sciences* 57, 267-277.
- Kalsbeek, F., 1992. The statistical distribution of the mean squared weighted deviation--- Comment: Isochrons, errorchrons, and the use of MSWD-values. *Chemical Geology* 94, 241-242.
- Lambert, D.D., Foster, J.G., Frick, L.R., Li, C., Naldrett, A.J., 1999. Re–Os isotopic systematics of the Voisey's bay Ni–Cu–Co magmatic ore system, Labrador, Canada. *Lithos* 47, 69-88.
- Liu, Y., Qi, L., Gao, J., Ye, L., Huang, Z., Zhou, J., 2015. Re-Os dating of galena and sphalerite from lead-zinc sulfide deposits in Yunnan Province, SW China. *Journal of Earth Science* 26, 343-351.
- Ludwig, K.R., 2008. Isoplot 3.70, a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4, p. 77.

- Maas, R., McCulloch, M.T., Campbell, I.H., Goad, P.R., 1986. Sm-Nd and Rb-Sr dating of an Archean massive sulfide deposit: Kidd Creek, Ontario. *Geology* 14, 585-588.
- Marcantonio, F., Zindler, A., Reisberg, L., Mathez, E.A., 1993. Re-Os isotopic systematics in chromitites from the Stillwater Complex, Montana, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57, 4029-4037.
- Mathur, R., Marschik, R., Ruiz, J., Munizaga, F., Leveille, R.A., Martin, W., 2002. Age of mineralization of the Candelaria Fe oxide Cu-Au deposit and the origin of the Chilean iron belt, based on Re-Os isotopes. *Economic Geology* 97, 59-71.
- Mathur, R., Ruiz, J., Munizaga, F., 2000a. Relationship between copper tonnage of Chilean base-metal porphyry deposits and Os isotope ratios. *Geology* 28, 555-558.
- Mathur, R., Ruiz, J., Tittley, S., Gibbins, S., Margotomo, W., 2000b. Different crustal sources for Au-rich and Au-poor ores of the Grasberg Cu-Au porphyry deposit. *Earth and Planetary Science Letters* 183, 7-14.
- Mathur, R., Ruiz, J., Tornos, F., 1999. Age and sources of the ore at Tharsis and Rio Tinto, Iberian pyrite belt, from Re-Os isotopes. *Mineralium Deposita* 34, 790-793.
- McCandless, T.E., Ruiz, J., 1991. Osmium isotopes and crustal sources for platinum-group mineralization in the Bushveld Complex, South Africa. *Geology* 19, 1225-1228.
- McCandless, T.E., Ruiz, J., Campbell, A.R., 1993. Rhenium behavior in molybdenite in hypogene and near-surface environments: Implications for Re-Os geochronometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57, 889-905.
- McInnes, B.I., McBride, J.S., Evans, N.J., Lambert, D.D., Andrew, A.S., 1999. Osmium isotope constraints on ore metal recycling in subduction zones. *Science* 286, 512-516.
- Morelli, R.M., Creaser, R.A., Selby, D., Kontak, D.J., Horne, R.J., 2005. Rhenium-Osmium geochronology of arsenopyrite in Meguma Group gold deposits, Meguma Terrane, Nova Scotia, Canada: Evidence for multiple gold-mineralizing events. *Economic Geology* 100, 1229-1242.
- Mote, T.I., Becker, T.A., Renne, P., Brimhall, G.H., 2001. Chronology of exotic mineralization at El Salvador, Chile, by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of copper wad and supergene alunite. *Economic Geology* 96, 351-366.
- Nakai, S.I., Halliday, A.N., Kesler, S.E., Jones, H.D., Kyle, J.R., Lane, T.E., 1993. Rb-Sr dating of sphalerites from Mississippi Valley-type (MVT) ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57, 417-427.
- Richards, J.P., Noble, S.R., 1998. Application of radiogenic isotope systems to the timing and origin of hydrothermal processes. *Reviews in Economic Geology* 10, 195-233.
- Ruiz, J., Freyrier, C., McCandless, T., Chesley, J., Munizaga, F., 1997. Re-Os-isotope systematics of sulfides from base-metal porphyry and manto-type mineralization in Chile. *International Geology Review* 39, 317-324.

- Ruiz, J., Mathur, R., 1999. Metallogenesis in Continental Margins: Re-Os Evidences from Porphyry Copper Deposits in Chile. *Reviews in Economic Geology* 12, 59-72.
- Selby, D., Kelley, K.D., Hitzman, M.W., Zieg, J., 2009. Re-Os sulfide (bornite, chalcopyrite, and pyrite) systematics of the carbonate-hosted copper deposits at Ruby Creek, southern Brooks Range, Alaska. *Economic Geology* 104, 437-444.
- Shirey, S.B., Walker, R.J., 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis. *Analytical Chemistry* 67, 2136-2141.
- Smoliar, M.I., Walker, R.J., Morgan, J.W., 1996. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA, and IVB iron meteorites. *Science* 271, 1099-1102.
- Snow, J.E., Reisberg, L., 1995. Os isotopic systematics of the MORB mantle: results from altered abyssal peridotites. *Earth and Planetary Science Letters* 133, 411-421.
- Stein, H.J., 1998. An introduction to Re-Os: What's in it for the mineral industry. *SEG Newslett.* 32, 1-8.
- Stein, H.J., 1998a. An introduction to Re-Os: What's in it for the mineral industry. *SEG Newslett.* 32, 1-8.
- Stein, H.J., Markey, R.J., Morgan, J.W., Du, A., Sun, Y., 1997. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt, Shaanxi Province, China. *Economic Geology* 92, 827-835.
- Stein, H.J., Markey, R.J., Morgan, J.W., Hannah, J.L., Scherstén, A., 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: how and why it works. *Terra Nova* 13, 479-486.
- Stein, H.J., Morgan, J.W., Scherstén, A., 2000. Re-Os dating of low-level highly radiogenic (LLHR) sulfides: The Harnas gold deposit, southwest Sweden, records continental-scale tectonic events. *Economic Geology* 95, 1657-1671.
- Stein, H.J., Sundblad, K., Markey, R.J., Morgan, J.W., Motuza, G., 1998b. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittila-Kivisuo, Finland and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting. *Mineralium Deposita* 33, 329-345.
- Suzuki, K., Shimizu, H., Masuda, A., 1993. Reliable Re-Os age for molybdenite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57, 1625-1628.
- Suzuki, K., Shimizu, H., Masuda, A., 1996. ReOs dating of molybdenites from ore deposits in Japan: implication for the closure temperature of the ReOs system for molybdenite and the cooling history of molybdenum ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 3151-3159.
- Vergara, M., Morata, D., Hickey-Vargas, R., Lopez-Escobar, L., Beccar, I., 1999. Cenozoic tholeiitic volcanism in the Colbún area, Linares Precordillera, central Chile (35°35'-36°S). *Revista geológica de Chile* 26, 23-41.

- Walker, R.J., Morgan, J.W., Horan, M.F., Czamanske, G.K., Krogstad, E.J., Fedorenko, V.A., Kunilov, V.E., 1994. Re-Os isotopic evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type, ore-bearing intrusions, Siberia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58, 4179-4197.
- Wendt, I., Carl, C., 1991. The statistical distribution of the mean squared weighted deviation. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section* 86, 275-285.
- Yang, J.-H., Zhou, X.-H., 2001. Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: Implications for the age and genesis of lode gold deposits. *Geology* 29, 711-714.

Capítulo 4 Variaciones isotópicas de Cu en el prospecto Brahma

4.1 ASPECTOS PRELIMINARES

La espectrometría de masas ha permitido determinar con gran precisión la variación de isótopos estables no tradicionales como el Cu, Fe y Zn en sistemas naturales. Lo anterior ha despertado el interés en el estudio de las variaciones isotópicas de metales de transición y su aplicación como guía de exploración. El Cu es particularmente útil para estos fines ya que es extremadamente sensible a procesos de óxido-reducción (redox) y, por lo tanto, muestra un mayor fraccionamiento en comparación con otros metales (e.g. Mathur y Fantle, 2015; Fig. 4.1).

El prospecto Brahma corresponde a un pórfido cuprífero actualmente sub-explorado. Los sondeos existentes interceptan la porción superior correspondiente a la zona de alteración filica-argílica y mineralización principalmente de pirita. A pesar de que los sondeos presentan leyes sub-económicas de Cu, se ha identificado la presencia de calcosina y covelina como reemplazo de pirita, calcopirita y bornita. Esto ha permitido confirmar la presencia de Cu en el sistema hidrotermal, motivando el estudio del prospecto en mayor detalle. Durante el desarrollo de este trabajo de tesis se han aplicado distintas metodologías que han permitido determinar, con la escasa información disponible, el posible potencial exploratorio del prospecto. En los capítulos anteriores se utilizó geocronología, geoquímica de roca total y geoquímica isotópica de Hf y Os para determinar la evolución del sistema hidrotermal Brahma e identificar procesos profundos propicios en la generación de este tipo de depósitos. En este capítulo se reportan resultados de un estudio isotópico de Cu en minerales sulfurados del prospecto Brahma. En virtud de las cualidades de dicho sistema isotópico, los nuevos datos permiten caracterizar procesos hidrotermales de baja temperatura, en conjunto con identificar y evaluar el potencial de posibles procesos de enriquecimiento secundario en el prospecto.

4.2 MARCO TEÓRICO

4.2.1 Generalidades y tipos de fraccionamiento

El Cu presenta 2 isótopos estables; ^{63}Cu y ^{65}Cu cuyas abundancias corresponden a 69.174% y 30.826% respectivamente. Las variaciones isotópicas de Cu son reportadas en notación delta según la siguiente expresión (Ec. 4.1):

$$\delta^{65}\text{Cu}\text{‰} = \left\{ \frac{\frac{^{65}\text{Cu}}{^{63}\text{Cu}}_{\text{muestra}}}{\frac{^{65}\text{Cu}}{^{63}\text{Cu}}_{\text{NIST 976}}} - 1 \right\} * 10^3 \text{ (Ec. 4.1)}$$

Donde NIST 976 corresponde al estándar de Cu ($^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu} = 0.44563 \pm 0.00042$; Shields et al., 1964). De esta manera, valores positivos de $\delta^{65}\text{Cu}$ indica que la muestra está enriquecida en el isótopo pesado respecto al estándar y viceversa.

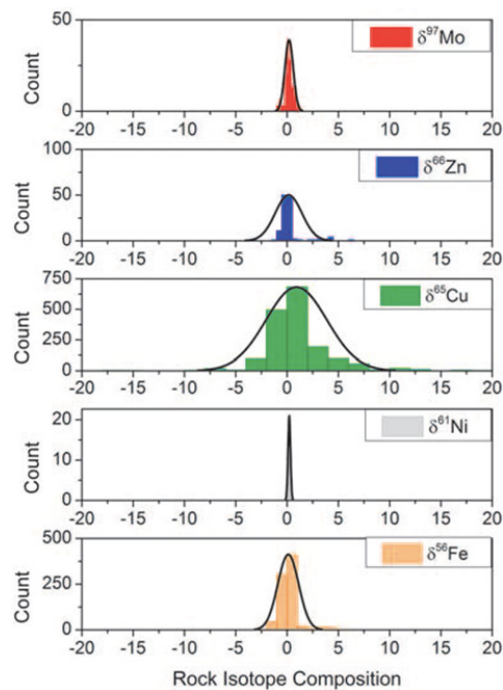


Figura 4.1 Valores de composición isotópica de metales de transición en muestras de roca reportados en la literatura. Tomado de Mathur y Fantle (2015).

A grandes rasgos el fraccionamiento isotópico entre moléculas se explica por las diferencias en sus energías de enlace. Dichos efectos cuánticos son más apreciables en sistemas de baja temperatura y pueden llegar a ser nulos en sistemas de alta temperatura (e.g. Kendall y Caldwell, 1998). Existen esencialmente 2 tipos de fraccionamiento asociados a reacciones químicas y cambios de fase; (1) fraccionamiento en equilibrio y (2) fraccionamiento cinético. El fraccionamiento en equilibrio consiste en el intercambio isotópico de un elemento entre diferentes compuestos, diferentes fases o entre moléculas individuales en un sistema cerrado en equilibrio (e.g. Kendall y Caldwell, 1998; Hoefs, 2018). La principal fuente de fraccionamiento isotópico corresponde a la diferencia de energía vibracional entre los diferentes compuestos, fases o moléculas (Hoefs, 2018). En general, a temperaturas muy altas, el fraccionamiento tiende a 0 e incluso puede cambiar de signo (*crossover*), pero siempre tomando valores cercanos a 0, ya que la diferencia de energías de enlace entre distintas especies disminuye (Stern et al., 1968). Por otro lado, el fraccionamiento cinético ocurre a partir de procesos químicos o físicos en un sistema abierto tal que los productos son físicamente aislados de los reactantes (reacciones irreversibles unidireccionales). Además de las energías de enlace, el fraccionamiento cinético depende también de la velocidad y dirección de reacción (e.g. Kendall y Caldwell, 1998; Hoefs, 2018). Para una misma reacción y en un ambiente de baja temperatura, el fraccionamiento cinético es mayor que el fraccionamiento en equilibrio (Kendall y Caldwell, 1998). El rango de temperaturas considerado como “alto” o “bajo” depende de la frecuencia vibracional de los enlaces de los compuestos que participan en la reacción (Hoefs, 2018).

El interés en implementar los isótopos de Cu como potencial herramienta para comprender la fuente de Cu, así como también los procesos de transporte y deposición en sistemas hidrotermales, ha conllevado a la realización de numerosas mediciones en distintos ambientes. La figura 4.2 muestra una recopilación de valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ en diferentes reservorios terrestres y depósitos minerales. A partir de la recopilación se puede notar que (1) el

fraccionamiento de Cu a temperaturas magmáticas es despreciable (e.g. Ikehata e Hirata, 2012); (2) tanto los valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ del manto como de la corteza son cercanos a 0 (Li et al., 2009); (3) la mayoría de los sistemas mineralizados muestra una variación de $\delta^{65}\text{Cu}$ mayor a 1‰ (e.g. Li et al., 2010); y (4) los sistemas mineralizados influenciados por procesos redox a baja temperatura muestran variaciones mucho mayores que los sistemas mineralizados de alta temperatura (e.g. Zhu et al., 2002; Ehrlich et al., 2004; Rouxel et al., 2004; Mathur et al., 2005; Asael et al., 2006; Markl et al., 2006; Asael et al., 2007; Fernandez y Borrok, 2009; Kimball et al., 2009; Mathur et al., 2009).

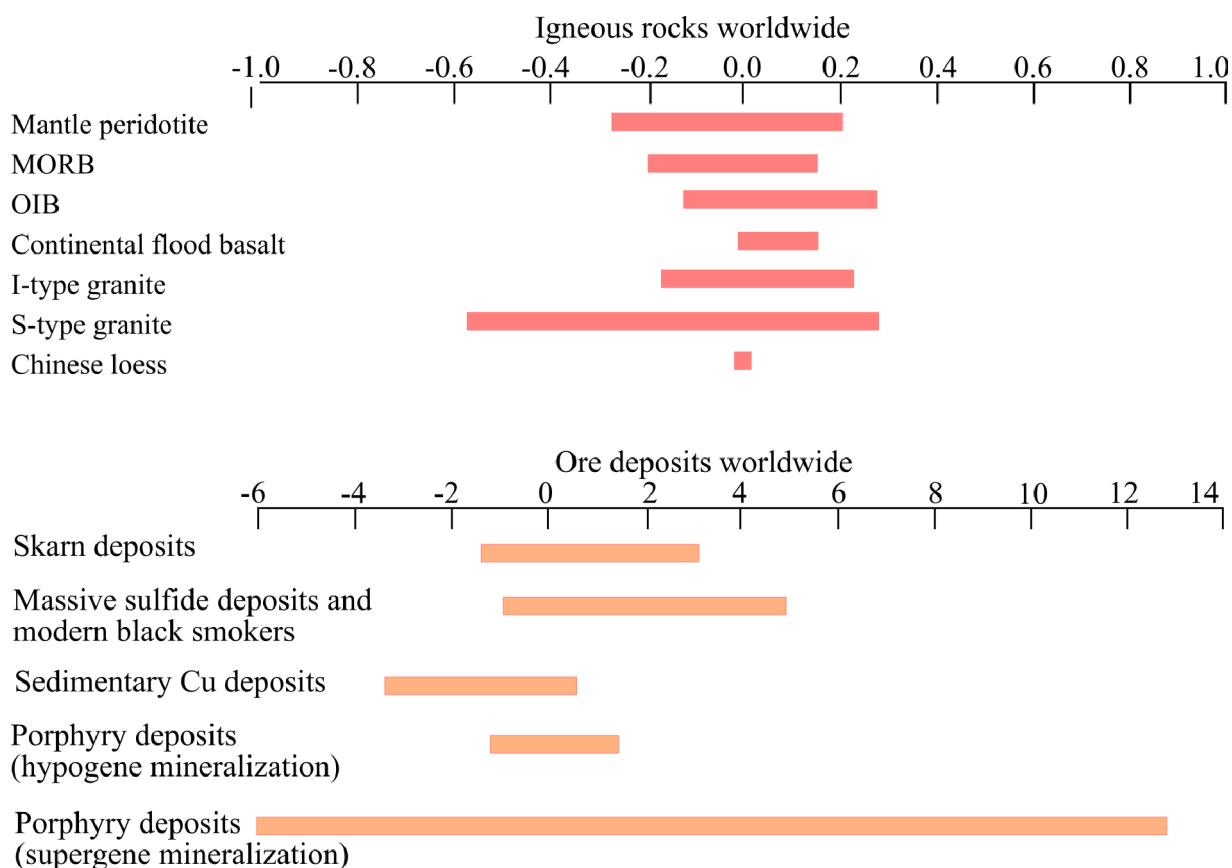


Figura 4.2 Rangos de $\delta^{65}\text{Cu}$ medidos en distintas rocas ígneas (arriba) y depósitos minerales (abajo). Datos tomados de Othman et al. (2006) para peridotitas del manto; Rouxel et al. (2004) y Othman et al., (2006) para basaltos de dorsal meso-oceánica (MORB); Othman et al. (2006) y Li et al. (2009) para basaltos de isla oceánica (OIB); Archer y Vance (2004) para *continental flood basalts*; Li et al. (2009) para granitos tipo I y S y loess. Datos de depósitos minerales tomados de Larson et al. (2003), Graham et al. (2004) y Maher y Larson (2007) para skarns; Zhu et al. (2000), Rouxel et al. (2004) y Mason et al. (2005) para sulfuros masivos y *black smokers*; Asael et al. (2007) para Cu sedimentario; Larson et al. (2003); Graham et al. (2004); Mathur et al (2005, 2009) y Asael et al. (2007) para pórfidos.

4.2.2 Variaciones isotópicas de Cu en sistemas de pórfido de Cu-Mo

Tal como se mencionó anteriormente, los cambios redox asociados a procesos de lixiviación, transporte y precipitación de Cu en ambiente de baja temperatura ($< 100^\circ\text{C}$) producen un importante fraccionamiento en este elemento. En depósitos tipo pórfido cuprífero con desarrollo de mineralogía supérgena numerosos estudios de variaciones isotópicas de Cu

muestran valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ característicos en cada zona mineral (Fig. 4.3; e.g. Maréchal et al., 1999; Larson et al., 2003; Li et al., 2010; Mathur et al., 2009; Mathur et al., 2010; Braxton y Mathur, 2011; Mathur et al., 2013; Mathur y Fantle, 2015). Usualmente las capas lixiviadas presentan valores bajos a negativos, mientras que las zonas con mineralogía de enriquecimiento secundario presentan los valores más altos, alcanzando incluso valores cercanos a los 8‰ (e.g. Silver Bell, Arizona, Estados Unidos; Mathur et al., 2010). Por otro lado, en la zona de mineralización hipógena, al verse el Cu afectado principalmente por procesos de fraccionamiento en equilibrio (típico de ambientes de alta temperatura), los valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ usualmente se agrupan entre -1.0 y 1.0‰.

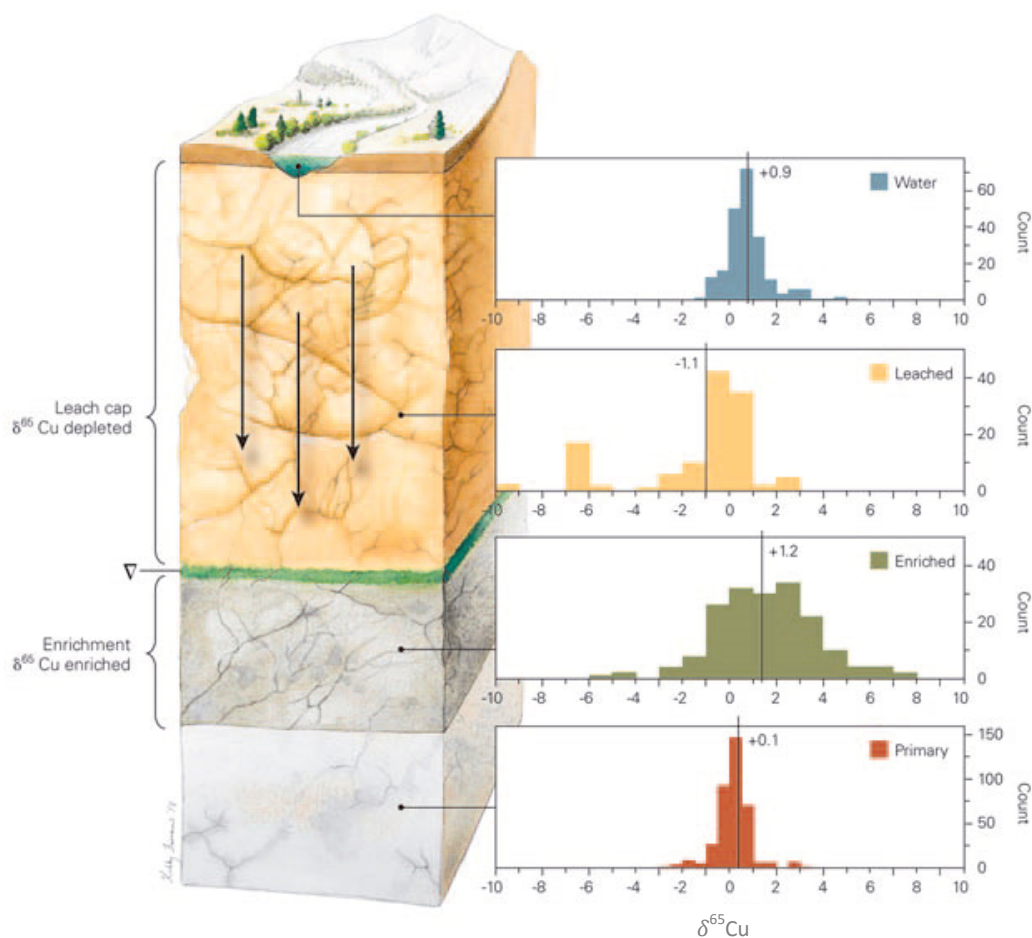


Figura 4.3 Compilación de valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ reportados en la literatura según las distintas zonas minerales presentes en un yacimiento de Cu expuesto a condiciones supérgenas. Tomado de Mathur y Fantle (2015).

El rango amplio de $\delta^{65}\text{Cu}$ en ambiente supérgeno ha motivado el estudio del fraccionamiento de Cu como herramienta de exploración en ambiente oxidante de baja temperatura ($<50^\circ\text{C}$). Para lograr un mayor entendimiento acerca de los valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ en cada zona mineral, es importante comprender el comportamiento del Cu en este tipo de ambiente. Estudios experimentales han demostrado que la oxidación de sulfuros genera soluciones enriquecidas en ^{65}Cu (Mathur et al., 2005; Fernandez y Borrok, 2009; Kimball et al., 2009, Wall et al., 2011). Estos valores son coherentes con mediciones de $\delta^{65}\text{Cu}$ realizadas en aguas subterráneas y de escorrentía superficial que participan en la lixiviación de sulfuros (Fernandez y Borrok, 2009; Kimball et al., 2009; Mathur et al., 2013). El enriquecimiento de ^{65}Cu en el fluido

lixiviante genera capas lixiviadas con signatura liviana (enriquecidas en ^{63}Cu). Por otro lado, el fluido lixiviante (pesado), precipita su carga metálica generando una capa de enriquecimiento secundario con signatura pesada. Si este proceso, se repite múltiples veces, y no tan solo lixiviando mineralogía hipógena sino que también lixiviando mineralogía supérgena, el mineral precipitado va a presentar valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ progresivamente más pesados (Shields et al., 1965; Mathur et al., 2005; Braxton y Mathur, 2011). De esta manera, los isótopos de Cu nos entregan información importante acerca de qué tan desarrollada se encuentra la capa de enriquecimiento secundario.

4.3 MUESTREO Y PROCEDIMIENTOS ANALÍTICOS

Tal como se ha mencionado en los capítulos anteriores, los sondajes existentes interceptan la porción superficial del sistema porfídico Brahma. Esta se encuentra dominada principalmente por mineralización de pirita y menor cantidad calcopirita y esfalerita (Fig. 4.4a, b). Adicionalmente, se ha observado la presencia de mineralización de bornita, calcosina y covelina en traza reemplazando calcopirita y pirita (Fig. 4.4c-e). Este reemplazo se encuentra poco desarrollado en los sondajes mapeados y actualmente se desconoce si estos sulfuros son de origen supérgeno o hipógeno.

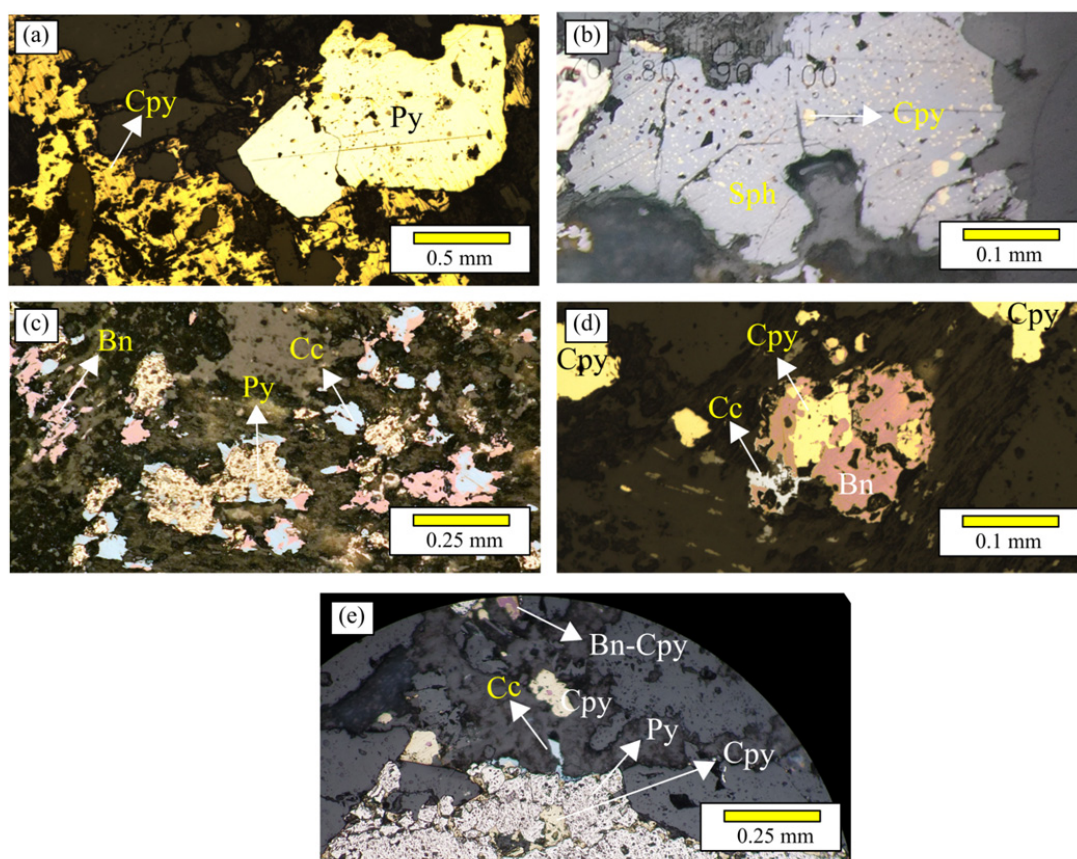


Figura 4.4 Fotomicrografías representativas de la mineralización analizada. (a, b) Mineralización hipógena de calcopirita y esfalerita con textura de corrosión calcopirítica (ver texto). (c-d) Mineralización de calcopirita con reemplazo de bornita y calcosina total (c) y parcial (d, e).

Se realizó análisis isotópico de Cu en 23 muestras con mineralización sulfurada de Cu. Las fases minerales analizadas corresponden a calcopirita, bornita, calcosina y esfalerita con ampollas de calcopirita como inclusión (*chalcopyrite disease*; Barton 1978; Fig. 4.4b), desde ahora en adelante llamada textura de corrosión calcopirítica. Las muestras fueron seleccionadas con el objetivo de (1) identificar posibles procesos de enriquecimiento secundario en el prospecto asociada a mineralización de calcosina, y (2) aportar información acerca de la procedencia de la mineralización hipógena tardía. De las 23 muestras escogidas, 9 de ellas presentan mineralización de calcosina-bornita, mientras que las 14 restantes presentan mineralización de calcopirita y esfalerita (Fig. 4.4; Tabla 4.1). Las muestras de mineralización únicamente hipógena (calcopirita-esfalerita) corresponden principalmente a alteraciones propilítica, filica (cuarzo-sericita-illita y clorita-sericita) y argílica moderada (Tabla 4.1). Debido a la escasa presencia de mineralización asociada a alteración potásica, solo fue posible medir razones isotópicas de Cu en una sola muestra. Por otro lado, todas las muestras con mineralización de calcosina-bornita están asociadas a alteraciones filica (cuarzo-sericita-illita) y argílica moderada.

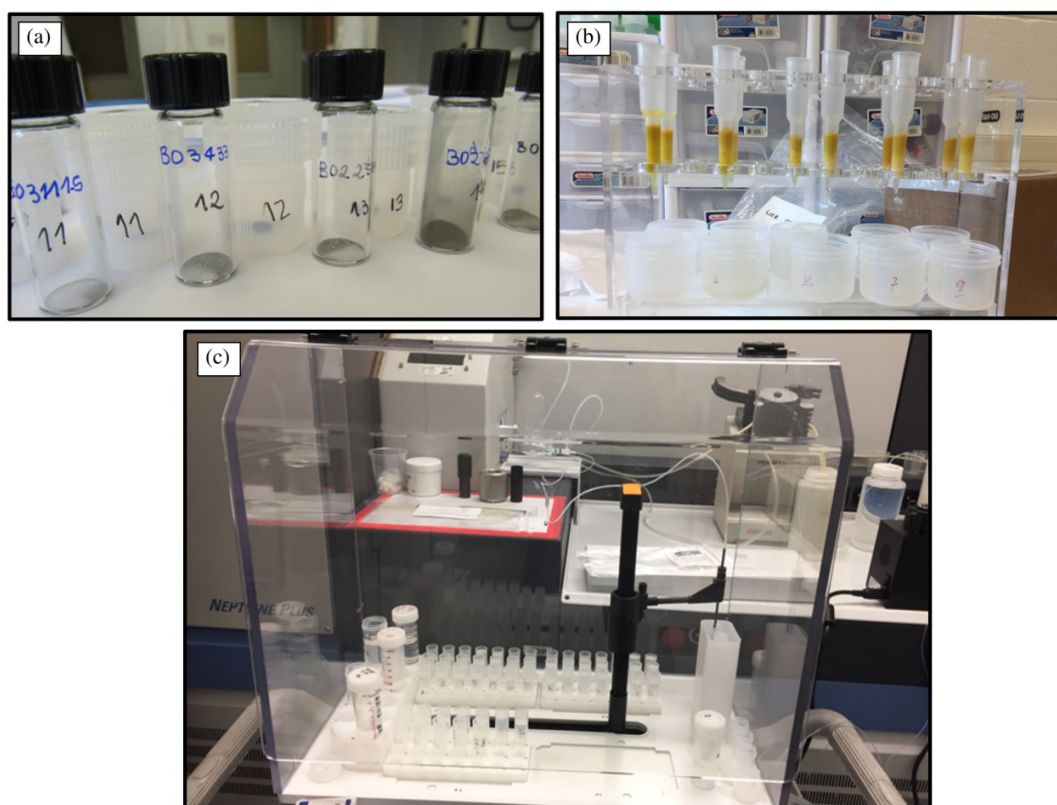


Figura 4.5 Procedimiento analítico para isótopos de Cu. (a) Concentrado de sulfuros seleccionados por muestra. (b) Columnas cromatográficas. (c) Espectrómetro de masas (ICP-MC-MS) modelo Thermo-Scientific Neptune Plus, Pennsylvania State University.

Por cada muestra de mano se seleccionó manualmente con pinza ~0.1 g de sulfuro (Fig. 4.5a). La mayoría de las fases sulfuradas presenta textura de intercrecimiento (Fig. 4.4), haciendo la separación difícil e incluso imposible. Por esta razón fue necesario realizar cromatografía para extraer el Cu. Las muestras de sulfuro fueron envueltas en papel y reducidas a polvo con un martillo (evitando así la contaminación con elementos del grupo del platino). Aproximadamente 0.05 g de cada muestra fueron disueltas en agua regia a 200°C por 24 horas y luego secadas a

40°C en un plato caliente. Con el objetivo de evitar el efecto matriz causado por la presencia de otros iones metálicos en la solución (principalmente Fe), las muestras fueron purificadas mediante cromatografía de intercambio iónico (IEC, *ion exchange chromatography*). Este proceso no produce fraccionamiento isotópico en las muestras (Mathur et al., 2005). La preparación de muestras y columnas cromatográficas se llevaron a cabo en las dependencias de Juniata College, Estados Unidos, siguiendo el procedimiento descrito en Mathur et al. (2005) (Fig. 4.5b). Las muestras purificadas mediante IEC fueron diluidas a 200 ppb de Cu en 2% de HNO₃ y luego analizadas mediante un espectrómetro de masas utilizando un nebulizador micro concéntrico para incrementar la sensibilidad. Los análisis se llevaron a cabo en Pennsylvania State University, Estados Unidos, utilizando un espectrómetro de masas (ICP-MC-MS) modelo Thermo-Scientific Neptune Plus (Fig. 4.5c).

Las razones isotópicas de Cu son reportadas en notación δ según la expresión 4.1 y corresponden a un promedio de 60 razones medidas por cada muestra. La desviación estándar de los valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ medidos es menor a 0.14‰. Sin embargo, una de las mayores fuentes de error durante la medición corresponde al fraccionamiento de masa dentro del instrumento durante la sesión analítica (*mass bias*; Maréchal et al., 1999). Para evaluar dicho error se comparan las razones de Cu medidas con el estándar NIST 976 (Ec. 4.1) usando el arreglo estándar–muestra–estándar en cada medición (*bracketing*; e.g. Mathur et al., 2005, 2009, 2013, 2018). El error asociado al análisis corresponde a la variación del estándar luego de múltiples sesiones analíticas, en este caso dicho valor equivale a 0.1‰ (2 σ).

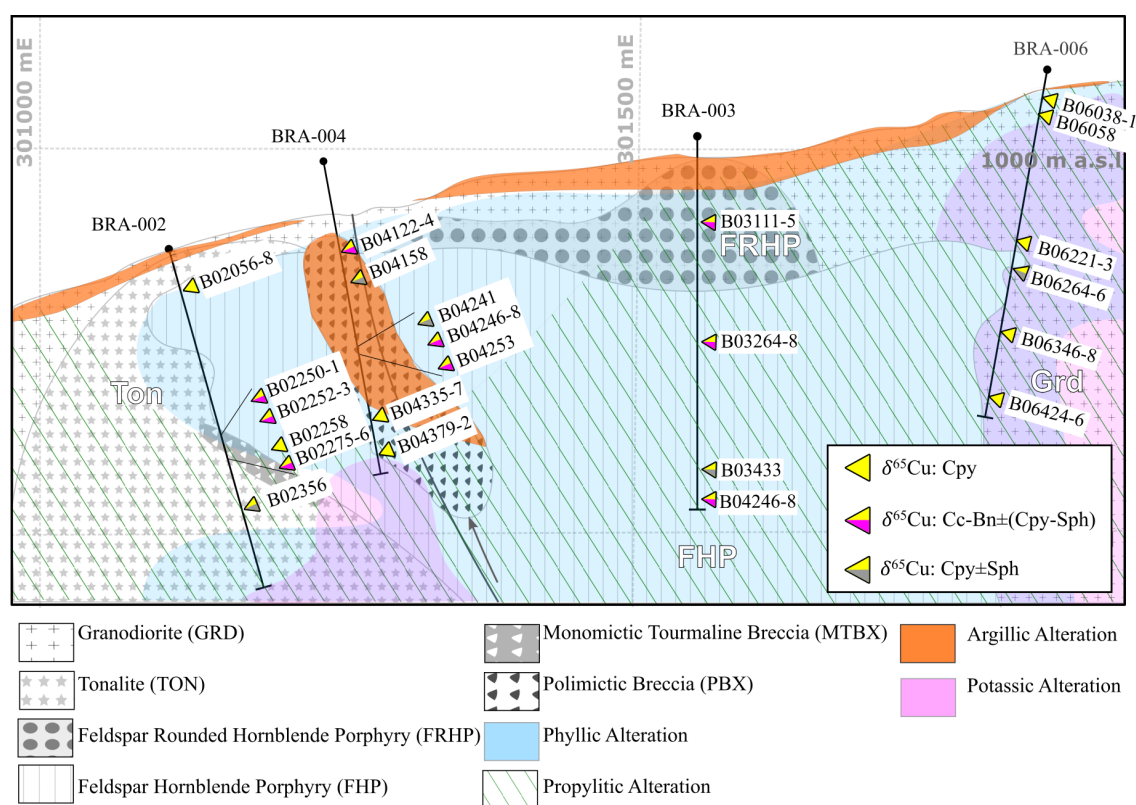


Figura 4.6 Distribución espacial de las muestras seleccionadas para medición de isótopos de Cu en la sección transversal A-A'.

Tabla 4.1 Resultados de análisis isotópico de Cu en muestras con mineralización únicamente hipógena (calcopirita-esfalerita) y con mineralización supérgena (presencia de calcosina).

Muestra	Fases	Estilo de mineralización	Alteración	$\delta^{65}\text{Cu}$	Cu ppm
<i>Muestras con mineralización hipógena</i>					
B02056-8	Cpy	Vetilla IX	Propilítica	0.1	1734
B02258	Cpy	Diseminada y en fractura	Fílica (Qz-Ser-III)	0.57	140
B02356	Cpy-Sph	Vetilla IV	Fílica (Qz-Ser-III)	0.61	439
B03433	Cpy-Sph	Vetilla X y diseminado	Argílica	0.34	580
B04158	Cpy-Sph	Vetilla X	Argílica	0.65	366
B04241	Cpy-Sph	Vetilla X y diseminado	Argílica	0.41	1100
B04335-7	Cpy	Vetilla VI	Fílica (Chl-Ser)	0.19	340
B04379-2	Cpy	Vetilla VI	Fílica (Chl-Ser)	0.33	486.5
B06038-1	Cpy	Vetilla II	Potásica	0.1	340.5
B06058	Cpy	Vetilla IX	Propilítica	0.86	188
B06221-3	Cpy	Vetilla IX	Propilítica	0	145
B06264-6	Cpy-Sph	Vetilla IX	Propilítica	0.95	432
B06346-8	Cpy	Vetilla IX	Propilítica	0.07	390
B06424-6	Cpy	Vetilla IX	Propilítica	0.11	1200
<i>Muestras con mineralización supérgena</i>					
B02250-1	Cc-Bn±(Cpy-Sph)	Diseminada y en fractura	Fílica (Qz-Ser-III)	-0.54	598
B02252-3	Cc-Bn± (Cpy-Sph)	Vetilla VIII	Fílica (Qz-Ser-III)	9.69	8675
B02275-6	Cc-Bn± (Cpy-Sph)	Vetilla VIII	Fílica (Qz-Ser-III)	-0.47	704
B03111-5	Cc-Bn±Cpy	Diseminado	Fílica (Qz-Ser-III)	0.04	2550
B03264-8	Cc-Bn±Cpy-Sph	Vetilla VIII	Fílica (Qz-Ser-III)	0.58	1990
B03470-4	Cc-Bn± (Cpy-Sph)	Vetilla IV	Fílica (Qz-Ser-III)	4.94	440
B04122-4	Cc-Bn±Cpy	Diseminado	Argílica	1.22	8673
B04246-8	Cc-Bn±Cpy	Diseminado	Argílica	4.94	5416
B04253	Cc-Bn± (Cpy-Sph)	Vetilla X	Argílica	1.67	600
OBS: - Abreviaciones minerales: Bn: bornita; Cc: calcosina; Chl: clorita; Cpy: calcopirita; Ill: illita; Qz: cuarzo; Sph: esfalerita					

4.4 RESULTADOS

Se analizó un total de 23 muestras con mineralogía sulfurada de Cu. Estas se encuentran distribuidas a lo largo de los sondajes BRA002, BRA003, BRA004 y BRA006 que conforman la sección transversal A-A' (Fig. 4.6). Las razones isotópicas de Cu de todas las muestras en conjunto con la mineralogía, alteración y ley de Cu están reportadas en la tabla 4.1. Las muestras con mineralización de calcopirita-esfalerita presentan valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ entre 0‰ y 0.95‰, mientras que las muestras que contienen mineralización de calcosina-bornita presentan valores entre -0.54‰ y 9.69‰ (Fig 4.7a). Los valores obtenidos en ambos grupos son coherentes con los valores de mineralogía hipógena y supérgena reportados en la literatura (Fig. 4.2, 4.3). Estos resultados permiten confirmar la presencia de calcosina de origen supérgeno en el prospecto. Como los procesos de fraccionamiento de Cu en ambiente hipógeno y supérgeno son distintos, las muestras analizadas serán divididas en 2 grupos (Tabla 4.1); (1) muestras con mineralogía supérgena (presencia de calcosina reemplazando sulfuros primarios) y (2) muestras con mineralogía hipógena (calcopirita±esfalerita).

Las muestras con mineralización de calcosina muestran un amplio rango de fraccionamiento con respecto a las muestras de calcopirita-esfalerita. Los valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ obtenidos en este grupo de muestras no son homogéneos, presentando valores livianos cercanos a 0 (e incluso tomando valores negativos) como también alcanzando valores extremadamente altos (>4.9‰). Los valores más altos se encuentran distribuidos preferencialmente en las zonas más permeables, particularmente en el cuerpo de brecha PBX (Fig. 4.6). Los valores más livianos por otro lado están relacionados a zonas de menor permeabilidad.

Del grupo de muestras con mineralogía hipógena, aquellas con mineralización de calcopirita presentan valores que van desde 0‰ a 0.86‰ con un promedio de 0.26‰. Por otro lado, las muestras con mineralización de esfalerita presentan valores levemente más pesados que van desde los 0.34‰ hasta 0.95‰ con un promedio de 0.59‰ (Tabla 4.1; Fig. 4.7a). La figura 4.7b muestra los resultados de $\delta^{65}\text{Cu}$ en mineralogía hipógena según alteración. La mayoría de las muestras asociadas a alteración propilítica presentan valores livianos que van desde 0‰ a 0.11‰, sin embargo 2 muestras presentan valores notoriamente más pesados (0.85‰ y 0.95‰). Las muestras de alteraciones filica (clorita-sericita y cuarzo-sericita-illita) y argílica moderada presentan valores intermedios que van desde los 0.19‰ a 0.65‰, siendo las muestras asociadas a alteración clorita-sericita las que muestran los valores más livianos. Finalmente, la muestra asociada a alteración potásica presenta un valor de 0.1‰.

La figura 4.7c muestra un gráfico de ley de Cu (datos tomado de Burns et al., 2008) versus $\delta^{65}\text{Cu}$. Se observa una correlación negativa para el grupo de muestras con mineralogía hipógena y correlación positiva para el grupo de muestras supérgenas. Sin embargo, en ambos casos la correlación es pobre ($R^2 \ll 0.5$). Es importante considerar que las leyes fueron medidas a partir de compósitos de sondajes de un largo de 2 m, mientras que las razones de $\delta^{65}\text{Cu}$ fueron medidas a partir de concentrados de sulfuros seleccionados con pinza desde fracturas y vetillas en la mayoría de las muestras. De manera que, si una muestra presenta un fuerte proceso de enriquecimiento secundario a escala de vetilla/fractura, pero estas estructuras son poco frecuentes, la correlación con la ley de Cu se verá afectada. Este es el caso de la muestra B03470-4 (Tabla 4.1; Fig. 4.7c).

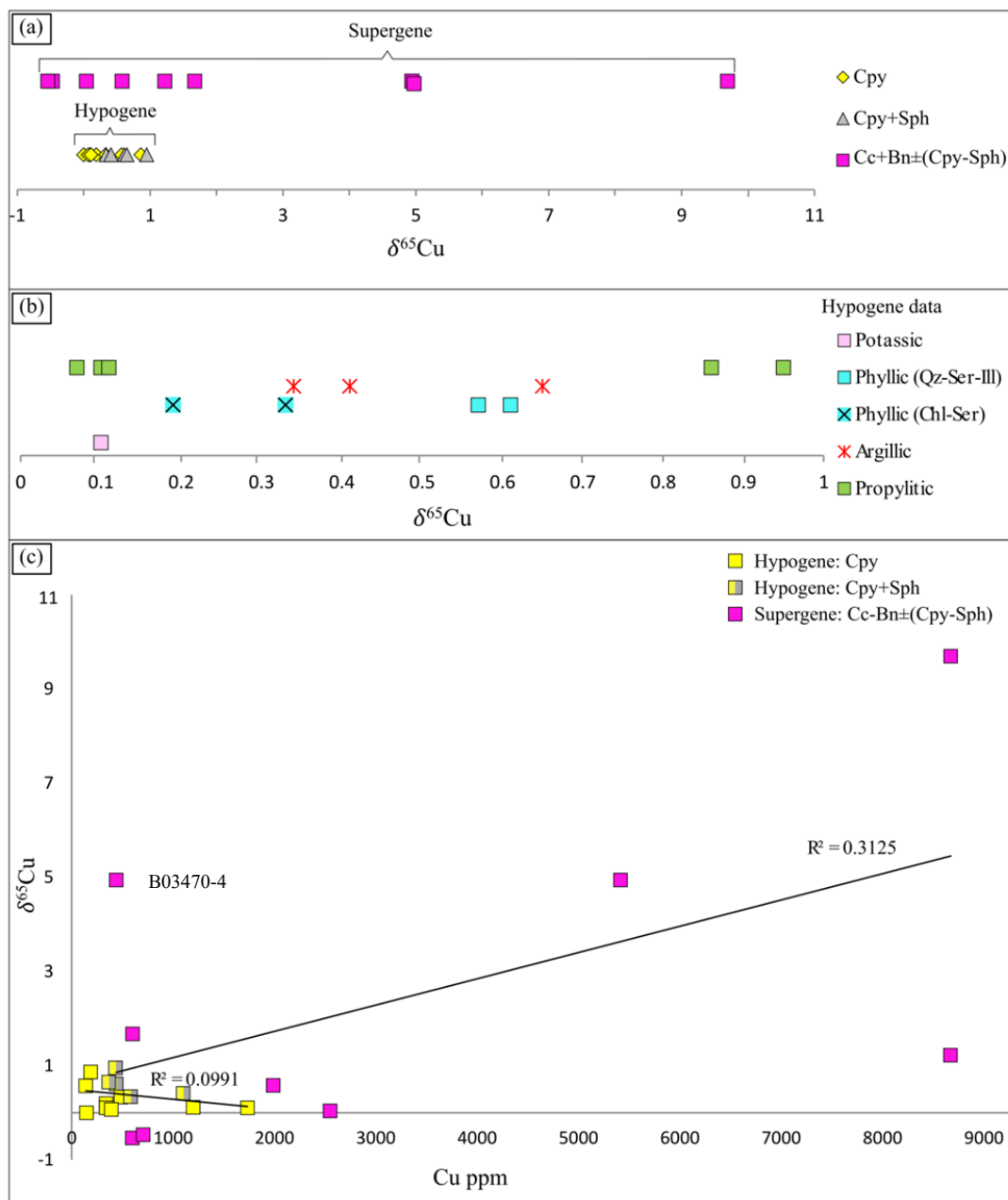


Figura 4.7 Resultados de análisis isotópico de Cu según mineralogía (a) y tipo de alteración (b). (c) Diagrama $\delta^{65}\text{Cu}$ vs. Ley de Cu. Muestra B03470-4 no muestra correlación con la ley de Cu (ver texto). Valores de ley de Cu tomados de Burns et al. (2008).

4.5 DISCUSIÓN

4.5.1 Origen de las calcosinas

Existen básicamente tres modelos que explican el origen de las calcosinas (Mathur et al., 2018); (1) calcosina hidrotermal hipógena precipitada por fluidos a temperaturas mayores a 150°C , (2) calcosina de enriquecimiento supérgeno precipitada a partir de fluidos oxidantes de baja temperatura (ambiente), y (3) calcosina precipitada por fluidos que circulan a través de

cuenas sedimentarias a temperaturas menores de 150°C (yacimientos de Cu sedimentario). En cada uno de estos ambientes el Cu se transporta mediante distintos complejos y por ende, en distintos estados de oxidación (e.g. Mathur et al., 2018). Debido a esto, las calcosinas presentan valores característicos de $\delta^{65}\text{Cu}$ según su fuente. Brahma corresponde a un depósito de tipo pórfido Cu-Mo hospedado en rocas intrusivas y secuencias volcánicas con escasos niveles clásticos, por lo tanto es directo descartar un origen sedimentario para la mineralización de Cu. De esta manera, la mineralización de calcosina puede corresponder a mineralización de enriquecimiento supérgeno, mineralización hipógena o ambas.

Tal como se mencionó anteriormente, el fraccionamiento de Cu en ambiente hipógeno es bajo, tomando valores cercanos a 0‰ y rara vez toma valores mayores a 1‰ (e.g. Mathur y Fantle, 2015; Fig.4.2, 4.3). Lo anterior permite confirmar el origen supérgeno de las calcosinas que muestran valores mayores a 1‰. Esto es coherente con las texturas observadas en los sulfuros, donde se observa calcosina y covelina recubriendo fases sulfuradas primarias (Fig. 4.4c-d). Por otro lado, de las 9 muestras analizadas, 4 de ellas presentan valores menores a 1‰ e incluso negativos (-0.54‰ y -0.47‰). A pesar de que estos valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ son típicos de ambiente hipógeno, también podrían explicarse por un proceso de enriquecimiento secundario poco desarrollado y/o procesos de lixiviación tal como se ha documentado en Braxton y Mathur (2011). Las muestras de calcosina que presentan valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ bajos, provienen de muestras de mano con leyes de Cu levemente mayor que las muestras con mineralización hipógena de calcopirita-esfalerita (598-2550 ppm y 140-1734 ppm respectivamente; Tabla 4.1; Fig. 4.7c). Sin embargo, no alcanzan leyes tan altas como las muestras que presentan valores extremadamente altos de $\delta^{65}\text{Cu}$ (4.49-9.69‰; 5416-8675 ppm; Tabla 4.1;). Lo anterior podría constituir un argumento a favor de un proceso de enriquecimiento secundario poco desarrollado en estas muestras.

Otro factor a considerar en la interpretación de los resultados, es la distribución espacial de las muestras analizadas. En la figura 4.8 es posible observar que los valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ más bajos se encuentran ubicados en zonas menos permeables (sondaje BRA003), mientras que los valores más pesados se encuentran en zonas de alta permeabilidad como cuerpos de brecha. El cuerpo de brecha PBX corresponde a la zona más permeable identificada en el prospecto y presenta valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ típicos de mineralización de enriquecimiento secundario. Por otro lado, las muestras de calcosina ubicadas en el cuerpo de brecha MTBX poseen valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ mixtos (Fig. 4.8). La muestra B02252-3 (ubicando en el cuerpo MTBX; Fig. 4.6) presenta un valor de $\delta^{65}\text{Cu}$ extremadamente alto (9.69‰). Esta muestra también presenta una ley de Cu de casi 1% y un reemplazo de sulfuros primarios casi total en comparación a todas las otras muestras analizadas (Fig. 4.4c), por lo que dicho valor es relativamente razonable y no se considera como error analítico. Por otro lado, muestras similares ubicadas en el mismo sondaje, a 1 y 22 metros de distancia de la muestra B02252-3 (B02250-1 y B02275-6 respectivamente), presentan valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ negativos. Tanto la ley de Cu como las texturas de reemplazo en estas muestras no son tan altas como la muestra B02252-3 (Fig. 4.4c, d). Braxton y Mathur (2011) comprobaron mediante modelos de fraccionamiento tipo Rayleigh que un enriquecimiento secundario a partir de lixiviación de sulfuros primarios no genera valores más altos que 3‰. De esta manera un valor de $\delta^{65}\text{Cu}$ de 9.69 solamente podrían explicarse por múltiples ciclos de lixiviación, no tan solo de sulfuros primarios sino que también de sulfuros secundarios, y posterior precipitación (Mathur et al., 2010; Braxton y Mathur, 2011). Al mismo tiempo, el proceso de lixiviación genera valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ cercanos a 0 e incluso negativos. Este antecedente indicaría la presencia de procesos cíclico de lixiviación y enriquecimiento a escala local dentro del cuerpo de brecha MTBX. Adicionalmente, es importante notar que algunos valores altos de $\delta^{65}\text{Cu}$ se encuentran en

profundidad distribuidos de manera no homogénea (Fig. 4.7a). Esto podría dar indicio acerca de la dirección en que se infiltran los fluidos, sugiriendo así nuevas zonas de falla no identificadas en los sondeos mapeados (Fig. 4.8b). La definición y vergencia de las fallas inferidas fueron determinadas considerando el mapeo de estructuras realizado por Burns et al (2008) y Sanchez y Motta (2013). También se complementó con información textural obtenida a partir del mapeo realizado en este estudio.

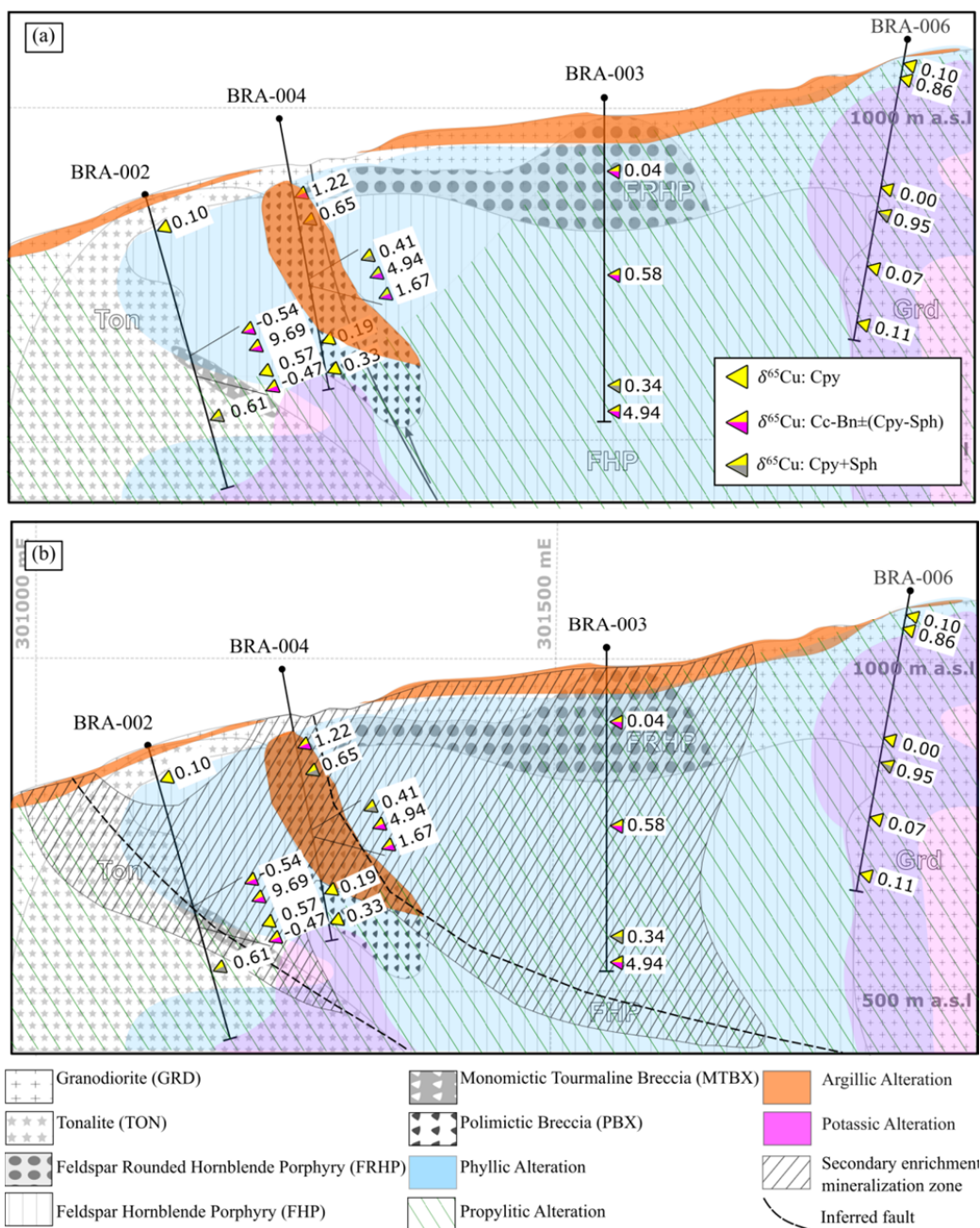
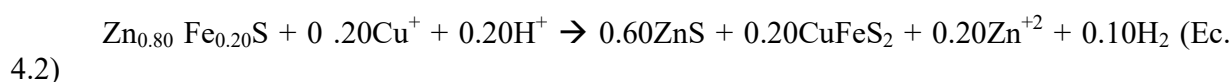


Figura 4.8 (a) Distribución espacial de valores de $\delta^{65}\text{Cu}$. (b) Delimitación de zona de sulfuros mixtos (hipógenos y supérgeno) y proposición de nuevas zonas de fallas.

4.5.2 Procesos de fraccionamiento en mineralogía hipógena

Si bien el proceso de fraccionamiento isotópico de Cu en ambiente hipógeno no es tan evidente como en ambiente supérgeno, existen muchos procesos por el cual se puede fraccionar dicho sistema isotópico. Dentro de estos mecanismos se encuentran variaciones en el estado de oxidación durante la evolución del sistema hidrotermal; variaciones en la fuente de Cu debido a múltiples eventos de mineralización; fraccionamiento de Cu durante la separación de fases salmuera-vapor y fluido-metal (e.g. Gregory y Mathur, 2017). La mayoría de estos procesos están influenciados por las condiciones fisicoquímicas.

Los valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ medidos en este estudio evidencian que en general, la esfalerita presenta valores levemente más pesados que la calcopirita (0.33‰ en promedio; Fig. 4.7a). Todos los cristales analizados presentan textura de corrosión calcopirítica y por lo tanto el Cu analizado proviene en gran parte de estas inclusiones. Lo anterior sugiere que la signatura de Cu medida está fuertemente influenciada por el proceso de formación de este tipo de textura. Actualmente, el origen de la corrosión calcopirítica en la esfalerita es tema de debate. La exsolución de calcopirita a partir de una esfalerita ha sido descartada por diversos autores que han demostrado que la solubilidad del Cu en este mineral es extremadamente baja entre 300°-700°C (Wiggins y Craig, 1980; Hutchison y Scott, 1981; Kojima y Sugaki, 1984, 1985). Lo anterior implica que la cantidad de Cu que puede contener la esfalerita es insuficiente para exsolver una cantidad considerable de calcopirita. A grandes rasgos, el mecanismo más aceptado en la formación de la corrosión calcopirítica es el reemplazo de Fe por Cu mediante difusión entre un fluido rico en Cu (y probablemente Fe) y esfalerita rica en Fe (Barton 1978; Barton y Bethke, 1987; Kojima y Sugaki, 1987; Eldridge et al., 1988; Bortnikov et al., 1991; Bente y Doering, 1993, 1995; Govindarao et al., 2018). La reacción de formación de calcopirita en esfalerita está dada por la ecuación 4.2 (Barton 1978; Eldridge et al., 1988). En ella se observa que no existe un cambio de estado de oxidación del Cu y, por lo tanto, no existiría un fraccionamiento asociado a cambios redox. De esta manera, el fraccionamiento de Cu puede explicarse por el proceso de difusión ya que constituye un mecanismo de fraccionamiento cinético (Watkins et al., 2017). Sin embargo, tal como se ha evidenciado en otros depósitos, el fraccionamiento entre distintas fases minerales hipógenas es poco significativo (bornita, calcopirita, calcosina; Larson et al., 2003; Maher y Larson, 2007; Li et al., 2010; Mathur et al., 2018). Adicionalmente, Li et al. (2010) señala que, a escala del sistema porfídico, las tasas de difusión de Cu son mucho más lentas que el movimiento de Cu en fluidos hidrotermales, de manera que el fraccionamiento relacionado a difusión no es más que un factor de segundo orden en las signaturas isotópicas. Finalmente, los factores que determinan el fraccionamiento en ambiente de alta temperatura son los cambios de pH, eH y partición entre fases líquido-vapor. Por consiguiente, el fraccionamiento por especiación es relativamente insignificante con respecto a la zonación esperada en un pórfido (e.g. Li et al., 2010).



La mayoría de las muestras perteneciente a mineralización asociada con alteración propilítica y potásica presentan valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ cercanos a 0 (≤ 0.11). Le siguen en orden creciente las alteraciones clorita-sericita y finalmente mineralización asociada a alteraciones cuarzo-sericita-illita y argílica (Fig. 4.7b). La tendencia observada sugiere que los valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ en las muestras analizadas están controlados principalmente por el pH, favoreciendo la partición del ^{65}Cu a las fases relacionadas a alteraciones más ácidas. Adicionalmente, la similitud

entre los valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ en alteración potásica y propilítica podría implicar que la temperatura cumple un rol menor en el fraccionamiento de Cu en la mineralización analizada. No obstante lo anterior, 2 muestras de alteración propilítica presentan valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ por sobre 0.8‰, indicando la presencia de un proceso de fraccionamiento distinto al resto de las muestras analizadas.

En el pórfido de Cu-Au Northparkes, Australia, se observa una distribución de valores isotópicos de Cu relativamente similar (Li et al., 2010). En Northparkes, al igual que en Brahma, los valores más altos de $\delta^{65}\text{Cu}$ están asociados a alteraciones distales y tardías (fílica y propilítica; 0.4-0.8‰), mientras que el núcleo potásico presenta valores cercanos a 0 (0.1-0.3‰). Li et al. (2010) sugiere que esta variación isotópica podría ser causada por dos mecanismos; (1) fraccionamiento entre salmuera-vapor y (2) contracción de vapor y mezcla con aguas meteóricas. La mineralización asociada al núcleo del sistema precipita principalmente a partir de salmuera (Mountain y Seward, 1999, 2003) enriquecida en ^{63}Cu (Seo et al., 2007), de manera que la fase vapor, enriquecida en ^{65}Cu (Seo et al., 2007), precipita su carga metálica hacia la periferia del sistema (alteraciones fílica, argílica y propilítica). Estos mecanismos (transporte, separación de fases y precipitación) constituyen procesos de fraccionamiento en equilibrio (Maher y Larson, 2007; Seo et al., 2007; Li et al., 2010; Rempel et al., 2012). Adicionalmente, Li et al. (2010) señala que la contracción de vapor en la periferia está influenciada por mezcla de aguas meteóricas que son capaces de lixiviar Cu^{+1} contenida en óxidos y silicatos de la roca de caja, transportarlo como Cu^{+2} y precipitarlo nuevamente como Cu^{+1} . Este mecanismo constituye un proceso de fraccionamiento cinético en ambiente oxidante y de baja temperatura, generando así el mayor fraccionamiento de Cu asociado a un sistema de mineralización hipógena. Además de Northparkes, altos valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ en la periferia de sistemas hidrotermales han sido documentados en Bingham Canyon, Estados Unidos (Dendas, 2012), Pebble, Alaska (Gregory y Mathur, 2017) y en los depósitos Tintaya y Corocchohuayco, Perú (Maher y Larson, 2007). En todos estos estudios, dichos valores han sido atribuidos a la mezcla de aguas meteóricas. Mecanismos de fraccionamiento similares a los sugeridos por Li et al. (2010) pueden explicar las principales variaciones isotópicas de Cu en la mineralogía hipógena del prospecto Brahma. Se propone entonces que los altos valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ asociado a las alteraciones más ácidas (0.2-0.65) se deben a la precipitación mineral a partir de un fluido predominantemente en fase vapor (enriquecido en ^{65}Cu). Por otro lado, valores superiores a 0.8‰ indicarían participación de aguas meteóricas durante el enfriamiento del sistema. Sin embargo, se debe notar que no se descarta la participación conjunta de ambos mecanismos en los valores intermedios.

4.5.3 Evolución de fluidos hidrotermales en el Prospecto Brahma

En el capítulo anterior se realizaron dataciones Re-Os en sulfuros con el objetivo de aportar información acerca del último (y más importante) evento de mineralización en el prospecto. Adicionalmente a las edades obtenidas, las razones isotópicas de Os inicial sugieren que este evento magmático-hidrotermal habría comenzado a los ~10.2 Ma con mineralización de signatura magmática-mantélica. A medida que el sistema evoluciona y la temperatura baja, la mineralización presenta una signatura isotópica de Os que evidencia una componente magmática y cortical. Se discutió acerca de 2 posibles fuentes de mineralización (Fig. 3.10); (1) mezcla de fluidos magmáticos y meteóricos, capaces de lixiviar Cu de las rocas adyacentes y (2) presencia de otro cuerpo ígneo con componente cortical (no identificado en este estudio) que actúa como fuente de fluidos mineralizadores (poco probable según contexto geológico de la región). Las razones isotópicas de Cu (a diferencia del Os) no entregan información clara acerca de la

proveniencia de los metales. Esto porque el valor de $\delta^{65}\text{Cu}$ varía principalmente con la evolución de los fluidos hidrotermales, y parece no depender en absoluto de la fuente magmática (Li et al., 2009, 2010). Sin embargo, los altos valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ relacionados a mineralización hipógena tardía, parecen avalar la primera hipótesis acerca de la evolución hidrotermal del prospecto develada por las firmas de Os. De esta manera, el último evento magmático hidrotermal comenzaría con mineralización de origen magmático-mantélico (Fig. 4.9), con valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ fraccionados debido a procesos de fraccionamiento en equilibrio (cambio de fase salmuera-vapor, pH, entre otros). A medida que, que el sistema evoluciona, la interacción de los fluidos magmáticos con la roca de caja y aguas meteóricas producen un fraccionamiento de Cu de tipo cinético dominado por cambios redox. Por otro lado, las firmas isotópicas de Cu en calcosina evidencian la presencia de procesos de enriquecimiento secundario posteriores. Estos son de carácter cíclico, probablemente aún activos debido al clima húmedo y lluvioso predominante en la zona.

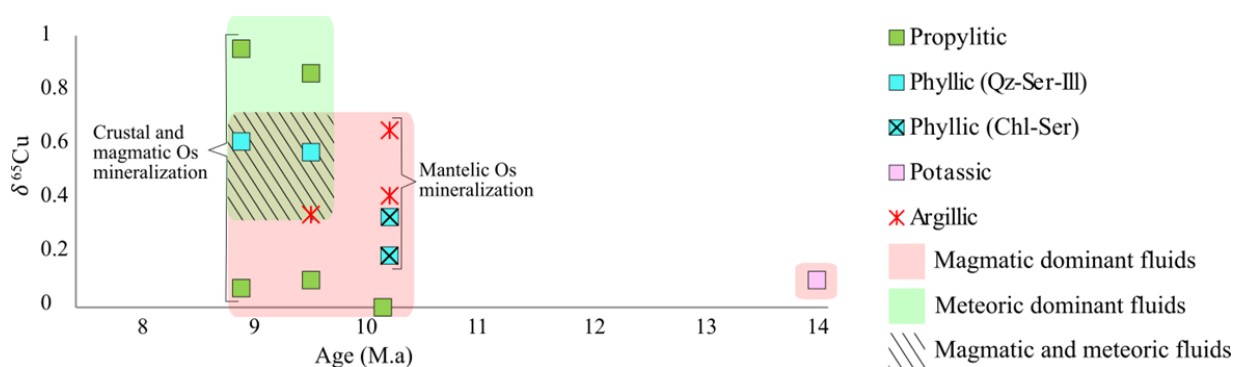


Figura 4.9 Diagrama $\delta^{65}\text{Cu}$ vs. Edad de mineralización. Las firmas isotópicas de Cu (y Os) muestran una evolución de los fluidos mineralizadores; desde dominados por componente magmática a dominados por aguas meteóricas.

4.6 RESUMEN Y CONCLUSIONES

(1) Se realizó un estudio isotópico de Cu en minerales sulfurados del prospecto Brahma. En virtud de las cualidades de dicho sistema isotópico, estos datos permiten caracterizar procesos hidrotermales de baja temperatura, en conjunto con identificar y evaluar el potencial de un posible desarrollo de enriquecimiento secundario en el prospecto. Debido a que los mecanismos de fraccionamiento en ambientes hipógeno y supérgeno son distintos, los datos fueron tratados en dos grupos; (1) muestras con mineralogía únicamente hipógena (calcopirita y esfalerita) y (2) muestras con presencia de mineralogía supérgena (calcosina recubriendo bornita y calcopirita-esfalerita en menor medida).

(2) La mineralización de calcosina muestra valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ extremadamente altos y también valores bajos e incluso negativos. Los valores altos se encuentran concentrados en las zonas más permeables como cuerpos de brecha y zonas de falla. Los valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ bajos y negativos cercanos a valores extremadamente altos sugieren la presencia de procesos de enriquecimiento secundarios cíclicos a escala local. Estos procesos se encuentran probablemente aún activos, influenciados por el clima húmedo y lluvioso típico de la región. Finalmente, las firmas isotópicas de Cu en mineralización supérgena entrega información acerca de la circulación de fluidos meteóricos, sugiriendo así nuevas zonas de falla no identificadas previamente (Fig. 4.8b)

(3) Los datos isotópicos de Cu en mineralización de calcopirita y esfalerita muestran valores poco fraccionados en comparación a la mineralización supérgena y son característicos de mineralización hipógena. Se observó un enriquecimiento leve de ^{65}Cu en la esfalerita con respecto a la calcopirita. Dicho fraccionamiento está probablemente relacionado con el proceso de difusión relacionado a la formación de corrosión calcopirítica en la esfalerita. Sin embargo, correspondería a un mecanismo de fraccionamiento de segundo orden. Los datos de $\delta^{65}\text{Cu}$ en mineralogía hipógena del prospecto Brahma son consistentes con los valores observados en otros sistemas mineralizados (Maher y Larson, 2007; Li et al., 2010; Dendas, 2012; Gregory y Mathur, 2017). A partir de dichos estudios, se propone que las variaciones de $\delta^{65}\text{Cu}$ responden a distintos procesos relacionados con la evolución del fluido hidrotermal, como cambios de fase salmuera-vapor, disminución del pH y cambios redox. Adicionalmente, los altos valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ en mineralización hipógena tardía sugieren la participación de aguas meteóricas oxidantes durante el estadio final de la actividad hidrotermal en el prospecto Brahma. Lo anterior es consistente con la componente magmática y cortical mostrada por las razones isotópicas de Os inicial en mineralización tardía (Fig. 4.9). Es importante señalar que las interpretaciones realizadas acerca de los análisis isotópicos de Cu, a pesar de mostrar coherencia con los análisis isotópicos de Os y también con la evolución típica de un sistema porfidico, deben ser consideradas con precaución debido a bajo número de muestras analizadas en este estudio.

(4) A partir de una mineralogía hipógena correspondiente a la zona de alteración fílica-argílica moderada distal, se ha podido generar un fraccionamiento de Cu de hasta 9.69%. Lo anterior confirma la presencia de Cu en el sistema hidrotermal y además indica que los procesos de enriquecimiento secundarios son altamente efectivos. Por otro lado, la cantidad de Cu hipógeno disponible es escasa, generando zonas de enriquecimiento secundario irregulares e incipientes, desarrollándose de manera preferencial en zonas de brecha y fallas. Lo anterior sugiere que la mineralización de Cu de interés económico está relacionada principalmente a sulfuros hipógenos.

4.7 BIBLIOGRAFÍA

- Archer, C., Vance, D., 2004. Mass discrimination correction in multiple-collector plasma source mass spectrometry: an example using Cu and Zn isotopes. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 19, 656-665.
- Asael, D., Butler, I., Rickard, A.D., Bar-Matthews, M., Halicz, L., 2006. $^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}$ fractionation during copper sulphide formation from iron sulphides in aqueous solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 18, A23.
- Asael, D., Matthews, A., Bar-Matthews, M., Halicz, L., 2007. Copper isotope fractionation in sedimentary copper mineralization (Timna Valley, Israel). *Chemical Geology* 243, 238-254.
- Barton, P.B., 1978. Some ore textures involving sphalerite from the Furutobe mine, Akita Prefecture, Japan. *Mining Geology* 28, 293-300.
- Barton, P.B., Bethke, P.M., 1987. Chalcopyrite disease in sphalerite; pathology and epidemiology. *American Mineralogist* 72, 451-467.
- Bente, K., Doering, T., 1993. Solid-state diffusion in sphalerites; an experimental verification of the "chalcopyrite disease". *European Journal of Mineralogy* 5, 465-478.
- Bente, K., Doering, T., 1995. Experimental studies on the solid state diffusion of Cu + In in ZnS and on "Disease", DIS (Diffusion Induced Segregations), in sphalerite and their geological applications. *Mineralogy and Petrology* 53, 285-305.

- Bortnikov, N., Genkin, A., Dobrovolskaya, M., Muravitskaya, G., Filimonova, A., 1991. The nature of chalcopyrite inclusions in sphalerite; exsolution, coprecipitation, or "disease"? *Economic Geology* 86, 1070-1082.
- Braxton, D., Mathur, R., 2011. Exploration applications of copper isotopes in the supergene environment: A case study of the Bayugo porphyry copper-gold deposit, southern Philippines. *Economic Geology* 106, 1447-1463.
- Burns, P., Marquez, E., Arias, S., 2008. Brahma Cu-Mo Porphyry, Chile: Unpublished report. Condor Resources Incorporated, p. 452.
- Dendas, M., 2012. Copper Isotope Tracers of Fluid Flow at Bingham Canyon Mine, Utah, M. Sc. Thesis, Department of Geosciences, University of Arizona, p. 36.
- Ehrlich, S., Butler, I., Halicz, L., Rickard, D., Oldroyd, A., Matthews, A., 2004. Experimental study of the copper isotope fractionation between aqueous Cu (II) and covellite, CuS. *Chemical Geology* 209, 259-269.
- Eldridge, C., Bourcier, W., Ohmoto, H., Barnes, H., 1988. Hydrothermal inoculation and incubation of the chalcopyrite disease in sphalerite. *Economic Geology* 83, 978-989.
- Fernandez, A., Borrok, D., 2009. Fractionation of Cu, Fe, and Zn isotopes during the oxidative weathering of sulfide-rich rocks. *Chemical Geology* 264, 1-12.
- Govindarao, B., Pruseth, K., Mishra, B., 2018. Sulfide partial melting and chalcopyrite disease: An experimental study. *American Mineralogist* 103, 1200-1207.
- Graham, S., Pearson, N., Jackson, S., Griffin, W., O'Reilly, S., 2004. Tracing Cu and Fe from source to porphyry: in situ determination of Cu and Fe isotope ratios in sulfides from the Grasberg Cu-Au deposit. *Chemical Geology* 207, 147-169.
- Gregory, M., Mathur, R., 2017. Understanding Copper Isotope Behavior in the High Temperature Magmatic-Hydrothermal Porphyry Environment. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 18, 4000-4015.
- Hoefs, J., 2018. *Stable isotope geochemistry*. Springer.
- Hutchison, M., Scott, S., 1981. Sphalerite geobarometry in the Cu-Fe-Zn-S system. *Economic Geology* 76, 143-153.
- Ikehata, K., Hirata, T., 2012. Copper isotope characteristics of copper-rich minerals from the Horoman peridotite complex, Hokkaido, northern Japan. *Economic Geology* 107, 1489-1497.
- Kendall, C., Caldwell, E., 1998. *Fundamentals of isotope geochemistry, Isotope tracers in catchment hydrology*. Elsevier, pp. 51-86.
- Kimball, B.E., Mathur, R., Dohnalkova, A.C., Wall, A.J., Runkel, R.L., Brantley, S.L., 2009. Copper isotope fractionation in acid mine drainage. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 1247-1263.
- Kojima, S., Sugaki, A., 1984. Phase relations in the central portion of the Cu-Fe-Zn-S system between 800 and 500 C. *Mineralogical Journal* 12, 15-28.
- Kojima, S., Sugaki, A., 1985. Phase relations in the Cu-Fe-Zn-S system between 500 degrees and 300 degrees C under hydrothermal conditions. *Economic Geology* 80, 158-171.
- Kojima, S., Sugaki, A., 1987. An experimental study on chalcopyritization of sphalerite induced by hydrothermally metasomatic reactions. *Mining Geology* 37, 373-380.
- Larson, P., Maher, K., Ramos, F., Chang, Z., Gaspar, M., Meinert, L., 2003. Copper isotope ratios in magmatic and hydrothermal ore-forming environments. *Chemical Geology* 201, 337-350.
- Li, W., Jackson, S., Pearson, N., Alard, O., Chappell, B., 2009. The Cu isotopic signature of granites from the Lachlan Fold Belt, SE Australia. *Chemical Geology* 258, 38-49.

- Li, W., Jackson, S., Pearson, N., Graham, S., 2010. Copper isotopic zonation in the Northparkes porphyry Cu–Au deposit, SE Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, 4078-4096.
- Maher, K., Larson, P., 2007. Variation in copper isotope ratios and controls on fractionation in hypogene skarn mineralization at Corocochuayco and Tintaya, Peru. *Economic Geology* 102, 225-237.
- Maréchal, C., Télouk, P., Albarède, F., 1999. Precise analysis of copper and zinc isotopic compositions by plasma-source mass spectrometry. *Chemical Geology* 156, 251-273.
- Markl, G., Lahaye, Y., Schwinn, G., 2006. Copper isotopes as monitors of redox processes in hydrothermal mineralization. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, 4215-4228.
- Mason, T., Weiss, D., Chapman, J., Wilkinson, J., Tessalina, S., Spiro, B., Horstwood, M., Spratt, J., Coles, B., 2005. Zn and Cu isotopic variability in the Alexandrinka volcanic-hosted massive sulphide (VHMS) ore deposit, Urals, Russia. *Chemical Geology* 221, 170-187.
- Mathur, R., Dendas, M., Titley, S., Phillips, A., 2010. Patterns in the copper isotope composition of minerals in porphyry copper deposits in southwestern United States. *Economic Geology* 105, 1457-1467.
- Mathur, R., Falck, H., Belogub, E., Milton, J., Wilson, M., Rose, A., Powell, W., 2018. Origins of chalcocite defined by copper isotope values. *Geofluids* 2018, 1-9.
- Mathur, R., Fantle, M.S., 2015. Copper isotopic perspectives on supergene processes: implications for the global Cu cycle. *Elements* 11, 323-329.
- Mathur, R., Munk, L., Nguyen, M., Gregory, M., Ansell, H., Lang, J., 2013. Modern and paleofluid pathways revealed by Cu isotope compositions in surface waters and ores of the Pebble porphyry Cu-Au-Mo deposit, Alaska. *Economic Geology* 108, 529-541.
- Mathur, R., Ruiz, J., Titley, S., Liermann, L., Buss, H., Brantley, S., 2005. Cu isotopic fractionation in the supergene environment with and without bacteria. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69, 5233-5246.
- Mathur, R., Titley, S., Barra, F., Brantley, S., Wilson, M., Phillips, A., Munizaga, F., Maksae, V., Vervoort, J., Hart, G., 2009. Exploration potential of Cu isotope fractionation in porphyry copper deposits. *Journal of Geochemical exploration* 102, 1-6.
- Mountain, B., Seward, T., 1999. The hydrosulphide/sulphide complexes of copper (I): Experimental determination of stoichiometry and stability at 22°C and reassessment of high temperature data. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63, 11-29.
- Mountain, B., Seward, T., 2003. Hydrosulfide/sulfide complexes of copper (I): experimental confirmation of the stoichiometry and stability of Cu (HS)₂⁻ to elevated temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67, 3005-3014.
- Othman, D., Luck, J., Bodinier, J., Arndt, N., Albarede, F., 2006. Cu–Zn isotopic variations in the Earth's mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, A46.
- Rempel, K., Liebscher, A., Meixner, A., Romer, R., Heinrich, W., 2012. An experimental study of the elemental and isotopic fractionation of copper between aqueous vapour and liquid to 450° C and 400 bar in the CuCl–NaCl–H₂O and CuCl–NaHS–NaCl–H₂O systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 94, 199-216.
- Rouxel, O., Fouquet, Y., Ludden, J., 2004. Copper isotope systematics of the Lucky Strike, Rainbow, and Logatchev sea-floor hydrothermal fields on the Mid-Atlantic Ridge. *Economic Geology* 99, 585-600.
- Seo, J., Lee, S., Lee, I., 2007. Quantum chemical calculations of equilibrium copper (I) isotope fractionations in ore-forming fluids. *Chemical Geology* 243, 225-237.
- Shields, W., Goldich, S., Garner, E., Murphy, T., 1965. Natural variations in the abundance ratio and the atomic weight of copper. *Journal of Geophysical Research* 70, 479-491.

- Shields, W., Murphy, T., Garner, E., 1964. Absolute isotopic abundance ratio and the atomic weight of a reference sample of copper. *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 68.
- Stern, M., Spindel, W., Monse, E., 1968. Temperature dependences of isotope effects. *The Journal of Chemical Physics* 48, 2908-2919.
- Wall, A., Mathur, R., Post, J., Heaney, P., 2011. Cu isotope fractionation during bornite dissolution: an in situ X-ray diffraction analysis. *Ore Geology Reviews* 42, 62-70.
- Watkins, J., DePaolo, D., Watson, E., 2017. Kinetic fractionation of non-traditional stable isotopes by diffusion and crystal growth reactions. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 82, 85-125.
- Wiggins, L., Craig, J., 1980. Reconnaissance of the Cu-Fe-Zn-S system; sphalerite phase relationships. *Economic Geology* 75, 742-751.
- Zhu, X., Guo, Y., Williams, R., O'nions, R., Matthews, A., Belshaw, N., Canters, G., De Waal, E.C., Weser, U., Burgess, B., 2002. Mass fractionation processes of transition metal isotopes. *Earth and Planetary Science Letters* 200, 47-62.
- Zhu, X., O'Nions, R., Guo, Y., Belshaw, N., Rickard, D., 2000. Determination of natural Cu-isotope variation by plasma-source mass spectrometry: implications for use as geochemical tracers. *Chemical Geology* 163, 139-149.

Capítulo 5 Resumen y Conclusiones

(1) El Prospecto Brahma es un depósito tipo pórfido Cu-Mo con mineralización hospedada en unidades intrusivas equigranulares y porfídicas, y en cuerpos de brecha hidrotermal. La zona interceptada por los sondajes existentes está dominada por alteración filica (clorita-sericita y cuazo-sericita-illita) sobreimpuesta por finas vetillas de clorita-epidota (alteración propilitica retrógrada) y alteración argílica moderada (arcillas-cuarzo-hematita) en zonas permeables. El prospecto Brahma presenta mineralización de pirita y menor cantidad de calcopirita, molibdenita, esfalerita y galena. También se detectó la presencia de bornita, calcosina y covelina en traza. La mineralización se presenta diseminada y asociada a vetillas tardías. Según los modelos clásicos de alteración-mineralización asociado a este tipo de depósitos (Lowell and Guilbert, 1970; Sillitoe, 2010), el área interceptada por los sondajes correspondería a la porción somera de un sistema porfídico (Fig. 5.1), en el halo pirítico descrito por Lowell y Guilbert (1970) y la zona de mineralización de Cu-Zn-Pb descrita por Sillitoe (2010) y Kouzmanov y Prokrovski (2012). En vista de lo anterior, se presume que la mayor parte de la mineralización hipógena de Cu estaría asociada al núcleo potásico ubicado a mayor profundidad.

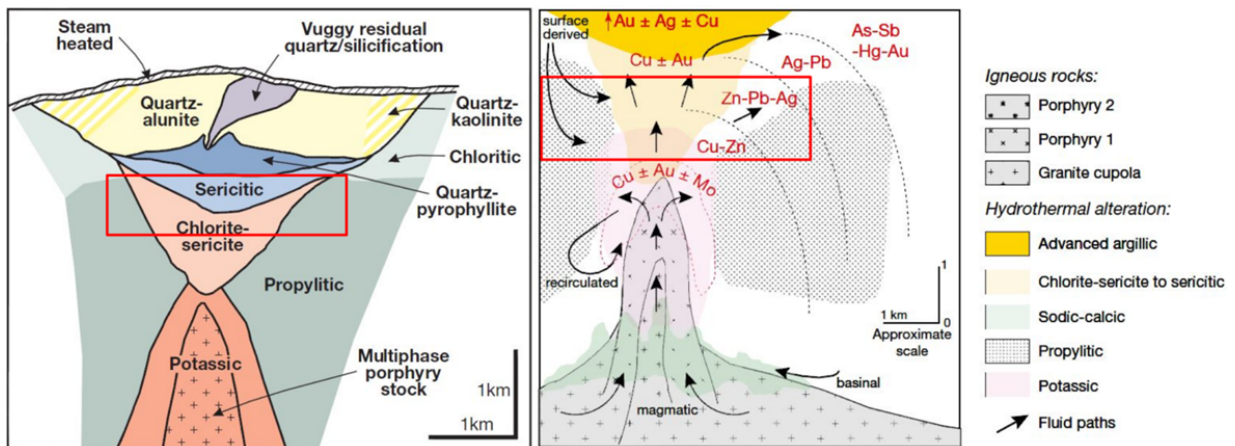


Figura 5.1 Modelos de alteración (derecha; Sillitoe, 2010) y mineralización (izquierda; Kouzmanov y Prokrovski, 2012) asociados a un yacimiento de tipo pórfido cuprífero. En rojo se marca la zona interceptada por los sondajes mapeados del Prospecto Brahma.

(2) Los análisis geocronológicos U-Pb en circón y Re-Os en molibdenita, pirita y calcopirita revelan la presencia de 3 eventos magmáticos-hidrotermales de ~14, 12 y 10 Ma. El evento de mineralización de ~10 Ma es el mejor documentado en la zona estudiada y según las relaciones de corte observadas en el prospecto, correspondería al de mayor interés económico. Dicho evento magmático-hidrotermal habría comenzado alrededor de los 10.2 Ma y habría culminado cerca de los 8.9 Ma. Estos antecedentes permiten señalar que el Prospecto Brahma se habría formado por más de un evento, comenzando a los ~14 Ma y estando activo por 4 a 5 Ma. Las edades U-Pb y Re-Os determinadas en este trabajo son similares a las edades reportadas para el depósito Los Pelambres, donde la actividad magmática comenzó a los ~13.9 Ma y el evento de mineralización principal se desarrolló a los ~11 Ma (Fig. 2.10; Bertens et al., 2003; 2006; Perelló et al., 2012). Adicionalmente, los análisis Re-Os en molibdenita muestran en promedio concentraciones de Re similares a otros pórfidos de Cu-Mo andinos y del mundo (e.g. Chuquicamata, Collahuasi, El Teniente, Los Pelambres; Voudouris et al., 2013; McFall et al., 2019; Fig. 5.2). Algunas

molibdenitas analizadas muestran concentraciones de Re bastante altas, alcanzando incluso los ~1700 ppm (Fig. 5.2; Tabla 2.3).

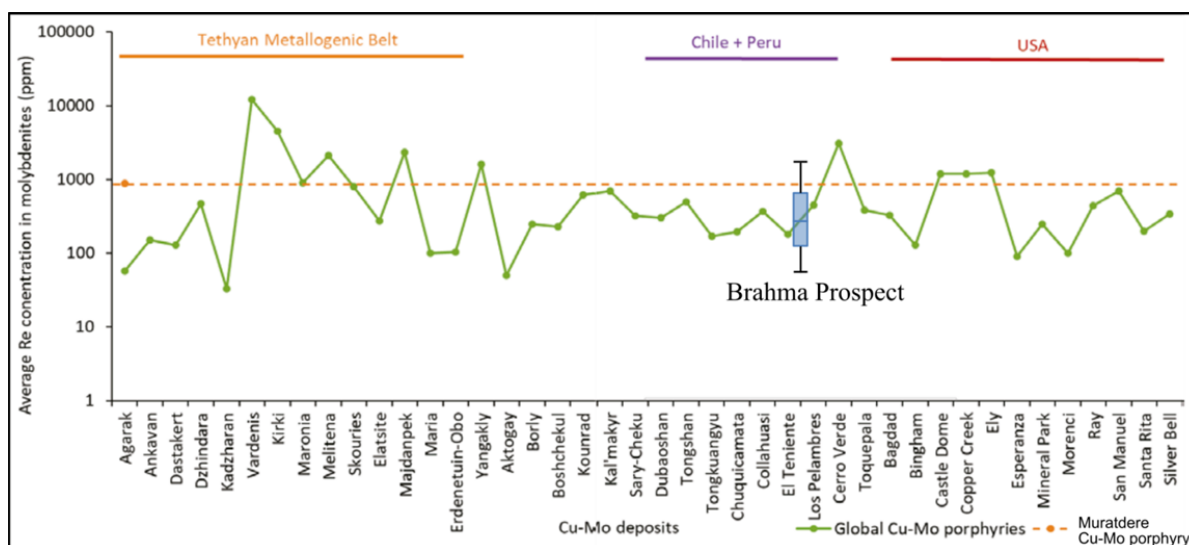


Figura 5.2 Concentración promedio de Re en molibdenitas pertenecientes a depósitos tipo pórfido de Cu-Mo (línea verde). Datos tomados de Berzina et al (2005), Singer et al (2005), Grabezhev (2007), Voudouris et al (2009), Grabezhev and Voudouris (2014) y McFall et al (2019). En azul se muestra un diagrama tipo boxplot que representa las concentraciones de Re en molibdenitas del prospecto Brahma (n=6). Modificado de McFall et al (2019).

(3) Los datos de isotopía Re-Os en sulfuros evidencian un origen esencialmente mantélico de los metales (Cu y Mo) asociados a la mineralización datada en 10.2 Ma y un origen mixto (mantélica-cortical) para la mineralización datada en 8.9 Ma. Lo anterior es coherente con la signatura juvenil mostrada por los análisis isotópicos de Hf en cada una de las unidades intrusivas reconocidas en el prospecto. Por otro lado, altos valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ asociados a mineralización hipógena tardía indican condiciones oxidantes en el estadio final de la actividad hidrotermal. De esta manera, los datos isotópicos de Hf, Os y Cu evidencian una evolución continua de los fluidos hidrotermales, desde magmático-mantélico a magmático-cortical con condiciones oxidantes. Esta evolución se atribuye a la participación de aguas meteóricas durante el enfriamiento de sistema. En complemento a lo anterior, según el estudio realizado por Mathur et al (2000a), las bajas razones de $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (i) asociadas a la principal etapa de mineralización develaría la presencia de procesos magmáticos-hidrotermales profundos propicios en la formación de un pórfido cuprífero de gran tonelaje.

(4) Las razones de $\delta^{65}\text{Cu}$ en sulfuros evidencian la existencia de procesos de enriquecimiento secundario en el prospecto. Estos se caracterizan por la presencia de calcosina y covelina recubriendo parcial a totalmente bornita, calcopirita y pirita. La distribución espacial de los datos indica que estos procesos presentan un mejor desarrollo en zonas permeables como brechas y fallas. Adicionalmente, la distribución no homogénea de altos valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ en profundidad entrega información acerca de la dirección de circulación de fluidos, sugiriendo así nuevas zonas de falla inferida. Los valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ en sulfuros supérgenos confirman que los procesos de enriquecimiento secundario son altamente efectivos, de carácter cíclico pero de escala local, generando zonas enriquecidas irregulares y poco desarrolladas. En consecuencia de lo anterior se concluye que la mineralización de interés económico estaría asociada a sulfuros hipógenos.

(5) Los antecedentes de geología, geocronología, geoquímica de roca total y geoquímica isotópica (Hf, Os y Cu) indican que el Prospecto Brahma presenta características similares a otros pórfidos de Cu-Mo pertenecientes a la franja del Mioceno-Plioceno de Chile Central. La edad Miocena determinada para el prospecto es coherente con las edades reportadas en otros pórfidos cupríferos ubicados al sur de El Teniente como Rosario de Rengo (9.89-8.43 Ma; 34°31'S; Muñoz, 2008) e Infiernillo (8.29 Ma; 35°09'S; Vale-Exploraciones, 2017). Lo anterior sugiere la continuación de la franja metalogénica del Mioceno-Plioceno al sur de El Teniente (34°05'S) hasta por lo menos la latitud del Prospecto Brahma (35°45'S).

(6) El sistema hidrotermal Brahma se encuentra exhumado en un nivel alto respecto del modelo conceptual de pórfidos cupríferos (techo de zona de alteración filica a base de lithocap; e.g. Sillitoe 2010), lo cual es coherente con la presencia de leyes sub-económicas de Cu y Mo en los sondajes realizados (Burns et al., 2008). Sin embargo, los datos aquí presentados permiten confirmar la presencia de estos metales dentro del sistema hidrotermal. Lo anterior, en conjunto las características geoquímicas, multiplicidad y longevidad de los eventos magmáticos-hidrotermales indicarían procesos favorables en la formación de un depósito de tipo pórfido de Cu-Mo de gran tonelaje. Finalmente se concluye que el Prospecto Brahma muestra un interesante potencial de exploración, mientras que su potencial económico se encuentra actualmente indeterminado.

BIBLIOGRAFÍA

- Bertens, A., Clark, A., Barra, F., Deckart, K., 2006. Evolution of the Los Pelambres-El Pachón porphyry copper-molybdenum district, Chile/Argentina, in: XI Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, pp. 179-181.
- Bertens, A., Deckart, K., Gonzalez, A., 2003. Geocronología U-Pb, Re-Os y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ del pórfido Cu-Mo Los Pelambres, Chile central, in: X Congreso Geológico Chileno, Concepción, (CD-ROM): 5.
- Berzina, A.N., Sotnikov, V.I., Economou-Eliopoulos, M., and Eliopoulos, D.G., 2005. Distribution of rhenium in molybdenite from porphyry Cu-Mo and Mo-Cu deposits of Russia (Siberia) and Mongolia. *Ore Geology Reviews* 26, 91-113
- Burns, P., Marquez, E., Arias, S., 2008. Brahma Cu-Mo Porphyry, Chile: Unpublished report. Condor Resources Incorporated, p. 452.
- Grabezhev, A.I., 2007. Rhenium in ores of porphyry copper deposits in the Urals. *Doklady Earth Sciences* 413, 265-268.
- Grabezhev, A.I., and Voudouris, P.C., 2014. Rhenium distribution in molybdenite from the Vosnesensk porphyry Cu \pm (Mo, Au) deposit (southern Urals, Russia). *Canadian Mineralogist* 52, 671-686.
- Kouzmanov, K., Pokrovski, G.S., 2012. Hydrothermal controls on metal distribution in porphyry Cu (-Mo-Au) systems. *Society of Economic Geologists, Special Publication* 16, 573-618.
- Lowell, J.D., Guilbert, J.M., 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology* 65, 373-408.
- Mathur, R., Ruiz, J., Munizaga, F., 2000a. Relationship between copper tonnage of Chilean base-metal porphyry deposits and Os isotope ratios. *Geology* 28, 555-558.
- McFall, K., Roberts, S., McDonald, I., Boyce, A. J., Naden, J., & Teagle, D., 2019. Rhenium Enrichment in the Muratdere Cu-Mo (Au-Re) Porphyry Deposit, Turkey: Evidence from Stable Isotope Analyses ($\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$, δ^{D}) and Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry Analysis of Sulfides. *Economic Geology* 114(7), 1443-1466.

- Muñoz, P., 2008. Antecedentes petrográficos, geoquímicos y geocronológicos de rocas intrusivas del sector Rosario de Rengo, Región del Libertador Bernardo O' Higgins., Undergraduated Thesis, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, p. 109.
- Perelló, J., Sillitoe, R.H., Mpodozis, C., Brockway, H., Posso, H., 2012. Geologic setting and evolution of the porphyry copper-molybdenum and copper-gold deposits at Los Pelambres, Central Chile, in: Hedenquist, J.W., Harris, M., Camus, F. (Eds.), *Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world: A tribute to Richard H. Sillitoe*. Society of Economic Geologist Special Publication, 16, 79-104.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology* 105, 3-41.
- Singer, D.A., Berger, V I., Menzie, W.D., and Berger, B.R., 2005. Porphyry copper deposit density. *Economic Geology* 100, 491-514.
- Vale-Exploraciones, 2017. Proyecto Arcángel. Reporte Temporada 2016-2017: Unpublished report., Santiago, p. 62.
- Voudouris, P.C., Melfos, V., Spry, P.G., Bindi, L., Kartal, T., Arikas, K., Moritz, R., and Ortelli, M., 2009. Rhenium-rich molybdenite and rheniite in the Pagoni Rachi Mo-Cu-Te-Ag-Au prospect, northern Greece: Implications for the Re geochemistry of porphyry-style Cu-Mo and Mo mineralization. *Canadian Mineralogist* 47, 1013-1036.
- Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P. G., Bindi, L., Moritz, R., Ortelli, M., & Kartal, T., 2013. Extremely Re-rich molybdenite from porphyry Cu-Mo-Au prospects in northeastern Greece: Mode of occurrence, causes of enrichment, and implications for gold exploration. *Minerals*, 3(2), 165-191.

Anexos

ANEXO A: Resultados de las determinaciones de edad U-Pb e isotopía de Hf en cristales de circón mediante LA-ICP-MS

Item 1: Results of zircon U-Pb age determinations by LA-ICP-MS.

Sample/ Grain	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	CORRECTED RATIOS								CORRECTED AGES (Ma)							Disc %	Obs ¹
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	±2σ	Rho	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	Best age (Ma)	±2σ		
B06_411 Granodiorite; 6,039,536N - 301,769E																				
Zircon_106	88	81	0.92	0.06500	0.02400	0.01750	0.00620	0.00219	0.00019	0.00098	0.00015	0.05	14.1	1.2	17.4	6.2	14.1	1.2	19.0	
Zircon_107	29	21	0.73	0.23000	0.13000	0.03000	0.01500	0.00225	0.00032	0.00149	0.00034	-0.33	14.5	2.0	29.0	14.0	14.5	2.0	50.0	
Zircon_108	101	55	0.54	0.11600	0.02700	0.03610	0.00830	0.00240	0.00020	0.00134	0.00027	-0.25	15.4	1.3	35.8	8.0	15.4	1.3	57.0	
Zircon_109	41	20	0.49	0.12800	0.05800	0.02500	0.01200	0.00206	0.00028	0.00157	0.00049	-0.25	13.3	1.8	25.0	11.0	13.3	1.8	46.8	
Zircon_110	63	33	0.53	0.09700	0.03800	0.02340	0.00830	0.00242	0.00027	0.00187	0.00039	-0.20	15.6	1.8	23.1	8.1	15.6	1.8	32.5	
Zircon_111	55	45	0.82	0.22000	0.18000	0.01080	0.00880	0.00172	0.00030	0.00077	0.00018	0.10	11.1	1.9	10.7	8.7	11.1	1.9	-3.7	
Zircon_112	73	64	0.88	0.06500	0.02200	0.01910	0.00610	0.00232	0.00023	0.00080	0.00022	0.21	14.9	1.5	19.0	6.0	14.9	1.5	21.6	
Zircon_113	77	38	0.49	0.11100	0.02200	0.03160	0.00680	0.00213	0.00017	0.00130	0.00023	0.23	13.7	1.1	31.3	6.6	13.7	1.1	56.2	
Zircon_114	184	112	0.61	0.05400	0.01100	0.01840	0.00360	0.00253	0.00015	0.00082	0.00011	-0.06	16.3	0.9	18.5	3.6	16.3	0.9	11.9	
Zircon_115	122	125	1.02	0.14500	0.04200	0.03300	0.00920	0.00216	0.00025	0.00074	0.00012	-0.37	13.9	1.6	32.8	9.0	13.9	1.6	57.6	
Zircon_116	125	66	0.53	0.05500	0.02000	0.01680	0.00550	0.00221	0.00021	0.00119	0.00020	0.12	14.3	1.4	16.8	5.4	14.3	1.4	14.9	
Zircon_117	69	40	0.58	0.10600	0.04100	0.02950	0.00850	0.00221	0.00028	0.00132	0.00027	0.11	14.2	1.8	29.1	8.3	14.2	1.8	51.2	
Zircon_118	50	26	0.51	0.06900	0.04400	0.01900	0.01100	0.00232	0.00027	0.00082	0.00028	-0.14	15.0	1.8	19.0	11.0	15.0	1.8	21.1	
Zircon_119	94	91	0.97	0.06300	0.02300	0.02410	0.00640	0.00256	0.00020	0.00087	0.00016	0.14	16.5	1.3	24.0	6.3	16.5	1.3	31.3	
Zircon_120	70	38	0.53	0.06500	0.02700	0.02510	0.00880	0.00266	0.00025	0.00193	0.00036	0.05	17.1	1.6	24.7	8.6	17.1	1.6	30.8	
Zircon_121	87	52	0.60	0.09500	0.02500	0.02480	0.00760	0.00225	0.00022	0.00102	0.00022	-0.09	14.5	1.4	24.6	7.4	14.5	1.4	41.1	
Zircon_122	242	87	0.36	0.07400	0.07900	0.02000	0.10000	0.00240	0.00098	0.00120	0.00070	-0.02	15.4	6.2	24.0	77.0	15.4	6.2	35.8	
Zircon_123	60	37	0.62	0.08700	0.03200	0.02840	0.00980	0.00234	0.00021	0.00114	0.00035	0.27	15.1	1.3	28.0	9.5	15.1	1.3	46.1	
Zircon_124	56	46	0.82	0.18500	0.08000	0.03700	0.01000	0.00212	0.00032	0.00101	0.00023	-0.01	13.6	2.1	36.0	10.0	13.6	2.1	62.2	
Zircon_125	48	28	0.57	0.14400	0.04900	0.04000	0.01200	0.00240	0.00033	0.00097	0.00040	-0.01	15.4	2.1	42.0	11.0	15.4	2.1	63.3	
Zircon_126	79	52	0.66	0.10000	0.03700	0.01860	0.00580	0.00214	0.00027	0.00081	0.00019	-0.34	13.8	1.8	19.7	6.1	13.8	1.8	29.9	
Zircon_127	66	52	0.79	0.06400	0.03100	0.01450	0.00810	0.00216	0.00029	0.00094	0.00021	-0.08	13.9	1.9	14.4	8.0	13.9	1.9	3.5	
Zircon_128	39	22	0.56	-0.08000	0.54000	0.03400	0.01000	0.00210	0.00037	0.00133	0.00038	-0.26	13.5	2.4	35.4	9.8	13.5	2.4	61.9	
Zircon_129	34	18	0.53	0.65000	0.10000	0.30000	0.18000	0.00420	0.00160	0.01170	0.00600	0.04	27.0	10.0	270.0	100.0	27.0	10.0	90.0	
Zircon_130	42	27	0.64	0.17300	0.04900	0.05400	0.01600	0.00245	0.00033	0.00119	0.00033	0.22	15.8	2.1	52.0	15.0	15.8	2.1	69.6	
Zircon_131	62	49	0.80	0.08000	0.03100	0.01970	0.00670	0.00211	0.00028	0.00126	0.00025	-0.20	13.6	1.8	21.1	6.6	13.6	1.8	35.5	
Zircon_132	105	102	0.97	0.06800	0.02200	0.02130	0.00520	0.00233	0.00022	0.00106	0.00017	0.14	15.0	1.4	21.3	5.2	15.0	1.4	29.6	
Zircon_133	106	62	0.58	0.10600	0.02400	0.02460	0.00590	0.00192	0.00019	0.00079	0.00022	0.12	12.4	1.2	24.5	5.8	12.4	1.2	49.4	
Zircon_134	59	53	0.89	0.12400	0.03700	0.03000	0.00890	0.00201	0.00022	0.00099	0.00022	-0.02	12.9	1.4	29.6	8.8	12.9	1.4	56.4	
Zircon_135	51	25	0.49	0.35700	0.08400	0.14100	0.09200	0.00285	0.00090	0.00510	0.00260	0.60	18.4	5.7	133.0	59.0	18.4	5.7	86.2	
Zircon_136	62	35	0.55	0.08100	0.03800	0.02580	0.00940	0.00225	0.00027	0.00133	0.00028	0.20	14.5	1.7	25.5	9.3	14.5	1.7	43.1	
Zircon_137	52	30	0.58	0.09300	0.03500	0.02800	0.01000	0.00221	0.00025	0.00109	0.00037	0.07	14.2	1.6	27.0	10.0	14.2	1.6	47.4	
Zircon_138	72	58	0.81	0.58300	0.05600	0.40000	0.04300	0.00484	0.00046	0.00940	0.00130	0.32	31.1	2.9	338.0	30.0	31.1	2.9	90.8	

Zircon_139	75	66	0.88	0.07600	0.02600	0.02580	0.00830	0.00246	0.00022	0.00072	0.00018	0.02	15.8	1.4	25.5	8.2	15.8	1.4	38.0
Zircon_140	63	33	0.53	0.06900	0.02600	0.02710	0.00870	0.00229	0.00024	0.00119	0.00029	-0.01	14.7	1.5	26.6	8.5	14.7	1.5	44.7
B03_155 Feldspar and Rounded Hornblende Porphyry; 6,039,546N - 301,550E																			
Zircon_01	49	32	0.66	0.13500	0.03900	0.03000	0.01100	0.00201	0.00030	0.00058	0.00026	-0.17	12.9	1.9	29.0	11.0	12.9	1.9	55.5
Zircon_02	46	28	0.62	0.07900	0.04300	0.02300	0.01100	0.00225	0.00025	0.00126	0.00038	0.09	14.5	1.6	23.0	11.0	14.5	1.6	37.0
Zircon_03	126	141	1.12	0.15900	0.03000	0.04490	0.00810	0.00210	0.00016	0.00091	0.00018	0.35	13.5	1.0	44.3	7.8	13.5	1.0	69.5
Zircon_04	85	68	0.80	0.12300	0.02900	0.03830	0.00850	0.00236	0.00021	0.00099	0.00017	-0.19	15.2	1.3	37.9	8.2	15.2	1.3	59.9
Zircon_05	74	39	0.52	0.11800	0.03200	0.03990	0.00780	0.00229	0.00021	0.00183	0.00042	-0.11	14.8	1.4	39.3	7.7	14.8	1.4	62.3
Zircon_06	264	555	2.10	0.05040	0.00710	0.01500	0.00200	0.00222	0.00012	0.00066	0.00005	-0.03	14.3	0.8	15.1	2.0	14.3	0.8	5.2
Zircon_07	96	48	0.50	0.06100	0.02400	0.01950	0.00620	0.00211	0.00017	0.00098	0.00021	0.19	13.6	1.1	19.5	6.1	13.6	1.1	30.3
Zircon_08	77	47	0.62	0.11900	0.03200	0.03020	0.00880	0.00217	0.00021	0.00132	0.00030	-0.30	14.0	1.3	30.0	8.6	14.0	1.3	53.3
Zircon_09	127	72	0.57	0.07800	0.01600	0.02600	0.00490	0.00228	0.00016	0.00105	0.00022	-0.17	14.6	1.0	26.0	4.8	14.6	1.0	43.8
Zircon_10	59	35	0.59	0.06000	0.04300	0.01800	0.01100	0.00225	0.00028	0.00101	0.00032	-0.09	14.5	1.8	17.0	11.0	14.5	1.8	14.7
Zircon_11	85	55	0.64	0.11600	0.03700	0.03170	0.00750	0.00221	0.00026	0.00111	0.00019	-0.06	14.2	1.7	31.4	7.4	14.2	1.7	54.8
Zircon_12	55	28	0.50	0.16200	0.05300	0.03800	0.01200	0.00228	0.00032	0.00199	0.00041	-0.13	14.7	2.1	37.0	12.0	14.7	2.1	60.3
Zircon_13	75	50	0.66	0.09500	0.03400	0.03000	0.00750	0.00234	0.00020	0.00125	0.00023	0.10	15.1	1.3	29.9	7.3	15.1	1.3	49.5
Zircon_14	63	42	0.67	0.08700	0.04000	0.02700	0.01100	0.00232	0.00025	0.00101	0.00027	0.07	14.9	1.6	26.0	10.0	14.9	1.6	42.7
Zircon_15	130	95	0.73	0.10300	0.02500	0.02660	0.00600	0.00208	0.00019	0.00084	0.00015	-0.11	13.4	1.2	26.5	6.1	13.4	1.2	49.4
Zircon_16	54	40	0.74	0.10600	0.04700	0.03600	0.01200	0.00217	0.00030	0.00117	0.00023	-0.04	14.0	1.9	36.0	11.0	14.0	1.9	61.1
Zircon_17	96	76	0.79	0.07000	0.02400	0.01880	0.00650	0.00223	0.00018	0.00077	0.00018	-0.14	14.3	1.2	18.8	6.4	14.3	1.2	23.9
Zircon_18	133	98	0.74	0.06400	0.02000	0.01670	0.00490	0.00209	0.00014	0.00089	0.00018	-0.06	13.4	0.9	16.8	4.9	13.4	0.9	20.1
Zircon_19	137	121	0.88	0.05700	0.02000	0.01790	0.00550	0.00210	0.00016	0.00086	0.00013	0.06	13.5	1.0	17.9	5.5	13.5	1.0	24.6
Zircon_20	54	26	0.48	0.11900	0.03400	0.03400	0.01000	0.00222	0.00024	0.00176	0.00040	0.19	14.3	1.5	33.8	9.8	14.3	1.5	57.7
Zircon_21	78	55	0.71	0.11500	0.03100	0.03080	0.00750	0.00208	0.00019	0.00124	0.00026	-0.05	13.4	1.2	30.5	7.3	13.4	1.2	56.1
Zircon_22	105	58	0.55	0.08100	0.02100	0.02230	0.00550	0.00214	0.00016	0.00073	0.00016	0.15	13.7	1.0	22.2	5.6	13.7	1.0	38.3
Zircon_23	83	47	0.57	0.07800	0.02900	0.02550	0.00850	0.00234	0.00026	0.00161	0.00030	0.11	15.1	1.7	25.4	8.2	15.1	1.7	40.6
Zircon_24	85	47	0.56	0.06700	0.02600	0.01810	0.00610	0.00232	0.00022	0.00077	0.00021	0.03	14.9	1.4	19.6	6.3	14.9	1.4	24.0
Zircon_25	277	323	1.17	0.06000	0.01100	0.01700	0.00280	0.00220	0.00013	0.00073	0.00006	-0.20	14.2	0.8	17.0	2.8	14.2	0.8	16.6
Zircon_26	103	101	0.98	0.07800	0.01900	0.02660	0.00460	0.00226	0.00019	0.00069	0.00012	0.37	14.5	1.3	26.5	4.6	14.5	1.3	45.3
Zircon_27	125	92	0.73	0.14900	0.02900	0.04450	0.00780	0.00224	0.00018	0.00119	0.00028	-0.17	14.4	1.2	45.9	7.5	14.4	1.2	68.6
Zircon_28	56	33	0.60	0.30500	0.07000	0.12900	0.03300	0.00313	0.00040	0.00430	0.00130	0.32	20.2	2.5	126.0	28.0	20.2	2.5	84.0
Zircon_29	63	36	0.58	0.14000	0.03400	0.04400	0.01100	0.00272	0.00022	0.00159	0.00040	0.07	17.5	1.4	43.0	10.0	17.5	1.4	59.3
Zircon_30	104	61	0.58	0.08100	0.01600	0.02530	0.00470	0.00217	0.00017	0.00106	0.00020	0.07	14.0	1.1	25.2	4.6	14.0	1.1	44.4
Zircon_31	86	70	0.81	0.09300	0.05200	0.03700	0.01200	0.00243	0.00025	0.00150	0.00032	-0.01	15.7	1.6	37.0	12.0	15.7	1.6	57.6
Zircon_32	128	97	0.76	0.13300	0.02700	0.03300	0.00670	0.00207	0.00019	0.00090	0.00023	0.06	13.3	1.2	32.7	6.6	13.3	1.2	59.3
Zircon_33	60	44	0.74	0.08000	0.03400	0.02770	0.00840	0.00254	0.00024	0.00107	0.00024	-0.17	16.4	1.5	27.4	8.3	16.4	1.5	40.1
Zircon_34	132	179	1.36	0.08800	0.01900	0.02420	0.00560	0.00202	0.00016	0.00069	0.00011	0.07	13.0	1.0	24.1	5.6	13.0	1.0	46.1
Zircon_35	94	57	0.60	0.09500	0.02200	0.03060	0.00600	0.00228	0.00016	0.00113	0.00020	0.10	14.6	1.0	30.4	5.9	14.6	1.0	52.0
B02_09 Tonalite; 6,039,788N - 301,119E																			
Zircon_141	62	52	0.84	0.06300	0.03600	0.01490	0.00730	0.00201	0.00025	0.00111	0.00026	-0.05	12.9	1.6	14.8	7.3	12.9	1.6	12.8
Zircon_142	66	58	0.87	0.39000	0.14000	0.21000	0.19000	0.00400	0.00130	0.00500	0.00330	-0.09	25.9	8.4	200.0	110.0	25.9	8.4	87.1
Zircon_143	97	96	0.98	0.05400	0.03400	0.01770	0.00740	0.00210	0.00019	0.00064	0.00016	0.00	13.5	1.3	17.6	7.3	13.5	1.3	23.3
Zircon_144	58	29	0.50	0.06900	0.04400	0.01760	0.00980	0.00197	0.00026	0.00128	0.00039	-0.12	12.7	1.6	17.3	9.7	12.7	1.6	26.6
Zircon_145	44	26	0.58	0.09500	0.04400	0.03500	0.01300	0.00247	0.00033	0.00139	0.00042	0.17	15.9	2.1	34.0	13.0	15.9	2.1	53.2
Zircon_146	49	31	0.63	0.16900	0.08500	0.04700	0.01800	0.00239	0.00035	0.00126	0.00027	-0.08	15.4	2.2	48.0	17.0	15.4	2.2	67.9
Zircon_147	25	16	0.65	0.17000	0.12000	0.02900	0.01900	0.00253	0.00043	0.00151	0.00054	-0.13	16.3	2.8	27.0	19.0	16.3	2.8	39.6

Zircon_148	39	30	0.77	0.10000	0.06200	0.01900	0.01300	0.00265	0.00036	0.00116	0.00038	-0.32	17.0	2.3	19.0	13.0	17.0	2.3	10.5
Zircon_149	51	49	0.98	0.08000	0.04700	0.02200	0.01000	0.00219	0.00033	0.00096	0.00022	0.16	14.1	2.1	22.0	10.0	14.1	2.1	35.9
Zircon_150	93	79	0.85	0.08000	0.03400	0.02090	0.00710	0.00207	0.00018	0.00066	0.00016	0.07	13.3	1.1	20.8	7.0	13.3	1.1	36.1
Zircon_151	45	38	0.84	0.20700	0.07100	0.06100	0.01500	0.00250	0.00038	0.00153	0.00039	0.04	16.1	2.4	59.0	14.0	16.1	2.4	72.7
Zircon_152	33	20	0.60	0.08000	0.13000	0.00900	0.01500	0.00234	0.00044	0.00134	0.00049	-0.19	15.0	2.8	8.0	15.0	15.0	2.8	-87.5
Zircon_153	49	45	0.90	0.01100	0.04100	0.00200	0.01000	0.00210	0.00027	0.00087	0.00028	-0.25	13.5	1.7	1.0	11.0	13.5	1.7	-1250.0
Zircon_154	54	41	0.76	0.36000	0.11000	0.17100	0.03700	0.00327	0.00033	0.00579	0.00072	0.29	21.1	2.1	164.0	31.0	21.1	2.1	87.1
Zircon_155	105	101	0.96	0.09000	0.04000	0.02650	0.00930	0.00237	0.00025	0.00123	0.00018	-0.10	15.2	1.6	26.1	9.2	15.2	1.6	41.8
Zircon_156	62	57	0.93	0.16400	0.05500	0.04700	0.01400	0.00251	0.00028	0.00184	0.00055	0.16	16.2	1.8	46.0	14.0	16.2	1.8	64.8
Zircon_157	63	55	0.88	0.10400	0.08000	0.02700	0.03900	0.00246	0.00064	0.00110	0.00110	0.17	15.8	4.1	27.0	33.0	15.8	4.1	41.5
Zircon_158	67	60	0.89	0.04900	0.03600	0.01390	0.00930	0.00222	0.00021	0.00100	0.00023	0.04	14.3	1.3	15.5	9.3	14.3	1.3	7.7
Zircon_159	38	21	0.55	0.12100	0.09500	0.03900	0.01700	0.00266	0.00045	0.00249	0.00061	0.05	17.2	2.9	37.0	17.0	17.2	2.9	53.5
Zircon_160	53	29	0.55	0.06400	0.04300	0.01700	0.01200	0.00199	0.00028	0.00091	0.00051	-0.06	12.8	1.8	16.0	11.0	12.8	1.8	20.0
Zircon_161	42	25	0.59	0.19800	0.06700	0.06900	0.02100	0.00280	0.00032	0.00249	0.00056	0.41	18.0	2.0	66.0	22.0	18.0	2.0	72.7
Zircon_162	37	20	0.55	0.05000	0.12000	0.02200	0.02100	0.00206	0.00035	0.00209	0.00049	-0.25	13.2	2.2	25.0	20.0	13.2	2.2	47.2
Zircon_163	30	20	0.65	-0.02000	0.17000	0.03400	0.01800	0.00276	0.00043	0.00199	0.00048	0.05	17.7	2.7	32.0	18.0	17.7	2.7	44.7
Zircon_164	79	78	0.99	0.07600	0.03800	0.02190	0.00870	0.00202	0.00023	0.00122	0.00020	0.14	13.0	1.4	21.8	8.6	13.0	1.4	40.4
Zircon_165	37	22	0.61	0.09500	0.05200	0.03800	0.02000	0.00246	0.00032	0.00159	0.00043	-0.08	15.8	2.1	36.0	19.0	15.8	2.1	56.1
Zircon_166	20	10	0.50	0.16000	0.21000	0.04500	0.03100	0.00273	0.00052	0.00240	0.00100	0.08	17.5	3.3	48.0	29.0	17.5	3.3	63.5
Zircon_167	31	20	0.64	0.27000	0.17000	0.05200	0.02500	0.00254	0.00036	0.00236	0.00065	-0.14	16.4	2.3	48.0	24.0	16.4	2.3	65.8
Zircon_168	34	27	0.80	0.32000	0.18000	0.06200	0.02500	0.00281	0.00051	0.00123	0.00034	-0.14	18.1	3.3	58.0	24.0	18.1	3.3	68.8
Zircon_169	34	20	0.59	0.15800	0.09900	0.04000	0.01900	0.00250	0.00035	0.00357	0.00068	0.26	16.1	2.3	38.0	18.0	16.1	2.3	57.6
Zircon_170	27	13	0.49	0.17000	0.08700	0.05600	0.02200	0.00278	0.00040	0.00365	0.00087	0.10	17.9	2.6	54.0	21.0	17.9	2.6	66.9
Zircon_171	86	78	0.90	0.05300	0.02700	0.01780	0.00800	0.00237	0.00021	0.00100	0.00019	0.11	15.3	1.4	17.6	7.9	15.3	1.4	13.1
Zircon_172	61	32	0.53	0.10100	0.03800	0.03400	0.01100	0.00241	0.00032	0.00171	0.00039	0.15	15.5	2.0	33.0	10.0	15.5	2.0	53.0
Zircon_173	36	22	0.61	0.20900	0.07400	0.06800	0.02300	0.00257	0.00043	0.00235	0.00080	0.51	16.5	2.8	65.0	23.0	16.5	2.8	74.6
Zircon_174	48	29	0.61	0.07900	0.06200	0.02400	0.01500	0.00193	0.00028	0.00134	0.00046	0.39	12.4	1.8	23.0	15.0	12.4	1.8	46.1
Zircon_175	76	63	0.84	0.14300	0.06400	0.02600	0.01300	0.00196	0.00026	0.00096	0.00024	-0.32	12.6	1.7	26.0	12.0	12.6	1.7	51.5
B02_159 Tonalite; 6,039,747N - 301,142E																			
Zircon_176	55	47	0.86	0.10800	0.04700	0.03700	0.01300	0.00237	0.00030	0.00083	0.00026	-0.04	15.2	1.9	36.0	13.0	15.2	1.9	57.8
Zircon_177	38	25	0.65	0.06400	0.07100	0.03100	0.01400	0.00237	0.00033	0.00059	0.00041	0.24	15.3	2.2	30.0	14.0	15.3	2.2	49.0
Zircon_178	74	69	0.93	0.10600	0.05100	0.02900	0.01100	0.00186	0.00024	0.00114	0.00022	0.15	12.0	1.5	28.0	10.0	12.0	1.5	57.1
Zircon_179	50	39	0.79	0.25000	0.18000	0.08000	0.21000	0.00310	0.00170	0.00310	0.00550	-0.04	20.0	11.0	80.0	120.0	20.0	11.0	75.0
Zircon_180	30	19	0.65	-0.08800	0.07800	0.02300	0.02100	0.00275	0.00040	0.00108	0.00044	-0.16	17.7	2.6	22.0	21.0	17.7	2.6	19.5
Zircon_181	117	66	0.56	0.06700	0.02600	0.01700	0.00530	0.00218	0.00022	0.00100	0.00024	-0.36	14.0	1.4	17.0	5.3	14.0	1.4	17.6
Zircon_182	46	36	0.78	0.11000	0.08300	0.01660	0.00890	0.00204	0.00031	0.00067	0.00026	0.19	13.1	2.0	15.9	9.0	13.1	2.0	17.6
Zircon_183	47	41	0.89	0.04500	0.04200	0.01800	0.01100	0.00214	0.00031	0.00087	0.00024	0.06	13.8	2.0	18.0	11.0	13.8	2.0	23.3
Zircon_184	37	23	0.62	0.17800	0.09200	0.03500	0.01600	0.00205	0.00031	0.00134	0.00043	-0.22	13.2	2.0	33.0	15.0	13.2	2.0	60.0
Zircon_185	27	20	0.71	-0.15000	0.61000	0.04000	0.01900	0.00187	0.00046	0.00138	0.00063	-0.31	12.0	3.0	42.0	20.0	12.0	3.0	71.4
Zircon_186	31	18	0.58	0.31000	0.10000	0.11100	0.02700	0.00310	0.00043	0.00379	0.00072	0.01	19.9	2.8	105.0	24.0	19.9	2.8	81.0
Zircon_187	41	34	0.82	0.12400	0.08400	0.03000	0.02000	0.00259	0.00035	0.00106	0.00049	-0.08	16.7	2.3	32.0	19.0	16.7	2.3	47.8
Zircon_188	38	22	0.56	0.23100	0.07400	0.06400	0.01700	0.00250	0.00029	0.00265	0.00048	0.01	16.1	1.9	63.0	16.0	16.1	1.9	74.4
Zircon_189	56	47	0.84	0.07500	0.04100	0.02400	0.01100	0.00231	0.00026	0.00151	0.00035	0.10	14.9	1.6	24.0	11.0	14.9	1.6	37.9
Zircon_190	31	20	0.65	0.21700	0.09700	0.06400	0.02100	0.00312	0.00043	0.00135	0.00055	-0.07	20.1	2.8	61.0	19.0	20.1	2.8	67.0
Zircon_191	51	47	0.91	0.15200	0.09300	0.05600	0.01900	0.00241	0.00029	0.00182	0.00039	0.17	15.5	1.9	54.0	18.0	15.5	1.9	71.3
Zircon_192	45	22	0.49	0.15500	0.07100	0.03200	0.01200	0.00243	0.00033	0.00140	0.00042	-0.04	15.6	2.1	31.0	12.0	15.6	2.1	49.7

Zircon_193	34	24	0.69	0.11000	0.17000	0.02200	0.01400	0.00188	0.00035	0.00103	0.00045	-0.23	12.1	2.3	21.0	14.0	12.1	2.3	42.4
Zircon_194	31	20	0.63	0.09000	0.18000	0.01300	0.01300	0.00214	0.00039	0.00066	0.00040	0.02	13.8	2.5	12.0	13.0	13.8	2.5	-15.0
Zircon_195	43	40	0.92	0.13500	0.06500	0.02090	0.00960	0.00208	0.00029	0.00105	0.00029	-0.10	13.4	1.8	20.6	9.6	13.4	1.8	35.0
Zircon_196	31	19	0.63	0.04400	0.05300	0.01800	0.01500	0.00265	0.00036	0.00127	0.00050	0.14	17.0	2.3	17.0	15.0	17.0	2.3	0.0
Zircon_197	36	20	0.55	0.21300	0.08600	0.07000	0.02100	0.00298	0.00036	0.00284	0.00074	-0.08	19.2	2.3	68.0	20.0	19.2	2.3	71.8
Zircon_198	46	40	0.88	0.08800	0.05200	0.02300	0.01100	0.00212	0.00032	0.00091	0.00028	-0.05	13.7	2.1	23.0	11.0	13.7	2.1	40.4
Zircon_199	63	57	0.91	0.12000	0.06000	0.02400	0.01000	0.00189	0.00030	0.00071	0.00017	-0.23	12.2	1.9	24.0	10.0	12.2	1.9	49.2
Zircon_200	50	45	0.91	0.12000	0.19000	0.02300	0.01100	0.00197	0.00031	0.00070	0.00023	-0.31	12.7	2.0	22.9	9.8	12.7	2.0	44.5
Zircon_201	40	35	0.87	0.36000	0.18000	0.08500	0.03200	0.00240	0.00045	0.00199	0.00054	0.02	15.4	2.9	80.0	29.0	15.4	2.9	80.8
Zircon_202	40	31	0.78	0.10100	0.06500	0.02400	0.01700	0.00231	0.00035	0.00172	0.00036	-0.03	14.9	2.3	22.0	16.0	14.9	2.3	32.3
Zircon_203	44	26	0.59	0.06600	0.04700	0.01900	0.01300	0.00235	0.00032	0.00141	0.00046	0.18	15.1	2.0	18.0	13.0	15.1	2.0	16.1
Zircon_204	31	19	0.61	0.23500	0.09100	0.11400	0.03000	0.00326	0.00051	0.00416	0.00086	0.38	20.9	3.3	106.0	27.0	20.9	3.3	80.3
Zircon_205	46	34	0.74	0.26700	0.06300	0.11300	0.02100	0.00339	0.00037	0.00319	0.00069	0.24	21.8	2.4	110.0	20.0	21.8	2.4	80.2
Zircon_206	65	51	0.78	0.07200	0.04300	0.01800	0.01300	0.00212	0.00023	0.00115	0.00029	-0.05	13.6	1.5	18.0	12.0	13.6	1.5	24.4
Zircon_207	52	38	0.72	0.16900	0.06700	0.05500	0.01700	0.00269	0.00031	0.00183	0.00036	0.12	17.3	2.0	53.0	16.0	17.3	2.0	67.4
Zircon_208	23	15	0.63	0.16000	0.20000	0.07300	0.03300	0.00302	0.00055	0.00312	0.00080	0.01	19.4	3.5	68.0	30.0	19.4	3.5	71.5
Zircon_209	33	20	0.62	0.30000	0.12000	0.11100	0.03100	0.00287	0.00041	0.00417	0.00069	0.24	18.4	2.7	105.0	28.0	18.4	2.7	82.5
Zircon_210	50	42	0.84	0.09000	0.05600	0.03500	0.01400	0.00253	0.00034	0.00096	0.00031	0.17	16.3	2.2	34.0	14.0	16.3	2.2	52.1
B06_253 Feldspar and Hornblende Porphyry; 6,039,536N - 301,797E																			
Zircon_71	104	47	0.45	0.06200	0.03100	0.01200	0.00540	0.00141	0.00016	0.00089	0.00021	-0.02	9.1	1.0	12.0	5.4	9.1	1.0	24.2
Zircon_72	108	51	0.47	0.11700	0.04400	0.02170	0.00550	0.00149	0.00018	0.00115	0.00022	0.09	9.6	1.2	21.6	5.4	9.6	1.2	55.6
Zircon_73	197	165	0.84	0.14100	0.02800	0.02790	0.00470	0.00144	0.00012	0.00080	0.00011	0.10	9.3	0.8	27.9	4.6	9.3	0.8	66.7
Zircon_74	156	81	0.52	0.05400	0.01600	0.00960	0.00290	0.00130	0.00014	0.00056	0.00014	-0.10	8.4	0.9	9.7	2.9	8.4	0.9	13.6
Zircon_75	92	55	0.60	0.07600	0.03000	0.01490	0.00640	0.00154	0.00014	0.00083	0.00021	0.46	9.9	0.9	14.8	6.4	9.9	0.9	32.8
Zircon_76	242	229	0.94	0.11100	0.02100	0.01890	0.00360	0.00145	0.00012	0.00053	0.00008	0.00	9.4	0.8	19.0	3.5	9.4	0.8	50.7
Zircon_77	224	194	0.87	0.15500	0.09000	0.03700	0.04400	0.00184	0.00034	0.00090	0.00110	0.17	11.9	2.2	36.0	37.0	11.9	2.2	66.9 *
Zircon_78	79	30	0.37	0.07800	0.03700	0.01030	0.00510	0.00156	0.00018	0.00096	0.00027	-0.17	10.0	1.2	10.3	5.1	10.0	1.2	2.9
Zircon_79	129	65	0.51	0.32300	0.05600	0.07200	0.01100	0.00175	0.00017	0.00231	0.00030	-0.05	11.3	1.1	70.0	10.0	11.3	1.1	83.9 *
Zircon_80	96	51	0.54	0.24400	0.05200	0.03660	0.00780	0.00137	0.00018	0.00107	0.00028	-0.22	8.8	1.1	36.3	7.6	8.8	1.1	75.8
Zircon_81	99	45	0.45	0.30800	0.05400	0.06900	0.01000	0.00166	0.00019	0.00271	0.00039	0.15	10.9	1.2	66.9	9.7	10.9	1.2	83.7
Zircon_82	154	92	0.60	0.09400	0.02600	0.01800	0.00450	0.00160	0.00017	0.00068	0.00016	-0.03	10.3	1.1	18.0	4.7	10.3	1.1	42.8
Zircon_83	209	122	0.59	0.18600	0.02900	0.04250	0.00580	0.00178	0.00013	0.00147	0.00024	0.22	11.5	0.8	42.1	5.6	11.5	0.8	72.8 *
Zircon_84	116	49	0.42	0.06000	0.02700	0.01040	0.00380	0.00131	0.00016	0.00064	0.00017	-0.08	8.5	1.1	10.4	3.8	8.5	1.1	18.3
Zircon_85	76	47	0.63	0.20200	0.05600	0.05200	0.01100	0.00174	0.00020	0.00168	0.00031	0.24	11.2	1.3	51.0	11.0	11.2	1.3	78.0 *
Zircon_86	62	24	0.39	0.19600	0.08700	0.04000	0.09900	0.00151	0.00075	0.00130	0.00330	0.17	9.8	4.8	39.0	66.0	9.8	4.8	74.9 *
Zircon_87	187	112	0.60	0.09700	0.01800	0.01780	0.00330	0.00138	0.00011	0.00066	0.00012	0.27	8.9	0.7	17.9	3.3	8.9	0.7	50.5
Zircon_88	61	32	0.53	0.19800	0.08900	0.04400	0.01200	0.00171	0.00023	0.00164	0.00036	0.08	11.0	1.5	43.0	12.0	11.0	1.5	74.4 *
Zircon_89	139	88	0.63	0.06200	0.02300	0.01120	0.00380	0.00146	0.00014	0.00065	0.00013	-0.07	9.4	0.9	11.2	3.8	9.4	0.9	15.8
Zircon_90	77	35	0.45	0.17100	0.06900	0.02210	0.00630	0.00138	0.00017	0.00077	0.00024	0.02	8.9	1.1	22.0	6.2	8.9	1.1	59.5
Zircon_91	171	142	0.83	0.11600	0.02400	0.02170	0.00430	0.00153	0.00013	0.00073	0.00011	0.00	9.8	0.8	21.7	4.3	9.8	0.8	54.7
Zircon_92	100	60	0.60	0.09500	0.03500	0.01740	0.00560	0.00132	0.00014	0.00083	0.00020	-0.03	8.5	0.9	17.4	5.6	8.5	0.9	51.0
Zircon_93	184	125	0.68	0.12300	0.02000	0.02770	0.00470	0.00160	0.00012	0.00102	0.00015	0.13	10.3	0.7	27.7	4.6	10.3	0.7	62.8
Zircon_94	127	57	0.45	0.11200	0.03000	0.02140	0.00580	0.00142	0.00017	0.00095	0.00022	0.08	9.1	1.1	21.4	5.7	9.1	1.1	57.5
Zircon_95	94	33	0.35	0.15900	0.06400	0.02800	0.02500	0.00127	0.00038	0.00120	0.00110	-0.11	8.2	2.5	28.0	22.0	8.2	2.5	70.7 *
Zircon_96	157	97	0.62	0.14400	0.03200	0.02800	0.00560	0.00151	0.00018	0.00105	0.00020	0.24	9.7	1.2	27.8	5.5	9.7	1.2	65.1
Zircon_97	231	163	0.71	0.25500	0.03900	0.06840	0.00920	0.00196	0.00013	0.00186	0.00026	0.17	12.6	0.8	67.0	8.6	12.6	0.8	81.2 *

Zircon_98	203	163	0.80	0.06800	0.01700	0.01400	0.00340	0.00142	0.00008	0.00052	0.00007	0.02	9.1	0.5	14.0	3.4	9.1	0.5	34.9	
Zircon_99	222	167	0.75	0.09500	0.02300	0.01620	0.00350	0.00135	0.00015	0.00070	0.00011	-0.09	8.7	1.0	16.2	3.5	8.7	1.0	46.3	
Zircon_100	128	56	0.44	0.09200	0.02900	0.01770	0.00490	0.00149	0.00016	0.00086	0.00021	0.06	9.6	1.0	17.7	4.9	9.6	1.0	45.8	
Zircon_101	137	75	0.55	0.10600	0.02500	0.01920	0.00370	0.00142	0.00013	0.00084	0.00014	-0.16	9.2	0.9	19.2	3.7	9.2	0.9	52.2	
Zircon_102	155	155	1.00	0.15200	0.02700	0.02950	0.00520	0.00143	0.00014	0.00078	0.00012	0.04	9.2	0.9	29.4	5.1	9.2	0.9	68.7	
Zircon_103	75	33	0.44	0.66600	0.07900	0.30000	0.32000	0.00350	0.00230	0.01100	0.01500	-0.39	23.0	14.0	260.0	100.0	23.0	14.0	91.2	*
Zircon_104	113	94	0.83	0.19500	0.04200	0.04530	0.00870	0.00170	0.00018	0.00107	0.00020	0.22	11.0	1.2	44.7	8.4	11.0	1.2	75.4	*
Zircon_105	78	36	0.46	0.35200	0.05900	0.10200	0.01500	0.00224	0.00027	0.00380	0.00066	0.41	14.4	1.7	97.0	14.0	14.4	1.7	85.2	*

Notes:

(1) Data not used in the age calculation.

Item 2: Results of zircon Hf isotopic determinations.

#	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma^{(2)}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$	t (Ma)	ϵ_{Hf}	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	
B06_411										
<i>Granodiorite; 6,039,536N - 301,769E</i>										
1	Zircon_106	0.283079	0.000022	0.001166	0.000021	0.283079	14.1	10.4	10.7	0.8
2	Zircon_107	0.283058	0.000023	0.000532	0.000006	0.283058	14.5	9.7	10.0	0.8
3	Zircon_108	0.283050	0.000017	0.000568	0.000002	0.283050	15.4	9.4	9.7	0.6
4	Zircon_109	0.283052	0.000019	0.000445	0.000001	0.283052	13.3	9.4	9.7	0.7
5	Zircon_110	0.283063	0.000016	0.000621	0.000008	0.283063	15.6	9.8	10.2	0.6
6	Zircon_112	0.283074	0.000022	0.001176	0.000012	0.283074	14.9	10.2	10.5	0.8
7	Zircon_113	0.283073	0.000017	0.000725	0.000034	0.283073	13.7	10.2	10.5	0.6
8	Zircon_115	0.283062	0.000028	0.001451	0.000014	0.283062	13.9	9.8	10.1	1.0
9	Zircon_116	0.283075	0.000014	0.000818	0.000028	0.283075	14.3	10.3	10.6	0.5
10	Zircon_117	0.283046	0.000019	0.000951	0.000029	0.283046	14.2	9.2	9.5	0.7
11	Zircon_118	0.283058	0.000018	0.000732	0.000020	0.283058	15.0	9.7	10.0	0.6
12	Zircon_119	0.283079	0.000021	0.001524	0.000026	0.283079	16.5	10.4	10.7	0.7
13	Zircon_121	0.283052	0.000017	0.000710	0.000020	0.283052	14.5	9.4	9.8	0.6
14	Zircon_123	0.283082	0.000016	0.000552	0.000009	0.283082	15.1	10.5	10.8	0.6
15	Zircon_124	0.283076	0.000019	0.000804	0.000016	0.283076	13.6	10.3	10.6	0.7
16	Zircon_126	0.283070	0.000022	0.000748	0.000015	0.283070	13.8	10.1	10.4	0.8
17	Zircon_127	0.283082	0.000020	0.001005	0.000009	0.283082	13.9	10.5	10.8	0.7
18	Zircon_131	0.283060	0.000017	0.000749	0.000005	0.283060	13.6	9.7	10.0	0.6
19	Zircon_132	0.283084	0.000023	0.001450	0.000009	0.283084	15.0	10.6	10.9	0.8
20	Zircon_133	0.283088	0.000023	0.001071	0.000017	0.283088	12.4	10.7	11.0	0.8
B03_155										
<i>Feldspar and Rounded Hornblende Porphyry; 6,039,546N - 301,550E</i>										
1	Zircon_02	0.283075	0.000017	0.000506	0.000011	0.283075	14.5	10.3	10.6	0.6
2	Zircon_06	0.283051	0.000022	0.002083	0.000065	0.283050	14.3	9.4	9.7	0.8
3	Zircon_07	0.283090	0.000020	0.000909	0.000022	0.283090	13.6	10.8	11.1	0.7
4	Zircon_08	0.283069	0.000017	0.000896	0.000011	0.283069	14.0	10.0	10.3	0.6
5	Zircon_09	0.283051	0.000019	0.000662	0.000021	0.283051	14.6	9.4	9.7	0.7
6	Zircon_10	0.283090	0.000022	0.000813	0.000007	0.283090	14.5	10.8	11.1	0.8
7	Zircon_11	0.283092	0.000019	0.000802	0.000006	0.283092	14.2	10.9	11.2	0.7

8	Zircon_12	0.283057	0.000017	0.000651	0.000008	0.283057	14.7	9.6	9.9	0.6
9	Zircon_13	0.283044	0.000019	0.000882	0.000016	0.283044	15.1	9.2	9.5	0.7
10	Zircon_14	0.283055	0.000017	0.000923	0.000005	0.283055	14.9	9.5	9.9	0.6
11	Zircon_15	0.283073	0.000021	0.000971	0.000034	0.283073	13.4	10.2	10.5	0.7
12	Zircon_16	0.283070	0.000028	0.003082	0.000061	0.283069	14.0	10.1	10.4	1.0
13	Zircon_17	0.283066	0.000024	0.000942	0.000014	0.283066	14.3	9.9	10.2	0.9
14	Zircon_18	0.283081	0.000019	0.001099	0.000022	0.283081	13.4	10.5	10.8	0.7
15	Zircon_19	0.283075	0.000021	0.001100	0.000049	0.283075	13.5	10.3	10.5	0.8
16	Zircon_22	0.283061	0.000018	0.000804	0.000010	0.283061	13.7	9.8	10.1	0.7
17	Zircon_24	0.283079	0.000019	0.000623	0.000009	0.283079	14.9	10.4	10.7	0.7
18	Zircon_25	0.283059	0.000024	0.001428	0.000065	0.283059	14.2	9.7	10.0	0.9
19	Zircon_30	0.283046	0.000016	0.000704	0.000015	0.283046	14.0	9.2	9.5	0.6
20	Zircon_35	0.283056	0.000020	0.000834	0.000004	0.283056	14.6	9.6	9.9	0.7

B02_09

Tonalite; 6,039,788N - 301,119E

1	Zircon_141	0.283047	0.000020	0.000610	0.000008	0.283047	12.9	9.3	9.5	0.7
2	Zircon_143	0.283065	0.000020	0.001375	0.000010	0.283065	13.5	9.9	10.2	0.7
3	Zircon_144	0.283034	0.000016	0.000655	0.000004	0.283034	12.7	8.8	9.1	0.6
4	Zircon_145	0.283076	0.000017	0.000298	0.000002	0.283076	15.9	10.3	10.6	0.6
5	Zircon_146	0.283068	0.000022	0.000494	0.000003	0.283068	15.4	10.0	10.3	0.8
6	Zircon_149	0.283069	0.000017	0.000591	0.000004	0.283069	14.1	10.0	10.4	0.6
7	Zircon_150	0.283081	0.000018	0.000994	0.000012	0.283081	13.3	10.5	10.8	0.7
8	Zircon_152	0.283066	0.000018	0.000464	0.000003	0.283066	15.0	9.9	10.3	0.6
9	Zircon_153	0.283076	0.000021	0.000787	0.000010	0.283076	13.5	10.3	10.6	0.8
10	Zircon_155	0.283075	0.000020	0.001138	0.000016	0.283075	15.2	10.3	10.6	0.7
11	Zircon_157	0.283070	0.000018	0.000675	0.000016	0.283070	15.8	10.1	10.4	0.6
12	Zircon_158	0.283067	0.000021	0.000816	0.000008	0.283067	14.3	10.0	10.3	0.7
13	Zircon_160	0.283058	0.000020	0.000637	0.000003	0.283058	12.8	9.7	9.9	0.7
14	Zircon_162	0.283074	0.000017	0.000458	0.000003	0.283074	13.2	10.2	10.5	0.6
15	Zircon_164	0.283047	0.000019	0.001294	0.000093	0.283047	13.0	9.3	9.5	0.7
16	Zircon_165	0.283068	0.000015	0.000602	0.000003	0.283068	15.8	10.0	10.4	0.5
17	Zircon_171	0.283071	0.000022	0.001164	0.000015	0.283071	15.3	10.1	10.4	0.8

18	Zircon_172	0.283056	0.000018	0.000781	0.000005	0.283056	15.5	9.6	9.9	0.6
19	Zircon_174	0.283042	0.000018	0.000423	0.000004	0.283042	12.4	9.1	9.4	0.7
20	Zircon_175	0.283051	0.000020	0.000529	0.000013	0.283051	12.6	9.4	9.7	0.7

B02_159

Tonalite; 6,039,747N - 301,142E

1	Zircon_176	0.283053	0.000020	0.001282	0.000081	0.283053	15.2	9.5	9.8	0.7
2	Zircon_177	0.283085	0.000019	0.000407	0.000000	0.283085	15.3	10.6	10.9	0.7
3	Zircon_178	0.283059	0.000022	0.001185	0.000031	0.283059	12.0	9.7	9.9	0.8
4	Zircon_181	0.283048	0.000020	0.001087	0.000049	0.283048	14.0	9.3	9.6	0.7
5	Zircon_182	0.283079	0.000022	0.000919	0.000033	0.283079	13.1	10.4	10.7	0.8
6	Zircon_183	0.283080	0.000020	0.000684	0.000005	0.283080	13.8	10.4	10.7	0.7
7	Zircon_184	0.283067	0.000021	0.000396	0.000000	0.283067	13.2	10.0	10.3	0.8
8	Zircon_185	0.283052	0.000018	0.000627	0.000016	0.283052	12.0	9.4	9.7	0.7
9	Zircon_189	0.283079	0.000020	0.001007	0.000036	0.283079	14.9	10.4	10.7	0.7
10	Zircon_191	0.283061	0.000017	0.000629	0.000007	0.283061	15.5	9.8	10.1	0.6
11	Zircon_193	0.283057	0.000019	0.000319	0.000002	0.283057	12.1	9.6	9.9	0.7
12	Zircon_194	0.283053	0.000020	0.000392	0.000004	0.283053	13.8	9.5	9.8	0.7
13	Zircon_195	0.283087	0.000021	0.000788	0.000002	0.283087	13.4	10.7	11.0	0.8
14	Zircon_198	0.283067	0.000024	0.000683	0.000013	0.283067	13.7	10.0	10.3	0.8
15	Zircon_199	0.283052	0.000018	0.000788	0.000009	0.283052	12.2	9.4	9.7	0.6
16	Zircon_200	0.283071	0.000021	0.000861	0.000002	0.283071	12.7	10.1	10.4	0.7
17	Zircon_201	0.283057	0.000018	0.000734	0.000029	0.283057	15.4	9.6	10.0	0.6
18	Zircon_202	0.283063	0.000020	0.000766	0.000006	0.283063	14.9	9.8	10.2	0.7
19	Zircon_203	0.283069	0.000017	0.000386	0.000002	0.283069	15.1	10.0	10.4	0.6
20	Zircon_206	0.283064	0.000019	0.000721	0.000027	0.283064	13.6	9.9	10.2	0.7

B06_253

Feldspar and Hornblende Porphyry; 6,039,536N - 301,797E

1	Zircon_71	0.283047	0.000017	0.000751	0.000004	0.283047	9.1	9.3	9.5	0.6
2	Zircon_72	0.283045	0.000019	0.000620	0.000011	0.283045	9.6	9.2	9.4	0.7
3	Zircon_73	0.283057	0.000016	0.000929	0.000004	0.283057	9.3	9.6	9.8	0.6
4	Zircon_74	0.283047	0.000018	0.000933	0.000011	0.283047	8.4	9.3	9.4	0.6
5	Zircon_75	0.283047	0.000019	0.000912	0.000020	0.283047	9.9	9.3	9.5	0.7
6	Zircon_76	0.283036	0.000029	0.000743	0.000015	0.283036	9.4	8.9	9.1	1.0

7	Zircon_78	0.283038	0.000017	0.000661	0.000029	0.283038	10.0	8.9	9.2	0.6
8	Zircon_82	0.283041	0.000024	0.000926	0.000008	0.283041	10.3	9.1	9.3	0.8
9	Zircon_84	0.283023	0.000019	0.000706	0.000018	0.283023	8.5	8.4	8.6	0.7
10	Zircon_87	0.283024	0.000021	0.000988	0.000002	0.283024	8.9	8.5	8.6	0.8
11	Zircon_89	0.283065	0.000018	0.000700	0.000005	0.283065	9.4	9.9	10.1	0.7
12	Zircon_90	0.283034	0.000018	0.000783	0.000004	0.283034	8.9	8.8	9.0	0.7
13	Zircon_91	0.283037	0.000017	0.000622	0.000010	0.283037	9.8	8.9	9.1	0.6
14	Zircon_92	0.283047	0.000017	0.000629	0.000006	0.283047	8.5	9.3	9.5	0.6
15	Zircon_94	0.283052	0.000018	0.000550	0.000035	0.283052	9.1	9.4	9.6	0.6
16	Zircon_96	0.283057	0.000020	0.000796	0.000019	0.283057	9.7	9.6	9.8	0.7
17	Zircon_98	0.283040	0.000023	0.000890	0.000007	0.283040	9.1	9.0	9.2	0.8
18	Zircon_99	0.283047	0.000020	0.000672	0.000010	0.283047	8.7	9.3	9.5	0.7
19	Zircon_100	0.283044	0.000022	0.000778	0.000023	0.283044	9.6	9.2	9.4	0.8
20	Zircon_105	0.283046	0.000019	0.000690	0.000009	0.283046	14.4	9.2	9.5	0.7

Notes:

¹⁷⁶Lu decay constant of 1.867×10^{-11} has been used in these calculations (Söderlund et al., 2004). For ϵ_{Hf} calculation the chondritic values of Bouvier et al. (2008) have been used along with the corresponding zircon age.

ANEXO B: Descripciones petrográficas

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B02056-8

Tipo Estudio	Isótopos de Cu	
Sondaje	Profundidad(m)	
BRA002	56,7-57	

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Roca intrusiva fanerítica con alteración propilítica leve. Las plagioclasas se encuentran levemente sericitizadas y los cúmulos máficos se encuentran reemplazados por clorita, epidota y pirita. La muestra presenta mineralización de pirita y calcopirita en menor medida, ambas se presentan diseminadas y en vetilla tipo IX.

Clasificación Tonalita (TON)

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

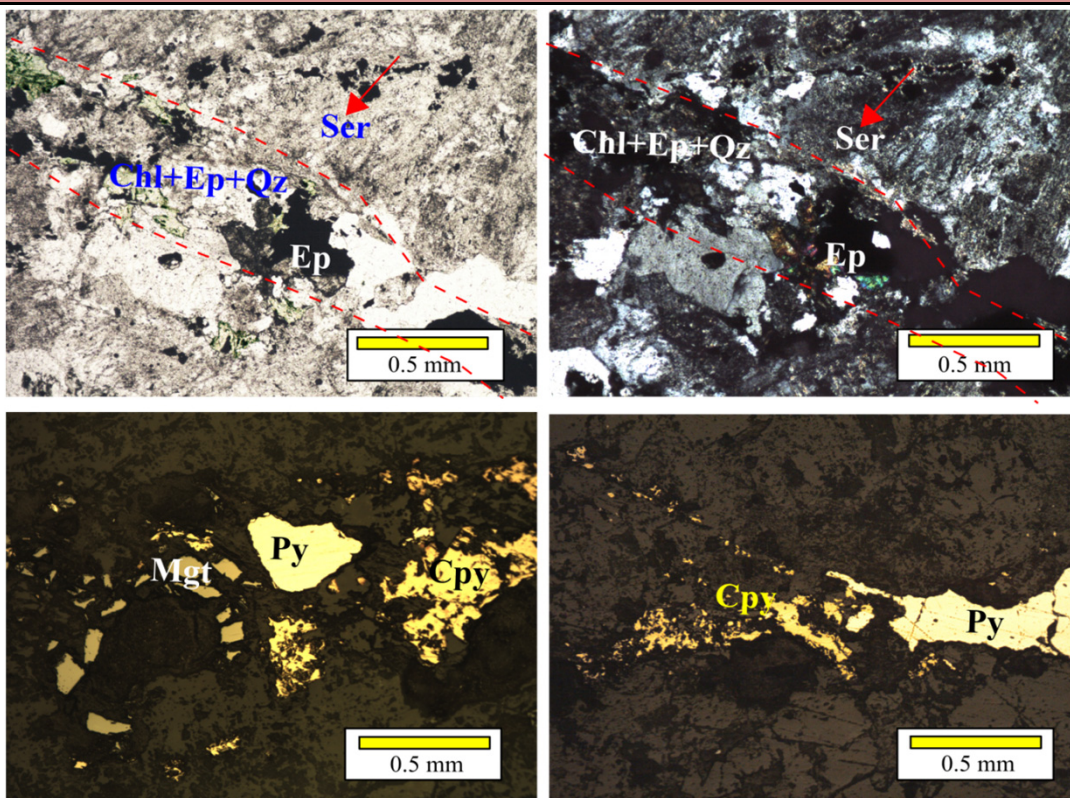
Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	30	1 a 2	Intrusivo de textura fanerítica. Las plagioclasas presentan macla periclina y polisintética y se encuentran con textura ad acumulada, donde los intersticios son rellenados por cuarzo conformando textura poikilítica. Los máficos se encuentran como cúmulos en los intersticios de las plagioclasas y están totalmente reemplazados por clorita, epidota y pirita.
Plagioclasa	60	1 a 2	
Hornblenda	8	0,2 a 0,6	
Magnetita	2	0,1	
% Roca fresca	70		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Clorita	10	Agregado microcristalino	Parches de clorita y clorita-epidota en los intersticios de las plagioclasas, reemplazando completamente cúmulos máficos
Epidota	3	0.4	
Sericita	10	Agregado microcristalino	Reemplazando parcialmente plagioclasas y rellenando microfracturas en estas.
Cuarzo	5	Agregado microcristalino	Rellenando microfracturas

Pirita	1	Hasta 1	Granos subhedrales relleno vetillas. Granos anhedrales diseminados en la matriz, estos presentan intercrecimiento con magnetita. Tanto en vetilla como en matriz se encuentra sola o reemplazada levemente por calcopirita desde los bordes
Calcopirita	<1	Hasta 0.3	Granos anhedrales intercrecidos con pirita relleno vetillas. En menor porcentaje diseminada en la matriz; se presenta intercrecida con magnetita y pirita y también reemplazando pirita desde los bordes
% Roca alterada	30		

Vetillas			Características (composicionales y texturales)
Mineralogía	Relleno	Halo	
Cuarzo	10		Vetillas finas de hasta 5 mm de ancho y de forma medianamente sinuosa. Halo de sericita de forma irregular (hasta 5 mm de ancho)
Clorita	60	40	
Epidota	20		
Pirita	3		
Calcopirita	2		
Sericita	5	60	

Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B02250-1

Tipo Estudio	Isótopos de Cu
Sondaje	Profundidad(m)
BRA002	250

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Brecha monomítica, matriz soportada. Clastos sub-redondeados de tonalita de hasta 20 mm y matriz de polvo de roca, fragmentos de cuarzo y plagioclasa, sericita, illita, clorita y turmalina. Mineralización de pirita y calcopirita diseminada tanto en clastos como en matriz. Fracturas rellenas de pirita, calcopirita y reemplazo de bornita y calcosina

Clasificación Brecha monomítica (MTBX)

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

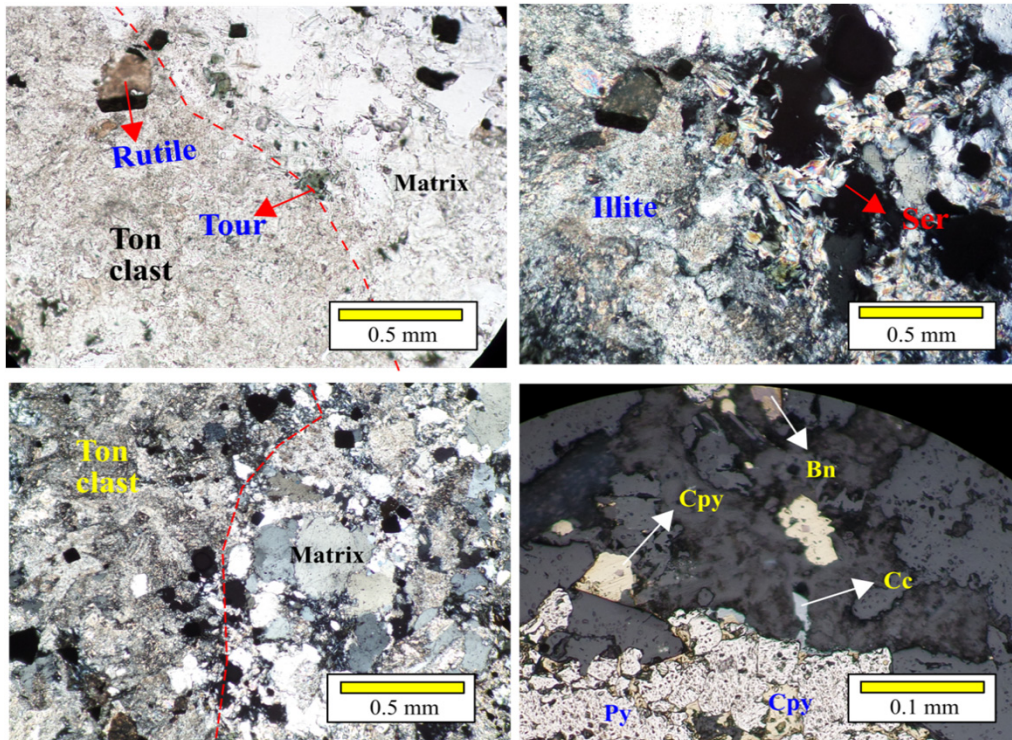
Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	28	1.3	Intrusivo fanerítico muy alterado. Se observan granos anhedrales y cuarzoes con textura de reabsorción
Plagioclasa	70	0.5	
Hornblenda	2	1.3	
% Roca fresca	30		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Sericita	30	Microcristalina	Como relleno de matriz y alterando plagioclasas
Clorita	10	Microcristalina	Como relleno de matriz y reemplazando fases máficas en los clastos de intrusivos
Illita	10	Microcristalina	Como relleno de matriz
Cuarzo	10	Variado; hasta 2.5 mm	Granos fragmentados angulosos, principalmente en la matriz de la brecha
Turmalina	2	0.1	Granos tabulares, principalmente en la matriz de la brecha
Hematita	2	<1.25	Reemplazando a fases máficas primarias. Se observa en variedad transparente y opaca
Rutilo	1	<1.25	Ganos subhedrales cristalinos preferentemente en el clasto de intrusivo

Pirita	4	Variado; hasta 1 mm	Granos principalmente euhedrales a anhedrales vermiculares (en menor medida). También, en menor medida relleno de fracturas. Se encuentra tanto en los clastos como en la matriz. Algunos granos se encuentran asociados a rutilo. Algunos granos cercanos a fracturas presentan reemplazo parcial de calcopirita y bornita.
Calcopirita	<1	<0.08	Granos anhedrales diseminados tanto en los clastos como en matriz y también como relleno de fracturas. Se presenta reemplazando parcialmente algunos granos de pirita y bornita (a través de clivaje). Algunos granos están parcial a completamente reemplazados por calcosina
Bornita	<1	0.1	Granos diseminados, preferentemente cercanos a zonas de fracturas. Algunos granos se encuentran reemplazados parcialmente por calcopirita a partir de planos cristalográficos. En menor medida se observa un reemplazo por calcosina
Calcosina	<1	<0.05	Diseminada cercana a zonas de fractura. Reemplaza total a parcialmente algunos granos de calcopirita desde los bordes hacia el centro
% Roca alterada	70		

Vetillas			
Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Cuarzo	40		Fracturas finas de forma recta de hasta 2 mm de ancho. Compuestas de cuarzo euhedral, pirita euhedral y calcopirita. Presencia de trazas de bornita y calcosina reemplazando parcialmente calcopirita
Pirita	55		
Calcopirita	4		
Bornita	<1		
Calcosina	<<1		

Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B02252-3

Tipo Estudio	Isótopos de Cu
Sondaje	Profundidad(m)
BRA002	252-253.5

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Brecha monomítica, matriz soportada. Clastos sub-redondeados de tonalita de hasta 20 mm y matriz de polvo de roca, fragmentos de cuarzo, sericita, illita, clorita y turmalina. Mineralización de pirita y calcopirita diseminada tanto en clastos como en matriz. Fracturas rellenas de cuarzo euhedral, pirita, calcopirita y reemplazo de bornita y calcosina (vetillas tipo VIII)

Clasificación	Brecha monomítica (MTBX)
----------------------	--------------------------

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

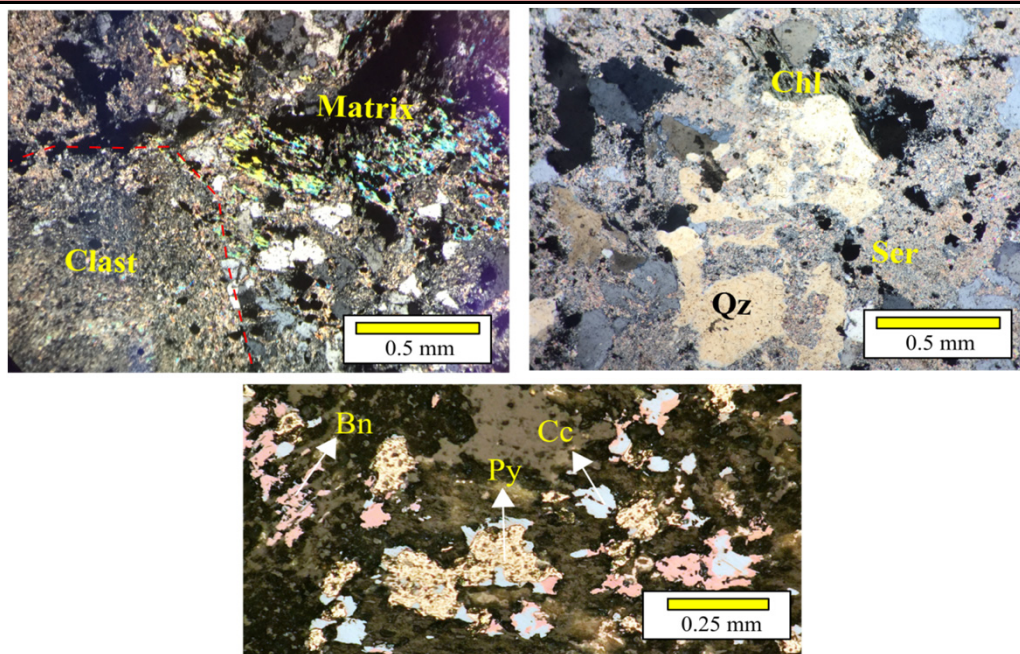
Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
% Roca fresca	0		Intrusivo fanerítico obliterado

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Sericita	20	Microcristalina	Pervasiva en toda la roca. Preferentemente en bordes de granos de cuarzo y reemplazando parches de clorita
Clorita	5	<1	En parches reemplazando fases máficas, la mayoría se encuentran sericitizados
Illita	30	Microcristalina	Pervasiva en toda la roca, tanto en matriz como en los clastos. Alterando preferentemente plagioclasas y feldespatos
Cuarzo	35	Variado; hasta 2	Granos fragmentados angulosos, principalmente en la matriz de la brecha
Pirita	5	Variado; hasta 2 en vetilla y 0.4 en matriz y clastos	En vetilla (o relleno de fractura) y finamente diseminada en la matriz. Los granos diseminados están levemente reemplazados por bornita y calcosina desde los bordes y además presenta algunas pequeñas inclusiones de estos. Estos granos corresponden a pseudomorfos de fases máficas. La pirita en vetilla presenta reemplazo muy leve a nulo de bornita y calcosina

Calcopirita	3	<0.1	Granos anhedrales diseminados en clastos y matriz, y también como relleno de fracturas. Se presenta reemplazando parcialmente algunos granos de pirita. Algunos granos están parcial a completamente reemplazados por bornita, calcosina y covelina
Bornita	1	<0.1	Granos anhedrales diseminados en clastos y matriz. Aparentemente reemplazando parcial a totalmente granos de pirita y calcopirita
Calcosina	<1	<0.05	Diseminada cercana a zonas de fractura. Reemplaza total a parcialmente algunos granos de calcopirita y bornita desde los bordes hacia el centro
Covelina	traza	<0.05	Reemplazando parcialmente calcopirita y bornita desde los bordes
% Roca alterada	100		

Vetillas			
Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Cuarzo	30		Fracturas finas de forma recta de hasta 2 mm de ancho, sin halo de alteración. Compuestas de cuarzo euhedral, pirita euhedral y calcopirita. Presencia de bornita y calcosina reemplazando parcial a totalmente calcopirita
Sericita	10		
Pirita	45		
Calcopirita	10		
Bornita	4		
Calcosina	1		

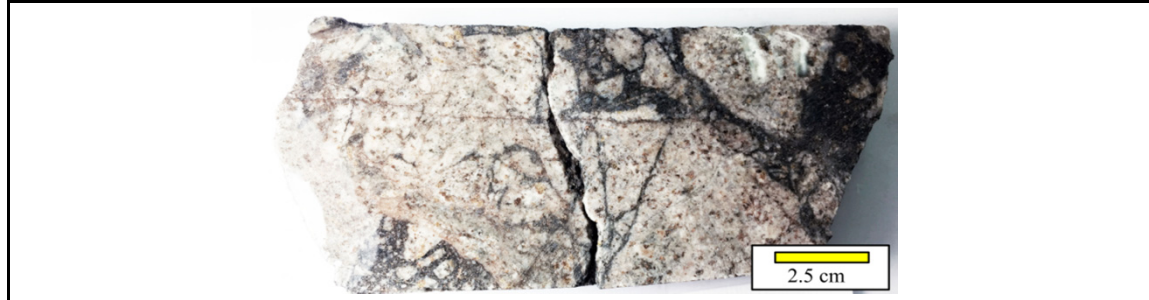
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B02258

Tipo Estudio	Isótopos de Cu
Sondaje	Profundidad(m)
BRA002	258

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Brecha monomítica, matriz soportada. Clastos sub-redondeados de tonalita de hasta 20 mm y matriz de polvo de roca, fragmentos de cuarzo y plagioclasa, sericita, illita, clorita y turmalina. Mineralización de pirita y calcopirita diseminada tanto en clastos como en matriz

Clasificación	Brecha monomítica (MTBX)
----------------------	--------------------------

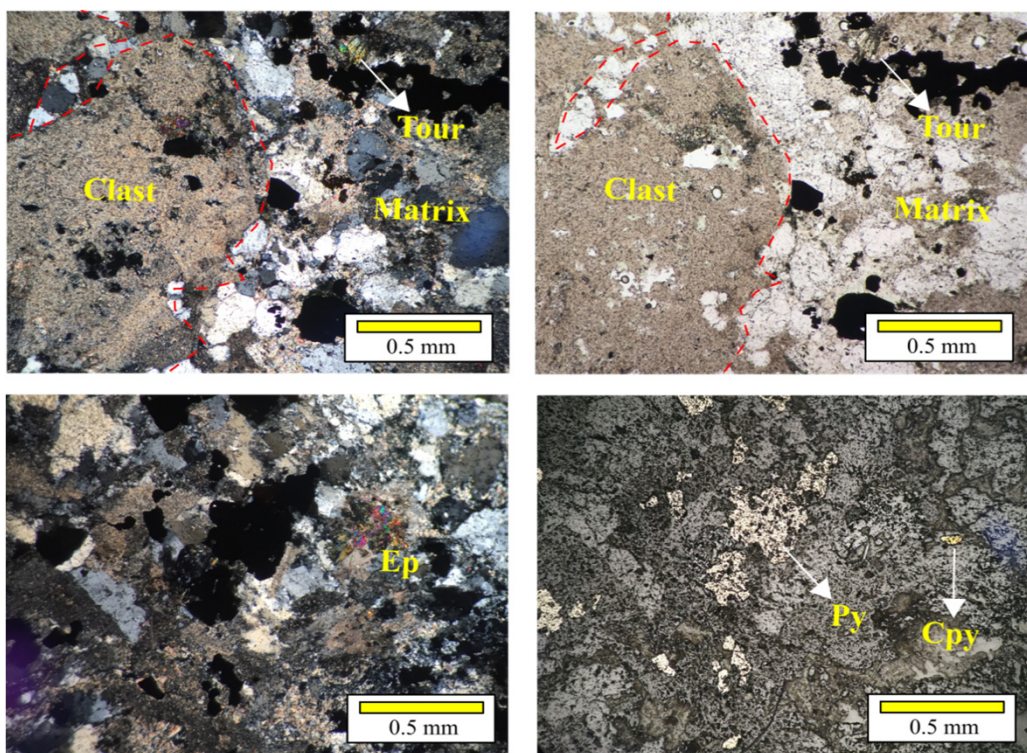
DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	10	<1	Roca intrusiva fanerítica muy alterada. Se observan granos de cuarzo anhedrales, plagioclasa euhedrales a subhedrales y hornblenda con hábito tabular subhedral.
Plagioclasa	15	<2	
Hornblenda	5	0.7	
% Roca fresca	30		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Sericita	15	Variable; <0.04 en matriz y 0.5 en clastos	Rellenando matriz de brecha preferentemente. En menor medida como reemplazo de minerales primarios (aparente reemplazo de clorita pseudomorfa)
Clorita	5	Variable; microcristalina en matriz y <0.7 en clastos	Como relleno de matriz y reemplazando fases máficas en los clastos de intrusivos
Illita	20	Agregado microcristalino (<0.1)	Preferentemente en clastos conformando pseudomorfo de plagioclasas

Cuarzo	20	Variado; hasta 2.5 mm	Granos fragmentados angulosos, principalmente en la matriz de la brecha
Turmalina	2	0.1	Granos tabulares, principalmente en la matriz de la brecha
Epidota	1	<0.5	Cristales granulares reemplazando parcialmente ferromagnesianos en clastos
Hematita	1	<0.3	Granos vermiculares formando pseudomorfos de cumulos máficos. Al parecer reemplazando pirita
Pirita	5	Variado; hasta 1 mm	Granos subhedrales diseminados principalmente en clastos y en menor medida en matriz. Preferentemente como reemplazo de cúmulos máficos.
Calcopirita	<1	<0.15	Granos anhedrales diseminados tanto en los clastos como en matriz y también como relleno de fracturas
% Roca alterada	70		

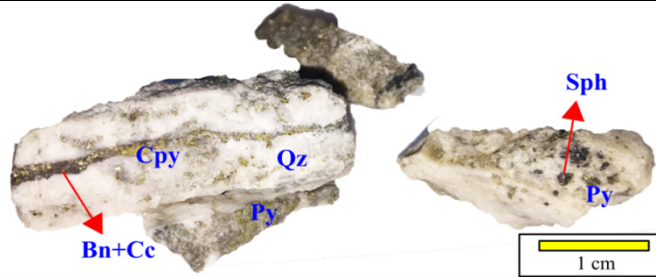
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B02275-6

Tipo Estudio	Isótopos de Cu
Sondaje	Profundidad(m)
BRA002	275,75-276

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Muestra altamente fragmentada de tonalita con alteración filica intensa. Vetillo de cuarzo-pirita-calcopirita-bornita-calcosina (vetillas tipo VIII). Mineralización diseminada de pirita, calcopirita y esfalerita.

Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	30	<1	Intrusivo de textura fanerítica muy alterado. Los máficos se encuentran como cúmulos y están totalmente reemplazados por clorita, epidota y pirita. Las plagioclasas se encuentran totalmente sericitizadas
Plagioclasa	60	<1	
Hornblenda	8	<1	
Magnetita	2	<1	
% Roca fresca	10		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Sericita	15	Microcristalina	Alterando pervasivamente plagioclasas
Cuarzo	55	<1	Silicificación y también como relleno de vetilla
Clorita	5	Microcristalina	Reemplazando selectivamente cúmulos máficos, en paragénesis con epidota
Epidota	5	<1	Reemplazando selectivamente cúmulos máficos, en paragénesis con clorita
Pirita	5	<1	Diseminada en la roca, aparentemente como reemplazo de cúmulos máficos. También como relleno de fracturas y vetillas
Clacopirita	2	<1	Diseminada en la roca, aparentemente como reemplazo de cúmulos máficos. También como relleno de fracturas y vetillas
Bornita	1	<1	Preferentemente en fracturas y vetillas reemplazando selectivamente calcopirita

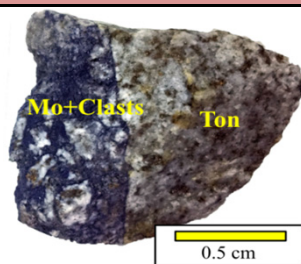
Calcosina	<1	<1	Preferentemente en fracturas y vetillas reemplazando selectivamente calcopirita y calcopirita
Esfalerita	1	<1	Diseminada formando pseudomorfos de pirita
% Roca alterada	90		

Vetillas			
Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Cuarzo	80		Vetillas rectas de hasta 15 mm de ancho. Compuestas de pirita intercrecida con calcopirita, ambas presentan reemplazo parcial de bornita y calcosina
Calcopirita	5		
Pirita	5		
Bornita	6		
Calcosina	4		

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B02315-7

Tipo Estudio	Re-Os en molibdenita
Sondaje	Profundidad(m)
BRA002	315,14-317,5

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Muestra altamente fragmentada de tonalita con alteración filica cortada por gruesas vetillas de molibdenita (tipo V). Mineralización de pirita y calcopirita diseminada

Clasificación Tonalita (TON)

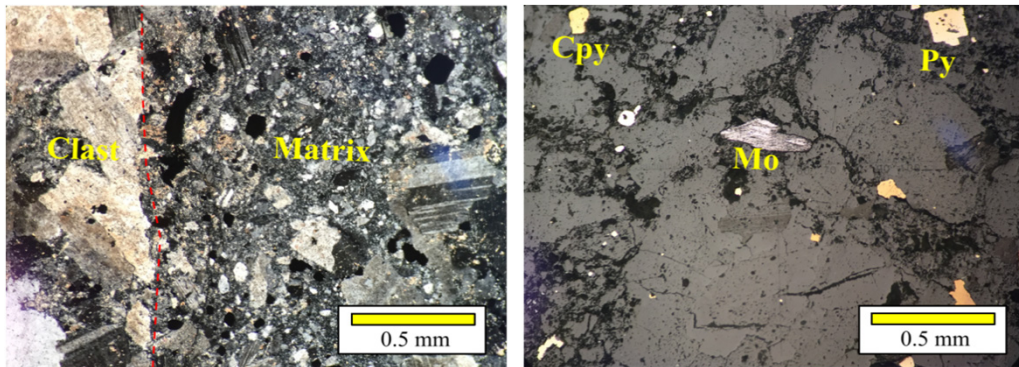
DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Plagioclasa	65	<2.5	Roca intrusiva fanerítica. Las plagioclasas presentan macla polisintética y periclina, se disponen conformando textura cumulada. El cuarzo se presenta como granos anhedral en los intersticios de las plagioclasas y minerales máficos. La hornblenda se presenta conformando cúmulos de hasta 2 mm, estos se encuentran completamente cloritizados
Cuarzo	25	<2	
Hornblenda	10	<2	
% Roca fresca	60		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Sericita	10	Microcristalina	Reemplazando parcialmente plagioclasas y cúmulos de clorita-epidota
Illita	5	Microcristalina	Reemplazando parcialmente plagioclasas y cúmulos de clorita-epidota
Cuarzo	10	<0.1	Granos anhedral relleno de vetillas
Clorita	8	1.0	Cúmulos de hasta 2 mm. Reemplazando completamente a los máficos
Epidota	1	<0.1	Granos anhedral en paragénesis con clorita conformando cúmulos
Molibdenita	1	<1	Cristales subhedral con forma de dagas. Se presenta masiva principalmente como relleno de vetas
Pirita	3	<1.4	Diseminada tanto en la roca como en vetilla. Preferentemente en cúmulos de clorita
Calcopirita	<1	<0.3	Diseminada en la matriz reemplazando parcial a completamente algunos granos de Py. Preferentemente en cúmulos de clorita
Hematita	<1	<1	Diseminada en la matriz, reemplazando parcialmente granos de pirita
% Roca alterada	40		

Vetillas			
Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Molibdenita	70		Vetillas rectas de hasta 2.5 cm de ancho, rellenas de molibdenita masiva, fragmentos de cuarzo y roca de caja, y en menor medida, pirita y calcopirita diseminada. Halo de forma irregular compuesto de sericita
Cuarzo	25		
Pirita	3		
Calcopirita	2		
Sericita		100	

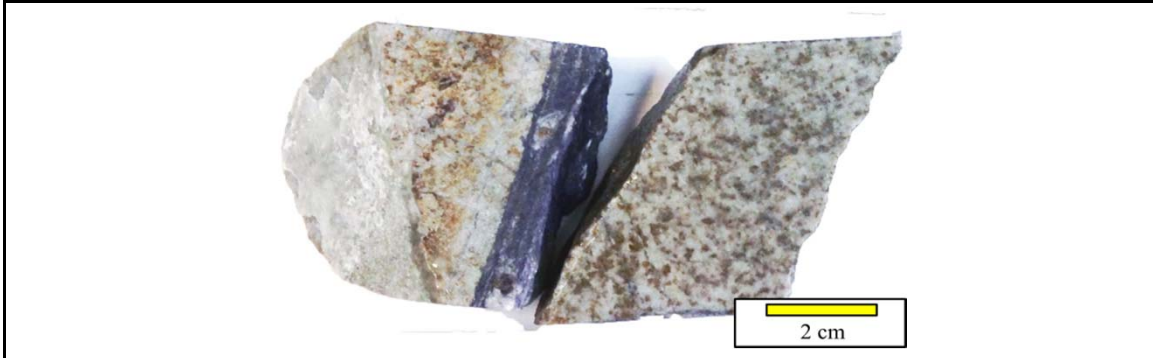
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B02334-2

Tipo Estudio	Re-Os en molibdenita	
Sondaje	Profundidad(m)	
BRA002	334-342	

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Roca intrusiva fanerítica con alteración filica (clorita-sericita) cortada por vetillas de molibdenita masiva (tipo V). Mineralización de pirita y menor calcopirita diseminada.

Clasificación	Tonalita (TON)
----------------------	----------------

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

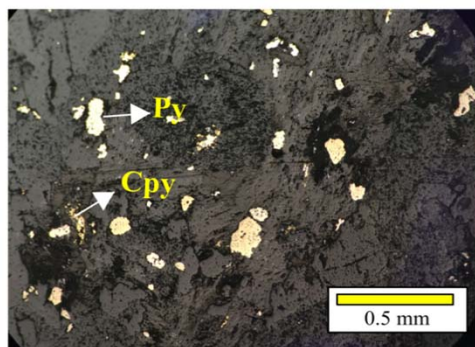
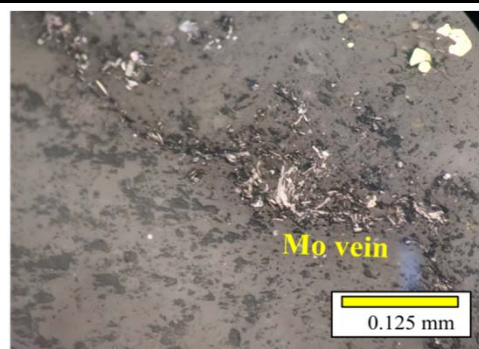
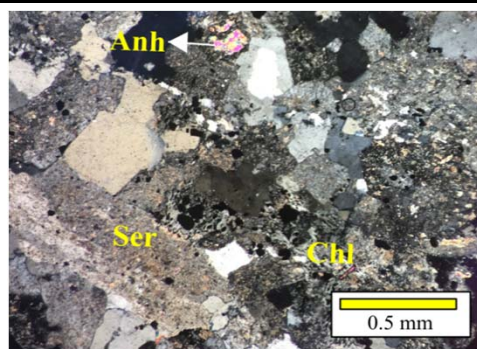
Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Plagioclasa	60	<2.5	Roca intrusiva fanerítica. Las plagioclasas y feldespatos presentan macla polisintética, periclina y carlsbad (feldespatos), se disponen conformando textura cumulada. El cuarzo se presenta como granos anhedrales en los intersticios de las plagioclasas, feldespatos y minerales máficos. La hornblenda se presenta tabular conformando cúmulos de hasta 1.5 mm, estos se encuentran completamente cloritizados
Feldespato	15	<2.5	
Cuarzo	15	<2.5	
Hornblenda	10	<1.5	
% Roca fresca	75		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	2	Microcristalino	Cuarzo microcristalino, hábito granular, principalmente relleno de vetillas
Sericita	7	Microcristalina	Reemplazando parcialmente a feldespatos, y plagioclasas; reemplazando clorita en menor intensidad. También como relleno de vetillas.
Clorita	7	<1.5	Reemplazando completamente a los cúmulos máficos
Epidota	2	0.1	Agregados granulares en paragénesis con clorita y levemente reemplazando plagioclasas

Yeso/ Anhidrita	4	<1.4	Se presenta como pequeños parches sobre feldespatos y plagioclasas. También como relleno de vetilla
Pirita	3	<0.3	Diseminada en la matriz, con preferencia en los cúmulos máficos (formas vermiculares a subhedrales). También en vetilla diseminada a masiva (euhedral a subhedral). Algunos granos se encuentran intercrecidos con hematita
Molibdenita	<1	<0.1	Cristales euhedrales a subhedrales en forma de dagas. Se presenta masiva a finamente diseminada en vetilla en conjunto con pirita y yeso-anhidrita
Calcopirita	<1	<0.1	Granos anhedrales diseminados. Se presenta reemplazando parcialmente pirita desde los bordes
Hematita	<1	<0.1	Diseminada, en asociación con pirita y clorita en reemplazo de cúmulos máficos
% Roca alterada	25		

Vetillas			
Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Anhidrita	43		Vetillas rectas de hasta 1 cm de ancho, rellenas con anhidrita y molibdenita masiva. Presencia de microbrechización de la roca de caja (clastos angulosos). Halo de alteración de cuarzo, sericita y pirita diseminada, de forma irregular y de hasta 2 cm de ancho
Sericita		85	
Cuarzo		10	
Molibdenita	55		
Pirita	2	5	

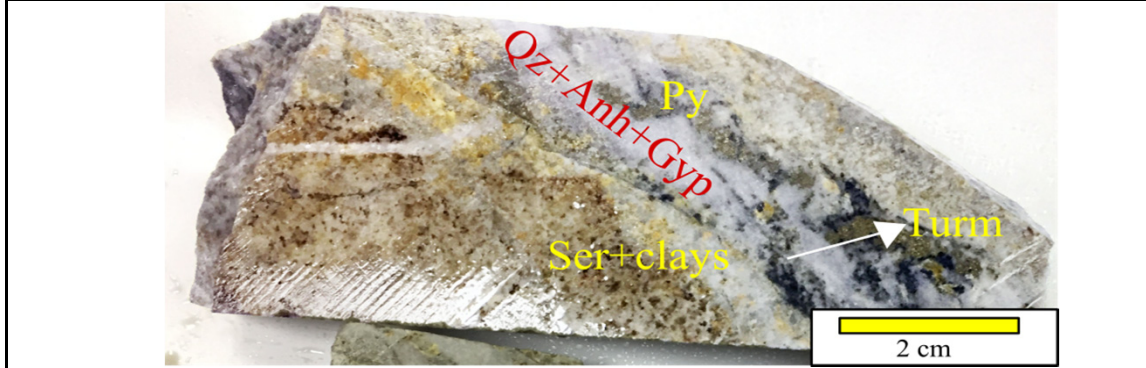
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B02356

Tipo Estudio	Re-Os en pirita
Sondaje	Profundidad(m)
BRA002	356

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Roca intrusiva fanerítica con alteración filica (cuarzo-sericita-illita) pervasiva. Los máficos se encuentran completamente reemplazados por clorita, óxidos de Fe y pirita. Gruesas vetillas de yeso, pirita y turmalina (tipo IV) cortan la muestra.

Clasificación	Tonalita (TON)
----------------------	----------------

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

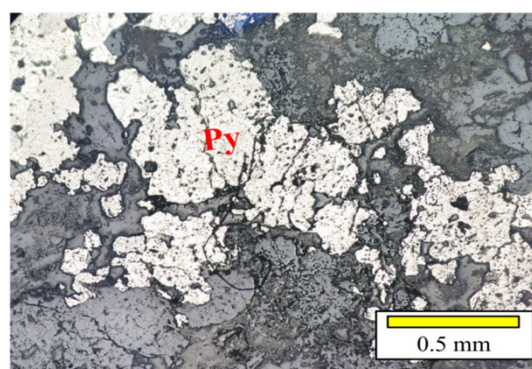
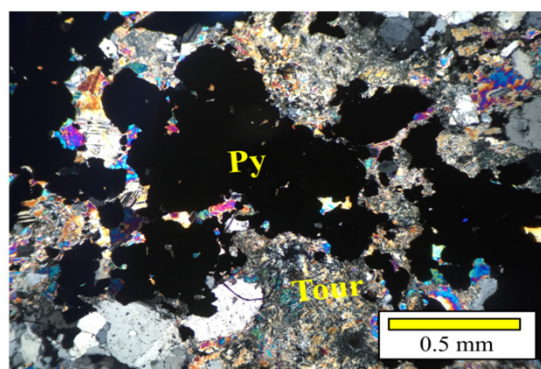
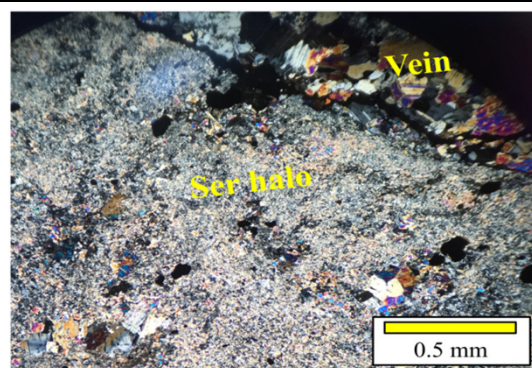
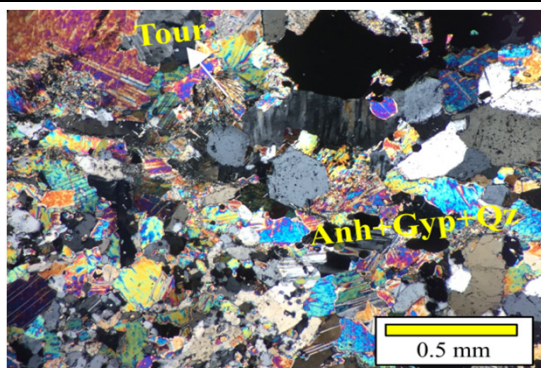
Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Plagioclasa	60	<2	Roca intrusiva fanerítica. Las plagioclasas presentan macla polisintética y periclina, se disponen conformando textura cumulada. El cuarzo se presenta como granos anhedrales en los intersticios de las plagioclasas y minerales máficos. La hornblenda se presenta conformando cúmulos de hasta 2 mm, estos se encuentran completamente cloritizados
Cuarzo	30	<1	
Hornblenda	10	0.7	
% Roca fresca	20		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	15	0.4	Cuarzo granular anhedral de diversos tamaños. Se presenta como relleno de vetillas
Sericita	30	<0.08	Se presenta alterando la roca de caja como reemplazo de plagioclasas. Reemplazo más pervasivo en el halo de la vetilla
Illita	10	Microcristalina	Se presenta alterando la roca de caja como reemplazo de plagioclasas
Clorita	5	<0.35	Se presenta reemplazando totalmente cúmulos máficos
Anhidrita	5	<3	Se presenta como granos anhedrales relleno estructuras

Yeso	5	<0.5	Se presenta como granos anhedrales rellenando estructura
Turmalina	2	<0.4	Cúmulos radiales. Se presenta rellenando estructuras y también como halo de alteración
Hematita	3	<0.2	Granos anhedrales formando pseudomorfos de cúmulos ferromagnesianos
Jarosita	1	<0.1	Granos anhedrales en paragénesis con hematita
Pirita	4	<0.3	Granos anhedrales diseminados como reemplazo parcial de ferromagnesianos. También granos subhedrales como relleno de vetillas
% Roca alterada	80		

Vetillas			
Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Anhidrita	50		Vetas de hasta 2 cm de ancho rellenas de anhidrita, cuarzo, yeso, turmalina y pirita. Halo muy pervasivo de sericita, pirita y turmalina de hasta 1 cm de ancho y forma irregular
Yeso	20		
Cuarzo	15		
Turmalina	5	5	
Pirita	10	10	
Sericita		85	

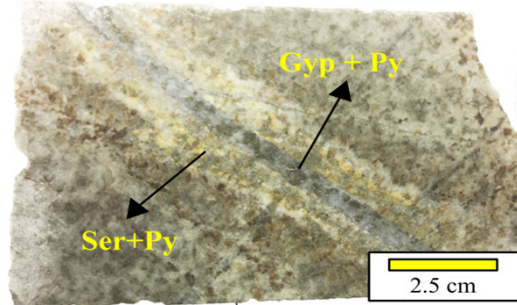
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B02364

Tipo Estudio	Re-Os en pirita
Sondaje	Profundidad(m)
BRA002	364

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Roca intrusiva fanerítica con alteración filica (cuarzo-sericita-illita). Mineralización de pirita diseminada y en vetilla tipo IV

Clasificación Tonalita (TON)

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

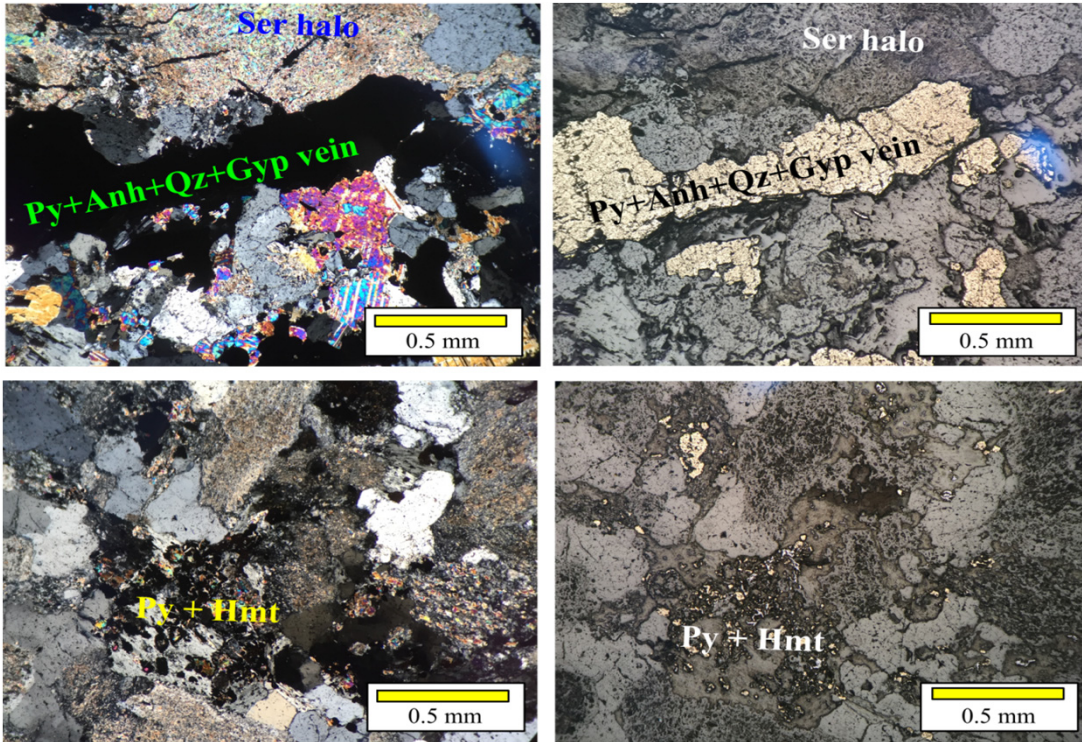
Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	30	<2	Roca intrusiva fanerítica. Las plagioclasas presentan macla polisintética y periclina, se disponen conformando textura cumulada. El cuarzo se presenta como granos anhedaes en los intersticios de las plagioclasas y minerales máficos. La hornblenda se presenta tabular subhedral conformando cúmulos de hasta 2 mm, estos se encuentran completamente cloritizados
Plagioclasa	60	<1.7	
Hornblenda	10	1.0	
% Roca fresca	60		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	10	Variado, hasta 1.7	Granos anhedaes a subhedaes prinipalmente como relleno de vetilla
Sericita	15	Variado; desde microcristalina hasta 0.5	Como reemplazo selectivo de plagioclasas, es más pervasivo en el halo de la vetilla. También se observa como pseudomorfo de ferromagnesianos
Anhidrita	5	<0.4	Granos anhedaes rellendo vetillas y oquedades
Yeso	5	<1	Granos anhedaes rellendo vetillas
Turmalina	2	<0.4	Diseminada en la matriz, aparentemente como relleno de oquedades en conjunto con anhidrita

Hematita	1	<0.4	Granos anhedrales reemplazando parcial y selectivamente ferromagnesianos, conformando pseudomorfos
Jarosita	<1	<0.04	Granos anhedrales asociados a hematita
Pirita	1	Variado; hasta 0.8 diseminada y hasta 6 en vetilla	Agregado de granos anhedrales a subhedrales rellenando vetilla. También se encuentra como granos anhedrales diseminados en la matriz como reemplazo de minerales ferromagnesianos
% Roca alterada	40		

Vetillas			Características (composicionales y texturales)
Mineralogía	Relleno	Halo	
Cuarzo	40		Vetilla recta de 5 mm de ancho, rellena de cuarzo, anhidrita, yeso, pirita. Halo de forma irregular de hasta 1 cm de ancho compuesto por sericita y pirita
Anhidrita	30		
Yeso	10		
Pirita	20	30	
Sericita		70	

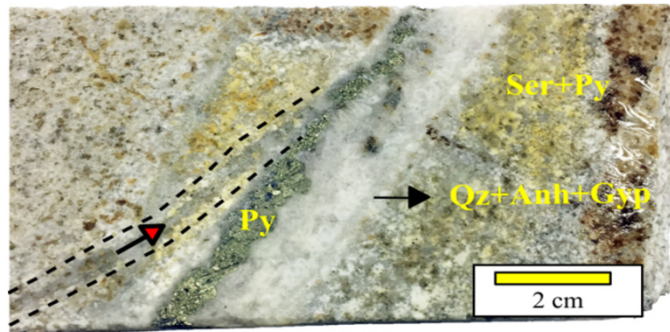
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B02373

Tipo Estudio	Re-Os en pirita
Sondaje	Profundidad(m)
BRA002	373

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Roca intrusiva fanerítica con alteración filica (cuarzo-sericita-illita). Mineralización de pirita diseminada y en vetilla tipo IV. La vetilla presenta textura de reactivación por otra vetilla de yeso-pirita

Clasificación Tonalita (TON)

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

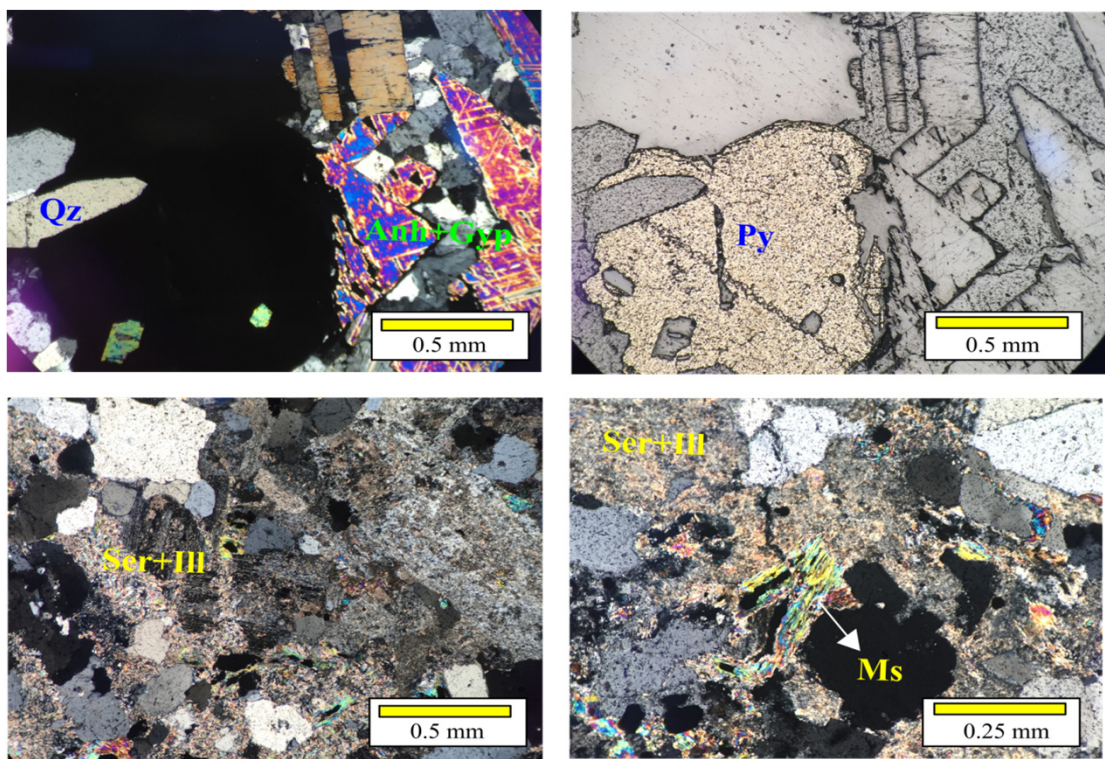
Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	30	<2	Roca intrusiva fanerítica. Las plagioclasas presentan macla polisintética y periclina, se disponen conformando textura cumulada. El cuarzo se presenta como granos anhedral en los intersticios de las plagioclasas y minerales máficos. La hornblenda se presenta tabular subhedral conformando cúmulos de hasta 2 mm, estos se encuentran completamente cloritizados
Plagioclasa	65	<2	
Hornblenda	5	1.0	
% Roca fresca	60		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	5	Variado, hasta 1.5	Granos anhedral a subhedral principalmente como relleno de vetilla
Sericita	14	Variado; desde microcristalina hasta 0.25	Como reemplazo selectivo de plagioclasas, es más pervasiva en el halo de la vetilla. También se observa como pseudomorfo de ferromagnesianos
Illita	5	Microcristalina	Como reemplazo selectivo de plagioclasas, es más pervasiva en el halo de la vetilla. También se observa como pseudomorfo de ferromagnesianos
Anhidrita	5	<2	Granos anhedral a euhedral tabulares principalmente como relleno de vetillas

Yeso	5	<1	Granos euhedrales tabulares principalmente como relleno de vetillas
Hematita	1	<0.6	Granos anhedrales reemplazando parcial y selectivamente ferromagnesianos, conformando pseudomorfos
Calcopirita	1	<0.04	Granos anhedrales diseminados en la matriz y reemplazando parcialmente algunas piritas en fracturas
Pirita	4	Variado; hasta 0.6 diseminada y hasta 2 en vetilla	Granos subhedrales rellanando vetilla. Granos anhedrales diseminados en la matriz, como reemplazo parcial de ferromagnesianos.
Esfalerita	<1	<0.08	Diseminado en matriz. Presenta textura de calcopirita <i>disease</i> . También se observa reemplazando algunos granos de Pirita
% Roca alterada	40		

Vetillas			Características (composicionales y texturales)
Mineralogía	Relleno	Halo	
Cuarzo	20		Vetilla recta de 2.5 mm de ancho, rellena de cuarzo, anhidrita, yeso y pirita. Halo de forma irregular de hasta 1 cm de ancho compuesto por sericita y pirita
Anhidrita	50		
Yeso	20		
Pirita	10	30	
Sericita		70	

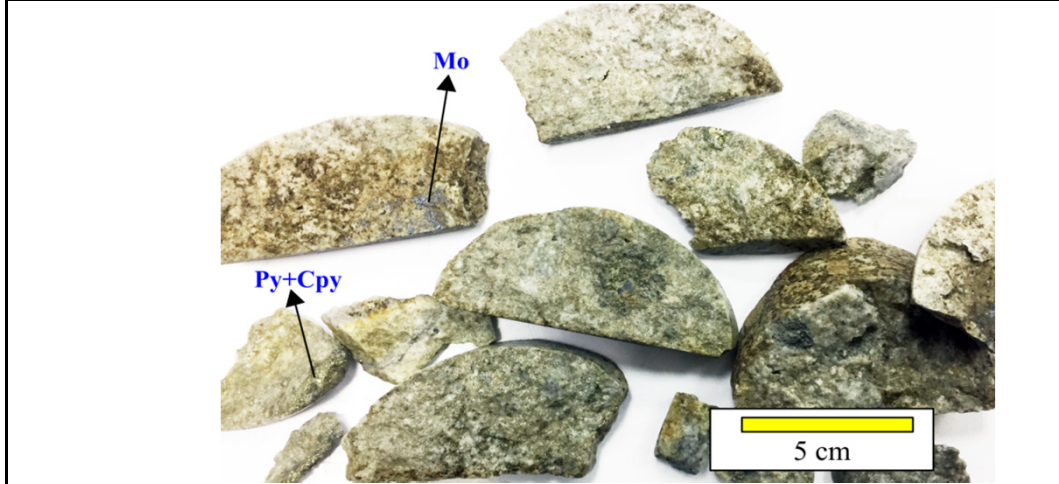
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B03111-5

Tipo Estudio	Re-Os en molibdenita; Isótopos de Cu	
Sondaje	Profundidad(m)	
BRA003	111-115	

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Muestra muy fragmentada. Roca de textura porfídica con alteración filica (clorita-sericita). Mineralización de molibdenita, pirita y calcopirita relleno de fracturas.

Clasificación Pórfido de feldespato y hornblendas redondeadas (FRHP)

Mineralogía Primaria		% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Fenocristales	Cuarzo	3	<2	Cristales anhedrales
	Feldespato	2	<2	
	Plagioclasa	20	<4	Cristales subhedrales conformando cúmulos
	Hornblenda	10	Variado; 1 a 5	Se presenta como granos subhedrales tabulares, algunos conforman cúmulos redondeados de 5 a 10
Masa Fundamental	Cuarzo	35	Microcristalino	Mosaico homogéneo de textura felsítica
	Feldespato	30		
% Roca fresca		50		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	10	<1	Masa fundamental sericitizada y con silicificación
Sericita	25	Microcristalina	
Clorita	10	<1	Cúmulos de hornblenda con reemplazo de clorita-epidota
Epidota	5	<1	

Pirita	3	<1	Pirita diseminada, principalmente como reemplazo de hornblenda. También como relleno de fracturas y vetillas
Calcopirita	<1	<1	Calcopirita diseminada en la masa fundamental, también como relleno de fracturas y vetillas
Molibdenita	<1	<1	Como relleno de fracturas en conjunto con pirita y calcopirita
% Roca alterada	55		

Vetillas			Características (composicionales y texturales)
Mineralogía	Relleno	Halo	
Pirita	30		Vetillas de 5 mm compuestas por cuarzo drúsico, pirita, molibdenita y calcopirita. Halo de forma irregular de hasta 1 cm compuesto por sericita
Calcopirita	5		
Molibdenita	50		
Cuarzo	15		
Sericita		100	

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B03115-7

Tipo Estudio	Re-Os en piritita
Sondaje	Profundidad(m)
BRA003	115-117

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Roca muy fracturada. Roca de textura porfídica con alteración propilítica y filica (cuarzo-sericita-illita) sobreimpuesta. Mineralización de pirita, calcopirita y molibdenita diseminada y como pátinas en fracturas

Clasificación Pórfito de feldespato y hornblendas redondeadas (FRHP)

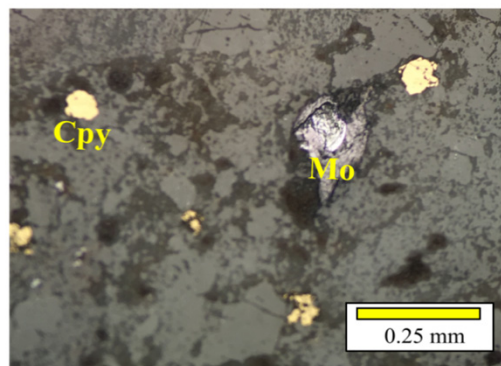
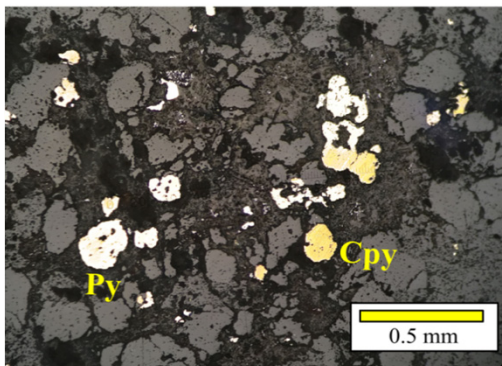
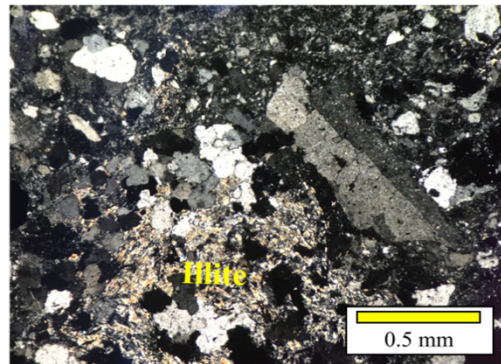
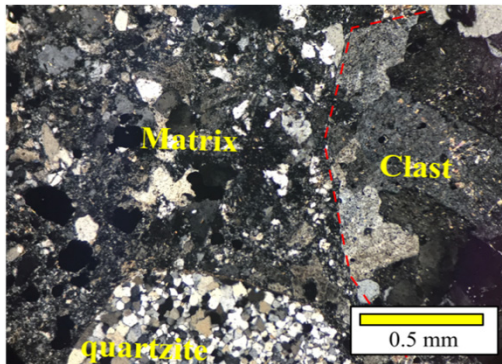
DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Mineralogía Primaria		% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Fenocristales	Cuarzo	3.0	0.2 a 2	
	Feldespato	2.0	0.2 a 2	
	Plagioclasa	20.0	0.2 a 4	
	Hornblenda	10.0	<1	
Masa Fundamental	Cuarzo	35.0	Microcristalino	
	Feldespato	30.0		
% Roca fresca		40.0		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	20	Microcristalino	Granos anhedrales a subhedrales prinipalmente como relleno de oquedades
Sericita	20	Microcristalino	Ambos minerales se presentan intercrecidos conformando parches. No existe un reemplazo selectivo notable hacia los feldespetos y plagioclasas, pero si hacia los

Illita	5	Microcristalino	reemplazo selectivo notable hacia los feldespatos y plagioclasas, pero sí hacia los cúmulos de clorita-epidota
Clorita	8	Microcristalino	En parches, probablemente como reemplazo total de máficos e intersticial entre los granos de cuarzo
Epidota	2	0.1	Se presenta en pequeños agregados granulares anhedrales en paragénesis con clorita
Pirita	2	<1.4	Granos anhedrales diseminados y como relleno parcial de fracturas
Calcopirita	<1	<0.2	Granos anhedrales diseminados y como relleno parcial de fracturas. A veces asociada a la pirita reemplazándola parcialmente desde los bordes.
Molibdenita	<1	<0.5	Granos anhedrales diseminados y como relleno de fracturas, conformando pátinas
Hematita	<1	0	Granos anhedrales diseminados, asociados a pirita
% Roca alterada	60		

Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B03264-8

Tipo Estudio	Isótopos de Cu	
Sondaje		Profundidad(m)
BRA003		264-268

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Roca intrusiva porfídica muy alterada (cuarzo-sericita-illita) y fragmentada. Se encuentra cortada por vetillas de tipo VIII

Clasificación	Pórfido de feldespato y hornblendas (FHP)
----------------------	---

Mineralogía Primaria		% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Fenocristales	Cuarzo	3	2 a 8	Roca intrusiva de textura porfídica muy alterada. Los minerales máficos se encuentran completamente reemplazados
	Feldespato	2	2 a 8	
	Plagioclasa	35	2 a 8	
	Hornblenda	15	<6	
Masa Fundamental	Cuarzo	25	Microcristalino	
	Feldespato	20		
% Roca fresca		20		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	30	<1	Silicificación de la masa fundamental y como relleno de vetas
Sericita	20	Microcristalina	Reemplazando selectivamente plagioclasas y feldespatos
Illita	10	Microcristalina	Reemplazando selectivamente plagioclasas y feldespatos

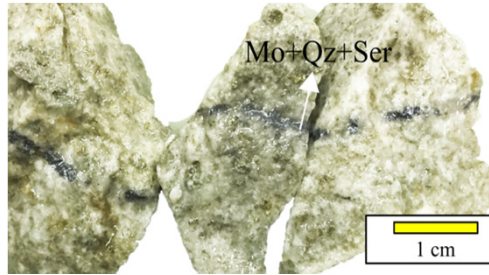
Clorita	6	Microcristalina	Reemplazando selectivamente cúmulos máficos
Oxidos de Fe	10	<1	Reemplazando selectivamente cúmulos máficos, en paragénesis con pirita y clorita
Pirita	2	<1	Diseminada en la roca, reemplazando selectivamente cúmulos máficos. También como pátina relenando fracturas y en vetillas de cuarzo calcosina-esfalerita
Calcosina	1	<1	Masiva en vetillas de cuarzo, pirita, esfalerita
Esfalerita (?)	<1	<1	Masiva en vetillas de cuarzo, pirita, calcosina
% Roca alterada	80		

Vetillas			
Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Cuarzo	70		Vetillas rectas de al menos 3 centímetros de ancho compuestas principalmente por cuarzo, calcosina y esfalerita. Halo irregular de arcillas
Pirita	5		
Calcosina	15		
Esfalerita	10		
Arcillas		100	

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B03310-2

Tipo Estudio	Re-Os en molibdenita	
Sondaje		Profundidad(m)
BRA003		310-312

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Roca intrusiva porfídica muy alterada (cuarzo-sericita-illita) y fragmentada. Se encuentra cortada por vetillas de molibdenita (tipo VII)

Clasificación Pórfido de feldespato y hornblendas (FHP)

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Mineralogía Primaria		% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Fenocristales	Cuarzo	25	1.0	Roca intrusiva de textura porfídica muy alterada. Los minerales máficos se encuentran completamente reemplazados
	Feldespato	5	1.8	
	Plagioclasa	15	1.8	
	Hornblenda	10	2.0	
Masa Fundamental	Cuarzo	25	Microcristalino	
	Feldespato	20		
% Roca fresca		20		

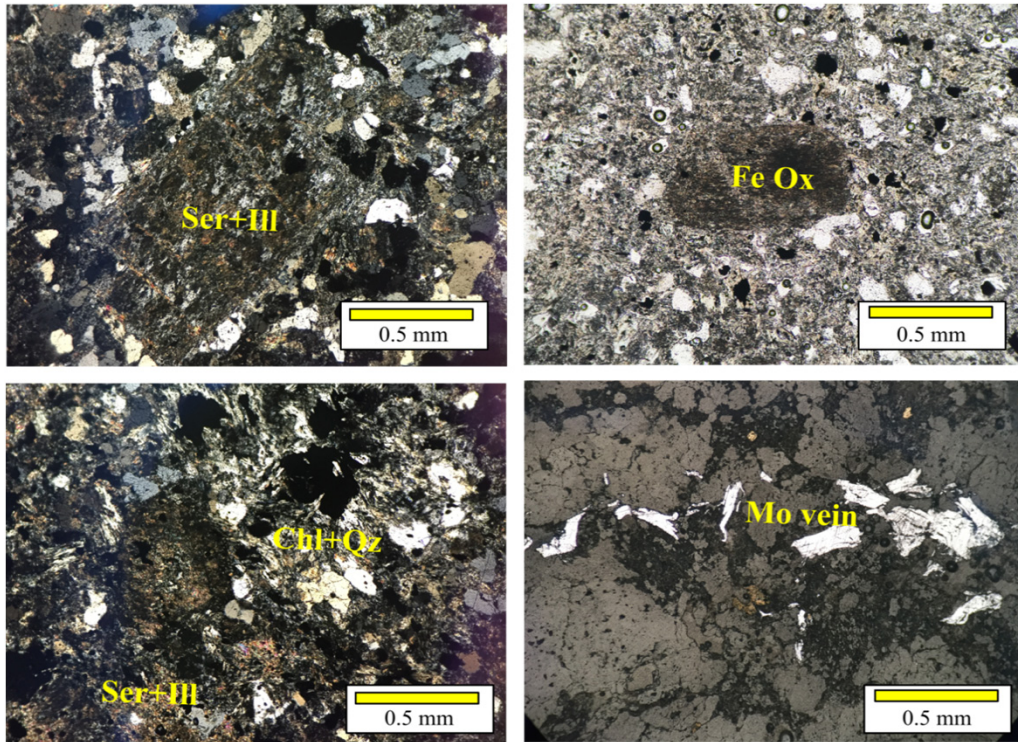
Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	25	<1	Granos anhedrales relleno de cavidades. Se presenta también en granos euhedrales conformando vetillas de cuarzo drúsico y piritas euhedrales. También se presenta subhedral en vetillas de molibdenita
Sericita	15	Microcristalina	Reemplazando selectivamente plagioclasas y feldespatos. También como relleno de vetillas de cuarzo y molibdenita
Illita	10	Microcristalina	Reemplazando selectivamente plagioclasas y feldespatos. También formando un agregado con óxidos de Fe, reemplazando selectivamente fases máficas
Clorita	20	<0.01	Alterando pervasivamente toda la roca

Óxido de Fe	8	Microcristalino	Reemplazando selectivamente cúmulos máficos, en paragénesis con illita
Molibdenita	<1	0.25	Como relleno de vetillas
Pirita	2	<0.3	Diseminada en la roca, reemplazando selectivamente cúmulos máficos. También como pátina rellenando fracturas y euhedral en vetillas de cuarzo drúsico
% Roca alterada	80		

Vetillas			
Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Molibdenita	80		Vetillas finas de hasta 0.15 mm de ancho, forma irregular y sin halo
Sericita	10		
Cuarzo	10		

Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Pirita	70		Vetillas finas de hasta 1 mm de ancho, forma irregular y sin halo
Cuarzo	30		

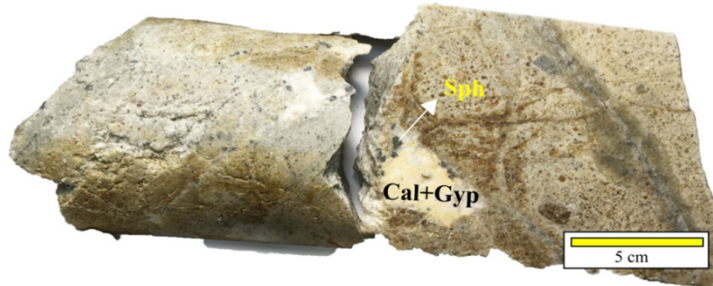
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B03433

Tipo Estudio	Isótopos de Cu	
	Sondaje	Profundidad(m)
	BRA003	433

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Roca intrusiva porfídica muy alterada (cuarzo-sericita-illita). Presenta brechización y es altamente porosa. Algunas cavidades se encuentran rellenas por anhidrita, yeso y carbonato. Presencia de mineralización de esfalerita y galena reemplazando pirita asociada tanto a mineralización diseminada como en vetillas de tipo X

Clasificación Pórfido de feldespato y hornblendas brechizado (FHP)

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

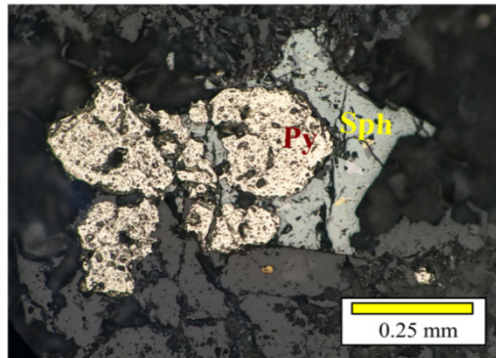
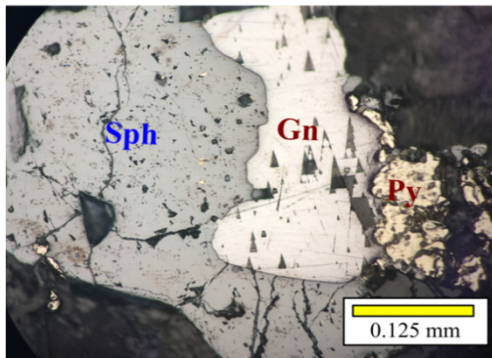
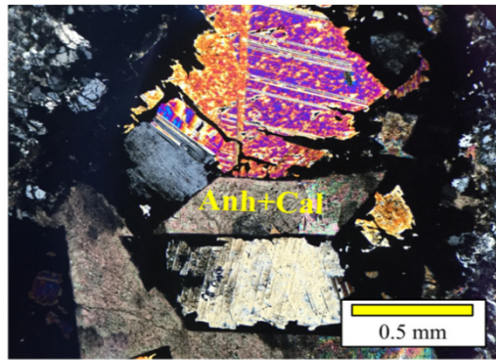
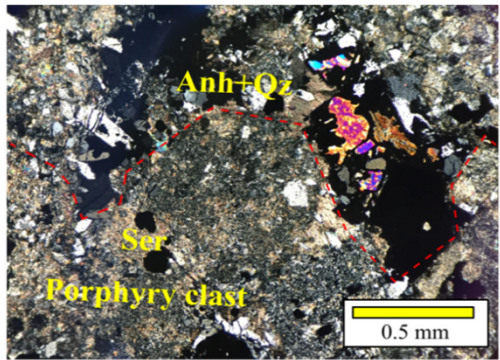
Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
% Roca fresca	0.0		Brecha monomítica clasto-soportada. Clastos con textura porfídica subangulosos desde 2 mm hasta más de 10 cm

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	35	<0.25	Granos anhedrales relleno de cavidades. Se presenta también en granos euhedrales conformando vetillas de cuarzo drúsico y pirita euhedral. También se presenta subhedral en vetillas de molibdenita
Sericita	25	< 0.15	Reemplazando selectivamente plagioclasas y feldespatos. También como relleno de vetillas de cuarzo y molibdenita
Illita	15	Microcristalina	Reemplazando selectivamente plagioclasas y feldespatos. También formando un agregado con óxidos de Fe, reemplazando selectivamente fases máficas
Turmalina	1	0.15	Cristales radiales conformando parte de la matriz de la brecha
Anhidrita	5	<0.14	Cristales subhedrales aparentemente relleno de cavidades o conformando parches con yeso y carbonato. Estas cavidades alcanzan ~4 mm y son de forma irregular

Yeso	5	<1.2	Cristales subhedrales aparentemente relleno de oquedades o conformando parches con anhidrita y carbonato
Carbonato	5	<1.8	Cristales subhedrales relleno de oquedades y/o conformando parches con yeso y anhidrita. Aparentemente reemplazando estos últimos y relleno de porosidades de la brecha
Pirita	5	<0.7	Granos anhedaes diseminados y granos subhedrales relleno de fracturas
Esfalerita	1	<1	Granos anhedaes a subhedrales reemplazando parcialmente pirita. Presenta textura de calcopirita disease
Galena	<1	<0.6	Granos anhedaes a subhedrales reemplazando parcialmente esfalerita. También presenta un reemplazo leve de calcopirita
Hematita	1	0.15	Granos anhedaes conformando pseudomorfos de hasta 0.5 mm
Calcopirita	<1	0.02	Como reemplazo de esfalerita y galena en textura de calcopirita disease
% Roca alterada	100		

Vetillas			
Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Yeso	50		Vetillas finas de 2 mm de ancho, forma irregular y halo de sericita de aspecto oscuro. La pirita se encuentra parcial a totalmente reemplazada por esfalerita
Cuarzo	40		
Pirita	3		
Esfalerita	7		
Sericita		100	

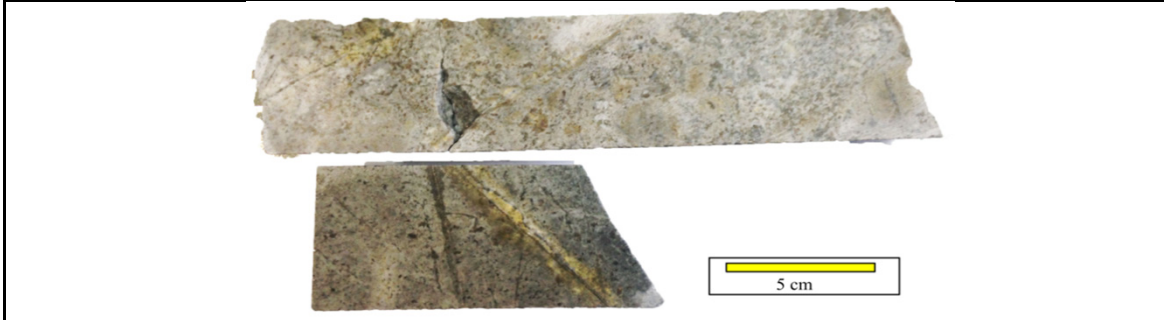
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B03470-4

Tipo Estudio	Re-Os pirita y calcopirita	
	Sondaje	Profundidad(m)
	BRA003	470-473

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Porfido Feldespato y Hornblendas Redondeadas con alteración filica (qz-ser-illita). Mineralización de pirita y calcopirita diseminada, en vetillas y pátina. Mineralización de esfalerita asociada a vetillas tipo IV.

Clasificación Porfido Feldespato y Hornblendas Redondeadas (FRHP)

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Mineralogía Primaria		% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Fenocristales	Cuarzo	30	0.1	Roca de textura porfítica con fenocristales euhedrales de feldespato y plagioclasa
	Feldespato	5	<1.6	
	Plagioclasa	10	<1.6	
	Hornblenda	5	<1	
Masa Fundamental	Cuarzo	30	Agregado Microcristalino	
	Feldespato	20		
% Roca fresca		60		

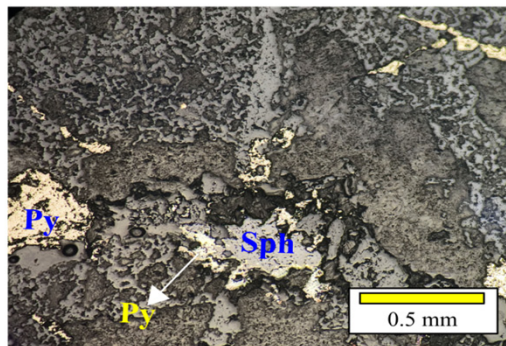
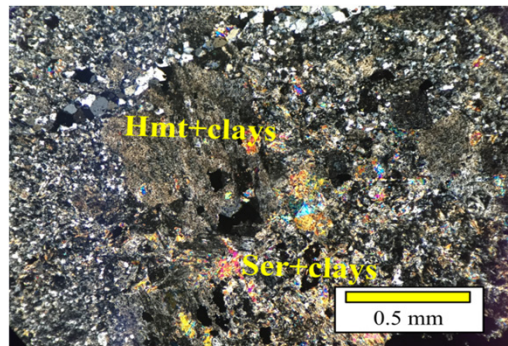
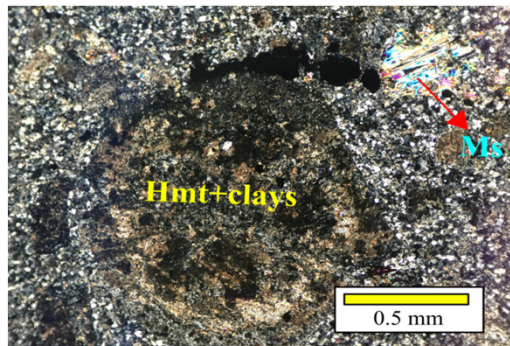
Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Sericita	15	0.10	Como reemplazo selectivo de feldespatos y plagioclasas, haciéndose mas pervasiva y de mayor tamaño hacia el halo de la vetilla
Caolinita	10	0.05	Como reemplazo selectivo de feldespatos y plagioclasas, haciéndose mas pervasiva y de mayor tamaño hacia el halo de la vetilla
Carbonato	5	0.25	Granos anhedrales conformando pseudomorfos de feldespato/plagioclasa, en un reemplazo parcial a total
Anhidrita	5	0.25	Granos anhedrales rellenando oquedades
Yeso	3	0.25	Granos anhedrales rellenando oquedades
Cuarzo	5	0.05	Granos anhedrales rellenando vetillas
Pirita	3	<1.5	Granos anhedrales diseminados y también como relleno de vetilla

Esfalerita	1	<1	Granos anhedrales reemplazando parcialmete pirita. Preferentemente en las vetillas y en menor medida diseminado
Galena	<1	<1	Granos anhedrales reemplazando parcialmente esfalerita.
Calcopirita	1	<0.2	Granos anhedrales diseminados en la matriz. Se presenta reemplazando parcialmente pirita, esfalerita y galena
Hematita	<1	0.05	Granos anhedrales formando pseudomorfos de minerales máficos. Algunos se encuentran reemplazado pirita
% Roca alterada	50		

Vetillas			
Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Cuarzo	85		Vetillas de hasta 2 mm de ancho, forma recta y sin halo
Pirita	10		
Calcopirita	4		
Esfalerita	1		

Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Cuarzo	44		Vetillas de hasta 4 mm de ancho, forma recta. Halo de forma relativamente irregular, de hasta 1 cm de ancho, compuesto por sericita y arcillas de tono amarillo a verdoso. Cortan a las anteriores
Yeso	30		
Pirita	10		
Calcopirita	5		
Esfalerita	10		
Galena	1		
Sericita		60	
Arcillas		40	

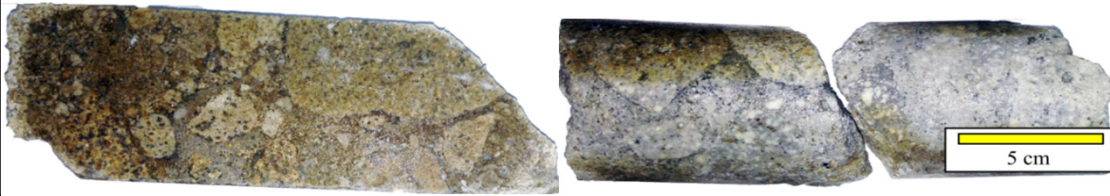
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B04122-4

Tipo Estudio	Re-Os pirita y calcopirita; Isótops de Cu	
Sondaje	Profundidad(m)	
BRA004	122-124	

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Brecha polimíctica con clastos de intrusivos porfídicos (FHP, FRHP y otros). Mineralización diseminada de pirita, galena y calcopirita. Presencia de mineralización de bornita y calcosina reemplazando pirita y calcopirita preferencialmente en fracturas y vetillas muy finas (tipo X)

Clasificación Brecha polimíctica (PBX)

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

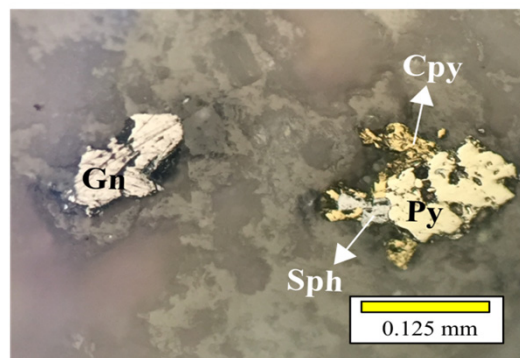
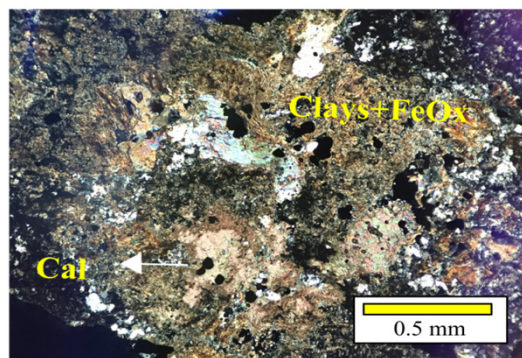
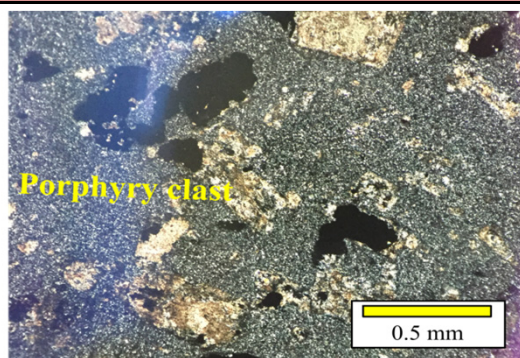
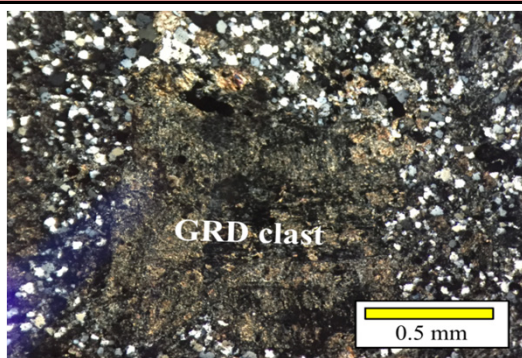
Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	65	Microcristalino en matriz y hasta 0.6 como fragmentos	Brecha polimíctica clastosoportada. Clastos de intrusivos porfídicos de forma subredondeada de diversos tamaños (15 a 70 mm). Matriz de polvo de roca, con fragmentos angulosos de cuarzo, feldespatos/ plagioclasas y líticos
Feldespato	15	Variado; hasta 1.8	
Plagioclasa	15	Variado; hasta 1.8	
Hornblenda	5	hasta 0.5	
% Roca fresca	30		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	30	<0.15	Granos anhedrales y fragmentados conformando parte de la matriz de la brecha
Arcillas	20	Microcristalina	Se presenta reemplazando selectiva y pervasivamente feldespatos y plagioclasas. Se presenta mezclada con óxidos de hierros terrosos
Carbonato	10	<0.6	Cristales anhedrales como relleno de oquedades y también conformando pseudomorfos en reemplazo parcial de feldespatos y plagioclasas
Hematita	5	0.02	Granos anhedrales conformando pseudomorfos de fases primarias máficas. También se observa alterando levemente piritas

Pirita	4	<2	Granos anhedrales a subhedrales diseminados . También como agregados vermiculares de hasta 2 mm en los bordes de clastos. Algunos granos corresponden a pseudomorfos de minerales primarios
Esfalerita	<1	0.3	Granos anhedrales diseminados. Aparentemente reemplazado pirita. Presenta textura de calcopirita disease
Galena	<1	0.2	Granos anhedrales diseminados. Aparentemente reemplazado pirita
Calcopirita	<1	<0.2	Granos anhedrales diseminados y también reemplazando selectivamente galena
Bornita	<1	0.01	Como microinclusión en pirita. También como pátinas asociada a fracturas
Calcosina	<1	0.01	Reemplazando microinclusiones de bornita en pirita. También como pátinas asociada a fracturas
% Roca alterada	70		

Vetillas			
Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Pirita	70		Finas vetillas de hasta 1 mm de espesor, de forma irregular, no presentan halo. La pirita y calcopirita presentan reemplazo parcial por bornita y calcosina
Calcopirita	20		
Bornita	5		
Calcosina	5		

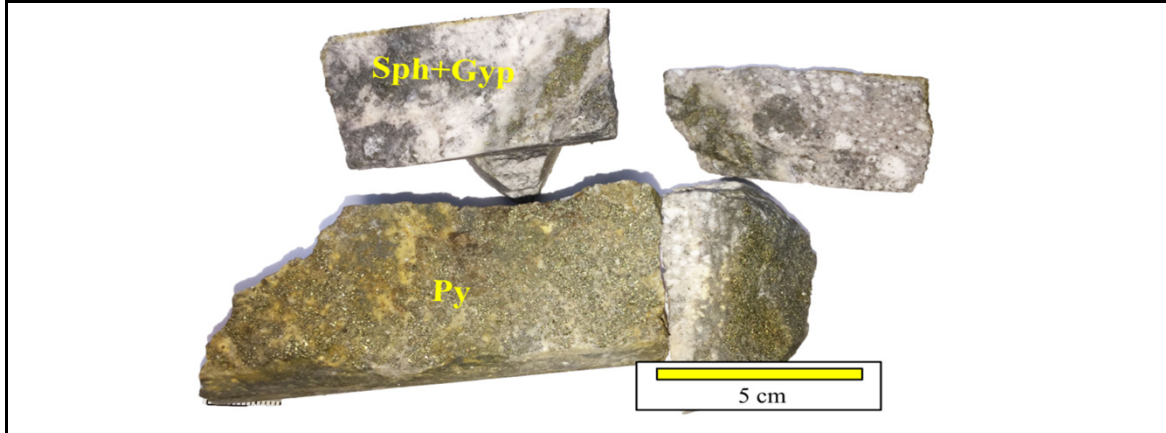
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B04158

Tipo Estudio	Re-Os pirita y calcopirita; Isótops de Cu	
Sondaje		Profundidad(m)
BRA004		158

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Porfido Feldespato y Hornblendas (FHP) microbrechizado. Mineralización de pirita y esfalerita masiva en vetillas de tipo X (post-brechización)

Clasificación	Porfido Feldespato y Hornblendas (FHP) brechizado
----------------------	---

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

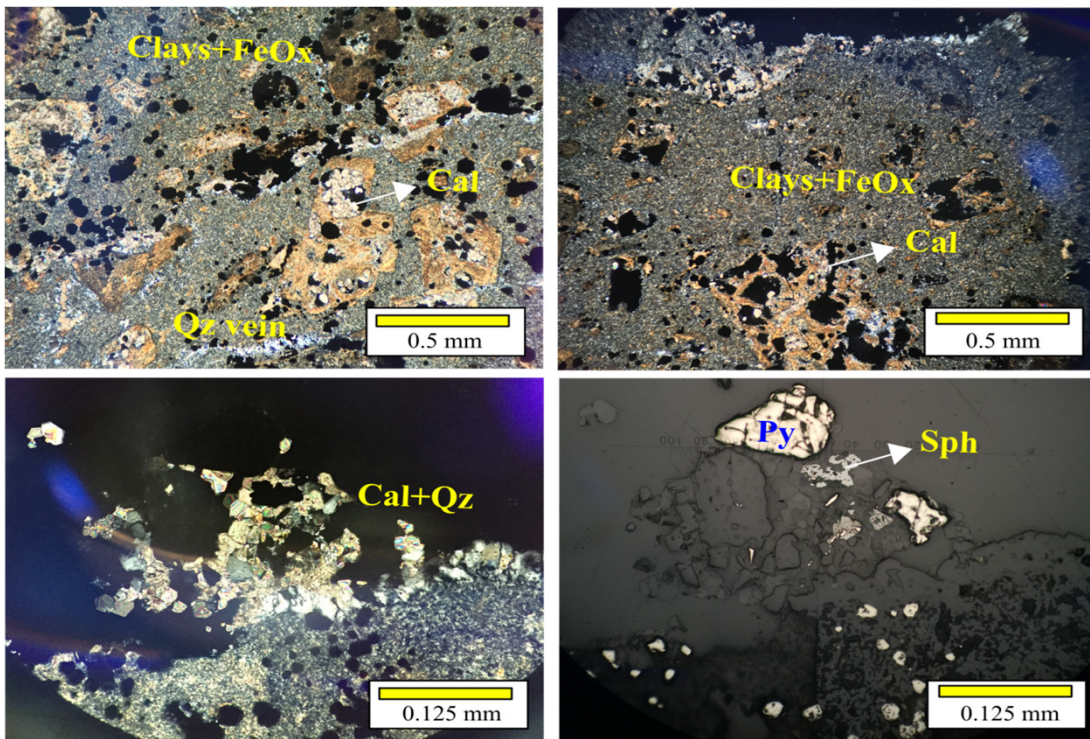
Mineralogía Primaria		% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Fenocristales	Cuarzo	30	0.1	Roca de textura porfídica con fenocristales subhedrales de feldespato, plagioclasas y hornblenda
	Feldespato	5	1.0	
	Plagioclasa	10	1.0	
	Hornblenda	15	0.6	
Masa Fundamental	Cuarzo	30	Agregado Microcristalino	
	Feldespato	10		
% Roca fresca		60		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	10	0.05	Cuarzo granular anhedral principalmente como relleno de vetillas
Arcilla	15	Microcristalina	Agregado de arcillas y óxidos de Fe terroso principalmente como reemplazo de feldespatos, plagioclasas y hornblendas. También en los bordes de fenocristales

Hematita	5	0.05	Agregado de granos anhedrales conformando pseudomorfos de hornblenda. Reemplazo parcial de pirita
Carbonato	5	<0.7	Agregado de granos anhedrales relleno oquedades, principalmente en el centro de plagioclasas y feldespatos.
Pirita	5	<0.4	Granos subhedrales a anhedrales diseminados. Principalmente conformando pseudomorfos de minerales máficos y también como relleno de vetillas
Esfalerita	<1	<0.18	Granos anhedrales reemplazando pirita. Presenta textura de calcopirita disease
% Roca alterada	40		

Vetillas			Características (composicionales y texturales)
Mineralogía	Relleno	Halo	
Cuarzo	25		Vetillas rectas de cuarzo drúsico, pirita euhedral y yeso. La pirita se encuentra parcialmente reemplazada por esfalerita. Halo de forma recta de hasta 5 mm compuesto de arcillas y óxidos de Fe otorgando un aspecto oscuro
Yeso	15		
Pirita	50		
Esfalerita	10		
Arcillas		50	
óxidos de Fe		50	

Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B04163-3

Tipo Estudio	Re-Os pirita y calcopirita
Sondaje	Profundidad(m)
BRA004	163-166

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Roca de textura porfírica microbrechizada con alteración argílica moderada tanto en clastos como en matriz. Cortadas por vetillas de pirita masiva (tipo X)

Clasificación Pórfido Feldespato y Hornblenda (FHP) brechizado.

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

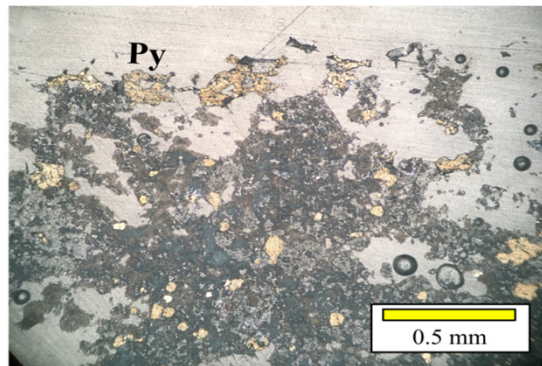
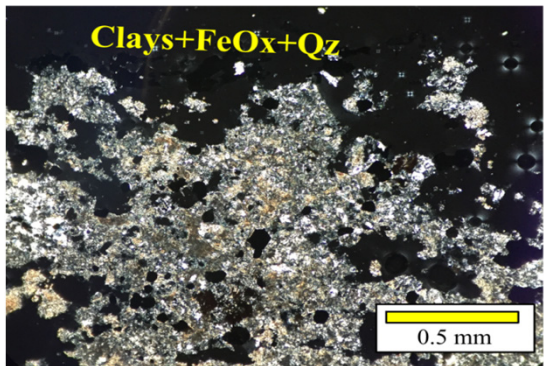
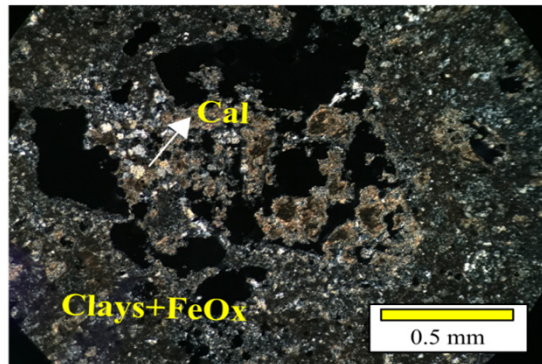
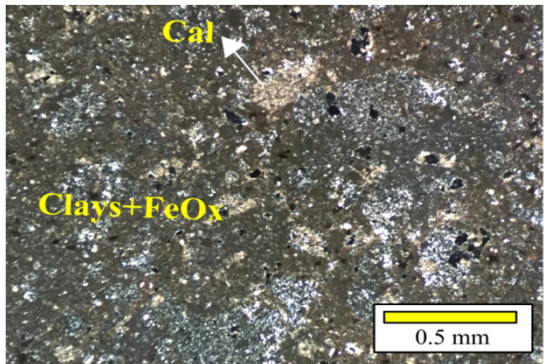
Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	60	Microcristalino en matriz	Roca de textura porfírica brechizada. No se observan otras texturas primarias
Feldespato	10	Variado; hasta 1	
Plagioclasa	15	Variado; hasta 1	
Hornblenda	15	hasta 0.6	
% Roca fresca	10		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	50	<0.1	Cuarzo granular anhedral como matriz y relleno de oquedades. Granos subhedrales a euhedrales en vetilla
Arcillas	20	Microcristalino	Se presenta reemplazando selectiva y pervasivamente feldespatos y plagioclasas. Se presenta mezclada con óxidos de hierros terrosos
Carbonato	10	0.05	Cristales anhedrales como relleno de oquedades y también conformando pseudomorfos en reemplazo parcial de feldespatos y plagioclasas

Hematita	5	<0.05	Agregado de granos anhedrales como reemplazo de hornblendas conformando pseudomorfos
Pirita	5	<0.4	Granos subhedrales a anhedrales diseminados y como relleno de fracturas. Se presenta como granos euhedrales a subhedrales en vetilla
% Roca alterada	90		

Vetillas			Características (composicionales y texturales)
Mineralogía	Relleno	Halo	
Cuarzo	30		Vetillas de forma recta compuesta por pirita euhedral y cuarzo drúsico. Halo de forma irregular (hasta 5 mm de espesor) compuesto de arcillas y óxidos de Fe
Pirita	70		
Arcillas		70	
Óxidos de Fe		30	

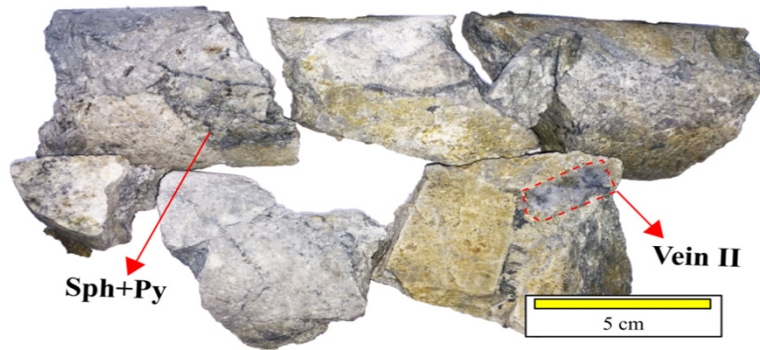
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B04241

Tipo Estudio	Re-Os pirita y calcopirita; Isótopos de Cu	
Sondaje	BRA004	Profundidad(m)
		241-244

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Brecha polimíctica con clastos de intrusivos porfídicos (FHP, FRHP y otros). Mineralización diseminada de pirita. Presencia de mineralización de esfalerita reemplazando pirita preferencialmente en fracturas y vetillas muy finas (tipo X), ambas estructuras cortan a la brecha. Presencia de vetillas tipo II truncadas por la brechización.

Clasificación Brecha polimíctica (PBX)

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	40	Microcristalino	Brecha polimíctica clastosoportada. Clastos de intrusivos porfídicos de forma subredondeada de diversos tamaños (1 a 50 mm). Matriz de polvo de roca, con fragmentos angulosos de cuarzo, feldespatos/ plagioclasas y líticos
Feldespato	15	<1.4	
Plagioclasa	15	<1.4	
Hornblenda	30	<1.3	
% Roca fresca	10		

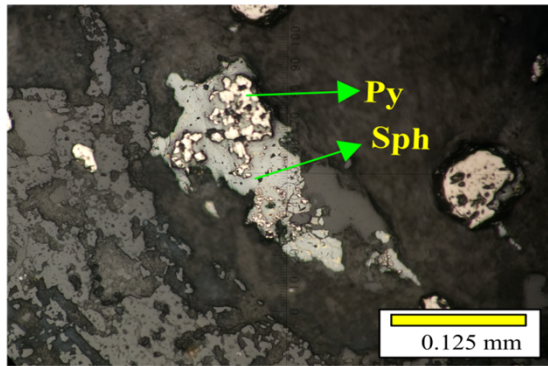
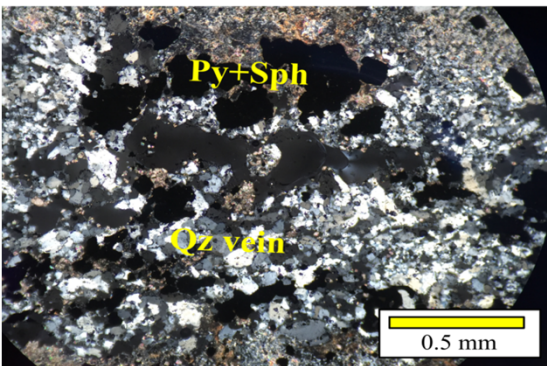
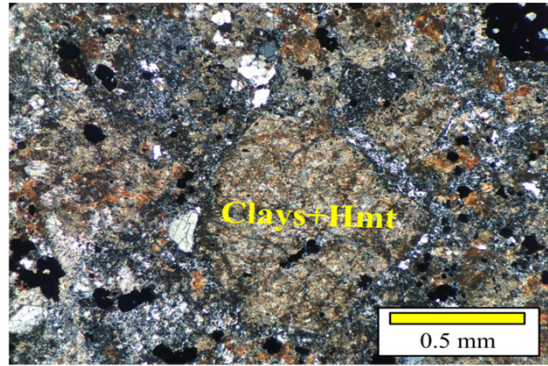
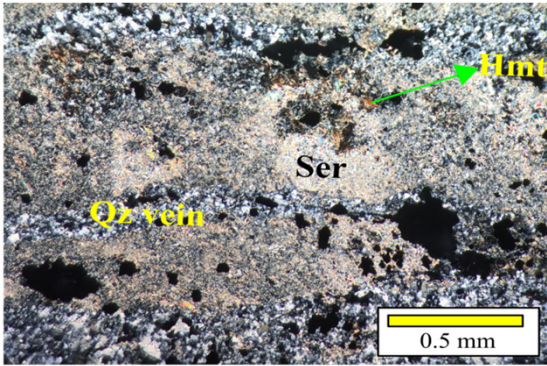
Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	30	Microcristalino hasta 1.5	Agregado de granos microcristalinos que conforman la matriz. Se observan fragmentos angulares en matriz y también granos anhedrales de mayor tamaño rellenando oquedades
Sericita	20	Microcristalina hasta 0.1	Agregado microcristalino como reemplazo de clastos y también como relleno de vetilla, alcanzando granos de mayor tamaño
Arcilla	20	Microcristalino	Agregado de granos microcristalinos mezclado con óxidos de Fe. Se pesena como reemplazo de hornblendas y también como parte de la matriz
Carbonatos	10	0.05	Agregado de granos anhedrales a subhedrales, se presentan principalmnte rellenando oquedades, vetillas y también conformando parte de la matriz

Hematita	5	<0.02	Granos anhedrales reemplazando hornblenda conformando pseudomorfos
Pirita	5	<0.8	Granos anhedrales a subhedrales diseminados en toda la roca y también como relleno de vetillas. La mayoría crece como reemplazo de fases máficas preexistentes
Esfalerita	<1	0.1	Granos anhedrales reemplazando pirita preferentemente en vetilla. Presenta textura de calcopirita disease
% Roca alterada	90		

Vetillas			Características (composicionales y texturales)
Mineralogía	Relleno	Halo	
Cuarzo	20		Vetillas de hasta 5 mm de ancho, forma irregular. Escaso halo (<1 mm), forma irregular. Presenta reactivación de calcita.
Pirita	40		
Esfalerita	20		
Sericita + Arcillas		100	
Calcita	10		

Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Cuarzo	90		Vetilla de 10 mm de ancho, forma recta. Compuesta por cuarzo y parches de pirita. No se distingue halo de alteración
Pirita	10		

Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B04246-8

Tipo Estudio	Isótopos de Cu	
Sondaje		Profundidad(m)
BRA004		246-248

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Brecha polimíctica con clastos de intrusivos porfídicos (FHP, FRHP y otros). Mineralización diseminada de pirita, galena, calcopirita, bornita, galena y esfalerita.

Clasificación	Brecha polimíctica (PBX)
----------------------	--------------------------

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

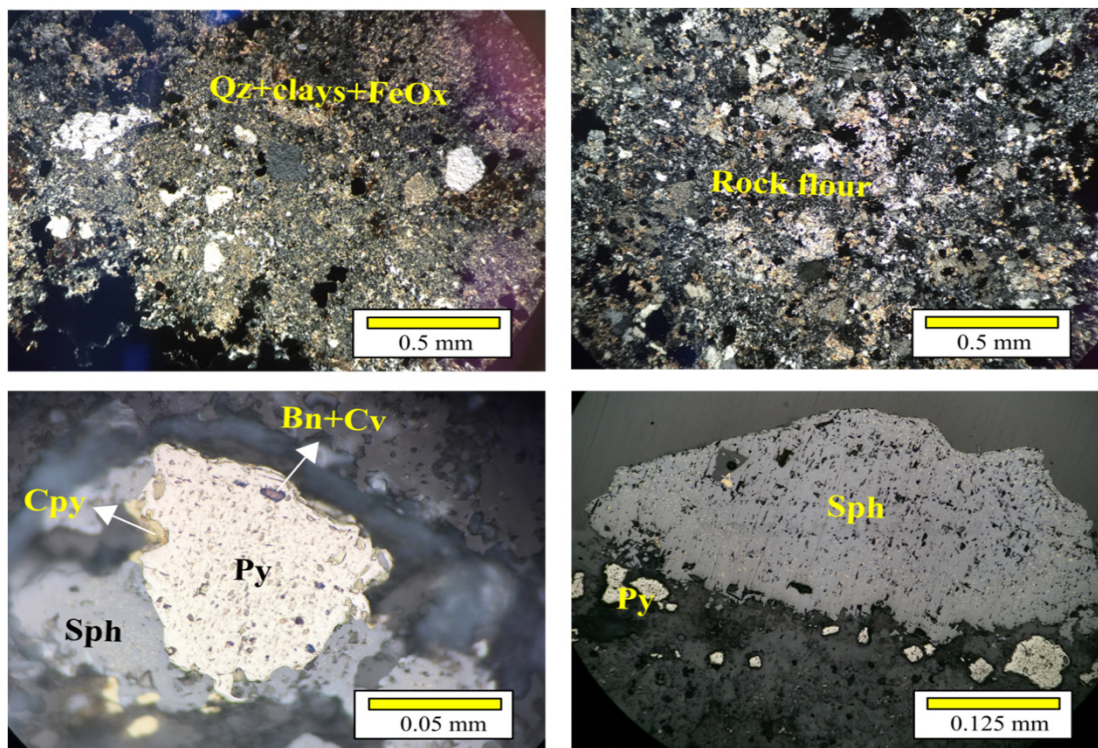
Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	50	Variado, hasta 1	Brecha polimíctica clastosoportada. Clastos de intrusivos porfídicos y cuarcitas de formas angulosa de diversos tamaños (0.5 a 70 mm). Matriz de polvo de roca, con fragmentos angulosos de cuarzo, feldspatos/ plagioclasas y líticos
Feldespato	10	0.5 hasta 1.2	
Plagioclasa	20	0.5 hasta 1.2	
Hornblenda	20	2.5	
% Roca fresca	20		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Sericita	30	Microcristalina	Alterando pervasivamente y selectivamente algunos clastos. También conformando parte de la matriz de la brecha
Cuarzo	20	<0.8	Granos anhedrales como matriz de brecha, también como relleno de fracturas y oquedades
Turmalina	4	0.2	Cristales tabulares radiales conformando parte de la matriz de la brecha
Carbonato	4	<0.1	Granos subhedrales a euhedrales rellando cavidades, conformando drusas en fracturas
Arcillas	10	Microcristalina	Alterando pervasivamente toda la roca
Óxidos de Fe	5	<0.1	Agregado de óxidos de Fe terrosos en conjunto con arcilla, alterando pervasivamente toda la roca, con preferencia en fases máficas y sulfuros
Pirita	4	<1.6	Granos subhedrales y agregado de granos anhedrales vermiculares diseminados tanto en matriz como clastos. También relleno de oquedades. Los granos en general presentan micro-porosidades rellenas con hematita o calcopirita, bornita y calcosina-covelina

Esfalerita	1	<2.5	Grano anhedrales a subhedrales diseminados y relleno de fracturas. Reemplaza pirita y galena. Esta a su vez es reemplazada por calcopirita y bornita en traza (calcopirita disease)
Galena	<1	<0.1	Granos anhedrales diseminados. Se presenta intercrecido con/ o como inclusión en pirita. También intercrecido con calcopirita y esfalerita
Hematita	<1	0.01	Granos anhedrales como reemplazo parcial de fases máficas. También se presenta intercrecida con pirita
Calcopirita	<1	0.1	Granos anhedrales a vermiculares diseminados en clastos, matriz y también relleno de fracturas. Reemplaza pirita, esfalerita y galena. A su vez es reemplazado por bornita
Bornita	<1	0.06	Anhedrales a vermicular, se encuentra reemplazando calcopirita
Calcosina	<<1	Microcristalina	Reemplazando parcialmente bornita
Covelina	<<1	Microcristalina	Cristales en dagas reemplazando levemente calcosina, bornita y calcopirita
% Roca alterada	80		

Vetillas			Características (composicionales y texturales)
Mineralogía	Relleno	Halo	
Cuarzo	50		Fracturas de hasta 1 mm de espesor, forma irregular, sin halo
Carbonatos	30		
Pirita	20		

Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B04253

Tipo Estudio	Re-Os pirita y calcopirita; Isótopos de Cu	
	Sondaje	Profundidad(m)
	BRA004	253

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Brecha polimíctica clastosoportada, con clastos de unidades porfídicas (FHP y otros). Los clastos se encuentran muy alterados a arcilla y óxidos de Fe. Mineralización diseminada de pirita con leve enriquecimiento secundario. Mineralización de pirita y esfalerita en vetillas tipo X

Clasificación	Brecha polimíctica (PBX)
----------------------	--------------------------

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

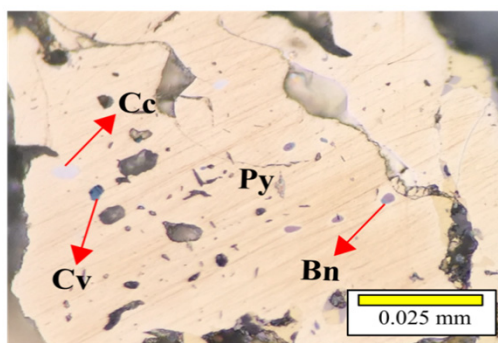
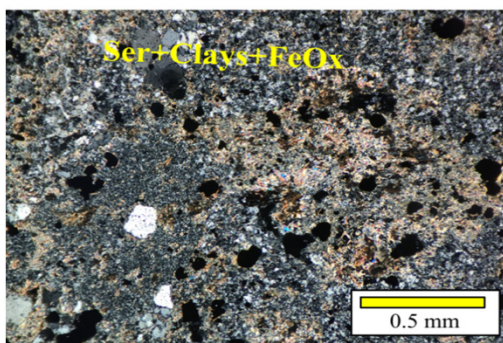
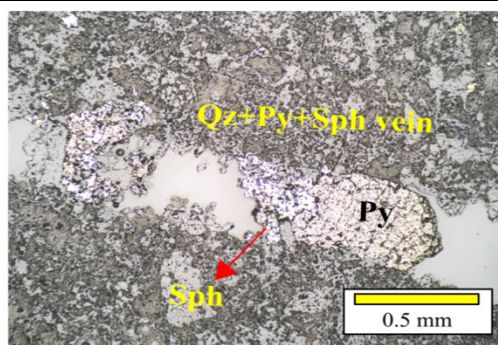
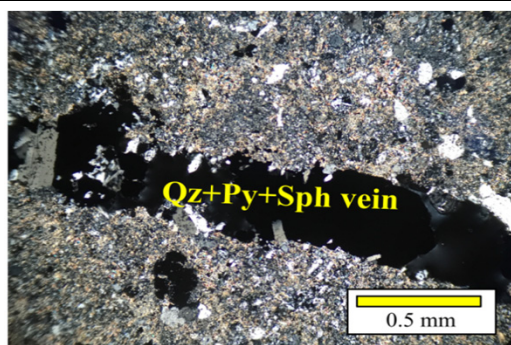
Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	50	Microcristalino	Brecha polimíctica clastosoportada. Clastos de intrusivos porfídicos de forma subredondeada de diversos tamaños (1 a 50 mm). Matriz de polvo de roca, con fragmentos angulosos de cuarzo y líticos
Feldespato	20	<1.4	
Plagioclasa	25	<1.4	
Hornblenda	5	<1.3	
% Roca fresca	10		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	40	Variado, hasta 1	Agregado de granos anhedrales a subhedrales. Se encuentra microcristalino conformando parte de la matriz de la brecha y también rellenando oquedades y vetillas alcanzando mayor tamaño de grano
Sercita	15	Microcristalina, hasta 0.1	Se presenta alterando pervasivamente los clastos, con preferencia a feldespatos y plagioclasas. También conformando parte de la matriz de la brecha
Arcillas	20	Microcristalina, hasta 0.1	Se presenta alterando pervasivamente los clastos de manera no selectiva. También conformando parte de la matriz de la brecha
Turmalina	1	<0.2	Granos tabulares radiales. Se presenta conformando parte de la matriz de la brecha

Óxidos de Fe	5	Microcristalino	Agregado de óxidos de hierro terrosos y arcilas. Se presentan alterando selectiva y pervasivamente fases máficas conformando pseudomorfos
Hematita	1	0.025	Agregado de granos anhedrales reemplazando parcialmente fases máficas
Pirita	7	<1.4	Granos anhedrales a subhedrales diseminados en toda la roca, tanto en clastos como en matriz. Granos subhedrales a euhedrales rellenando fracturas y vetillas
Esfalerita	<1	<0.8	Granos anhedrales vermiculares. Se encuentra reemplazando pirita en vetillas. Presenta además textura de calcopirita disease
Calcopirita	<<1	0.02	Como microinclusion en pirita. También reemplazando a esfalerita
Bornita	<<1	0.01	Como microinclusión en pirita dentro de vetillas de pirita-cuarzo-esfalerita
Covelina	<<1	0.01	Como microinclusión en pirita dentro de vetillas de pirita-cuarzo-esfalerita. Aparentemente reemplazando microinclusiones de bornita
Calcosina	<<1	0.01	Como microinclusión en pirita dentro de vetillas de pirita-cuarzo-esfalerita. Aparentemente reemplazando microinclusiones de bornita
% Roca alterada	90		

Vetillas			Características (composicionales y texturales)
Mineralogía	Relleno	Halo	
Cuarzo	30		Vetillas de hasta 2 mm de ancho y forma sinuosa rellenas de cuarzo euhedral y pirita euhedral. La pirita presenta un reemplazo casi total por esfalerita. Halo de forma irregular (hasta 5 mm) de sericita
Pirita	50		
Esfalerita	20		
Sericita		100	

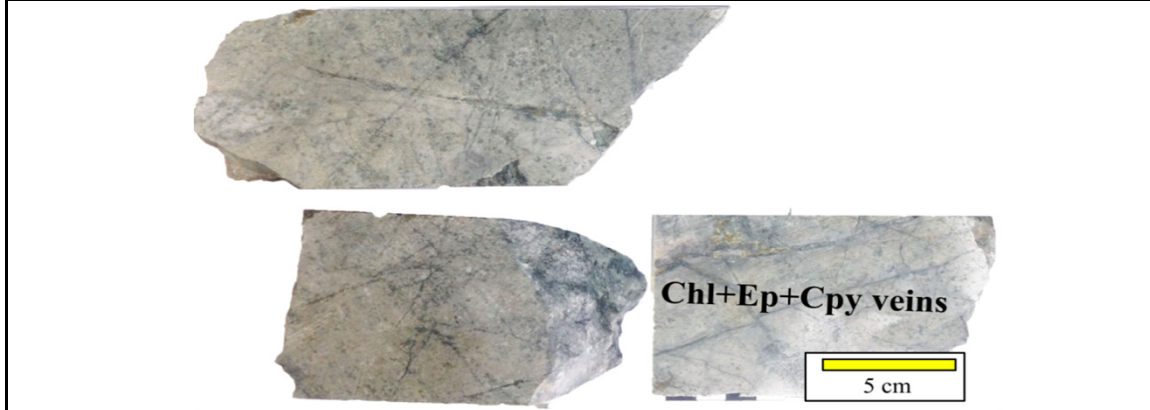
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B04335-7

Tipo Estudio	Re-Os pirita y calcopirita; Isótopos de Cu	
Sondaje	Profundidad(m)	
BRA004	335-337	

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Brecha polimíctica con alteración filica (clorita-sercita) pervasiva. Cortada por stockwork de vetillas de tipo VI, con abundante mineralización de calcopirita

Clasificación	Brecha polimíctica (PBX)
----------------------	--------------------------

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

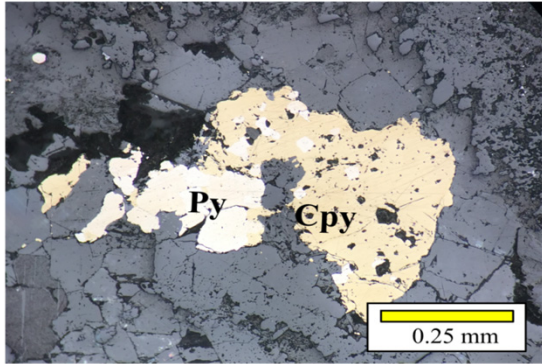
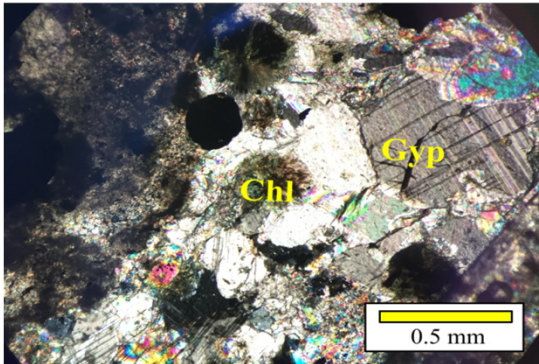
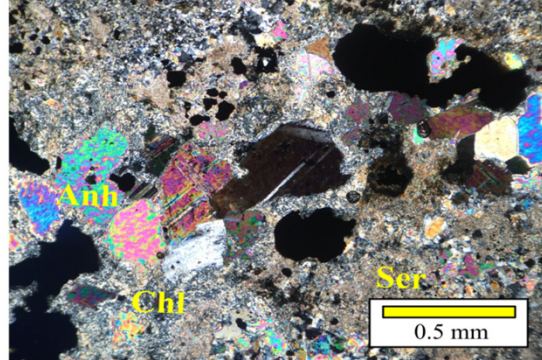
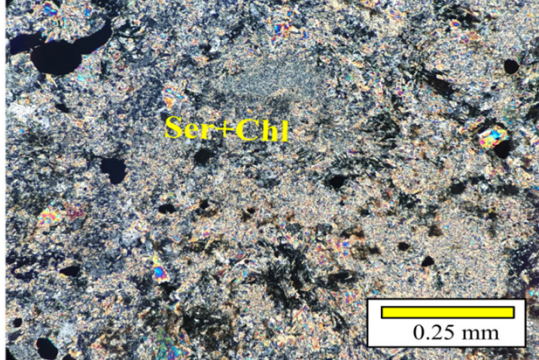
Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
% Roca fresca	0.0		Roca totalmente alterada, no se reconocen texturas primarias

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	20	Microcristalino	Agregado de granos anhedrales conformando parte de la matriz de la brecha
Sericita	35	Microcristalina	Agregado fino conformando parte de la matriz de la brecha. También alterando pervasivamente clastos y como halo de vetillas
Anhidrita	15	<0.1	Granos anhedrales relleno de vetillas
Yeso	5	<0.1	Granos anhedrales relleno de vetillas
Epidota	3	<0.1	Granos anhedrales relleno de vetillas
Clorita	15	Microcristalina	Agregado fino conformando parte de la matriz de la brecha. También como relleno de vetilla y conformando parte del halo de estas mismas

Pirita	5	<2	Diseminada en toda la roca y en vetilla. La pirita en vetilla está siendo reemplazada por calcopirita desde los bordes
Calcopirita	2	<1.6	Granos anhedrales relleno de vetillas. Reemplaza parcial a totalmente Pirita desde los bordes
Magnetita	<1	0.1	Granos anhedrales finamente diseminados en la matriz y como inclusiones en Pirita
% Roca alterada	100		

Vetillas			Características (composicionales y texturales)
Mineralogía	Relleno	Halo	
Anhidrita	40		Stockwork de vetillas de forma irregular, ancho desde 1 mm hasta 5 mm. Halo compuesto por sericita y clorita, de forma irregular, de hasta 3 mm de ancho
Yeso	10		
Clorita	20	60	
Epidota	5		
Pirita	10		
Calcopirita	10		
Sericita	5	40	

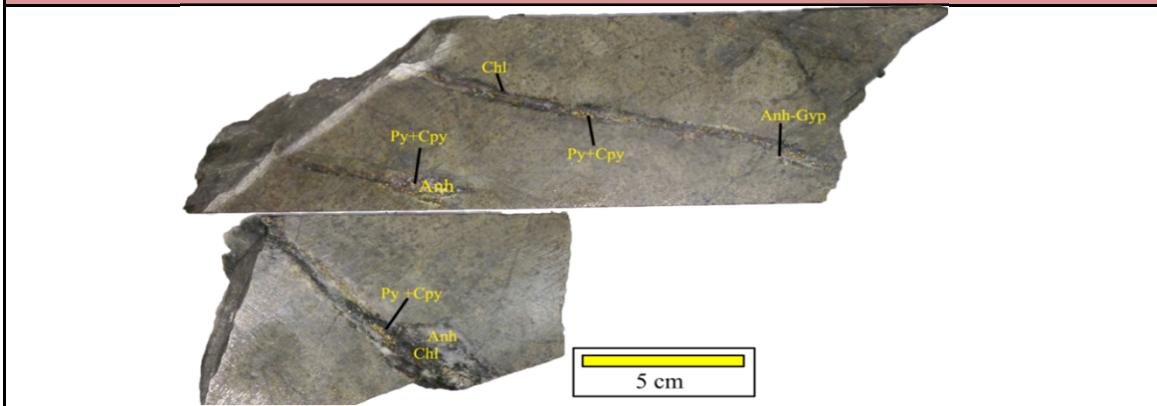
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B04379-2

Tipo Estudio	Re-Os pirita y calcopirita; Isótopos de Cu	
Sondaje	Profundidad(m)	
BRA004	379-382	

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Brecha polimíctica con alteración filica (clorita-sercita) pervasiva. Cortada por stockwork de vetillas de tipo VI, con abundante mineralización de calcopirita

Clasificación	Brecha polimíctica (PBX)
----------------------	--------------------------

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

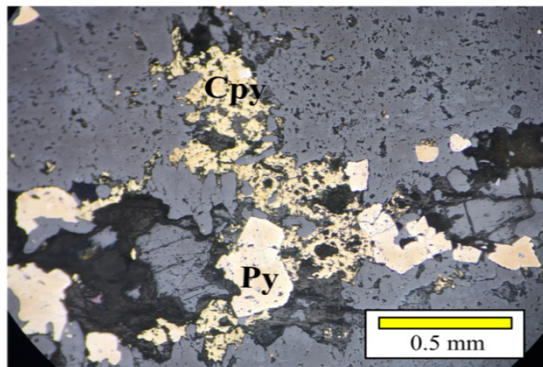
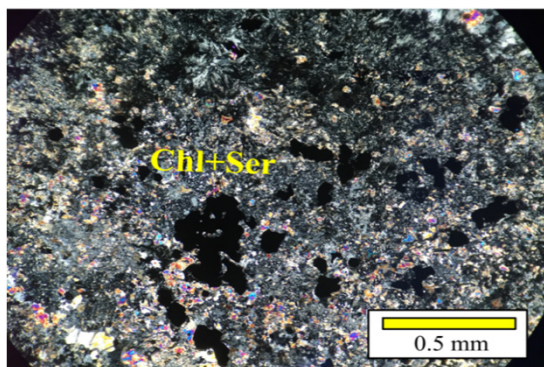
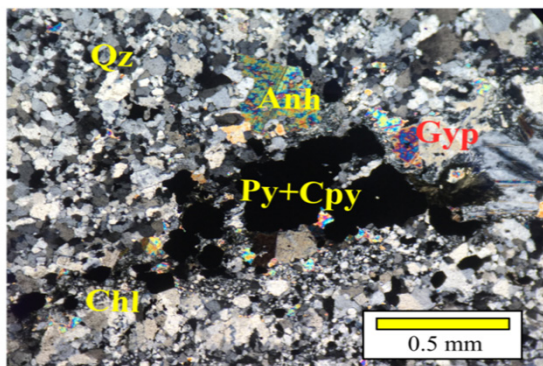
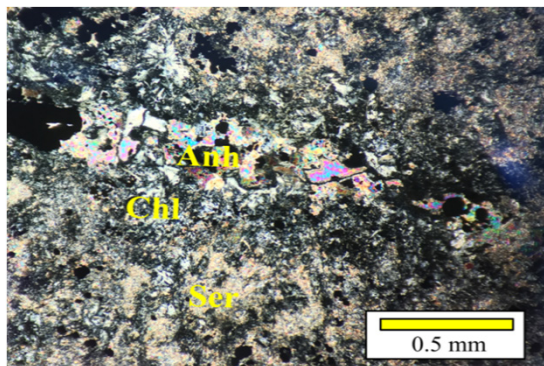
Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	50	0.5	Brecha polimíctica con clastos subangulosos de intrusivos porfíricos. No se reconocen otras texturas debido al alto grado de alteración
Feldespato/ Plagioclasa	50	0.3 hasta 2	
% Roca fresca	10.0		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	20	Microcristalino, hasta 0.4	Pervasivo en toda la roca, conformando parte de la matriz de la brecha y también como relleno de vetillas
Sericita	30	Microcristalina	Agregado fino alterando pervasivamente clastos y también conformando parte de la matriz de la brecha
Clorita	20	Microcristalina	Agregado fino alterando pervasivamente clastos y conformando parte de la matriz de la brecha. También se presenta como relleno y halo de vetillas

Anhidrita	10	<0.1	Granos anhedrales relleno vetillas
Pirita	6	1.2 hasta 6	Masiva en vetilla y diseminada en la roca. La mayoría de los granos son euhedrales a subhedrales, sin embargo hay una menor proporción de granos vermiculares. La pirita presente en vetillas se encuentra en paragénesis con calcopirita
Calcopirita	3	0.4 hasta 4	Diseminada en la roca y asociada a fracturas y vetillas. Se encuentra preferentemente en vetillas de cuarzo-anhidrita en paragénesis con pirita. Formas principalmente subhedrales a euhedrales
Magnetita	1	<0.4	Pequeños granos euhedrales diseminados en toda la roca. Suele estar asociado a la pirita y también conformando pseudomorfos de fases minerales máficas
% Roca alterada	90		

Vetillas			Características (composicionales y texturales)
Mineralogía	Relleno	Halo	
Anhidrita	40		Vetillas de forma recta, ancho desde 2 mm hasta 25 mm. Halo compuesto por sericita y clorita, de forma irregular, de hasta 3 mm de ancho
Yeso	10		
Clorita	20	60	
Epidota	5		
Pirita	10		
Calcopirita	10		
Sericita	5	40	

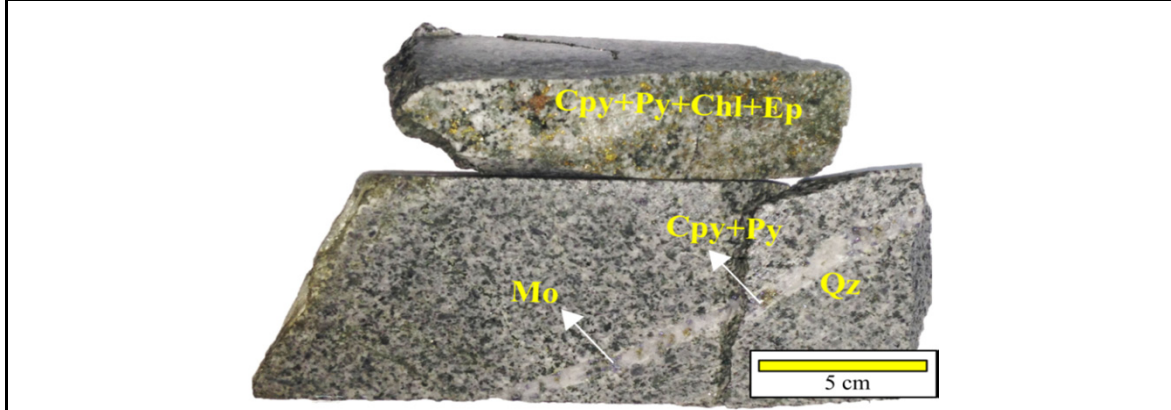
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B06038-1

Tipo Estudio	Re-Os molibdenita; Isótopos de Cu
Sondaje	Profundidad(m)
BRA006	38-39

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Roca intrusiva equigranular con alteración propilítica leve. Presencia de vetillas de cuarzo con escasa mineralización de molibdenita, pirita y calcopirita (tipo II). Estas vetillas son cortadas por vetillas tipo IX

Clasificación	Granodiorita (GRD)
----------------------	--------------------

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	10	1.2	Roca intrusiva de textura fanerítica con granos relativamente equigranulares. Las plagioclasas se encuentran en textura acumulada y la mayoría presenta maclas de tipo polisintética. El cuarzo se encuentra intersticial en textura poikilítica englobando algunas plagioclasas y feldespatos. Las biotitas se presentan en cúmulos en asociación con magnetita
Feldespato	15	2.0	
Plagioclasa	60	<3	
Biotita	10	1.5	
Magnetita	5	<0.3	
% Roca fresca	80		

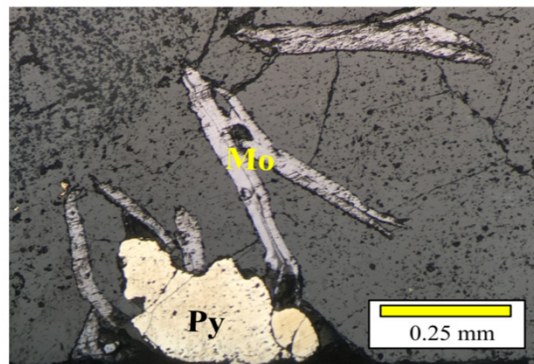
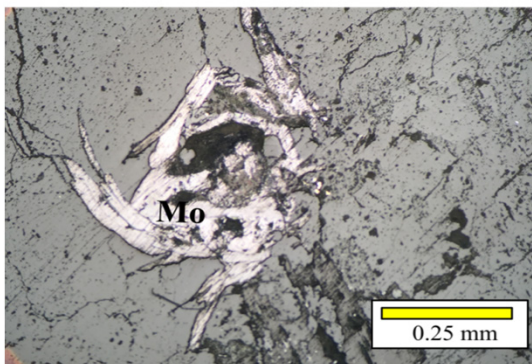
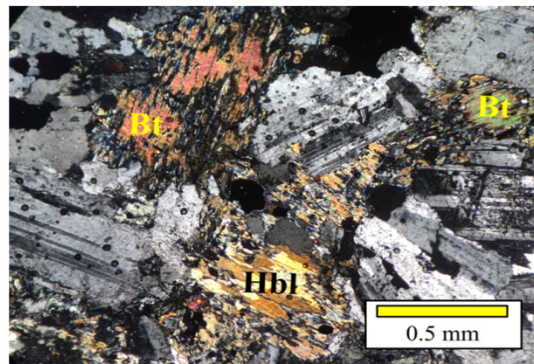
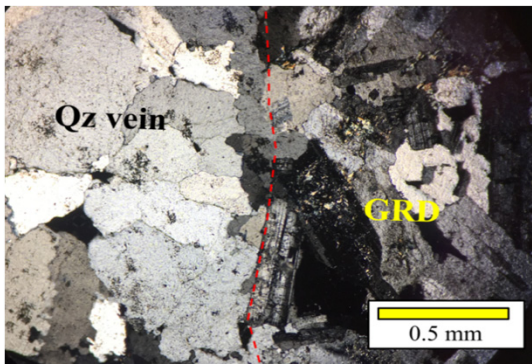
Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Clorita	12	<1.5	Se presenta en cúmulos, reemplazando biotita desde los bordes. También se presenta rellenando vetillas
Epidota	2	0.25	Pequeños granos euhedrales a subhedrales diseminados. Preferentemente reemplazando plagioclasas. También se presenta como relleno de vetillas
Cuarzo	5	<2.5	Granos anhedrales rellenando vetillas

Pirita	1	<1	Granos euhedrales a subhedrales diseminados en vetillas de cuarzo. También se presenta diseminada muy débil en las cercanías de la vetilla. En pátina rellenando fracturas
Calcopirita	<1	<0.15	Granos euhedrales a subhedrales diseminados en vetillas de cuarzo. También se presenta diseminada muy débil en las cercanías de la vetilla. En pátina rellenando fracturas
Molibdenita	<1	1.5	Cristales en forma de dagas diseminados en vetillas de cuarzo
% Roca alterada	20		

Vetillas			Características (composicionales y texturales)
Mineralogía	Relleno	Halo	
Cuarzo	92		Vetillas de hasta 1 cm de espesor, forma recta y sin halo. Rellenas de cuarzo granular y parches de molibdenita, pirita y calcopirita
Molibdenita	5		
Pirita	2		
Calcopirita	1		

Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Clorita	60		Vetillas de hasta 2 mm de ancho, de forma irregular. Similares a fracturas rellenas con clorita, epidota y mineralización en pátina
Epidota	30		
Pirita	7		
Calcopirita	3		

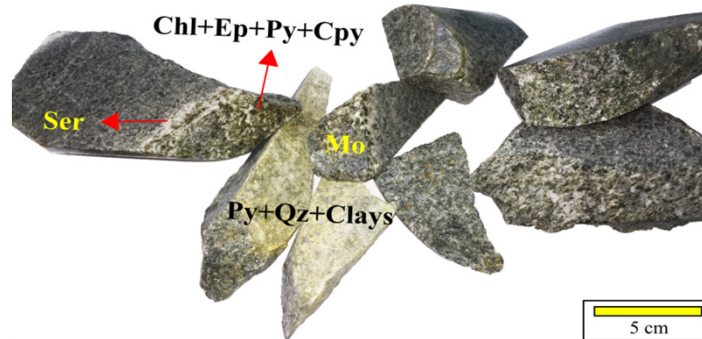
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B06058

Tipo Estudio	Isótopos de Cu	
Sondaje		Profundidad(m)
BRA006		58

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Roca intrusiva equigranular con alteración propilitica leve. Presencia de vetillas de cuarzo-pirita euhedral (tipo X) cortadas por vetillas de clorita-epidota-pirita-calcopirita-molibdenita (tipo IX)

Clasificación Granodiorita (GRD)

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	15	1.0	Roca intrusiva de textura fanerítica con granos relativamente equigranulares. Las plagioclasas se encuentran en textura cumulada y la mayoría presenta maclas de tipo polisintética. El cuarzo se encuentra intersticial en textura poikilítica englobando algunas plagioclasas y feldespatos. Las biotitas se presentan en cúmulos en asociación con magnetita y hornblenda. Algunos cristales de hornblenda presentan textura poikilítica englobando pequeños cristales de plagioclasa
Feldespato	10	1.5	
Plagioclasa	60	<2.5	
Biotita	5	1.5	
Hornblenda	5	1.5	
Magnetita	5	<0.3	
% Roca fresca	75		

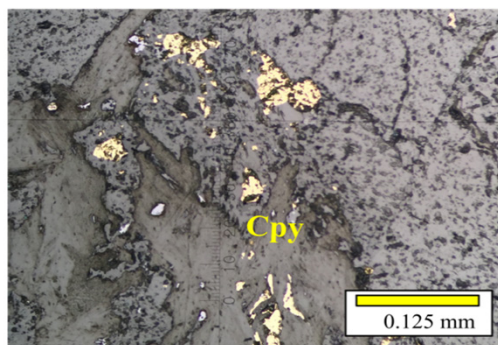
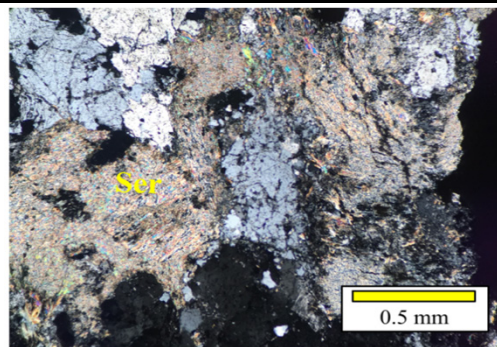
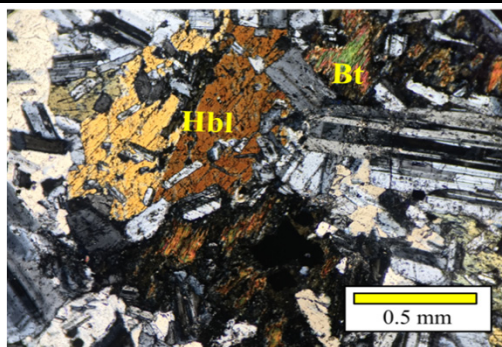
Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Clorita	10	<1.5	Se presenta reemplazando completamente fases máficas, conformando pseudomorfos. También se presenta rellenando vetillas en un agregado de menor tamaño
Epidota	2	0.25	Pequeños granos euhedrales a subhedrales diseminados. Preferentemente reemplazando plagioclasas. También se presenta como relleno de vetillas
Cuarzo	5	<2	Granos subhedrales rellenando vetillas
Sericita	3	Microcristalina	Se presenta como halo de vetillas
Arcillas	2	Microcristalina	Agregado microcristalino entremezclado con óxidos de Fe, conformando halo de vetillas de cuarzo-pirita

Óxidos de Fe	1	Microcristalino	Agregado terroso entremezclado con arcillas conformando halo de vetillas de cuarzo-pirita
Pirita	<1	<1	Granos subhedrales a euhedrales relleno de vetillas y también como pátina en fracturas
Calcopirita	<1	<0.2	Granos subhedrales a euhedrales relleno de vetillas y también como pátina en fracturas
Moibdenta	<1	<1	Cristales anhedrales como parche en vetillas
% Roca alterada	25		

Vetillas			Características (composicionales y texturales)
Mineralogía	Relleno	Halo	
Clorita	60		Vetillas de hasta 2 mm de ancho, de forma irregular. Halo de sericitia de hasta 10 mm de ancho y forma irregular
Epidota	30		
Pirita	7		
Calcopirita	3		
Sericita		100	

Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Cuarzo	50		Vetillas rectas de hasta 3 mm de ancho rellenas de cuarzo euhedral y pirita euhedral. Halo de arcillas y óxidos de Fe de forma regular, hasta 3 mm de ancho
Pirita	50		
Arcillas		60	
Óxidos de Fe		40	

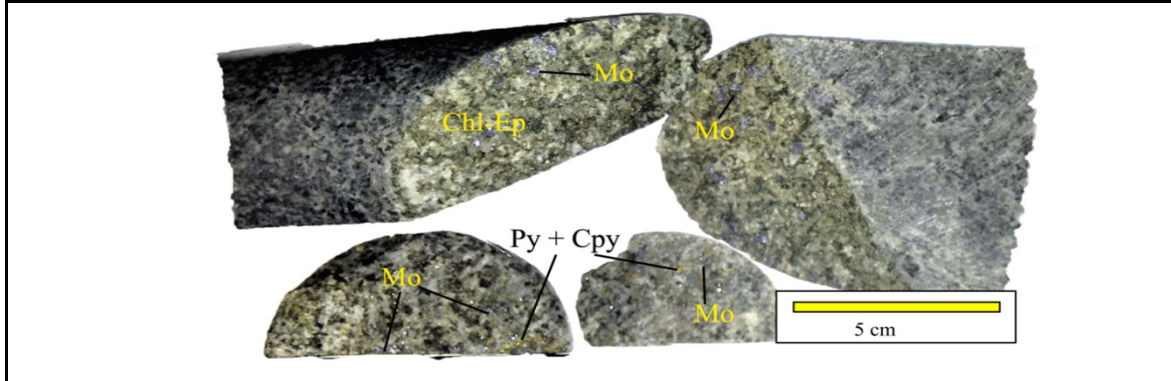
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B06221-3

Tipo Estudio	Re-Os molibdenita; Isótopos de Cu	
Sondaje		Profundidad(m)
BRA006		221-223

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Roca intrusiva equigranular con alteración propilítica leve. Presenta un stockwork de vetillas de cuarzo (tipo II) sin mineralización, estas son cortadas por vetillas de clorita-epidota-pirita-calcopirita-molibdenita (tipo IX).

Clasificación	Granodiorita (GRD)
----------------------	--------------------

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	5	1.6	Intrusivo fanerítico relativamente equigranular. Las plagioclasas y feldespatos tienen textura cumulada, poseen zonación; presentan macla polisintética y carlsbad respectivamente. El cuarzo se encuentra en los intersticios entre las plagioclasas y feldespatos. Las fases máficas presentes corresponden a hornblenda y biotita, las cuales se presentan en paragénesis como cúmulos. Algunos cristales de hornblenda presentan textura poikilítica englobando pequeños cristales de plagioclasa
Feldespato	10	2.0	
Plagioclasa	60	5.0	
Biotita	10	1.8	
Hornblenda	13	<4.5	
Magnetita	2	<0.5	
% Roca fresca	70		

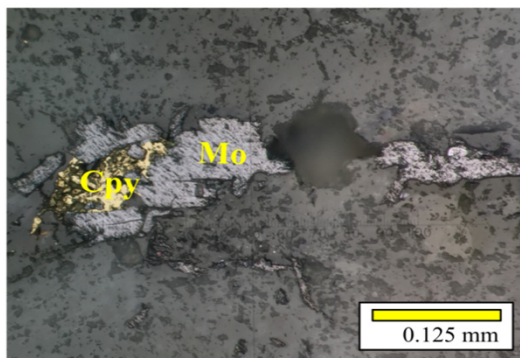
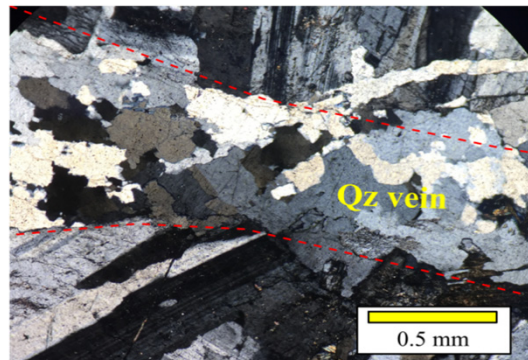
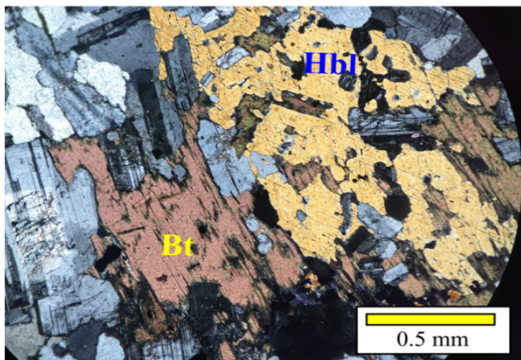
Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Clorita	15	0.1 hasta 1.8	Reemplazando parcial a totalmente cristales de biotita y hornblenda en textura pseudomórfica. El reemplazo ocurre en pequeños agregados de cristales equigranulares como también conformando un solo gran cristal. También se presenta rellenando fracturas
Epidota	5	0.2	Se presenta en pequeños granos euhedrales a subhedrales reemplazando plagioclasas, y como granos anhedrales reemplazando biotita y hornblenda. También se presenta en pequeños granos anhedrales rellenando fracturas

Cuarzo	5	<2.5	Granos subhedrales principalmente como relleno de vetillas
Sericita	2	Microcristalina	Reemplazando parcialmente feldespatos y plagioclasas
Pirita	1	<0.12	Granos anhedrales diseminados en toda la roca. Principalmente reemplazando granos de magnetita primaria (probablemente) desde los bordes y fracturas
Molibdenita	<1	0.25	Cristales en dagas conformando parches en vetillas, asociada a pirita y calcopirita
Calcopirita	<1	<0.2	Como pátina rellenando fracturas y vetillas. Asociada a molibdenita
Magnetita	1	<0.45	Diseminada en toda la roca, reemplazando cúmulo de minerales máficos o como exsolución en los planos de exfoliación
% Roca alterada	30		

Vetillas			
Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Cuarzo	100		Stockwork de vetillas finas (hasta 1.4 mm) de cuarzo, form recta. Sin halo de alteración ni mineralización

Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Clorita	60		Vetillas finas (hasta 1 mm) de forma relativamente sinuosa, no presentan halo de alteración. Estas vetillas cortan a las descritas anteriormente
Epidota	30		
Pirita	6		
Calcopirita	3		
Molibdenita	1		

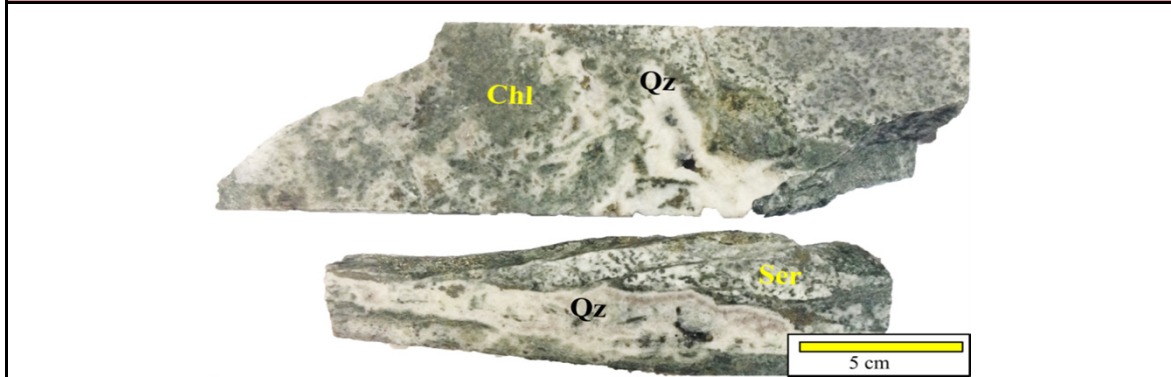
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B06264-6

Tipo Estudio	Re-Os pirita y calcopirita; Isótopos de Cu	
	Sondaje	Profundidad(m)
	BRA006	264-266

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Roca intrusiva equigranular con alteración propilitica intensa. Presenta gruesas vetas de cuarzo bandeado y drúsico cortadas por vetillas tipo IX. Mineralización de pirita, calcopirita y esfalerita diseminada en los halos de vetillas

Clasificación Granodiorita (GRD)

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	10	1.4	Roca intrusiva fanerítica relativamente equigranular. Los feldespatos y plagioclasas se encuentran en textura cumulada, las plagioclasas presentan macla polisintética y en general no se observan zonaciones. El cuarzo se encuentra intersticial entre plagioclasas y feldespatos. Los máficos se presentan como cúmulos completamente cloritizados
Feldespato	10	<2.6	
Plagioclasa	60	<6	
Biotita	8	<2.5	
Hornblenda	7	<2.5	
Magnetita	5	<0.2	
% Roca fresca	50		

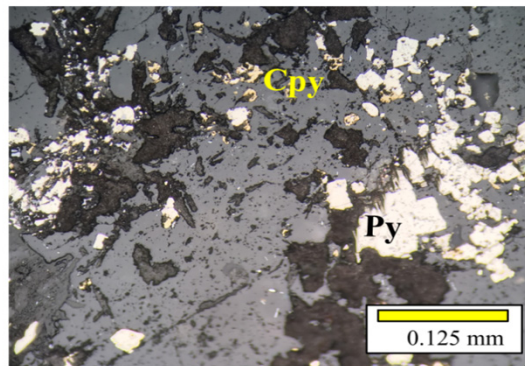
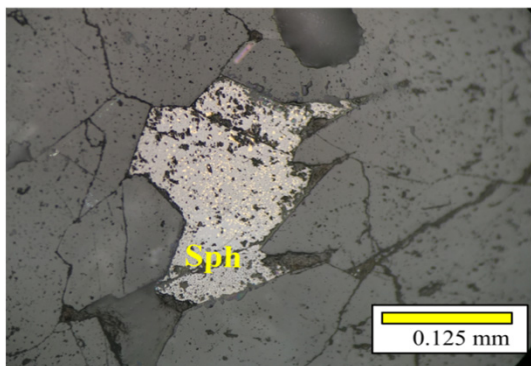
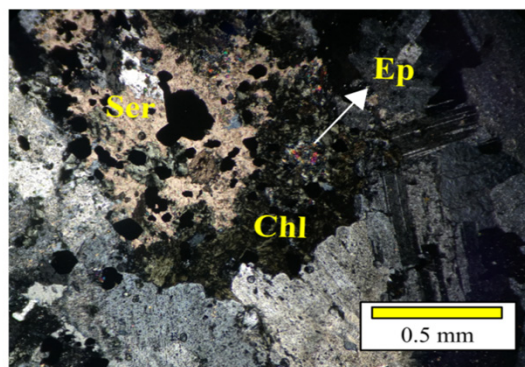
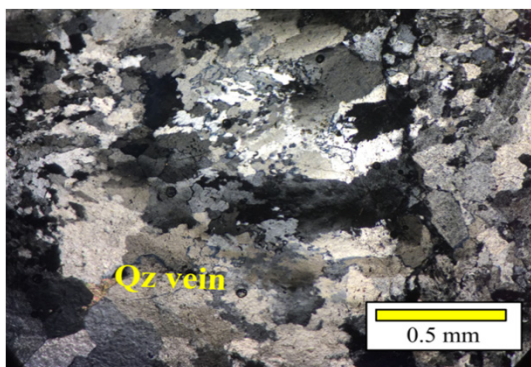
Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Clorita	10	0.1 hasta 2.5	Se presenta reemplazando máficos, ya sea formando cúmulos de clorita hojosa o bien como un solo gran cristal pseudomorfo
Epidota	5	<0.1	Agregado de pequeños granos que reemplazando plagioclasas a partir de fracturas preexistente. También se presentan en asociación con calcita y cuarzo en los cúmulos de clorita
Calcita	2	<1	Granos anhedral en asociación con epidota y clorita conformando cúmulos
Sericita	5	Microcristalina	Reemplazando muy leve las plagioclasas y feldespatos
Cuarzo	20	<3	Se presenta anhedral granular en toda la roca, preferentemente en vetas y en cúmulos de clorita. También se presenta de forma euhedral rellenando oquedades, conformando drusas

Pirita	5	0.4	Diseminada en toda la roca, creciendo preferentemente a partir de cúmulos de minerales máficos y en asociación con magnetita. También se presenta masiva como halo de alteración de vetillas de cuarzo
Calcopirita	2	<0.2	Diseminada en toda la roca, creciendo preferentemente a partir de cúmulos de minerales máficos. También se presenta en asociación con pirita en el halo de alteración de vetillas de cuarzo
Esfalerita	<1	<0.8	Granos subhedrales diseminados en vetillas de cuarzo
% Roca alterada	50		

Vetillas			
Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Cuarzo	88		Vetillas de cuarzo-sulfuros de hasta 2 cm de ancho. Presenta texturas bandeadas y drúscicas. Presenta mineralización de pirita, calcopirita y esfalerita en cúmulos. Posee un extenso halo de alteración (hasta 10 cm) compuesto de clorita-sericita-sulfuros
Pirita	5	20	
Calcopirita	5	10	
Esfalerita	2		
Clorita		30	
Sericita		40	

Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Clorita	70		Vetilla fina (5 mm) de forma irregular, corta a las estructuras descrita anteriormente
Pirita	10		
Calcopirita	5		
Epidota	15		

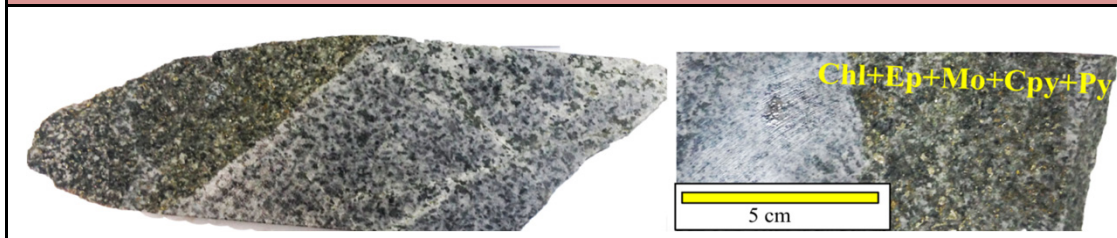
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B06346-8

Tipo Estudio	Re-Os molibdenita; Isótopos de Cu	
Sondaje	Profundidad(m)	
BRA006	346-348	

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Roca intrusiva equigranular con alteración propilitica leve. Presenta vetillas de biotita (tipo I) completamente cloritizadas y parcialmente epidotizada (reactivada por vetillas tipo IX). Escasa mineralización de pirita y calcopirita tanto diseminada como en vetillas.

Clasificación	Granodiorita (GRD)
----------------------	--------------------

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

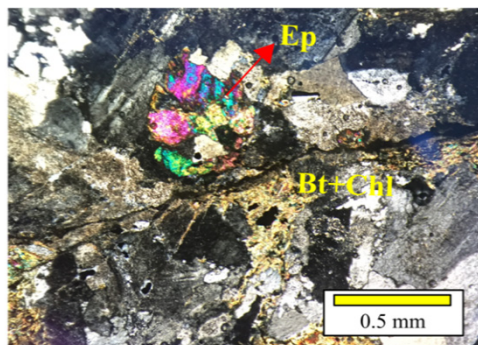
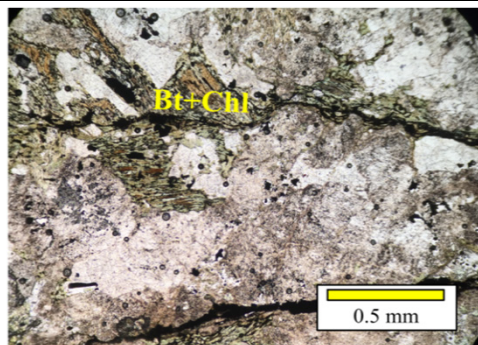
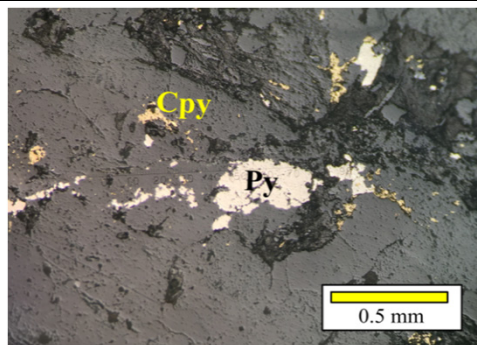
Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Cuarzo	5	3.0	Roca intrusiva de textura fanerítica, cristales relativamente equigranulares. Los feldespatos y plagioclasas se encuentran zonados, las plagioclasas presentan macla polisintética. El cuarzo se presenta intersticial entre las plagioclasas y feldespatos, a veces conformando textura poikilitica. Las fases máficas están conformadas por cúmulos de hornblenda, biotita y magnetita. Algunas hornblendas presentan macla carlsbad.
Feldespato	15	.4	
Plagioclasa	55	3.4	
Biotita	10	<2	
Hornblenda	12	<2	
Magnetita	3	<2.8	
% Roca fresca	80		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Clorita	7	0.2 hasta 1.4	Se presenta reemplazando cúmulos de minerales máficos. Tiende a reemplazar biotita formando un solo cristal pseudomorfo, mientras que al reemplazar hornblenda forma un agregado hojoso de granos mas pequeños. En vetillas se observa como dagas reemplazando biotita
Epidota	3	<0.2	Agregado de pequeños granos que reemplazando plagioclasas a partir de fracturas preexistente y también reemplazando minerales máficos
Sericita	1	Microcristalina	Reemplazando levemente a plagioclasas y feldespatos, preferentemente en las cercanías de fracturas
Cuarzo	2	<0.05	Granos anhedrales relleno vetillas

Calcita	<1	<0.1	Granos anhedrales relleno vetillas
Biotita	2	<1.2	Se presenta creciendo a partir vetillas, se observan cristales en forma de dagas/ hojas. Se encuentran parcial a totalmente reemplazados por clorita
Pirita	2	<2.2	Diseminada en toda la roca reemplazando magnetita desde lo bordes. Se presenta preferentemente diseminada en vetillas en asociación con calcopirita. En ambos caso crece a partir de minerales máficos
Calcopirita	1	<0.8	Diseminada preferenemente en vetillas de clorita y se presenta en asociación con pirita. Crece a partir de minerales máficos
Magnetita	<1	<2.8	Diseminada en toda la roca, presenta formas euhedrales a subhedrales y crece a partir de cúmulos de minerales máficos. Algunos granos se presentan reemplazados por pirita
% Roca alterada	20		

Vetillas			Características (composicionales y texturales)
Mineralogía	Relleno	Halo	
Biotita	70		Vetillas muy finas (<1 mm) de forma sinuosa compuestas por biotita cloritizada, epidota y sulfuros diseminados. Halo de sericita de hasta 1 mm de ancho
Clorita	15		
Epidota	5		
Pirita	5		
Calcopirita	5		
Sericita		10	

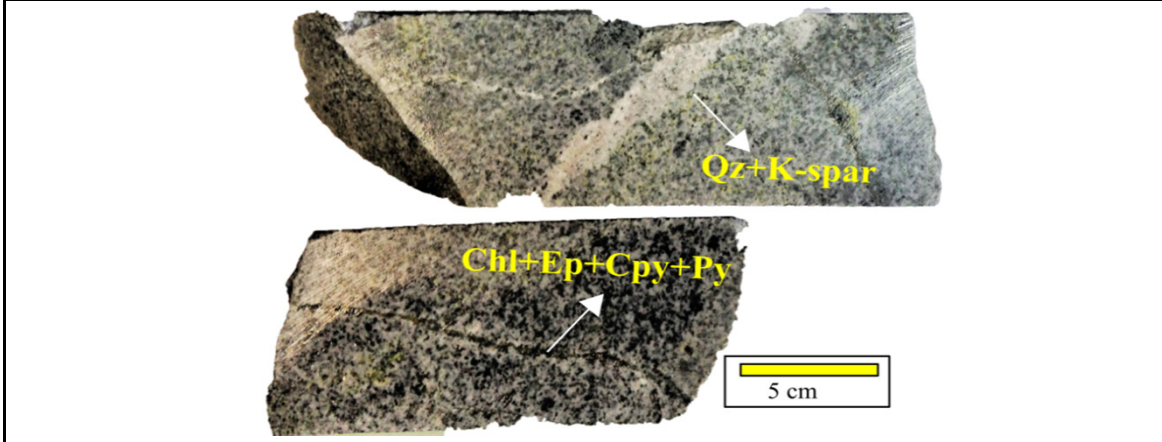
Fotomicrografías



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA -B06424-6

Tipo Estudio	Isótopos de Cu	
Sondaje		Profundidad(m)
BRA006		424-426

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA



RESUMEN: Roca intrusiva equigranular con alteración propilítica leve. Presenta vetillas de cuarzo-feldespato-K (tipo I) cortadas por vetillas de biotita cloritizada (tipo II). Ambas vetillas son cortadas por vetillas tipo IX. Mineralización de pirita y calcopirita diseminada y asociada a vetillas tipo II y IX

Clasificación	Granodiorita (GRD)
----------------------	--------------------

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Mineralogía Primaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Plagioclasa	55	2 hasta 6	Roca intrusiva de textura fanerítica, cristales relativamente equigranulares. Los feldespatos y plagioclasas se encuentran zonados, las plagioclasas presentan macla polisintética. El cuarzo se presenta intersticial entre las plagioclasas y feldespatos, a veces conformando textura poikilítica. Las fases máficas están conformadas por cúmulos de hornblenda, biotita y magnetita. Algunas hornblendas presentan macla carlsbad
Feldespato	15	2.0	
Cuarzo	5	2.6	
Biotita	10	<1.8	
Hornblenda	13	1.0	
Magnetita	2	<0.2	
% Roca fresca	70		

Mineralogía secundaria	% Total	Tamaño (mm)	Características texturales
Clorita	10	0.1 hasta 1.5	Se presenta reemplazando cúmulos de minerales máficos. Tiende a reemplazar biotita formando un solo cristal pseudomorfo, mientras que al reemplazar hornblenda forma un agregado hojoso de granos mas pequeños. En vetillas se observa como dagas reemplazando biotita

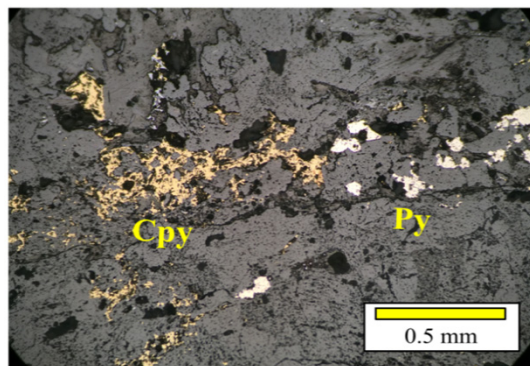
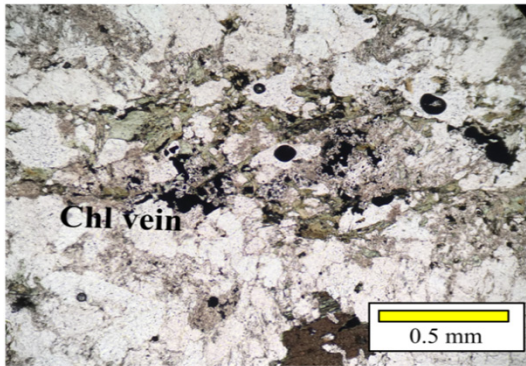
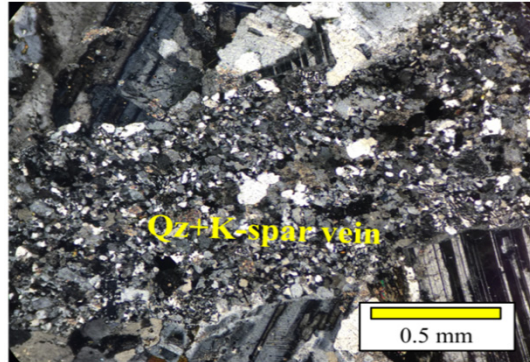
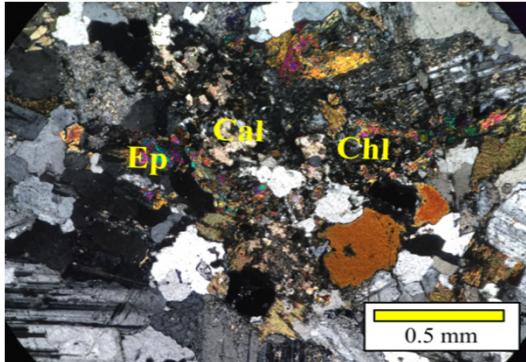
Epidota	3	0.2	Se presenta granular a tabular en cúmulos reemplazando plagioclasas y feldespatos, también como relleno de fracturas y en menor medida reemplazando cúmulos de máficos. Se presenta en paragénesis con clorita
Calcita	1	<0.3	En paragénesis con cúmulos de clorita y epidota, aparentemente reemplazando máficos
Feldespato-K	5	0.05 hasta 1	Como relleno de vetillas en paragénesis con cuarzo y biotita
Biotita	2	0.1	Dagas/hojas como relleno de vetillas . La mayoría de estos cristales se encuentran reemplazados total a parcialmente por clorita
Sericita	1	Microcristalina	Reemplazando parcialmente feldespatos y plagioclasas
Cuarzo	6	<0.3	Como relleno de vetillas en paragénesis con feldespato-K
Pirita	2	0.2	Diseminada preferentemente en vetillas de clorita-epidota-calcita y biotita-feldespato-K, en paragénesis con calcopirita
Calcopirita	1.5	0.2	Diseminada en vetillas de clorita-epidota (en menor proporción) y biotita-feldk (bastante abundante). En ambos casos se presenta en paragénesis con pirita. En general rellenando fracturas
Magnetita	<1	<0.2	Diseminada, granular euhedral a subhedral creciendo a partir de cúmulos de minerales máficos
% Roca alterada	30		

Vetillas			
Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Cuarzo	70		Vetillas de hasta 6 mm de ancho, rellenas de cuarzo y feldespato-k. Presentan forma recta, bordes irregulares. Delgado halo de alteración de sericita (1 mm)
Feldespato-K	30		
Sericita		100	

Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Biotita	60		Delgadas vetillas (<2 mm) de biotita cloritizada, feldespato-K y sulfuros. Presentan forma sinuosa y un delgado halo de sericita (<1 mm). Cortan a las vetillas descritas anteriormente
Feldespato-K	10		
Clorita	20		
Pirita	5		
Calcopirita	5		
Sericita		100	

Mineralogía	Relleno	Halo	Características (composicionales y texturales)
Clorita	70		Delgadas vetillas (<2 mm) de forma recta. No presentan halo de alteración. Cortan a todas las vetillas descritas anteriormente
Epidota	20		
Pirita	5		
Calcopirita	5		

Fotomicrografias





Genesis and evolution of the Brahma porphyry copper deposit, Maule Region, Central Chile

Díaz, V.^{1,2}, Townley, B.^{1,2}, Muñoz, M.³, Martínez, O.¹, Deckart, K.^{1,2}, Mathur, R.⁴

¹Universidad de Chile, ²Advanced Mining Technology Center, ³Universidad Andrés Bello, ⁴Juniata College

The Brahma porphyry copper prospect (35.7°S) is located in the central Chilean Andes cordillera. The deposit is emplaced in Eocene-Miocene volcanic rocks of the Abanico Formation and located within the Miocene-Pliocene metallogenic belt. This belt extends to 34°S and includes world-class porphyry Cu-Mo deposits such as Los Pelambres, Rio Blanco-Los Bronces and El Teniente. Zircon U-Pb geochronology was carried out on five samples from each main lithologic unit of the prospect and yielded emplacement ages of about 17 Ma, 14 Ma and 9 Ma. Re-Os analyses were carried out in molybdenite, chalcopyrite and pyrite from 8 samples chosen by their relative temporality of the different vein types in Brahma. Results yielded mineralization ages of 14 Ma and 9.6 Ma. From these results it is inferred that: (i) the prospect hosts at least 3 magmatic events, (ii) early mineralization is associated with the 14 Ma magmatic pulse, and (iii) economic mineralization occurred around 9 to 10 Ma probably associated with a magmatic pulse of the same age. In addition to geochronology, copper isotope ratios have been determined in sulfide minerals by MC-ICPMS. These analysis yielded $\delta^{65}\text{Cu}$ values between 0 and 9.69‰, chalcocite having the highest values (>4.94‰) and chalcopyrite-pyrite, the hypogene mineralization, having lower values (0 to 1.22‰). These preliminary results suggest that the Brahma hydrothermal system could have been formed by more than one mineralizing event, with the earliest one at 14 Ma and a continued activity for at least 4 m.y. Also, high values of $\delta^{65}\text{Cu}$ in chalcocite provide evidence of a cyclic and extensive secondary enrichment process within the deposit.

Genesis and evolution of the Brahma Porphyry Cu-Mo Prospect, Chilean Andes at ~35°45'S

Valentina Díaz^{1,2}, Marcia Muñoz³, Katja Deckart^{1,2}, Brian Townley^{1,2}, Ryan Mathur⁴, Osvaldo Martínez¹

(1) Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile

(2) Advanced Mining Technology Center, Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile

(3) Departamento de Ciencias de la Tierra, Campus Republica, Universidad Andres Bello, Santiago, Chile

(4) Department of Geology, Juniata College, Huntingdon, Pennsylvania, United States of America

The Brahma prospect is a porphyry copper type deposit located in the main Chilean Andes of central Chile (35°45'S). The deposit is emplaced in volcano-sedimentary rocks of the Abanico Formation (Eocene-early Miocene). The cross-cut relations of the prospect point it as part of a Miocene mineralizing event. In Chile, numerous deposit of late Cenozoic age have been grouped in the so called Miocene-Pliocene metallogenic belt. This belt is continuously recognized along the western slope of the main Andes until 34°S and includes the world class deposits of Los Pelambres (31°43'S), Río Blanco-Los Bronces (33°12'S) and El Teniente (34°05'S). Zircon U-Pb geochronology was carried out on five samples from each main lithologic unit of the prospect and yielded emplacement ages of about 17 Ma, 14 Ma and 10 Ma. Re-Os analyses were carried out in molybdenite from 2 samples chosen by their relative temporality of the different vein types in Brahma. Preliminary results yielded mineralization ages of 14 Ma and 9.6 Ma. From these results it is inferred that: (i) the prospect hosts at least 3 magmatic events, (ii) early mineralization is associated with the 14 Ma magmatic pulse, and (iii) economic mineralization occurred around 10 Ma probably associated with a magmatic pulse of the same age. In addition to geochronology, copper isotope ratios have been determined in sulfide minerals. These analysis yielded $\delta^{65}\text{Cu}$ values between 0 and 9.69‰, chalcocite having the highest values (>4.94‰) and chalcopyrite-pyrite, the hypogene mineralization, having lower values (0 to 4.94‰). These preliminary results suggest that the mineralization present in the Brahma prospect would have formed from more than one event, beginning at 14 Ma and being active for at least 4 Ma. Also, high values of $\delta^{65}\text{Cu}$ in chalcocite provide evidence of a cyclic and extensive secondary enrichment process within the deposit. These characteristics indicate an interesting exploratory potential for the Brahma prospect, a long-lived Cu-Mo porphyry of early Miocene age, which can be associated to the Central Chile metallogenic belt.



XV CONGRESO GEOLÓGICO CHILENO

“GEOCIENCIAS HACIA LA COMUNIDAD”

18 AL 23 DE NOVIEMBRE DE 2018, UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
CONCEPCIÓN, CHILE

Copper isotope variations in the Brahma Porphyry Cu-Mo Prospect, Chilean Andes at ~35°45'S

Valentina Diaz^{1,2}, Brian Townley^{1,2}, Katja Deckart^{1,2}, Ryan Mathur³, Marcia Munoz⁴, Osvaldo Martinez¹

(1) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile

(2) Advanced Mining Technology Center (AMTC), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile

(3) Department of Geology, Juniata College, Huntingdon, Pennsylvania, United States of America

(4) Departamento de de Ciencias de la Tierra, Campus Republica, Universidad Andres Bello, Santiago, Chile

The Brahma prospect is a porphyry copper type deposit located in the western slope of the Chilean Andes, at 35°45'S and 180 km south-southwest of the El Teniente Cu-Mo mega-deposit. The prospect is emplaced in volcano-sedimentary rocks of the Abanico Formation (late Eocene-early Miocene). Previous geochronological U-Pb and Re-Os analyses indicate that the Brahma deposit formed during early Miocene and thus it can be associated to the Miocene-Pliocene metallogenic belt of Central Chile. This belt is continuously recognized along the western slope of the main Andes until 34°S and includes the world class deposits of Los Pelambres (31°43'S), Río Blanco-Los Bronces (33°12'S) and El Teniente (34°05'S). In this work copper isotope ratios were determined in sulfide minerals (chalcopyrite and chalcocite) from 13 samples chosen by their relative temporality and alteration association in the different vein types of the Brahma prospect. Chalcocite and chalcopyrite from hydrothermal breccia matrix were also measured. These preliminary results show an extremely wide variation in $\delta^{65}\text{Cu}$ ranging from 0 to 9.59 ‰, chalcocite having the highest values (≥ 4.94 ‰) and chalcopyrite, the hypogene mineralization, having lower values. Chalcopyrite associated to potassic alteration veins shows lower values than chalcopyrite associated to chlorite-sericite, phyllic and supergene veins. In general, a continuous increase of the $\delta^{65}\text{Cu}$ values is observed respect to the temporality of events, from the potassic alteration to the supergene mineralization event. High values of $\delta^{65}\text{Cu}$ provide evidence of a cyclic and extensive secondary enrichment process within the deposit and could indicate an interesting exploratory potential for the Brahma prospect.

This work was supported by the Chilean government through the project Fondecyt 1161360 (CONICYT, Chilean national research agency).



XV CONGRESO GEOLÓGICO CHILENO

“GEOCIENCIAS HACIA LA COMUNIDAD”

18 AL 23 DE NOVIEMBRE DE 2018, UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
CONCEPCIÓN, CHILE

Geochronology of the Brahma Porphyry Cu-Mo Prospect, Chilean Andes at ~35°45'S

Valentina Diaz^{1,2}, Marcia Munoz⁴, Katja Deckart^{1,2}, Townley Brian^{1,2}, Ryan Mathur³, Osvaldo Martinez¹

(1) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile

(2) Advanced Mining Technology Center (AMTC), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile

(3) Department of Geology, Juniata College, Huntingdon, Pennsylvania, United States of America

(4) Departamento de Ciencias de la Tierra, Campus República, Universidad Andrés Bello, Santiago, Chile

The Brahma prospect is a porphyry copper type deposit located in the main Chilean Andes of central Chile (35°45'S). The deposit is emplaced in volcano-sedimentary rocks of the Abanico Formation (late Eocene-early Miocene), a cross-cut relation indicating that the prospect is part of a Miocene mineralizing event. In Chile, numerous deposits of late Cenozoic age have been grouped in the so called Miocene-Pliocene metallogenic belt. This belt is continuously recognized along the western slope of the main Andes until 34°S and includes the world class deposits of Los Pelambres (31°43'S), Río Blanco-Los Bronces (33°12'S) and El Teniente (34°05'S). Zircon U-Pb geochronology was carried out on five samples from each main lithologic unit of the Brahma prospect and yielded emplacement ages of about 17 Ma, 14 Ma and 10 Ma. Re-Os analyses were carried out in molybdenite from 2 samples chosen by their relative temporality in the different vein types. Preliminary results yielded mineralization ages of c.a. 14 Ma and 9.6 Ma. From these results it is inferred that: (i) the prospect hosts at least 3 magmatic events, (ii) early mineralization is associated with the ~14 Ma magmatic pulse, and (iii) economic mineralization occurred around 10 Ma probably associated with a magmatic pulse of the same age. These preliminary results suggest that the mineralization present in the Brahma prospect would have formed from more than one event, beginning at ~14 Ma and being active for at least 4 Ma. Such characteristics indicate an interesting exploratory potential for the Brahma prospect, a long-lived Cu-Mo porphyry deposit of early Miocene age which can be associated to the Central Chile metallogenic belt.

This work was supported by the Chilean government through the project Fondecyt 1161360 (CONICYT, Chilean national research agency). Additional support from the Fondecyt grant 11140012 is gratefully acknowledged.