



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**MODELO PETROGENÉTICO ÍGNEO PARA EL PROSPECTO BRAHMA,  
YACIMIENTO DE COBRE MIOCENO A LOS 35°45' SUR**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

OSVALDO ANDRÉS MARTÍNEZ OVIEDO

PROFESORA GUÍA:

MARCIA ALEJANDRA MUÑOZ GÓMEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

KATJA DECKART

Este trabajo fue financiado por los proyectos  
FONDECYT N°11140012 y N°1161360

SANTIAGO DE CHILE

2019

**MODELO PETROGENÉTICO ÍGNEO PARA EL PROSPECTO BRAHMA, YACIMIENTO DE COBRE MIOCENO A LOS 35°45' SUR**

En el presente estudio se establece un modelo petrogenético para el prospecto Brahma, yacimiento de cobre ubicado en el flanco occidental de la Cordillera Principal a los 35°45'S. Este modelo se construye en base a un estudio de las unidades intrusivas que componen y hospedan el yacimiento. Estas unidades se analizan mediante descripción de sondajes existentes en la propiedad minera donde se encuentra Brahma, petrografía, análisis de composición química y dataciones radiométricas de U-Pb en circones. Todos estos procedimientos analíticos se efectúan en muestras de roca tomadas desde sondajes ubicados en la zona central del prospecto Brahma. Los resultados de este estudio indican que Brahma corresponde a un sistema intrusivo multifásico y es producto del magmatismo de arco Mioceno con una afinidad calcoalcalina. En este prospecto se observan 4 unidades intrusivas principales, todas ellas con edades de cristalización dentro del Mioceno medio a tardío (14 – 9 Ma aproximadamente).

A las 4 unidades intrusivas identificadas se les denomina de la siguiente forma, ordenándolas según su temporalidad de más antigua a más joven: Granodiorita (GRD); Pórfido de Feldespato y Hornblendas redondeadas (PFHr); Tonalita (TON) y Pórfido de Feldespato y Hornblenda (PFH). GRD tiene una edad de  $14,40 \pm 0,30$  Ma y representa la inyección magmática más temprana y extensa del prospecto, la cual hospeda a los siguientes intrusivos; PFHr tiene una edad de  $14,10 \pm 0,23$  Ma; TON registra dos poblaciones de edad en sus resultados, la población más joven correspondería a su edad de cristalización con valores de  $13,64 \pm 0,52$  y  $13,84 \pm 0,54$  Ma, por otra parte se registra una población antigua de valores de  $16,60 \pm 0,57$  y  $17,5 \pm 0,90$  Ma. Esta población de edades cercanas a 17 Ma se interpreta como material heredado desde el batolito El Melado, para el que se han reportado edades Miocenas en estos valores; finalmente el intrusivo PFH registra la edad más joven del conjunto con  $9,28 \pm 0,23$  Ma. Las firmas geoquímicas de las muestras de roca analizadas señalan que Brahma es un producto del magmatismo del arco volcánico del Mioceno medio a tardío en la región. Este magmatismo tendría afinidades calcoalcalinas y se habría desarrollado sobre una corteza de aproximadamente 40-45 km de espesor.

El prospecto Brahma comparte características geoquímicas y de edad con aquellas registradas en los yacimientos que componen la franja metalogénica del Neógeno en Chile central. Además, es particularmente más similar en cuanto a tamaño, litologías identificadas, edad y patrones de tierras raras con el yacimiento Los Pelambres (~31°45'S). En base a este conjunto de características, se propone que la franja metalogénica Neógena podría extenderse hacia el sur hasta al menos los 35°45'S con Brahma como el miembro más austral hasta ahora identificado.

# TABLA DE CONTENIDO

---

1	Introducción .....	1
1.1	Presentación del Estudio .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.2.1	Objetivos Generales.....	2
1.2.2	Objetivos Específicos .....	2
1.3	Hipótesis .....	3
1.4	Ubicación y Vías de Acceso .....	3
1.5	Metodologías .....	4
1.5.1	Fase Preparativa Pre-Terreno .....	4
1.5.2	Campaña de Terreno.....	4
1.5.3	Gabinete post-terreno .....	4
2	Antecedentes Geológicos .....	7
2.1	Aspectos Generales.....	7
2.2	Morfoestructuras a los 36° Sur .....	7
2.3	Evolución Geotectónica Regional .....	9
2.4	Evolución del Magmatismo en Chile Central.....	10
2.5	Franja metalogénica del Neógeno en Chile central .....	11
2.6	Marco Geológico del Área de Estudio.....	13
2.6.1	Unidades Estratificadas en la zona de estudio y cercanías.....	14
2.6.2	Unidades Intrusivas en la zona de estudio y cercanías.....	15
3	Geología del Prospecto Brahma.....	17
3.1	Aspectos generales de la geología local en el prospecto Brahma.....	17
3.2	Descripción de sondajes.....	18
3.2.1	Sondaje BRA-002.....	19
3.2.2	Sondaje BRA-003.....	21
3.2.3	Sondaje BRA-004.....	23
3.2.4	Sondaje BRA-006.....	25

3.3	Resultados generales de los sondajes descritos en Brahma .....	26
4	Petrografía de unidades principales en el prospecto Brahma.....	30
4.1	Granodiorita (GRD).....	30
4.2	Pórfido de Feldespato y Hornblendas redondeadas (PFHr).....	32
4.3	Tonalita (TON) .....	34
4.4	Pórfido de feldespato y hornblenda (PFH) .....	36
4.5	Resultados generales e interpretación de la petrografía de las muestras de Brahma.....	38
5	Geocronología del prospecto Brahma .....	40
5.1	Edades radiométricas U-Pb en circones de unidades ígneas de Brahma .....	40
5.2	Interpretación de edades radiométricas y modelo geológico del prospecto Brahma.....	43
6	Petroquímica del prospecto Brahma .....	46
6.1	Elementos mayores .....	46
6.2	Elementos trazas compatibles .....	50
6.3	LILEs ( <i>Large Ion Lithophile Elements</i> ) y HFSEs ( <i>High Field Strength Elements</i> ).....	51
6.4	REEs ( <i>Rare Earth Elements</i> ) .....	53
6.5	Otros resultados petroquímicos .....	55
7	Discusión geoquímica y petrogénesis ígnea para el prospecto Brahma.....	58
7.1	Brahma frente a otros yacimientos en Chile central .....	61
8	Conclusiones .....	68
	Bibliografía.....	70

Anexos: (A) Descripciones de sondajes, (B) Descripciones petrográficas de muestras de mano, (C) Descripciones petrográficas de lámina delgada, (D) Edades radiométricas de U-Pb en circones, (E) Análisis químico de roca total y (F) Procedimientos Analíticos.

## INDICE DE FIGURAS

---

Fig. 1.1 – Mapa de rutas en la Región del Maule. En polígono morado se observa la propiedad minera donde se encuentra Brahma (perteneciente a Condor Resources Inc.). Tomado de Dirección de Vialidad – MOP <a href="http://www.mapas.mop.cl/cc2016/vi-vii.jpg">http://www.mapas.mop.cl/cc2016/vi-vii.jpg</a> el 03/12/2018.3.....	3
Fig. 1.2 – Ubicación de 16 muestras correspondientes a los 4 sondajes centrales estudiados en Brahma. Perfil proyectado sobre la traza A-A' que muestra Fig. 3.1.....	6
Fig. 2.1 – Unidades morfoestructurales que componen el margen Andino de Sudamérica y aquellas presentes en Chile entre los 33°S y 36°S. El recuadro naranja indica el área de estudio. Modificado de Charrier <i>et al.</i> (1996).....	8
Fig. 2.2 – Esquema con la distribución de la franja Neógena en Chile y la ubicación de los principales yacimientos de esta franja en Chile central. Se incluyen las principales características de convergencia entre la Placa de Nazca y el margen continental chileno. Modificado de Muñoz (2011).....	12
Fig. 2.3 – Modelo genético para los yacimientos Miocenos de los Andes centrales en el que se resalta el rol de la fase hornblenda en la base de la corteza. Tomado de Kay y Mpodozis (2001).....	13
Fig. 2.4 – Mapa geológico del flanco occidental de la Cordillera Principal en los alrededores de la zona de estudio (~35°30' – 36°S en la Región del Maule). Se incluyen algunas dataciones radiométricas del Batolito El Melado y plutón La Invernada.....	14
Fig. 3.1 – Mapa litológico de superficie del prospecto Brahma (tomado y traducido de Burns <i>et al.</i> , 2008). La traza A-A' indica la orientación del perfil litológico propuesto en el capítulo 5 de este trabajo (Fig. 5.7).....	18
Fig. 3.2 – TON con xenolito oscuro inconcluso (probablemente de PFHr) a los 153 m del sondaje BRA-002.....	20
Fig. 3.3 – Brecha hidrotermal monomíctica de TON a los 259 m del sondaje BRA-002.....	20
Fig. 3.4 – Brecha hidrotermal polimíctica con clastos de TON y PFHr a los 362 m del sondaje BRA-002.....	21
Fig. 3.5 – PFHr con alteración propilítica moderada a los 155 m del sondaje BRA-003.....	22
Fig. 3.6 – PFH con alteración fílica intensa a los 357 m del sondaje BRA-003.....	22
Fig. 3.7 – PFHr con alteración fílica muy penetrativa a los 413 m del sondaje BRA-003.....	23
Fig. 3.8 – Brecha hidrotermal polimíctica con clastos de PFH, PFHr y otros no identificados debido a la alteración a los 138 m del sondaje BRA-004.....	24
Fig. 3.9 – PFH con alteración fílica a los 174 m de BRA-004.....	24

Fig. 3.10 – GRD con alteración potásica moderada de fondo y alteración propilítica superpuesta a los 111 m del sondaje BRA-006.....	25
Fig. 3.11 – PFH con alteración filica moderada a los 253 m del sondaje BRA-006.....	26
Fig. 3.12 – PFHr intruye a GRD a los 410 m del sondaje BRA-002 .....	28
Fig. 3.13 – Tonalita intruye a PFHr a los 252 m del sondaje BRA-002. Se observa textura de flujo en el contacto y halo de alteración hacia PFHr.....	28
Fig. 3.14. – Tonalita intruye a PFHr a los 217 m del sondaje BRA-002.....	29
Fig. 3.15 – PFH en contacto con TON a los 436 m del sondaje BRA-002, se observa un halo de alteración hacia TON.....	29
Fig. 4.1 – Muestra de mano B06-111 de la unidad GRD.....	31
Fig. 4.2 – Microfotografía a nícoles cruzados con aumento de 5X de la muestra B06-111 correspondiente a la unidad GRD. Se observan: plagioclasa zonada, biotita cloritizada y descompuesta en los bordes, relictos de textura consertal.....	31
Fig. 4.3 – Microfotografía a nícoles paralelos con aumento de 5X de la muestra B06-111 correspondiente a la unidad GRD. Se observan: texturas poikilítica de opacos dentro de biotitas reemplazadas a clorita.....	31
Fig. 4.4 – Muestra de mano B03-155 de la unidad PFHr con alteración propilítica.....	32
Fig. 4.5 – Muestra de mano B03-413 de la unidad PFHr con alteración filica intensa.....	33
Fig. 4.6 – Microfotografía a nícoles paralelos con aumento de 5X de la muestra B03-357 correspondiente a la unidad PFHr. Se observan: epidota reemplazando selectivamente cristales primarios de hornblenda y plagioclasas, clorita presente como reemplazo de cristales primarios y en la masa fundamental, pirita diseminada de manera isótropa.....	33
Fig. 4.7 – Microfotografía a nícoles cruzados con aumento de 5X de la muestra B03-472 correspondiente a la unidad PFHr. Se observan: múltiples cristales de cuarzo y plagioclasa fragmentados en una masa fundamental muy fina, epidota y clorita presentes como alteración con menor arcilla.....	33
Fig. 4.8 – Microfotografía a nícoles cruzados con aumento de 5X de la muestra B03-472 correspondiente a la unidad PFHr. Se observan: Plagioclasas de distintos tamaños, algunas se observan zonadas. En la imagen un cristal de plagioclasa de 2 mm de largo muestra una vetilla de anhidrita de 0,1 mm de ancho. También se observa epidota menor a 0,2 mm y sericita.....	34
Fig. 4.9 – Muestra de mano B02-5 de brecha hidrotermal con matriz de turmalina, sección monomítica con clastos de TON.....	35
Fig. 4.10 – Muestra de mano B02-7 de la unidad TON intruyendo a PFHr.....	35

Fig. 4.11 – Microfotografía a nícoles cruzados con aumento de 5X de la muestra B03-472 correspondiente a la unidad TON. Se observan: pseudomorfo de hornblenda reemplazado por epidota, clorita también reemplazando máficos primarios, cuarzo y plagioclasa en textura consertal y con reabsorciones.....	35
Fig. 4.12 – Microfotografía a nícoles cruzados con aumento de 5X de la muestra B02-159 correspondiente a la unidad TON. Se observan plagioclasas con zonación oscilatoria, clorita y smectitas reemplazan minerales primarios, también sericita reemplazan a plagioclasas.....	36
Fig. 4.13 – Muestra de mano B06-253 de la unidad PFH.....	37
Fig. 4.14 – Microfotografía a nícoles paralelos con aumento de 5X de la muestra B06-253 correspondiente a la unidad PFH. Se observan hornblendas de hasta 0,5 mm reemplazadas parcialmente por epidota además de presentarse descompuestas desde sus bordes, piritita y apatito.....	37
Fig. 4.15 – Microfotografía a nícoles cruzados con aumento de 5X de la muestra B05-272 correspondiente a la unidad PFH. Se observan fenocristales de cuarzo y plagioclasa fragmentados y con reabsorción avanzada en cuarzo, cristales de epidota como alteración y piritita.....	38
Fig. 5.1 – Concordia inversa, probabilidad relativa y edades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ de 26 circones analizados en la muestra B06-411 correspondiente a la unidad GRD.....	40
Fig. 5.2 – Concordia inversa, probabilidad relativa y edades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ de 32 circones analizados en la muestra B03-155 correspondiente a la unidad PFHr.....	41
Fig. 5.3 – Concordia inversa, probabilidad relativa y edades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ de 33 circones analizados en la muestra B02-9 correspondiente a la unidad TON.....	41
Fig. 5.4 – Concordia inversa, probabilidad relativa y edades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ de 31 circones analizados en la muestra B02-159 correspondiente a la unidad TON.....	42
Fig. 5.5 – Concordia inversa, probabilidad relativa y edades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ de 23 circones analizados en la muestra B06-253 correspondiente a la unidad PFH.....	42
Fig. 5.6 – Paragénesis de las vetillas y alteraciones hidrotermales reconocidas en Brahma, tomado de Díaz <i>et al.</i> (2018).....	43
Fig. 5.7 – Perfil litológico del prospecto Brahma proyectado sobre la traza A-A' mostrada en la Fig. 3.1. Se incluye la ubicación de las muestras datadas mediante U-Pb en circones y las edades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ en sí obtenidas.....	45
Fig. 6.1 – Diagrama TAS para las muestras del prospecto Brahma. En líneas negras continuas se presentan los límites composicionales para rocas extrusivas (Le Maitre <i>et al.</i> , 1989) y en líneas naranjas segmentadas los límites composicionales para rocas intrusivas (modificación TAS de Wilson, 1989) La línea segmentada burdeo muestra el límite entre campos de la serie alcalina y subalcalina de Irvine y Baragar (1971).....	47

Fig. 6.2 – Diagrama AFM para las rocas intrusivas del prospecto Brahma. La línea azul representa el límite calcoalcalino-toleítico de Irvine y Baragar (1971) y la línea roja el mismo límite determinado por Kuno (1966). A: Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O; F: FeO <sub>T</sub> ; M: MgO.....	47
Fig. 6.3 – Diagrama FeO <sub>T</sub> /MgO vs. SiO <sub>2</sub> , donde FeO <sub>T</sub> corresponde al contenido total de hierro.....	48
Fig. 6.4 – Diagramas Harker para 9 óxidos elementos mayores (Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ti y P) y el número de magnesio (#Mg) de rocas intrusivas de Brahma. Las flechas segmentadas representan las tendencias parciales de concentración (cuando se logran identificar) para las unidades faneríticas en azul y porfídicas en rojo.....	49-50
Fig. 6.5 – Diagramas Harker para los elementos trazas compatibles V, Ni, Co, Sc y Cr contenidos en las rocas intrusivas de Brahma. Las flechas segmentadas representan las tendencias parciales de concentración (cuando se logran identificar) para las unidades faneríticas en azul y porfídicas en rojo.....	51
Fig. 6.6 – Diagramas Harker para los LILEs Ba, Sr y Rb contenidos en las rocas intrusivas de Brahma. Las flechas segmentadas representan las tendencias parciales de concentración (cuando se logran identificar) para las unidades faneríticas en azul y porfídicas en rojo.....	52
Fig. 6.7 – Diagramas Harker para los HFSEs Y, Hf, Zr y Th contenidos en las rocas intrusivas del prospecto Brahma.....	53
Fig. 6.8 – Diagrama de variación en la concentración de REEs con respecto a SiO <sub>2</sub> para las rocas intrusivas del prospecto Brahma.....	54
Fig. 6.9 – Diagramas de concentraciones de REEs normalizadas a valores condriticos de Sun y McDonough (1989).....	55
Fig. 6.10 – Diagrama multielementos normalizado a NMORB de Sun y McDonough (1989) Para las muestras de del prospecto Brahma.....	56
Fig. 6.11 – Diagramas de discriminación tectónica de Pearce <i>et al.</i> (1984). VAG: Volcanic Arc Granites; WPG: Within Plate Granites; syn-COLG: syn-Collisional Granites; ORG: Ocean Ridge Granites. Las líneas rojas delimitan a los ORG anómalos.....	56
Fig. 6.12 – Diagramas de Sr/Y vs. Y y La/Yb vs. Yb, se incluyen los límites para rocas adakite-like y andesitas-dacitas-riolitas normales definidos por Richard y Kerrich (2007).....	57
Fig. 7.1 – Coeficientes de partición para REEs en distintas fases minerales. Tomado de Rollinson (1993). Los datos de hornblenda son para una andesita basáltica.....	59
Fig. 7.2 – Modelo de espesor cortical según Tassara <i>et al.</i> (2006), se incluye la topografía a los pies de la Cordillera Principal de Chile entre 35° y 38°S tomada de NOAA, 2006. Las barras negras indican cálculos exhumación mínima y máxima según Spikings <i>et al.</i> (2008) y la línea segmentada corresponde a una interpolación lineal según los mismos autores. Tomado de Spikings <i>et al.</i> (2008).....	60

Fig. 7.3 – Edades de la Franja Neógena de Chile central y prospectos que guardan relación a ella. Edades obtenidas de Bertens (2003), Muñoz (2008), Lopez y Vergara (2010), Deckart et al. (2013) y Díaz et al. (2018). Los contenidos de cobre indicados entre parentesis corresponden a la suma de recursos, reservas y producción registrada que se presentan en la Tabla 7.2.....	61
Fig. 7.4 – Patrón de tierras raras de Brahma comparado con los intrusivos estériles Cerro Mesón Alto (CMA, ~66% SiO <sub>2</sub> ), Plutón La Gloria (PLG, ~64% SiO <sub>2</sub> ), Batolito San Francisco (BSF, ~60% SiO <sub>2</sub> ) y Yerba Loca (YL, 56% SiO <sub>2</sub> ). Datos de los intrusivos estériles se presentan en sombra gris y fueron tomados de Deckart <i>et al.</i> (2010).....	62
Fig. 7.5 – Patrón de tierras raras de Brahma comparado con los intrusivos de la región de Los Pelambres, intrusivos precursores de la mineralización (Perelló <i>et al.</i> , 2012) en sombra gris corresponden al Complejo Intrusivo Chalinga etapa 3 (CIC-3, ~62% SiO <sub>2</sub> ) e Intrusivos hipabisales de Río Santa Cruz (IRSC, ~65% SiO <sub>2</sub> ). Pórfidos mineralizadores de Pelambres en sombra rosada (~66% SiO <sub>2</sub> ). Compilación de Los Pelambres tomada de Bergoeing (2016).....	63
Fig. 7.6 – Patrón de tierras raras de Brahma comparado con los intrusivos de la región de Río Blanco-Los Bronces, intrusivos estériles en sombra gris (~67% SiO <sub>2</sub> ) y Pórfido Río Blanco-San Francisco (PRB-SF, ~64% SiO <sub>2</sub> ) en sombra rosada. Compilación de RB-LB tomada de Lopez y Vergara (1982).....	63
Fig. 7.7 - Patrón de tierras raras de Brahma comparado con los intrusivos de la región de El Teniente, intrusivos estériles en sombra gris corresponden a los miembros del Teniente Volcanic Complex (TVC): Maqui Chico (MC, ~63% SiO <sub>2</sub> ), Lower Sewell (LS, ~58% SiO <sub>2</sub> ) y Upper Sewell (US, ~ 58% SiO <sub>2</sub> ). Pórfidos mineralizadores de El Teniente (PET, ~67% SiO <sub>2</sub> ) en sombra rosada. Compilación de El Teniente tomada de Kay <i>et al.</i> (2005).....	64
Fig. 7.8 – Patrón de tierras raras de Brahma comparado con los intrusivos del prospecto Rosario de Rengo en sombra azul (promedio de SiO <sub>2</sub> de ~64%). Compilación de Rosario de Rengo tomada de Muñoz (2008).....	65
Fig. 7.9 – Razones de La/Yb vs. edad de las unidades identificadas en este trabajo en Brahma frente a las que se registran en las rocas magmáticas de El Teniente y de la SVZ (barras azules). El eje inferior azul representa la latitud de los centros eruptivos de SVZ y no es válida la posición de latitud para las demás unidades. Modificado de Kay <i>et al.</i> (2005).....	66
Fig. 7.10 – Razones de La/Yb vs. edad de las unidades identificadas en este trabajo en Brahma frente a las que se registran en las rocas magmáticas de Los Pelambres (compilación de Bergoeing, 2016) y de la SVZ (barras azules). El eje inferior azul representa la latitud de los centros eruptivos de SVZ y no es válida la posición de latitud para las demás unidades. Modificado de Kay <i>et al.</i> (2005).....	66
Fig. 7.11 – Diagramas de La/Sm vs. Sm/Yb para las unidades identificadas en el prospecto Brahma. Se incluyen las mismas razones para las unidades estériles CMA, PLG, BSF y YL (Deckart <i>et al.</i> 2010) y para los intrusivos Miocenos de Pelambres (Bergoeing, 2016; Reich <i>et al.</i> 2003; Maydagán <i>et al.</i> , 2011).....	67

## INDICE DE TABLAS

---

Tabla 1.1 – Ubicación en coordenadas UTM y elevación en m s.n.m. de las 21 muestras tomadas en Brahma. Los procedimientos aplicados en estas muestras son DM: Descripción macroscópica; DLD: Descripción de lámina delgada; AQ: Análisis químico de roca total; DR: Datación radiométrica de U-Pb en circones.....	5
Tabla 3.1 – Ubicación, orientación, inclinación y total de metros perforados para los 7 sondajes existentes en el prospecto Brahma, en verde los 4 sondajes descritos en este trabajo.....	18
Tabla 3.2 – Resumen de mejores resultados de leyes de Cu en tramos de los 7 sondajes efectuados en Brahma (Burnz <i>et al.</i> , 2008).....	27
Tabla 4.1 – Abreviaciones minerales usadas en las microfotografías de este capítulo.....	30
Tabla 5.1 – Resumen de los resultados de dataciones U-Pb efectuadas en el prospecto Brahma.....	43
Tabla 6.1 – Compilación de características que reúnen las rocas de tipo adakítico según Richards y Kerrich (2007), se destaca si las muestras de Brahma cumplen cada una de ellas y comentarios adicionales.....	57
Tabla 7.1 – Razones de La/Yb para las 15 muestras analizadas en el prospecto Brahma.....	60
Tabla 7.2 – Principales indicadores de contenido de cobre en los megayacimientos de cobre presentes en Chile central según Corporación Chilena del Cobre (2016).....	62

# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO

El margen continental chileno contiene gran parte de las reservas de cobre y es el primer productor de este metal a nivel mundial. El cobre producido por Chile proviene en su gran mayoría de yacimientos de tipo pórfido cuprífero. Debido a su importancia económica, estos depósitos han sido objeto de innumerables estudios con el fin de generar una caracterización para ellos. También, un objetivo importante de estudiar los pórfidos cupríferos es comprender las condiciones propicias para su formación permitiendo obtener más y mejores herramientas de exploración.

La evolución geológica de Chile ha presentado una subducción continua al menos desde el Jurásico (Mpodosis y Ramos, 1989; Charrier y Muñoz 1994), incluso estudios más recientes señalan que la subducción habría comenzado Carbonífero inferior (Coloma *et al.*, 2017; del Rey *et al.*, 2016). Esto constituye un ambiente ideal para la formación de pórfidos cupríferos, ya que en esta región se han sucedido una serie de arcos magmáticos los cuales han ido migrando hacia el este según cambia la configuración geodinámica de la subducción y velocidades de convergencia en las placas participantes. Previo al cese de actividad de cada uno de estos arcos magmáticos y su posterior desplazamiento dentro de un régimen tectónico compresivo, es cuando se han generado diversos yacimientos de tipo pórfido cuprífero a lo largo del margen continental (Camus, 2003 y referencias ahí citadas). Esta asociación entre depósitos y arcos magmáticos ha llevado a conformar lo que se conoce como franjas metalogénicas, presentando cada una de ellas distintas edades y características que permiten distinguirlas una de otra.

La subducción activa y el magmatismo asociado no son condiciones suficientes para formar pórfidos cupríferos, más bien estos representan una ocurrencia anómala como procesos puntuales y breves en el tiempo (aunque en el caso de Chile, se registra la ocurrencia de pórfidos sobre una larga extensión espacial aproximadamente N-S constituyendo franjas metalogénicas) dentro de la evolución de un arco volcánico. Estos procesos tienen características particulares y la determinación de estas en términos de la génesis de los cuerpos mineralizados, significa obtener mejores herramientas de exploración.

Actualmente, el descubrimiento de nuevos yacimientos de tipo pórfido cuprífero ha ido disminuyendo en cantidad y calidad, lo que es un resultado directo de la ausencia de depósitos expuestos no explorados. Una de las estrategias para alcanzar más hallazgos de depósitos interesantes económicamente ha sido entonces buscar en zonas cubiertas y/o también en zonas menos exploradas. Esto último, hace particularmente importante evaluar el potencial metalogénico fuera de las regiones que ya tienen una madurez relevante en cuanto a exploración. En Chile, por ejemplo, este es el caso de la región Andina al sur de los  $\sim 34^{\circ}\text{S}$ , límite meridional de la Franja Metalogénica Neógena, la cual alberga algunos de los depósitos de tipo pórfido cuprífero más grandes del planeta (Los Pelambres, Río Blanco-Los Bronces y El Teniente). En los últimos años, esta región ha sido objeto de una renovada atención con respecto a su potencial

metalogénico y actualmente algunos prospectos se encuentran en evaluación, como por ejemplo Rosario de Rengo a los 34°45'S.

La actividad magmática que acompaña invariablemente la formación de depósitos de tipo pórfido cuprífero constituye una de las herramientas para estudiar y trazar su génesis. En particular, el estudio de características como la composición química y mineralógica, junto con el estilo y naturaleza del magmatismo son un enfoque para inferir cómo ha evolucionado la geología que controla los procesos del escenario de interés. Lo anterior es útil debido a que es posible reconocer y comparar firmas composicionales con otras similares ya conocidas, permitiendo establecer relaciones con condiciones geológicas congruentes.

Sobre estas premisas se fundamenta este trabajo, el cual se contextualiza dentro de los proyectos FONDECYT 11140012 y 1161360. En particular, este estudio se enfoca en las rocas ígneas relacionadas a la mineralización del prospecto Brahma (35°45'S; propiedad de Condor Resources Inc.). Dicho prospecto presenta características que indican clasificación como de tipo pórfido cuprífero (Burns *et al.*, 2008; Sánchez y Motta, 2013) y se encuentra ubicado en la Cordillera Principal de la Región del Maule, la cual es una región de los Andes que a la fecha no cuenta con descubrimientos de interés económico. Anterior a este trabajo, no se han realizado dataciones absolutas para las unidades presentes en el prospecto ni para la mineralización presente. Sin embargo, se observa que Brahma está hospedado en una secuencia estratificada volcanoclástica altamente deformada que corresponde a la Formación Abanico, por lo tanto, se sabe *a priori* que la edad de Brahma es al menos menor a la de dicha formación (Eoceno tardío – Mioceno temprano según Charrier *et al.*, 2007).

Integrando aspectos petrográficos, químicos y cronológicos, en este trabajo se busca establecer un modelo petrogenético de las rocas intrusivas que permita caracterizar el prospecto Brahma. Adicionalmente, se contempla contextualizar dichos procesos genéticos dentro de la evolución Andina regional contemporánea y discutir los resultados en el marco de las franjas metalogénicas conocidas.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivos Generales**

Los objetivos generales de este trabajo son establecer un modelo petrogenético para las unidades ígneas relacionadas a la mineralización del prospecto Brahma, caracterizando cada una de ellas según sus aspectos petrográficos, geoquímicos y edades radiométricas. También, se busca contextualizar dicho modelo en el marco de la evolución Andina contemporánea al desarrollo del yacimiento Brahma. Finalmente, se tiene como objetivo inferir las implicancias de lo anterior en un modelo metalogénico para esta región.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos de este trabajo, se busca identificar las unidades ígneas mayores presentes en los sondeos centrales del prospecto Brahma y su distribución en profundidad. Luego, se pretende caracterizar la petrografía y geoquímica de las unidades ígneas identificadas

en los sondajes centrales de Brahma. Además, se busca deducir la evolución del prospecto Brahma integrando los resultados anteriores con observaciones de temporalidad relativa y dataciones radiométricas. Finalmente, se pretende integrar toda la información anterior para inferir un modelo petrogenético para las unidades ígneas estudiadas, y discutir los resultados obtenidos dentro de: (1) el marco de la evolución Andina contemporánea y (2) la formación de franjas metalogénicas Andinas.

### 1.3 HIPÓTESIS

Por su ubicación y los antecedentes geológicos disponibles, las rocas intrusivas del prospecto Brahma representarían parte de la actividad magmática del arco Mioceno en la región. Como se ha observado en regiones adyacentes, dicha actividad tendría afinidades geoquímicas calcoalcalinas propias de un margen convergente activo. Además, se espera que las características composicionales de Brahma sean propicias a la formación de pórfidos cupríferos como los que se reconocen en los yacimientos que forman la franja metalogénica del Neógeno en Chile central.

### 1.4 UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El prospecto Brahma está ubicado geográficamente 320 km al sur de Santiago, 60 km al este de la ciudad de Talca y 40 km al NE de la ciudad de Linares, en la zona de Colbún Alto, Región del Maule (Fig. 1.1). Esta ocurrencia mineral está en el frente occidental de la Cordillera Principal Andina aproximadamente a  $35^{\circ}45'S$ , en la ladera sur del río Maule. El acceso a la zona desde Santiago es por la Ruta 5 Sur, pasado el segundo acceso a Talca (hacia el sur) por el desvío hacia San Clemente, en el cual se recorren aproximadamente 60 km por la ruta 115-CH hasta la propiedad minera de Brahma (Fig. 1.1).

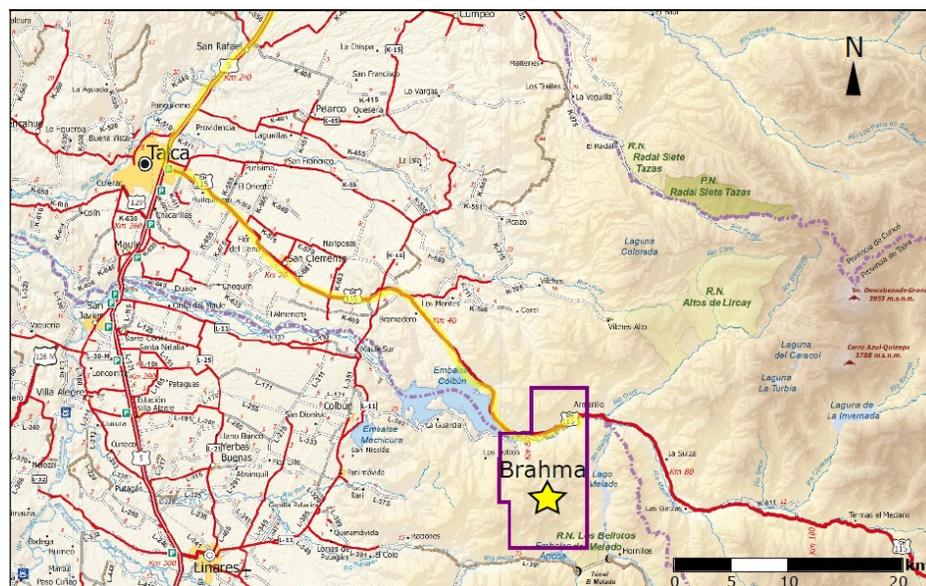


Fig. 1.1 – Mapa de rutas en la Región del Maule. En polígono morado se observa la propiedad minera donde se encuentra Brahma (perteneciente a Condor Resources Inc.). Tomado de Dirección de Vialidad – MOP <http://www.mapas.mop.cl/cc2016/vi-vii.jpg> el 03/12/2018.

## **1.5 METODOLOGÍAS**

Con el fin de cumplir los objetivos mencionados se llevan a cabo diferentes tareas, las que se dividen a continuación en las siguientes etapas de trabajo:

### **1.5.1 Fase Preparativa Pre-Terreno**

En esta fase inicial se incluye una revisión bibliográfica para comprender el contexto geológico que engloba la ocurrencia mineral estudiada en cuanto al marco geológico y metalogénico correspondiente, referidos a la región donde se encuentra el prospecto Brahma y zonas circundantes.

### **1.5.2 Campaña de Terreno**

Con una duración de 7 días efectivos, esta etapa contempla el mapeo de 4 sondajes dentro de los 7 existentes en el prospecto Brahma. El enfoque de las descripciones es principalmente litológico, sin embargo, también se incluyen observaciones de alteración y mineralización presentes, entre otras. La descripción de sondajes completa se incluye en el Anexo A. En esta campaña se recolectan 21 muestras con la finalidad de describir macroscópicamente y mediante microscopía óptica de luz transmitida cada una de ellas. Las descripciones petrográficas de las 21 muestras de mano se incluyen en el Anexo B y las descripciones de lámina delgada en el Anexo C, la ubicación de estas muestras se puede observar en la Tabla 1.1, 16 muestras del conjunto total corresponden a los 4 sondajes centrales descritos (Fig. 1.2).

### **1.5.3 Gabinete post-terreno**

Se realiza un catastro del total de muestras, describiendo cada una según pautas petrográficas correspondientes al tipo de litología. A cada muestra se le asigna una ubicación espacial en coordenadas UTM incluyendo elevación con respecto al nivel del mar. Adicionalmente, se indica qué tipo de análisis o procedimiento se debe realizar a cada espécimen cuando corresponda (Tabla 1.1)

Del conjunto de muestras recolectadas en terreno, se escogen 17 muestras que representen de mejor forma la unidad litológica a la que corresponde cada una y tengan menor grado de alteración para en ellas realizar cortes de lámina delgada. Luego, se describen estos cortes mediante el uso de microscopía óptica de luz transmitida en los laboratorios de microscopía del Departamento de Geología y del Advanced Mining Technology Center (AMTC), ambos en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile. Con el uso de las observaciones microscópicas se evalúa la calidad de cada muestra para realizar análisis químico de roca total y separación de circones para posterior datación. En la Tabla 1.1 se muestra la información de ubicación y procedimientos aplicados en cada muestra.

Luego de realizar una selección de 5 muestras propicias para datación geocronológica, se toman 3 kg de cada una de ellas y se envían a molienda a la empresa Bureau Veritas Chile Group. Luego el polvo de roca resultante fue tratado por el técnico Juan Vargas quien realizó una separación de circones. Posteriormente se realizan dataciones radiométricas de U-Pb en estos circones mediante el método de *Laser Ablation – Inductive Coupled Plasma – Mass Spectrometer* (LA-ICP-MS) en el Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Queretaro,

México. Se obtuvo un total de 145 circones datados con aproximadamente 29 circones para cada muestra. Los resultados en detalle de estos análisis se presentan en el Anexo D.

Tabla 1.1 – Ubicación en coordenadas UTM y elevación en m s.n.m. de las 21 muestras tomadas en Brahma. Los procedimientos aplicados en estas muestras son DM: Descripción macroscópica; DLD: Descripción de lámina delgada; AQ: Análisis químico de roca total; DR: Datación radiométrica de U-Pb en circones.

Muestra	X (UTM)	Y (UTM)	Z (m s.n.m.)	Procedimientos
B02 064	6039776	301126	817	DM, DLD, AQ
B02 159	6039747	301142	728	DM, DLD, AQ, DR
B02 210	6039732	301151	679	DM, DLD, AQ
B02 403	6039676	301183	499	DM, DLD, AQ
B02-2	6039676	301184	501	DM, AQ
B02-7	6039731	301152	674	DM, AQ
B02-9	6039788	301119	854	DM, DLD, DR
B03 155	6039546	301550	870	DM, DLD, DR
B03 357	6039599	301550	675	DM, DLD, AQ
B03 399	6039609	301550	634	DM, DLD
B03 472	6039628	301550	564	DM, DLD
B03-2	6039598	301550	677	DM, AQ
B04 387	6039342	301286	617	DM, DLD, AQ
B05 193	6038972	301210	808	DM, AQ
B05 272	6038991	301229	734	DM, DLD, AQ
B06 111	6039536	301822	996	DM, DLD, AQ
B06 253	6039536	301797	857	DM, DLD, AQ, DR
B06 411	6039536	301769	700	DLD, AQ, DR
B07 053	6038583	301035	984	DLD
B07 222	6038603	301055	817	DLD
B07 298	6038613	301065	742	DLD, AQ

Además de una selección de muestras para datación, también se elige un grupo de 15 muestras para molienda (también realizado por la empresa Bureau Veritas Chile Group) y análisis químico de roca total mediante *Inductive Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometer* (ICP-OES) e ICP-MS. Estos análisis se llevaron a cabo en el laboratorio Activation Laboratories Ltd (ActLabs), Ontario, Canadá. Los resultados completos de análisis químico se presentan en el Anexo E y los detalles de los procedimientos analíticos se presenta en el Anexo F.

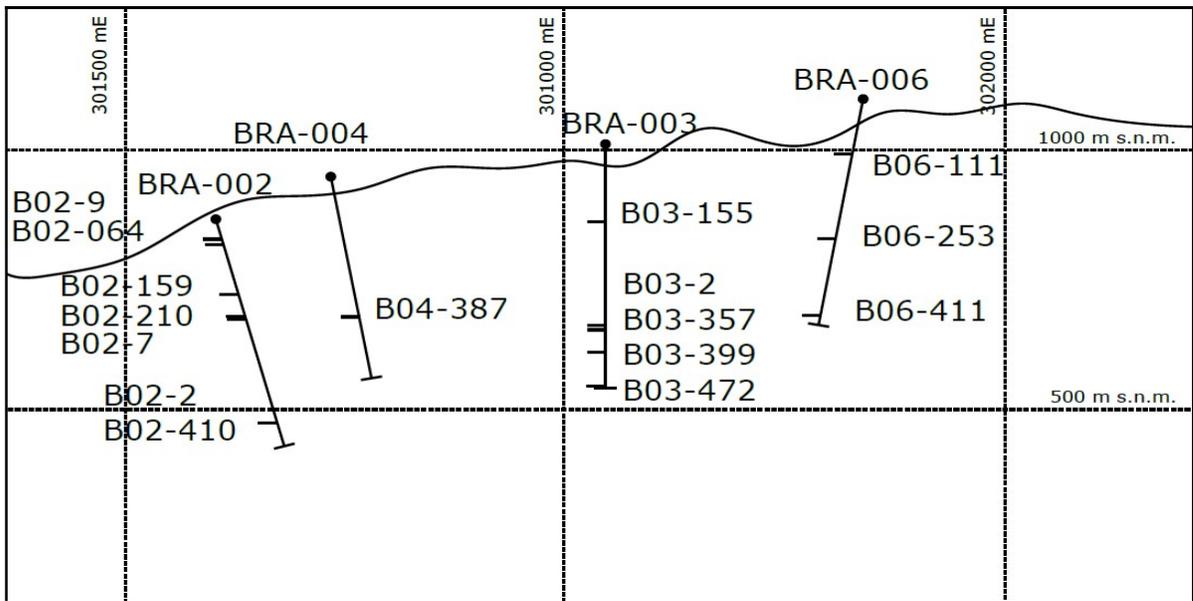


Fig. 1.2 – Ubicación de 16 muestras correspondientes a los 4 sondajes centrales estudiados en Brahma. Perfil proyectado sobre la traza A-A' que muestra Fig. 3.1.

## 2 ANTECEDENTES GEOLÓGICOS

---

### 2.1 ASPECTOS GENERALES

El prospecto Brahma se ubica en el flanco oeste de la Cordillera Principal Andina a la latitud de 35°45'S. Este depósito presenta concentraciones anómalas de Cu y Mo dentro de rocas intrusivas emplazadas en una roca huésped correspondiente a una granodiorita de gran extensión reconociéndose en un área de aproximadamente 6 km<sup>2</sup> (Burns *et al.*, 2008). El sistema magmático de Brahma se encuentra intruyendo a una secuencia de rocas volcánicas y volcanoclásticas pertenecientes a la Formación Abanico. Las edades de la Fm. Abanico van desde el Eoceno al Mioceno temprano (Charrier *et al.*, 1996; Charrier *et al.*, 2007; Flynn *et al.*, 2003).

La ubicación del prospecto Brahma en el contexto geotectónico y metalogénico de Chile es interesante por varios aspectos. La posición del depósito mineral Brahma se encuentra en una zona de subducción actualmente activa y normal con aproximadamente 30° de buzamiento aproximadamente 3° de latitud al sur de la zona de *flat slab* (27°-33°S). Además, Brahma se encuentra en una prolongación del lineamiento que constituye la Franja Metalogénica del Neógeno reconocida formalmente hasta los ~34°S.

### 2.2 MORFOESTRUCTURAS A LOS 36° SUR

Las unidades morfoestructurales reconocidas en la zona de estudio y latitudes contiguas corresponden de oeste a este a: Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal (Fig. 2.1). Estas 3 unidades presentan una orientación N-S en la porción norte de la zona de transición entre los 33° y 33°40'S, mientras que al sur de esta última latitud la orientación se vuelve NNE-SSW.

En su conjunto, la Cordillera de la Costa representa un homoclinal con leve manteo al este de rocas que tienen edades desde el Paleozoico tardío hasta el Cretácico, sin relación a movimientos importantes debido a estructuras compresivas (Wall *et al.*, 1999). A la latitud de estudio (35 – 36°S) esta cordillera puede ser dividida en dos flancos. El flanco oeste presenta alturas topográficas menores a 500 m s.n.m. y se compone de una serie de terrazas marinas que van del Plioceno al Pleistoceno (Wall *et al.*, 1996; Rodríguez *et al.*, 2012), dispuestas sobre cuerpos plutónicos y complejos acrecionarios que representan el basamento, con edades desde el Paleozoico tardío al Jurásico medio (Selles y Gana, 2001; Willner, 2005; Richter *et al.*, 2007). Por otro lado, en el flanco este se alcanzan mayores elevaciones topográficas que en estas latitudes alcanzan los 800 m s.n.m. Este borde oriental se compone por secuencias volcánicas y sedimentarias de edades Mesozoicas (Thomas, 1958; Wall *et al.*, 1999; Sellés y Gana, 2001; Bravo, 2001).

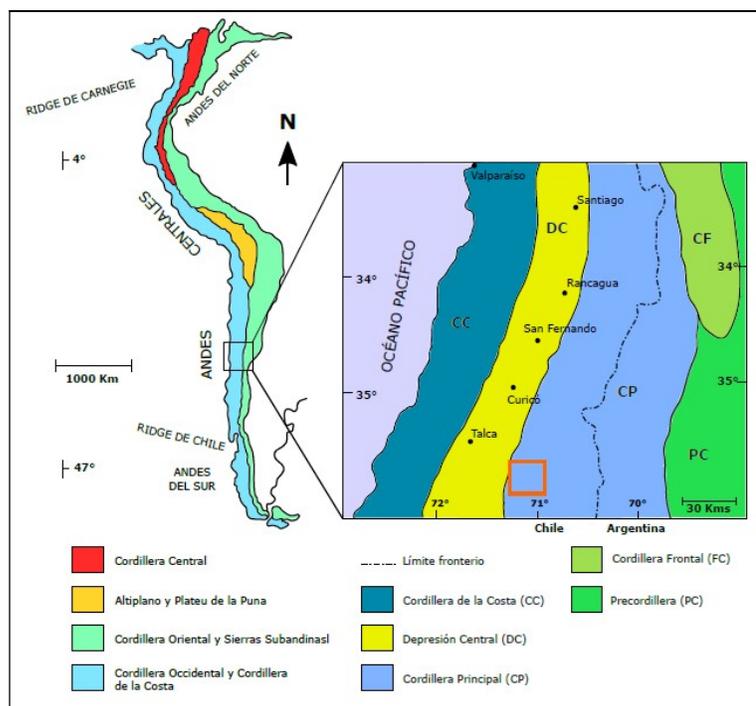


Fig. 2.1 – Unidades morfoestructurales que componen el margen Andino de Sudamérica y aquellas presentes en Chile entre los 33°S y 36°S. El recuadro naranja indica el área de estudio. Modificado de Charrier *et al.* (1996).

La Depresión Central se desarrolla entre los 33°S y los 40°S, separando la Cordillera de la Costa de la Cordillera Principal. Esta depresión tiene elevaciones entre 500 y 700 m s.n.m. Dicha cuenca está rellena por depósitos aluviales y volcánicos del Pleistoceno al Holoceno (Thiele, 1980; Araneda *et al.*, 2000; Rauld, 2002). El basamento de la cuenca queda expuesto en cerros islas y cordones aislados que cortan la depresión formando angosturas y cuevas (*e.g.*, Farías *et al.*, 2008), exhibiéndose en ellos rocas Mesozoicas preferentemente en el sector occidental y Cenozoicas al oriente. En estas morfologías las alturas máximas alcanzan los 1600 m s.n.m. (Rodríguez *et al.*, 2012). El límite oriental de la depresión es un tema controversial en su interpretación, ya que en el norte se encuentra en contacto aparentemente por falla con niveles basales de la Formación Abanico (Falla Infiernillo según Fock *et al.*, 2006), aunque se puede interpretar también como una discordancia erosiva (Fock, 2005).

La Cordillera Principal también puede ser dividida en dos porciones. Al oeste en la latitud estudiada (36°S), se presentan las rocas Cenozoicas de la Formación Abanico intensamente deformadas, y rocas de la Formación Cola de Zorro. Ambas formaciones tienen edades desde el Oligoceno al Mioceno. Sobre ellas se observan secuencias volcánicas levemente plegadas que provienen del arco volcánico actual (Astaburuaga, 2014 y referencias ahí citadas). En la porción este de la Cordillera Principal chilena sigue observándose la Formación Abanico y secuencias Mesozoicas fuertemente deformadas (Fock, 2005; Farías *et al.*, 2008). El contacto entre las rocas Cenozoicas y Mesozoicas es mediante un sistema de fallas con vergencia este y retrocorrimientos (Falla el Fierro; Davidson *et al.*, 1973). La altura promedio de la Cordillera Principal es de 2500 m s.n.m. en las latitudes de la zona de estudio.

### 2.3 EVOLUCIÓN GEOTECTÓNICA REGIONAL

El margen continental occidental de Sudamérica se caracteriza por ser un margen convergente activo al menos desde el Jurásico temprano en el que la placa oceánica subducta de manera continua bajo la Placa Sudamericana (Jordan *et al.*, 1983). La subducción activa en la que participa el continente de Sudamérica ha sido un factor de primer orden en los procesos geológicos que lo afectan. Por lo tanto, las características de la subducción son un punto clave para comprender la evolución geológica de Chile y cualquier proceso que haya ocurrido durante su historia.

Clásicamente, se considera el inicio de los procesos constructivos de los Andes modernos a partir del Cretácico Tardío (Mpodozis y Ramos, 1989; Charrier *et al.*, 2007). En este período se dieron de manera segmentada y episódica varios eventos compresivos que invirtieron partes de las cuencas de trasarco existentes (Mpodozis y Ramos, 1989). Este acortamiento habría perdurado hasta el Paleoceno y en Chile central (32° - 36°S) se puede observar en depósitos sinorogénicos continentales del Cenomaniano que afloran aproximadamente entre 32° y 36°S (*e.g.*, Tunik *et al.*, 2010), luego habría ocurrido una subsidencia generalizada que permitió una transgresión marina desde el Atlántico en el Maastrichtiano. Este ingreso del mar alcanzó el frente orogénico Cretácico por el este (Tunik, 2003; Aguirre-Urreta *et al.*, 2011).

Entre el Paleoceno temprano y el Eoceno temprano-medio, ocurrió un progresivo aumento de la velocidad de la convergencia junto con una rotación en sentido horario del vector de subducción (Somoza y Ghidella, 2005). En ese entonces el magmatismo y la deformación de los Andes Centrales se localizaba en la actual región del antearco.

Luego, durante el Eoceno al Mioceno temprano, ocurre una deformación extensional importante, la cual se concentra en el actual flanco occidental de la Cordillera Principal y está representada por el desarrollo de la cuenca de Abanico (*e.g.*, Charrier *et al.*, 2002). Dicho episodio se ha relacionado a la convergencia más lenta y constante durante el Eoceno tardío al Oligoceno, la que habría tenido una velocidad de 4 a 6 cm/año y 55° de oblicuidad (Fock, 2005 y referencias ahí citadas). Durante este período además de fallamiento normal, existe un adelgazamiento cortical, alcanzándose espesores de entre 30 y 35 Km (Nyström *et al.*, 2003; Kay *et al.*, 2005; Muñoz *et al.*, 2006).

Entre 28 y 26 Ma ocurre un cambio repentino en la convergencia de placas, con un vector de convergencia que se vuelve casi ortogonal al margen sudamericano poniente y un aumento de la velocidad absoluta de la placa continental hacia el este (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza, 1998). Este abrupto cambio de configuración geodinámica se relaciona al quiebre de la placa Farallón en las placas de Nazca y de Cocos (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza y Ghidella, 2005), produciendo en el margen Andino un evento de deformación regional conocido como Fase Pehuenche. Este episodio sería responsable de la inversión de la cuenca de Abanico entre los 22 y 19 Ma (*e.g.*, Mpodozis y Ramos, 1989; Charrier *et al.*, 2002, 2005). Durante este evento, se observa tanto una inversión de las fallas normales preexistentes, como un corrimiento al este de la actividad tectónica, en lo que corresponde al comienzo de la formación de los Andes Centrales (*e.g.*, Mpodozis y Ramos, 1989; Charrier *et al.*, 2002, 2007).

Posterior al inicio de la inversión de Abanico y durante el Mioceno medio-tardío, la deformación migra hacia el este hasta afectar los depósitos mesozoicos del flanco occidental de la Cordillera Principal, generando la faja plegada y corrida del Aconcagua y de la Ramada (Giambiagi y Ramos, 2002; Giambiagi *et al.*, 2003; Fock, 2005, Fock *et al.*, 2006).

Desde el Mioceno tardío al Plioceno más temprano, se produce otro evento compresivo que alza la Cordillera Frontal y continúa la deformación asociada a las fajas plegadas y corridas a través de retrocorrimientos y fallas fuera de secuencia en el borde oriental de la antigua cuenca de Abanico (Giambiagi y Ramos, 2002; Fock, 2005; Fock *et al.*, 2006). Posteriormente a este último evento y hasta la actualidad, se desarrollan procesos de deformación y acortamiento en el antepaís y de deformación de rumbo en la Cordillera Principal (Giambiagi y Ramos, 2002; Farías, 2007; Farías *et al.*, 2010). Es en este último evento de deformación compresiva (Mioceno tardío – Plioceno temprano) donde se registra la mayor cantidad de alzamiento y exhumación regional de los Andes (Skewes y Holmgren, 1993; Kurtz *et al.*, 1997; McInnes *et al.*, 2005; Farías *et al.*, 2008; Makshev *et al.*, 2009).

Los eventos de alzamiento y exhumación del orógeno andino durante el Cenozoico son el resultado del progresivo engrosamiento cortical que sucede a la inversión de la cuenca de Abanico, y este engrosamiento se atribuye fundamentalmente a procesos de acortamiento cortical (Jordan *et al.*, 2001; Kay *et al.*, 2005; Farías *et al.*, 2010).

## **2.4 EVOLUCIÓN DEL MAGMATISMO EN CHILE CENTRAL**

Para fines de este estudio, el período que requiere mayor atención es el Cenozoico. En este periodo, la evolución tectónica cenozoica en Chile central se caracteriza por la apertura de la cuenca Abanico y su inversión tectónica, eventos que distinguen dos distintos tipos de magmatismo.

Las rocas que representan el magmatismo de Chile central durante el Cenozoico son las rocas volcánicas pertenecientes a las formaciones Abanico y Farellones, sus intrusivos asociados y rocas ígneas posteriores a la Formación Farellones distribuidas a lo largo de la Cordillera Principal. Todas estas unidades tienen composiciones químicas e isotópicas que indican un origen en la cuña astenosférica modificada por subducción, al igual que los magmas de arco en general (*e.g.*, Kay *et al.*, 1991; Stern y Skewes, 1995; Kay y Mpodozis, 2001; Fuentes, 2004; Kay *et al.*, 2005; Montecinos *et al.*, 2008).

Durante el Eoceno – Oligoceno y contemporáneo a la depositación de la Formación Abanico el volcanismo de arco es muy abundante en la región de Chile central (*e.g.*, Charrier *et al.*, 2002; Nyström *et al.*, 2003; Kay *et al.*, 2005). Concordantemente con la tectónica subsidente y extensional de este período, el magmatismo contemporáneo es predominantemente básico a intermedio, poco enriquecido según muestran sus firmas isotópicas de Sr-Nd, con afinidad toleítica, entre otras características ampliamente registradas en la Formación Abanico (Nyström *et al.*, 2003; Fuentes, 2004; Kay *et al.*, 2005; Muñoz *et al.*, 2006).

Luego de la inversión de la cuenca Abanico, durante el Mioceno temprano, la actividad magmática de la región es concordante con el aumento de espesor cortical registrado,

presentando un cambio progresivo hacia firmas más evolucionadas, con afinidad calcoalcalina y un carácter más fraccionado y enriquecido según muestran los patrones de tierras raras e isotopía de Sr-Nd en las rocas volcánicas de la Formación Farellones (Nyström *et al.*, 2003; Fuentes, 2004; Kay *et al.*, 2005).

En resumen, el magmatismo cenozoico presenta las siguientes características y etapas importantes:

- (1) A inicios del Cenozoico presenta composiciones básicas a intermedias evolucionando a composiciones levemente más diferenciadas, fraccionadas y enriquecidas. El arco magmático en ese entonces se ubicaba en la cuenca de Abanico.
- (2) Una reducción de actividad volcánica y magmática durante el Mioceno temprano relacionable a eventos tectónicos compresivos e inversión de la cuenca Abanico.
- (3) Cambio de afinidad toleítica a calcoalcalina del magmatismo marcando la inversión tectónica de Abanico desde un régimen tectónico extensional a uno compresivo.
- (4) Posterior migración del arco hacia el este alcanzado su posición actual, la cual dependiendo de la zona se encuentra superpuesto o inmediatamente al este del arco Mioceno (como es el caso de la zona de estudio).

## **2.5 FRANJA METALOGÉNICA DEL NEÓGENO EN CHILE CENTRAL**

La franja metalogénica Neógena se extiende en dirección N-S a lo largo del flanco occidental de la Cordillera de los Andes entre los 31°30' y 34°30'S. También, esta franja incluye al norte de los 31°S a los depósitos de Au ± Cu de las franjas de Maricunga y El Indio (Camus, 2003, Fig. 2.2).

En Chile central, y dentro de esta franja, se ubican 3 megayacimientos de tipo pórfido cuprífero: Los Pelambres (~32°S), Río Blanco – Los Bronces (~33°S) y El Teniente (~34°S). El yacimiento Los Pelambres es el más antiguo de este conjunto con una edad de entre 12 a 10 Ma (Perelló *et al.*, 2009), los otros dos grandes pórfidos de esta franja en Chile central son aproximadamente coetáneos y tienen una edad de 8 a 4 Ma aproximadamente (Maksaev *et al.*, 2004; Deckart *et al.*, 2005).

A diferencia de otras franjas metalogénicas reconocidas en el margen continental chileno, la del Neógeno no presenta una relación espacial con alguna estructura de carácter mayor y paralela a la fosa. Sin embargo, para cada depósito perteneciente a esta franja se han registrado estructuras de carácter local, las cuales se relacionan a reactivaciones de estructuras pre-Cenozoicas durante el desarrollo de la Cordillera de los Andes (*e.g.*, Rivera y Cembrano, 2000; Rivera y Falcón, 2000).

Los principales sistemas estructurales reconocidos entre 32° y 34°S son: el sistema de Fallas Pocuro – San Ramón con carácter actual inverso y vergente al oeste afectando el flanco occidental de la Cordillera Principal, y la Faja Plegada y Corrida del Aconcagua de carácter inverso y con vergencia hacia el este afectando los depósitos del Mesozoico cercano al límite entre Chile y Argentina.

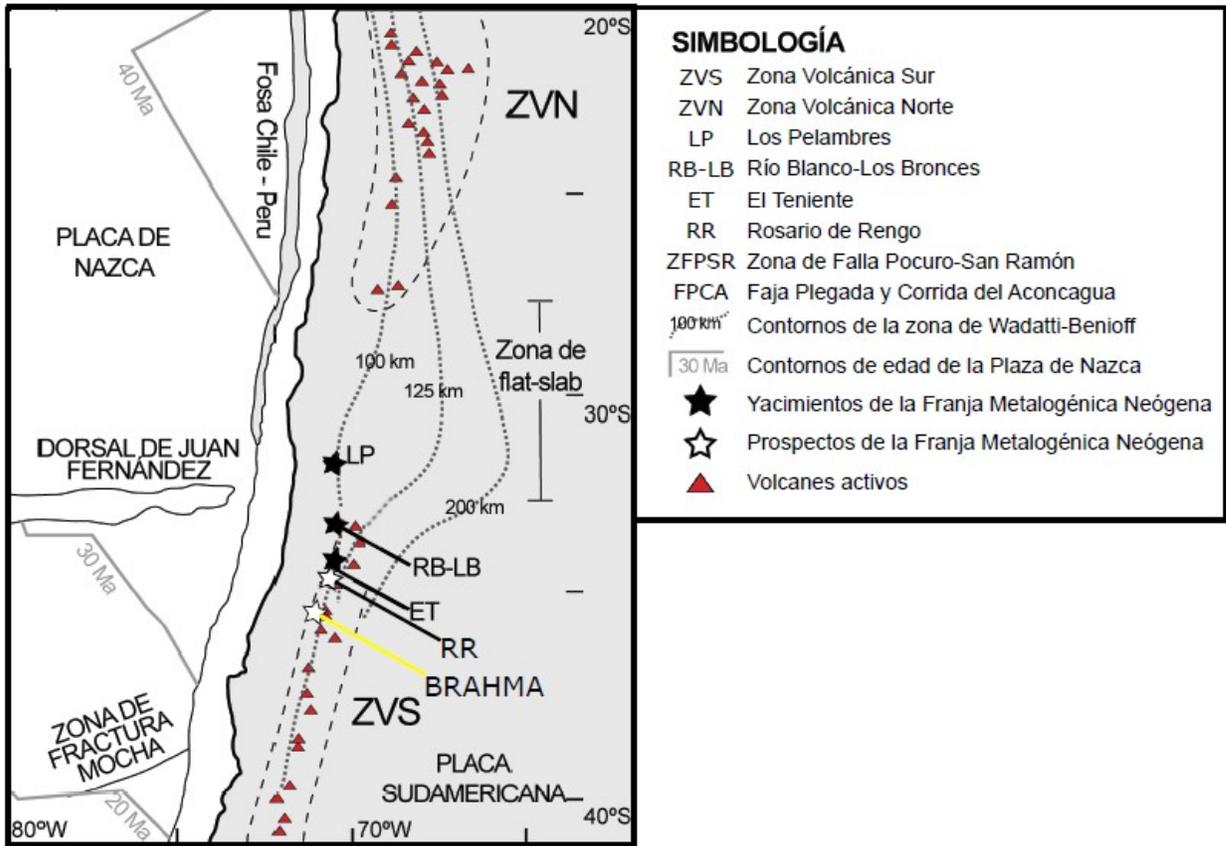


Fig. 2.2 – Esquema con la distribución de la franja Neógena en Chile y la ubicación de los principales yacimientos de esta franja en Chile central. Se incluyen las principales características de convergencia entre la Placa de Nazca y el margen continental chileno. Modificado de Muñoz (2011).

Kay y Mpodozis (2001) proponen un modelo genético para los yacimientos Miocenos presentes en los Andes centrales en los cuales la fase hornblenda cumple un rol muy importante. Según estos autores, estos depósitos se forman durante etapas en las que los fluidos almacenados en la corteza profunda se liberan e interactúan con los magmas derivados de la subducción. El modelo que ellos proponen afirma que una porción importante de estos fluidos provendría de la desestabilización de la fase hornblenda en la corteza profunda. Lo anterior ocurriría durante acortamiento y engrosamiento cortical junto a una disminución del ángulo de subducción. Estos procesos generan condiciones de mayor presión en la base de la corteza, ocurriendo una transformación metamórfica de hornblenda a granate liberando agua (Kay *et al.*, 1999; Kay y Mpodozis, 2001, Fig. 2.3). En este contexto, la génesis de los pórfidos mineralizados en la región del *flat slab* (27°-33°S) se habría visto favorecida por procesos de engrosamiento cortical que favorecieron la ruptura de la anfíbola presente en la base de la corteza y habrían provocado la liberación de fluidos que alcanzaron su máximo a los 10 Ma en coincidencia con el inicio de la subducción, bajo la zona, del segmento E-W de la Dorsal de Juan Fernández (Kay *et al.*, 2005; Kay y Mpodozis, 2002; Ramos *et al.*, 2002) mostrando la importancia de la evolución tectonomagmática de la región.

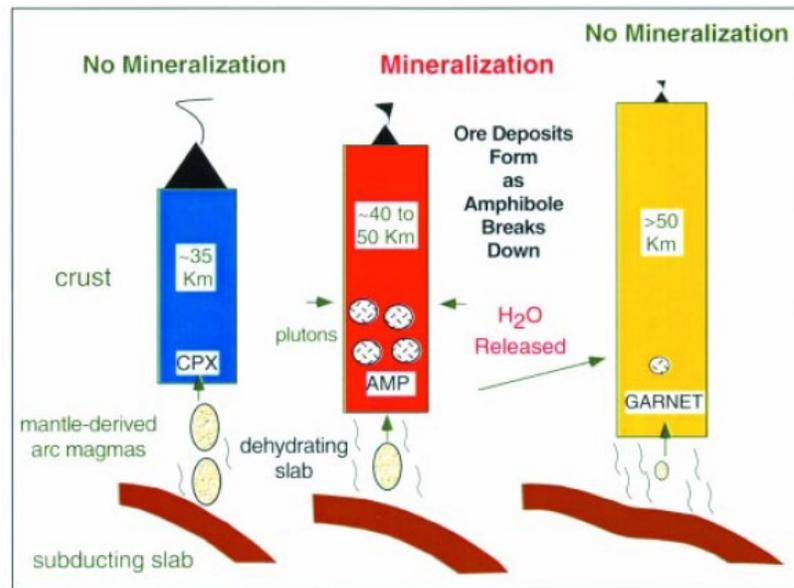


Fig. 2.3 – Modelo genético para los yacimientos Miocenos de los Andes centrales en el que se resalta el rol de la fase hornblenda en la base de la corteza. Tomado de Kay y Mpodozis (2001).

Las rocas que conforman los yacimientos de tipo pórfido cuprífero presentes en Chile central, reúnen características geoquímicas de elementos trazas que también se reconocen en rocas adakíticas, tales como altas razones de Sr/Y y La/Yb. Esta signatura adakítica se ha explicado como producto de interacción de los magmas de arco con rocas de la corteza profunda, especialmente donde se encuentran presentes las fases hornblenda y granate (Streck *et al.*, 2007; Richard y Kerrich, 2007). También, aportan a producir una signatura adakítica los procesos de cristalización fraccionada que involucran anfíboles ± titanita ± segregación menor de plagioclasa, ya que la cristalización de plagioclasa es suprimida por el alto contenido de agua en estos magmas de arco (Richard y Kerrich, 2007). Estas características junto a patrones de REE con forma cóncava en el rango de MREE y HREE es característico de rocas magmáticas de arco de la serie calcoalcalina incluyendo a aquellos asociados a los depósitos de tipo pórfido cuprífero (Richard y Kerrich, 2007).

## 2.6 MARCO GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

Las rocas que se ubican en la zona oeste de la Cordillera Principal chilena a la latitud de la zona de estudio (~36°S), corresponden a secuencias volcánicas y sedimentarias estratificadas con una compleja deformación, pertenecientes a la Formación Abanico, intrusivos que cortan estas últimas secuencias, y por último productos volcánicos más jóvenes que cubren los afloramientos estratificados (Fig.2.4).

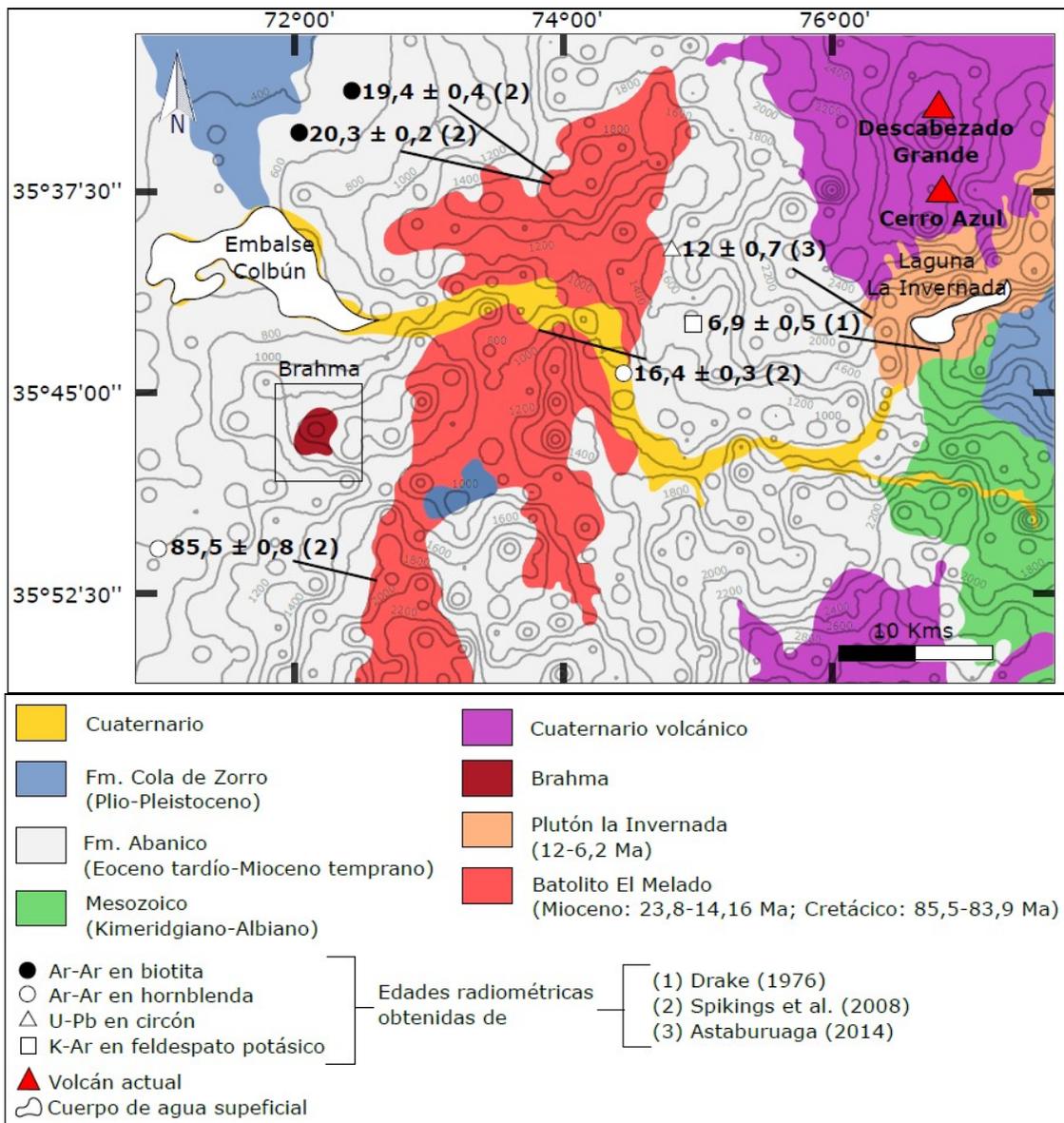


Fig. 2.4 – Mapa geológico del flanco occidental de la Cordillera Principal en los alrededores de la zona de estudio (~35°30' – 36°S en la Región del Maule). Se incluyen algunas dataciones radiométricas del Batolito El Melado y plutón La Invernada.

### 2.6.1 Unidades Estratificadas en la zona de estudio y cercanías

#### Formación Abanico (Eoceno superior – Mioceno inferior)

La Formación Abanico corresponde a una sucesión continental predominantemente volcánica, con considerables espesores sedimentarios intercalados (Klohn, 1960; Aguirre, 1960; Thiele, 1980; Zurita, 1999; Baeza, 1999; Muñoz *et al.*, 2006; Charrier, 1973; Charrier *et al.*, 2002). Las series volcánicas de la unidad se componen principalmente de lavas basálticas a intermedias, y subordinadamente de rocas piroclásticas ácidas, que se encuentran formando estructuras de coladas, brechas y tobas. Los depósitos sedimentarios corresponden a intercalaciones de limonitas, areniscas y conglomerados finos y gruesos de color verde a verde amarillento.

El espesor de la formación es variable según la localidad. Aguirre (1960) midió una potencia aproximada de 3.600 m en la provincia del Aconcagua, Klohn (1960) y Charrier (1981) la estimaron en 3.000 m de espesor medio. Por otra parte, González y Vergara (1962) estimaron de norte a sur, 2.700 m de espesor en el río Teno, 1.900 m en el río Maule y 600 m en el río Longaví.

Esta unidad se encuentra plegada y afectada por metamorfismo de muy bajo grado (Aguirre, 1960; Thiele, 1980; Levi *et al.*, 1989). El contacto basal de la Formación Abanico es un tema controversial, aunque la opción más aceptada y reciente es que el contacto corresponde a una discordancia angular entre depósitos Cenozoicos y las unidades Mesozoicas con un hiato deposicional no menor a 16 m.a. (Charrier *et al.*, 2002; Piquer, 2004). El contacto superior de la Fm. Abanico puede ser tanto concordante como discordante según los sectores y esto debido al desarrollo de discordancias progresivas asociadas a la inversión de fallas normales reactivadas con la inversión tectónica de la cuenca de Abanico (Charrier *et al.*, 2002, 2007).

Hallazgos fósiles y dataciones radiométricas permitieron determinar a la Formación Abanico una edad Eoceno tardío – Mioceno temprano (Charrier *et al.*, 1996; Flynn *et al.*, 2003). Diversas evidencias sedimentológicas, estructurales, de madurez termal y geoquímicas indican que su depositación tuvo lugar en una cuenca extensional (Charrier *et al.*, 2002). Estudios realizados sobre la geoquímica de las rocas intrusivas muestran una afinidad toleítica, consistente con una corteza delgada, a diferencia de las rocas más jóvenes que presentan afinidad calcoalcalina (Charrier *et al.*, 2002; Nyström *et al.*, 2003; Kay *et al.*, 2005) evidenciando un cambio a nivel cortical.

### **Depósitos Cuaternarios**

Diversos procesos modeladores del paisaje, en respuesta al clima y al volcanismo propios de la zona, han generado las morfologías encontradas en la región. Uno de los mecanismos más importantes y que diferencia la zona de estudio de otras encontradas más al norte, es el clima más lluvioso el cual se relaciona a un mayor porcentaje de erosión. Esto se asocia directamente a las redes hidrográficas presentes en la zona y a las glaciaciones pleistocénicas (Astaburuaga, 2014). El proceso anterior de carácter destructivo es compensado con el volcanismo asociado a los centros eruptivos de la zona, los cuales forman un *plateau* volcánico que se encuentra cubriendo extensas áreas de terreno. Todos estos procesos han quedado registrados por la presencia de sedimentos de origen glacial como depósitos morrénicos, sedimentos de origen fluvial y gravas formando niveles aterrazados, depósitos aluviales, de remoción en masa, depósitos de ceniza, de escoria y coladas de lava (Astaburuaga, 2014).

## **2.6.2 Unidades Intrusivas en la zona de estudio y cercanías**

### **Batolito El Melado (Oligoceno tardío – Mioceno medio)**

El intrusivo de mayor extensión en la zona corresponde al batolito El Melado, abarcando un área de aproximadamente 500 Km<sup>2</sup>. Este batolito tiene una elongación N-S, está ubicado inmediatamente al este de la propiedad minera de Brahma y su litología corresponde a granodioritas de hornblenda.

Drake *et al.* (1982) determinan una edad de cristalización para El Melado de 16,4 a 23,8 Ma mediante el método de K-Ar en biotita, mientras que Muñoz y Niemeyer (1984) obtuvieron una edad K-Ar en biotita de 14,9 Ma, esta diferencia se interpreta debido a que el batolito El Melado correspondería a un complejo compuesto por múltiples facies intrusivas (Nelson *et al.*, 1999).

En un estudio reciente de Spikings *et al.* (2008) se obtiene una muestra en la zona del río Ancoa que corresponde al batolito El Melado (por su ubicación y litología) y que presenta una edad plateau  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de  $85,5 \pm 0,8$  Ma en hornblenda.

### **Plutón La Invernada**

Se ubica al norte del río Maule y aproximadamente 45 km al este de Brahma. La Invernada abarca un área cercana a los  $100 \text{ km}^2$  en superficie. Corresponde a un cuerpo intrusivo multifásico en el que se identifican desde una granodiorita de hornblenda de grano medio a un granito de biotita de grano grueso.

Este plutón es interpretado como sintectónico y correspondería a un periodo de deformación generalizada en la región durante el Mioceno medio (Astaburuaga, 2014). Lo anterior debido a la forma sigmoidal que presenta en superficie y según trabajos realizados por Montanari *et al.* (2010) con modelos análogos.

Se determina una edad de entre  $6,2 \pm 0,1$  y  $7,1 \pm 0,1$  mediante K-Ar en biotita y ortoclasa respectivamente (Drake, 1976). Estudios más recientes indican una edad de hasta  $12,0 \pm 0,7$  Ma mediante U-Pb en Circón (Astaburuaga, 2014).

### **Otros intrusivos cercanos a la zona de estudio**

Según Spikings *et al.* (2008), en el sector del Río Achibueno los intrusivos presentan edades plateau  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de  $10,2 \pm 0,7$  en biotita y  $11,1 \pm 0,8$  Ma en hornblenda.

Existen dataciones de intrusivos cercanos a Brahma con edades cretácicas, como el plutón El Indio ubicado al este del actual arco volcánico a los  $36^\circ\text{S}$  y registra edades plateau  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en biotita de 79,8 Ma (Nelson *et al.*, 1999). Este plutón corresponde a una Granodiorita de biotita.

Exceptuando la muestra tomada de la zona del río Ancoa anteriormente mencionada y correspondiente a El Melado, los intrusivos con edades cretácicas en la región intruyen a las secuencias sedimentarias correspondientes a las formaciones Colimapu, Baños del Flaco y Río Damas (Nelson *et al.*, 1999; Astaburuaga, 2014) de edades mesozoicas y reconocidas en el flanco oriental de la Cordillera Principal (*e.g.*, Klohn, 1960; Gonzalez y Vergara, 1962) escapando de la zona de estudio.

## 3 GEOLOGÍA DEL PROSPECTO BRAHMA

---

### 3.1 ASPECTOS GENERALES DE LA GEOLOGÍA LOCAL EN EL PROSPECTO BRAHMA

El prospecto Brahma cubre un área equivalente a 6 km<sup>2</sup> y está incluido en una propiedad minera de 270 km<sup>2</sup> perteneciente en un 100% a Condor Resources. Se han realizado 7 perforaciones de diamantina en este prospecto sumando un total de 2.905 m perforados. El sondaje más largo cuenta con 474 m y el más corto con 344 m perforados en total. Las cotas de inicio de las perforaciones son cercanas a los 1.000 m s.n.m. y alcanzan profundidades de 650 a 430 m s.n.m. aproximadamente.

Para la zona de estudio, Burns *et al.* (2008) proponen que Brahma corresponde a un yacimiento de tipo pórfido cuprífero. Los mismos autores proponen que la roca huésped de Brahma corresponde a una granodiorita, la cual aloja a 3 unidades intrusivas más en la zona central del prospecto, dentro de este conjunto 2 unidades corresponderían a pórfidos que contendrían la mayor porción de mineralización identificada hasta ahora en Brahma. Ellos también identifican brechas intrusivas e hidrotermales dentro de la propiedad, además de una unidad de andesitas que aflora en la zona sur del prospecto. La distribución anterior se resume en la Figura 3.1 tomada de Burns *et al.* (2008) en la cual se observa la litología de superficie en Brahma. La ubicación, orientación y otros detalles referidos a los sondajes efectuados en Brahma se presentan en Tabla 3.1.

Las leyes de Cu máximas medidas en el yacimiento Brahma son de 2,97% con una ley media de 0,03% (Culbert, 2007). El pórfido Brahma pertenece a un clúster de pórfidos alineados en dirección NNE, con Roblería al sur, Brahma en el centro y Austral al norte (Burns *et al.*, 2008). Esto indica que el yacimiento Brahma y los alrededores de la zona de estudio conforman una extensa área de interés desde el punto de vista metalogénico.

La mineralización de este pórfido corresponde a sulfuros de cobre alojados en rocas ígneas intrusivas. Los sulfuros reconocidos durante la campaña de descripción de sondajes de este estudio y otros anteriores son calcopirita y pirita asociados a vetillas y en ocasiones diseminados. También se observan molibdenita, bornita y calcosina en menor medida, nuevamente con su mayor ocurrencia en vetillas y relacionados a ellas.

Anterior a este trabajo, no se han realizado dataciones absolutas para las unidades presentes en el yacimiento ni para la mineralización económica. No obstante, se sabe que el yacimiento está hospedado en la Formación Abanico, por lo que su edad es al menos menor a la de dicha formación.

Tabla 3.1 – Ubicación, orientación, inclinación y total de metros perforados para los 7 sondajes existentes en el prospecto Brahma, en verde los 4 sondajes descritos en este trabajo.

Sondaje	X (UTM)	Y (UTM)	Z (m s.n.m.)	Metros perforados (m)	Inclinación (°)	Azimuth (°)
BRA-001	301518	6040128	934	353,40	-80	340
BRA-002	301115	6039795	878	448,00	-70	150
BRA-003	301550	6039506	1020	474,00	-75	360
BRA-004	301215	6039271	991	404,00	-75	45
BRA-005	301163	6038925	990	431,30	-70	45
BRA-006	301841	6039536	1106	450,00	-80	270
BRA-007	301028	6038576	1036	344,00	-80	45

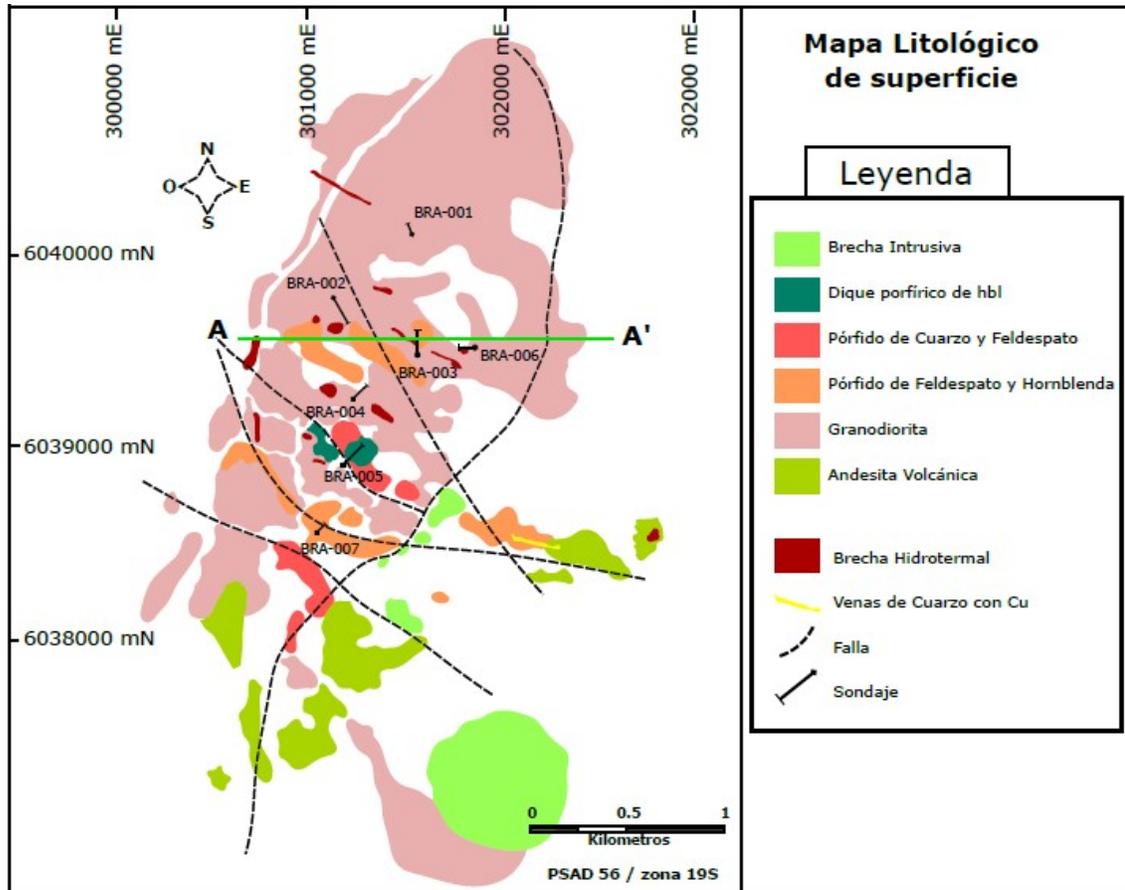


Fig. 3.1 – Mapa litológico de superficie del prospecto Brahma (tomado y traducido de Burns *et al.*, 2008). La traza A-A' indica la orientación del perfil litológico propuesto en el capítulo 5 de este trabajo (Fig. 5.7).

### 3.2 DESCRIPCIÓN DE SONDAJES

Este trabajo incluye la descripción en detalle de 4 sondajes ubicados en la parte central del prospecto Brahma y que corresponden a: BRA-002, BRA-003, BRA-004 y BRA-006 (Tabla 3.1, Fig. 3.1). Las descripciones en detalle de estas perforaciones se incluyen en el Anexo A. A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de los sondajes estudiados rescatando aspectos relevantes sobre litologías, alteraciones y mineralización observadas.

### 3.2.1 Sondaje BRA-002

Corresponde al sondaje ubicado más hacia el oeste del conjunto descrito en este trabajo. A pesar de no ser el sondaje más largo en cuanto a metros perforados, BRA-002 es el sondaje que alcanza las menores elevaciones interceptadas en Brahma (aproximadamente 430 m s.n.m.). Lo anterior se debe a que el punto de inicio de la perforación de BRA-002 tiene la cota más baja del conjunto iniciando desde los 878 m s.n.m.

El sondaje BRA-002 corta 4 unidades intrusivas diferentes, las cuales en orden de ocurrencia desde superficie a fondo corresponden a las siguientes: Pórfido de Feldespato y Hornblenda (PFH); Tonalita (TON); Granodiorita (GRD) y Pórfido de Feldespato y Hornblendas redondeadas (PFHr). La petrografía de las unidades mencionadas se presenta en el siguiente subcapítulo.

Los primeros 20 m perforados de este sondaje se encuentran muy lixiviados y el material está disgregado. A pesar de esto, se puede reconocer que la litología PFH abarca los primeros 60 m de BRA-002 con una alteración propilítica de intensidad moderada a fuerte y alteración filica débil reconocibles desde los 20 a 60 m perforados. En este mismo tramo, se observan vetillas rectas y algunas de muy baja sinuosidad con cuarzo, clorita y epidota acompañados de abundante pirita y menor cantidad de calcopirita. También en ocasiones, se presenta bornita muy escasa asociada a dichas vetillas.

Luego, desde los 60 a 120 m perforados, se presenta la litología denominada TON. Las alteraciones propilítica y filica tienen una intensidad comparable a la observada en el tramo y litología anterior, aunque en esta unidad se observa que la alteración propilítica pierde intensidad en cuanto aumenta la profundidad mientras que aumenta la intensidad de la alteración filica. Lo anterior se manifiesta en una menor densidad de vetillas del tipo anteriormente descrito, y mayor presencia de vetillas con cuarzo, sericita y pirita. Además de bajas cantidad de calcopirita, se observa escasa molibdenita en pátinas. También, se hace presente turmalina diseminada en muy escasa cantidad.

Desde los 120 a 144 m perforados reaparece PFH continuando el comportamiento y estilo de alteración y mineralización (con escasa calcopirita y molibdenita) descritos para TON en el tramo anterior acompañada de alteración argílica muy débil.

Entre los 144 y 174 m perforados vuelve a observarse TON con alteración propilítica manteniendo una intensidad moderada constante en todo este tramo y se ausenta la alteración filica antes observada. Entre los 150 y 160 m de este sondaje, TON presenta xenolitos oscuros que aparentemente corresponden a PFHr (Fig. 3.2), los cuales presentan magnetismo moderado. Hacia el fondo de este tramo, adquiere mayor densidad la presencia de vetillas con cuarzo, clorita y pirita, acompañados de menor calcopirita. A los 173 m aparece calcosina y turmalina escasa diseminada alrededor de vetillas con cuarzo y clorita con menor calcopirita.

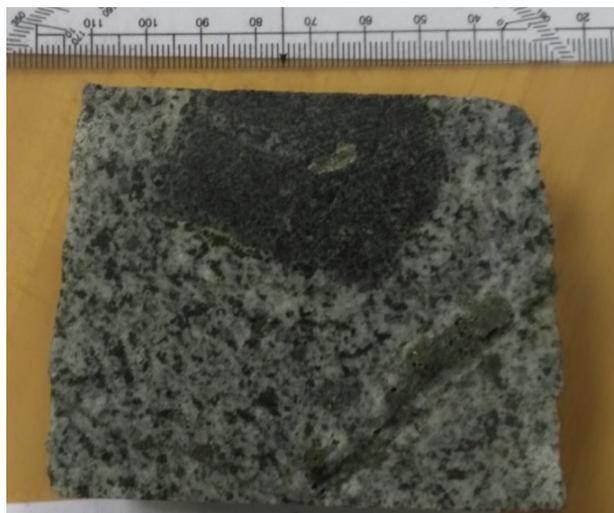


Fig. 3.2 – TON con xenolito oscuro inconcluso (probablemente de PFHr) a los 153 m del sondaje BRA-002.

Desde los 174 a 268 m del sondaje BRA-002 la identificación litológica es muy compleja. Esto se debe a que se observan zonas de brecha hidrotermal con clastos preferentemente de TON (Fig. 3.3), aunque también se observan clastos de PFHr (y PFH con menor seguridad). La alteración propilítica domina en intensidad por sobre la filica en esta zona brechosa. Entre los 184 y 192 m de sondaje se observa baja cantidad de calcopirita diseminada alrededor de vetillas de clorita y cuarzo. También, se observa este estilo de mineralización entre los 250 y 254 m de sondaje junto a escasa bornita. Entre los 200 y 210 m se observa fracturación intensa y aparición de la litología GRD con alteración propilítica intensa.



Fig. 3.3 – Brecha hidrotermal monomictica de TON a los 259 m del sondaje BRA-002.

En el tramo de 268 a 276 m de BRA-002, se observa PFHr con alteraciones propilítica y filica de intensidad moderada sin mineralización importante.

Desde 276 m hasta el fondo del sondaje se presenta casi en su totalidad la unidad TON, salvo algunas apariciones de PFH en zonas brechizadas a los 330 m, PFH y PFHr a los 360 m (Fig. 3.4) y 405 m, y GRD entre 414 y 426 m. Hay zonas donde la brechización de TON es muy intensa dentro de una matriz hidrotermal de color gris oscuro correspondiente a turmalina. La alteración propilítica de esta zona pierde intensidad hasta no identificarse desde los 324 m hacia abajo, mientras que la alteración filica adquiere mayor intensidad en profundidad. Entre 374 y 394 m se

observa una población muy poco densa de vetillas con pirita y calcopirita, con menor cantidad de calcosina asociada a las vetillas y pequeños halos de estas. En este mismo tramo, se registran escasas pátinas de bornita y molibdenita.



Fig. 3.4 – Brecha hidrotermal polimíctica con clastos de TON y PFHr a los 362 m del sondaje BRA-002.

### 3.2.2 Sondaje BRA-003

Es el sondaje con mayor cantidad total de metros perforados de todo el conjunto y alcanza una profundidad aproximada de 540 m s.n.m. Las litologías presentes en este sondaje en orden de aparición desde superficie a fondo son: PFHr, PFH y GRD además de algunos diques andesíticos que suman una porción cercana al 3% del largo total de BRA-003 y no contienen mineralización relevante.

Los primeros 56 m perforados de BRA-003 corresponden a PFHr, con los primeros 30 m muy lixiviados y una alteración argílica que pierde intensidad hasta desaparecer a los 52 m. Entre 34 y 56 m se observa alteración propilítica débil. No se observa mineralización de Cu. Entre los 56 a 70 m aparece la unidad PFH con alteración propilítica débil a muy débil acompañada de alteración filica débil a moderada. Este tramo tampoco presenta mineralización económica.

Desde los 70 a 266 m se registra un extenso tramo de PFHr con alteración propilítica moderada (Fig. 3.5), el cual solo es interrumpido por diques andesíticos con alteración propilítica débil. Estos diques de menor magnitud abarcan los segmentos de 122 a 126 m, 216 a 218 m y 240 a 242 m. En este largo segmento mencionado anteriormente, PFHr registra una alteración filica débil en los 70 m y va aumentando progresivamente su intensidad mientras aumenta la profundidad haciéndose muy intensa desde 156 m aproximadamente. Entre 100 y 116 m de BRA-003 se observa mineralización de calcopirita asociada a vetillas con cuarzo, sericita y pirita. Este estilo de mineralización se hace más denso entre los 150 y 200 m y también entre 220 y 266 m, aunque

con menor cantidad de calcopirita. A los 184 m se observa muy débil mineralización de calcosina diseminada y bornita en pátinas.



Fig. 3.5 – PFHr con alteración propilítica moderada a los 155 m del sondaje BRA-003.

Luego, desde los 266 a 280 m perforados, se observa PFH con alteración filica moderada y presencia de vetillas con cuarzo, sericita y pirita, con escasa calcopirita comparativamente menor a la registrada en el mismo tipo de vetillas presentes en PFHr a lo largo del tramo superior.

Desde los 280 a 302 m se observa GRD. En este tramo, GRD registra una alteración propilítica débil y alteración filica débil a moderada con muy pocas vetillas de cuarzo, sericita y pirita.

A partir de los 302 y hasta los 320 m de BRA-003 reaparece un segmento de PFH con alteración filica muy intensa, esto evidenciado en abundantes vetillas con cuarzo, sericita y pirita y nuevamente acompañadas de calcopirita.

A continuación, desde 320 y hasta los 346 m de este sondaje, se registra GRD con las mismas características que en el tramo de 280 a 302 m.

Desde los 346 a 354 m, se registra PFHr con alteración filica intensa y vetillas de cuarzo, sericita y pirita sin mineralización importante de Cu. Luego, se identifica PFH con la misma alteración, grado y vetillas hasta los 408 m (Fig. 3.6), pero a diferencia del tramo previo, la unidad PFH presenta mineralización de calcopirita desde 354 a 372 m y desde 400 a 406 m.



Fig. 3.6 – PFH con alteración filica intensa a los 357 m del sondaje BRA-003.

Nuevamente se observa un tramo corto de PFHr entre 410 y 414 m de BRA-003. En este tramo se identifica alteración filica muy penetrativa (Fig. 3.7), aunque esta vez con escasa calcopirita relacionada a las vetillas de cuarzo, sericita y pirita. A continuación, desde los 414 hasta el fondo del sondaje (474 m) se observa la litología PFH, la cual aún presenta una muy intensa alteración filica, abundantes vetillas de cuarzo y sericita con menor pirita en comparación a los tramos anteriores, y escasa calcopirita registrada hasta los 460 m perforados.



Fig. 3.7 – PFHr con alteración filica muy penetrativa a los 413 m del sondaje BRA-003.

### 3.2.3 Sondaje BRA-004

El sondaje BRA-004 está ubicado en la zona oeste central y próximo al sondaje BRA-002. La perforación alcanza una profundidad de aproximadamente 590 m s.n.m. e intercepta fundamentalmente dos litologías en orden de aparición desde superficie a fondo: PFH y PFHr. En zonas intermedias y en profundidad, se observan zonas de brecha en las cuales se identifican clastos de GRD y TON.

Desde superficie y hasta los 114 m de BRA-004, se observa PFH, con los primeros 12 m muy disgregados y lixiviados. Luego de los 12 m se observa que PFH presenta una alteración filica intensa y se encuentra brechizado de forma monomictica, soportado por una matriz gris afanítica muy disgregada, al punto que se disuelve en una pasta de sericita al agregar agua. En los últimos 6 metros de este tramo, se observan vetillas débilmente sinuosas de cuarzo, sericita y pirita. No se observa mineralización en todo el segmento.

Entre los 114 y 120 m se registra PFHr con alteración filica moderada y vetillas de cuarzo, sericita y pirita. Luego, desde los 120 y hasta 180 m perforados, se observa nuevamente PFH con tramos de brecha hidrotermal polimictica con presencia de calcosina diseminada en algunos clastos de un pórfido no identificado (Fig. 3.8). En este tramo PFH presenta una alteración filica intensa (Fig. 3.9) y esta vez con mayor presencia de vetillas con el mismo relleno. Entre 156 y 162 m se observa calcosina diseminada. Desde los 160 a 180 m, se superpone una alteración argílica moderada en la unidad PFH.



Fig. 3.8 – Brecha hidrotermal polimíctica con clastos de PFH, PFHr y otros no identificados debido a la alteración a los 138 m del sondaje BRA-004.



Fig. 3.9 – PFH con alteración filica a los 174 m de BRA-004.

En el siguiente segmento, desde 180 a 250 m perforados, se presenta PFHr muy fracturado y disgregado. Hasta los 212 m se observan alteraciones filica intensa y argílica moderada. Desde los 212 m no se registra más alteración argílica y la alteración filica se hace muy intensa, con baja densidad de vetillas y menor proporción de piritita en comparación a los tramos superiores. Se presenta calcosina diseminada en cercanías de estas vetillas, como también escasa calcopirita cercano a los 250 m de sondaje.

Desde los 250 y hasta 322 m de BRA-004, se registra PFH nuevamente. Los primeros 10 m de este tramo siguen presentando alteración filica, la cual pierde intensidad hasta no observarse desde los 282 m. Desde 260 m hacia abajo se reconoce alteración propilítica aumentando intensidad desde débil en los primeros metros a muy penetrativa desde los 296 m. La alteración propilítica se manifiesta en vetillas de clorita, epidota y menor calcopirita, esta última se concentra preferentemente entre 285 y 312 m.

A partir de los 322 m y hasta el fondo del sondaje (404 m), se observa una brecha hidrotermal polimíctica con clastos de PFH, PFHr, TON y GRD. Esta brecha tiene una matriz de polvo de roca y sigue presentando alteración propilítica de intensidad moderada, acompañada de alteración potásica muy débil y silicificación moderada. Siguen observándose vetillas de clorita, epidota y menor calcopirita en todo este tramo de brecha.

### 3.2.4 Sondaje BRA-006

Corresponde al sondaje ubicado más al este del conjunto central de sondajes que se describen en este trabajo. También, es aquel que comienza desde la cota más alta en los 1.006 m s.n.m. En profundidad, BRA-006 alcanza los 630 m s.n.m. Se interceptan en orden de aparición desde superficie a fondo: GRD (cerca de 95% del sondaje) y PFH.

Desde superficie y hasta los 82 m se observa GRD. Los primeros 12 m se encuentran lixiviados y muy fracturados, aunque de todas formas se reconoce alteración argílica débil y propilítica moderada. Luego de estos primeros metros de sondaje, se observa que la alteración propilítica se hace más intensa con una densidad moderada de vetillas con clorita, cuarzo y pirita, acompañadas de escasa calcopirita en los tramos de 20 a 30 m y de 38 a 52 m.

Desde los 64 m se registra alteración potásica moderada de fondo en GRD junto a algunas vetillas de cuarzo y feldespato potásico. La intensidad de alteración y densidad de vetillas son menores en comparación a la alteración propilítica superpuesta.

Entre 82 y 94 m, se observa la litología PFH con muy intensa alteración filica y pocas vetillas de cuarzo, sericita y alta pirita.

A los 94 m reaparece GRD registrándose hasta los 176 m con una alteración potásica levemente más intensa que en el tramo anterior (Fig. 3.10). Se observan solo algunas vetillas de cuarzo y feldespato potásico. En los tramos de 106 a 114 m y de 156 a 164 m se registra calcopirita en vetillas. A los 170 m se registran algunas vetillas de cuarzo, sericita y pirita. También desde los 170 m se observan algunas vetillas de turmalina y pirita hasta los 176 m en GRD.

Entre 176 y 182 m, se observa un tramo corto de PFH con alteración filica moderada y mayor pirita que en GRD. La alteración se acompaña de vetillas de cuarzo y sericita. Luego, desde los 182 m se observa nuevamente GRD hasta los 250 m. GRD sigue presentando una alteración potásica moderada de fondo con alteración propilítica moderada a intensa superpuesta. Se registra calcopirita en vetillas y diseminada en los tramos de 156 a 164 m, de 190 a 193 m, y de 228 a 235 m.



Fig. 3.10 – GRD con alteración potásica moderada de fondo y alteración propilítica superpuesta a los 111 m del sondaje BRA-006

Desde 250 y hasta 260 m de BRA-006, se observa PFH con alteración filica débil a moderada y algunas vetillas de pirita con menor calcopirita a los 256 m (Fig. 3.11). Luego, reaparece GRD

desde 260 y hasta los 420 m de sondaje con características análogas al tramo anterior de GRD en cuanto a alteración, intensidad, vetillas y estilo de mineralización. Se registra una baja densidad de vetillas con calcopirita y diseminación de este sulfuro de Cu alrededor de ella, aunque los tramos que la contienen son extensos registrándose su presencia desde 260 a 270 m, desde 278 a 330 m y desde 410 a 414 m.



Fig. 3.11 – PFH con alteración filica moderada a los 253 m del sondaje BRA-006.

La extensión de GRD vuelve a ser interrumpida por PFH desde los 420 a 424 m de BRA-006. La alteración observada en PFH sigue siendo filica débil. Luego de esta corta aparición de PFH, se registra GRD hasta el fondo del sondaje (450 m) continuando la presencia de alteración potásica de fondo con propilítica superpuesta, pero esta vez sin presencia importante de calcopirita salvo en el tramo de 434 a 437 m donde se le encuentra diseminada alrededor de vetillas de clorita, epidota y piritita.

### **3.3 RESULTADOS GENERALES DE LOS SONDAJES DESCRITOS EN BRAHMA**

De la campaña de descripción de sondajes en Brahma efectuada en este trabajo, se obtiene que en la zona oeste de la porción central del prospecto Brahma existe una mayor complejidad en cuanto a litologías y alteraciones presentes. Además, se identifican zonas de brecha hidrotermal polimíctica con secciones monomícticas desde el centro de los 4 sondajes y extendiéndose preferentemente hacia el oeste y profundidad.

La alteración hidrotermal de mayor temperatura interceptada por los sondajes centrales en Brahma es la potásica, observada como alteración de fondo en la litología GRD en el sondaje BRA-006 con una intensidad débil a moderada. También se observa alteración potásica muy débil acompañada de silicificación moderada en las zonas de brecha hidrotermal polimíctica hacia el fondo del sondaje BRA-004.

En PFHr se observa que la alteración filica se desarrolla de forma muy intensa y más moderada en PFH. Se destaca que la mayor cantidad de calcosina está asociada a las vetillas de cuarzo, sericita y piritita las que corresponden a esta alteración. También en los tramos con alteración filica se registra calcopirita y muy escasa bornita.

La mineralización de calcopirita se registra de forma más extensa en asociación a las vetillas correspondientes a la alteración propilítica, acompañada de clorita y piritita. La calcopirita se encuentra mayormente concentrada donde se observa mayor presencia de epidota. Aunque a la epidota no se le observa con frecuencia en las vetillas, sí se registra en reemplazo con hornblendas selectivamente con distintos grados de intensidad. También, la escasa molibdenita observada se asocia a los tramos con alteración propilítica.

Los tramos con mayor contenido de Cu se observan en el sondaje BRA-003, ya que este contiene la mayor cantidad de calcosina registrada, también asociada a zonas de alteración filica penetrativa. El sondaje BRA-004 tiene el segundo lugar en cuanto a mineralización de Cu observada, con ubicación preferente en zonas profundas y asociado a las brechas en donde se presenta en forma de calcosina diseminada en algunos clastos y como calcopirita asociada a vetillas de alteración propilítica. Los sondajes BRA-006 y BRA-002 le siguen con concentraciones menores de calcopirita y distribuidos en las zonas más profundas de los sondajes preferentemente. Este orden de contenido de cobre determinado mediante observaciones cualitativas es coherente con los ensayos cuantitativos de ley de cobre efectuados en estudios anteriores (Tabla 3.2, Burnz *et al.*, 2008).

Las relaciones de contacto entre los intrusivos observadas, indican situaciones en las cuales PFHr intruye a GRD (Fig. 3.12), TON intruye a PFHr (Figs. 3.13 y 3.14), PFH intruye a TON (Fig. 3.15). En resumen, de las observaciones de los 4 sondajes mapeados en la zona central del prospecto Brahma, se puede interpretar la siguiente temporalidad relativa para las litologías identificadas desde más antigua a más joven: GRD – PFHr – TON – PFH – Brechas hidrotermales.

Tabla 3.2 – Resumen de mejores resultados de leyes de Cu en tramos de los 7 sondajes efectuados en Brahma (Burnz *et al.*, 2008).

ASSAY RESULTS FROM HOLES BRA-001 TO BRA-007					
Hole	From (m.)	To (m.)	Width (m.)	Cu (%)	Zn (%)
BRA-001	324.00	332.00	8.00	0.24	
BRA-002	102.00	204.00	102.00	0.07	
	270.00	326.00	52.00	0.06	
BRA-003	102.00	116.00	14.00	0.21	
	166.00	350.00	184.00	0.14	
	362.00	468.00	106.00	0.07	
BRA-004	216.00	248.00	32.00	0.19	
	282.00	332.00	50.00	0.11	
	348.00	404.00	56.00	0.08	
BRA-005	104.00	276.00	172.00		0.2
	350.00	430.00	80.00	0.05	
BRA-006	332.00	402.00	70.00	0.06	
	424.00	434.00	10.00	0.10	
BRA-007	192.00	242.00	50.00	0.03	

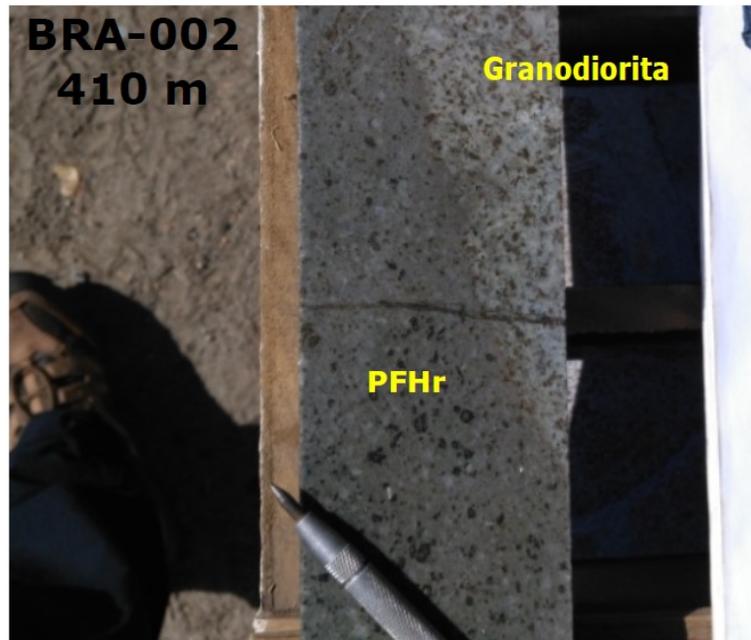


Fig. 3.12 – PFHr intruye a GRD a los 410 m del sondaje BRA-002.



Fig. 3.13 – Tonalita intruye a PFHr a los 252 m del sondaje BRA-002. Se observa textura de flujo en el contacto y halo de alteración hacia PFHr.

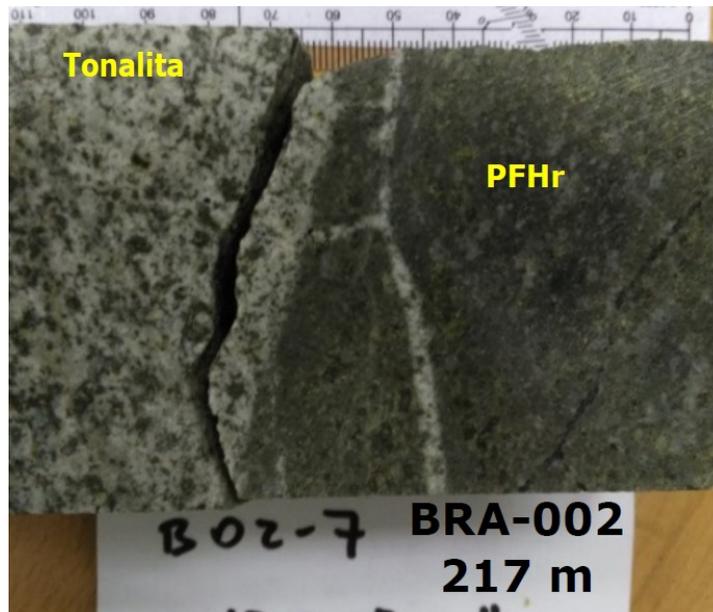


Fig. 3.14. – Tonalita intruye a PFHr a los 217 m del sondaje BRA-002.

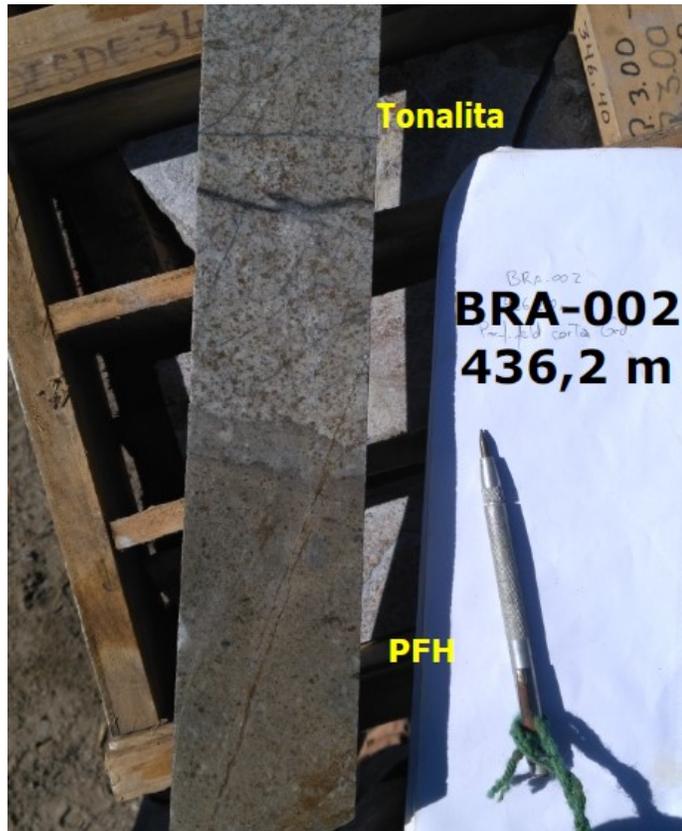


Fig. 3.15 – PFH en contacto con TON a los 436 m del sondaje BRA-002, se observa un halo de alteración hacia TON.

## 4 PETROGRAFÍA DE UNIDADES PRINCIPALES EN EL PROSPECTO BRAHMA

---

De los sondajes del prospecto Brahma, se tomaron un total de 21 muestras de mano las cuales se describieron macroscópicamente. De estas muestras, 16 corresponden a los 4 sondajes centrales estudiados en este trabajo. La ubicación de este subconjunto se observa en Fig. 1.2. En la Tabla 1.1 se observa la ubicación de todas las muestras. Del conjunto total de muestras se escogen 17 a las cuales se les describe microscópicamente mediante luz transmitida en láminas delgadas (Tabla 1.1). Las descripciones detalladas de las muestras recolectadas en Brahma se encuentran en los Anexos B y C. En base a las características petrográficas de las 21 muestras de Brahma, se presentan a continuación las descripciones de las 4 unidades intrusivas identificadas. Para las figuras de microfotografías se usan las abreviaciones minerales que se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 – Abreviaciones minerales usadas en las microfotografías de este capítulo.

Mineral	Abreviación
cuarzo	qtz
feldespato potásico	feld-K
plagioclasa	plg
hornblenda	hbl
biotita	bt
clorita	chl
epidota	ep
pirita	py
anhidrita	anh
apatito	apa

### 4.1 GRANODIORITA (GRD)

Esta unidad ígnea es la roca huésped de los demás intrusivos participantes en el prospecto Brahma. Tiene una textura fanerítica equigranular de granos medios e hipidiomórficos. Su estructura es homogénea y presenta fábrica isótropa. El índice de color está en el límite leucocrático a mesocrático con un porcentaje de máficos entre 30 % y 45 % (Fig. 4.1).

En promedio de las muestras de esta unidad, el 45 % de los cristales observados corresponden a plagioclasas que alcanzan un tamaño de hasta 4 mm; los cristales de cuarzo y feldespato potásico representan cada uno un 10 % del total y varían entre 2 a 4 mm en tamaño. Las fases máficas presentes son hornblenda y biotita con un 20 % y 15 % respectivamente y tamaños menores a 3 mm.

En lámina delgada se observa la asociación de alteración propilítica con intensidad moderada, representada por cristales de epidotas y cloritas < 0,4 mm junto con un sobrecrecimiento leve de plagioclasas. Además, se identifica la presencia de pirita diseminada con tamaños menores a 0,4 mm (Figs. 4.2 y 4.3). En cuanto a texturas, se observan zonaciones oscilatorias en algunas plagioclasas y textura consertal entre granos de cuarzo, plagioclasa y feldespato alcalino (Fig. 4.2). También se reconoce textura poikilítica de opacos en oikocristales de biotita con reacción de clorita entre ellos como se observa en Fig. 4.3.



Fig. 4.1 – Muestra de mano B06-111 de la unidad GRD.

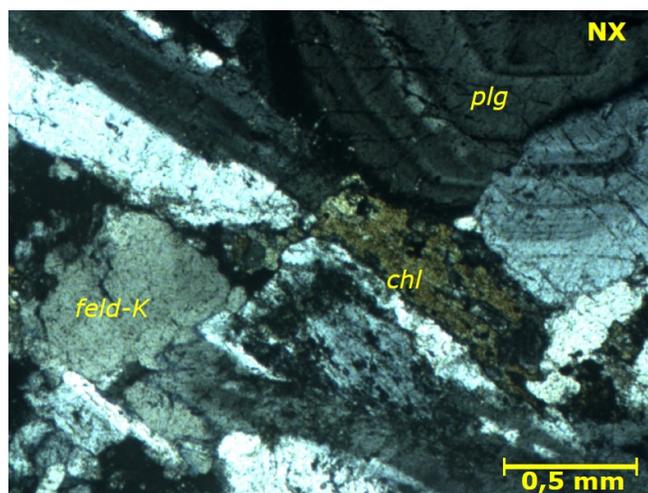


Fig. 4.2 – Microfotografía a nícoles cruzados con aumento de 5X de la muestra B06-111 correspondiente a la unidad GRD. Se observan: plagioclasa zonada, biotita cloritizada y descompuesta en los bordes, relictos de textura consertal.

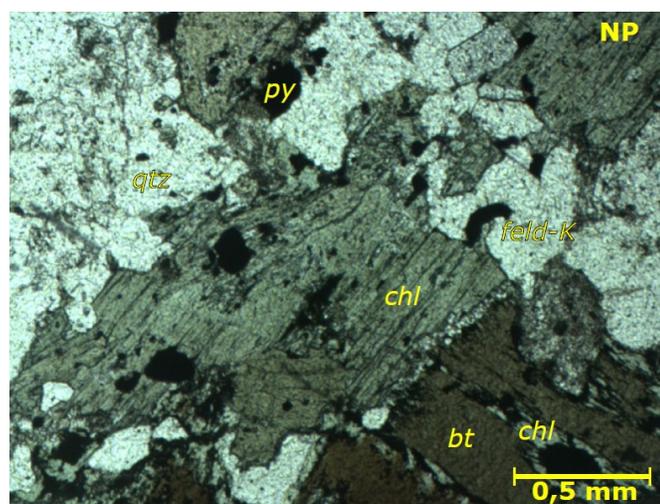


Fig. 4.3 – Microfotografía a nícoles paralelos con aumento de 5X de la muestra B06-111 correspondiente a la unidad GRD. Se observan: texturas poikilitica de opacos dentro de biotitas reemplazadas a clorita.

## 4.2 PÓRFIDO DE FELDESPATO Y HORNBLENDAS REDONDEADAS (PFHR)

Este pórfido tiene una textura hipocristalina inequigranular, porfídica de granos gruesos considerando el tamaño de la familia mayor de hornblendas, aunque descontando estos cristales su granularidad es fina a media (Figs. 4.4 y 4.5).

Los fenocristales son hipidiomórficos y cubren el 35 % de la roca mientras que el 65 % restante corresponde a la masa fundamental. Tiene una estructura homogénea sin morfologías especiales observadas. Su fábrica es isótropa e índice de color leucocrático. Los fenocristales de plagioclasas tienen varios tamaños alcanzando hasta 4 mm, con hábito subhedral tabular y un 20 % de abundancia. El cuarzo y feldespato alcalino no superan los 2 mm con granos masivos anhedral y en suma representan un 5 % de abundancia. Se presentan hornblendas de hasta 1 cm redondeadas y otras menores de hábito subhedral tabular de hasta 6 mm con una abundancia de 10 % del total de la roca.

Se observan texturas de desequilibrio como descomposición de minerales hidratados (Fig. 4.6). También, se observa zonación oscilatoria en las plagioclasas. En algunos cortes se observan texturas de microbrechización y fragmentación de cristales de plagioclasa y cuarzo (Fig. 4.7) junto con reabsorción desde los bordes de dichos minerales. Se observa textura glomeroporfídica de plagioclasas.

En tramos profundos de los sondajes tiene una fuerte alteración filica que afecta pervasivamente la masa fundamental y desintegra los fenocristales, mientras que en las zonas más superficiales se observa una alteración propilítica moderada a intensa. Aparecen en esta unidad, vetillas de sinuosidad débil a moderada de hasta 2 mm de ancho, rellenas de cuarzo-sericita, cuarzo-anhidrita, y clorita-epidota que se presentan más rectas en las zonas altas del prospecto (Fig. 4.8).



Fig. 4.4 – Muestra de mano B03-155 de la unidad PFHr con alteración propilítica.



Fig. 4.5 – Muestra de mano B03-413 de la unidad PFHr con alteración filica intensa.

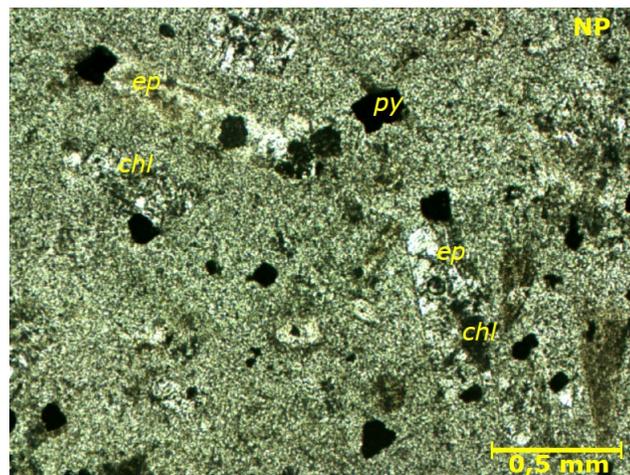


Fig. 4.6 – Microfotografía a nícoles paralelos con aumento de 5X de la muestra B03-357 correspondiente a la unidad PFHr. Se observan: epidota reemplazando selectivamente cristales primarios de hornblenda y plagioclasas, clorita presente como reemplazo de cristales primarios y en la masa fundamental, pirita diseminada de manera isótropa.

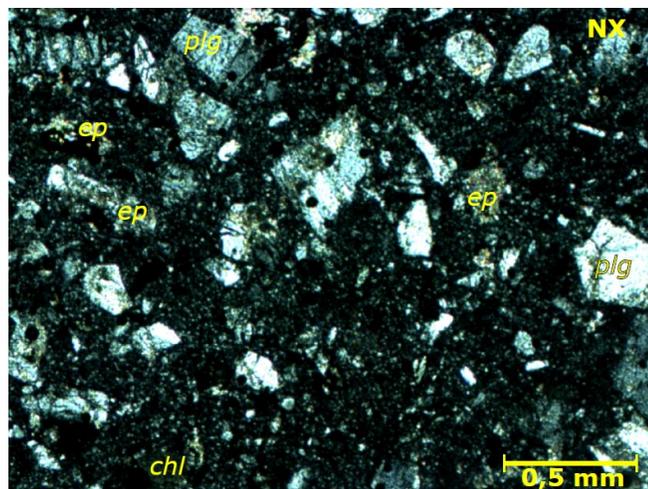


Fig. 4.7 – Microfotografía a nícoles cruzados con aumento de 5X de la muestra B03-472 correspondiente a la unidad PFHr. Se observan: múltiples cristales de cuarzo y plagioclasa fragmentados en una masa fundamental muy fina, epidota y clorita presentes como alteración con menor arcilla.

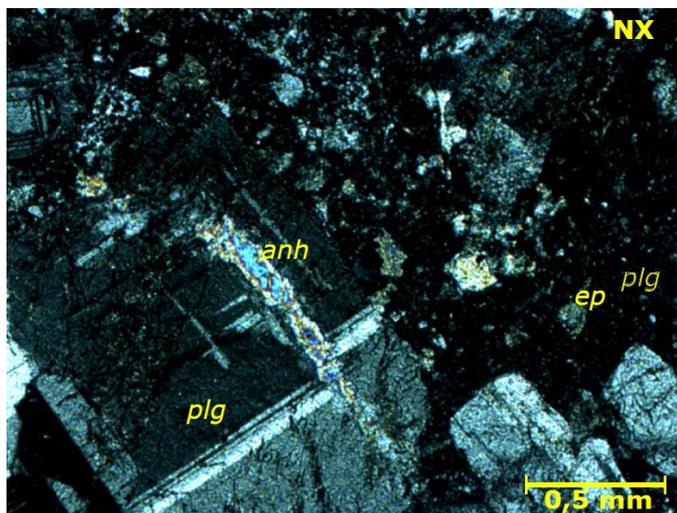


Fig. 4.8 – Microfotografía a nícoles cruzados con aumento de 5X de la muestra B03-472 correspondiente a la unidad PFHr. Se observan: Plagioclasas de distintos tamaños, algunas se observan zonadas. En la imagen un cristal de plagioclasa de 2 mm de largo muestra una vetilla de anhidrita de 0,1 mm de ancho. También se observa epidota menor a 0,2 mm y sericita.

### 4.3 TONALITA (TON)

Es un cuerpo intrusivo fanerítico holocristalino equigranular de granos medios e hipidiomórficos. Su estructura es homogénea y sin morfologías especiales observadas. La fábrica es isótropa y su índice de color es leucocrático a mesocrático. Presenta magnetismo moderado.

Se encuentra muy brechizada en secciones monomíticas con una matriz ígnea fina y oscura como se observa en Fig. 4.9. En otras ocasiones se le observa intruyendo a unidades porfídicas anteriores como en Fig. 4.10 donde la relación de contacto es evidenciada por el vetilleo desde TON hacia la unidad PFHr.

La abundancia mineral de plagioclasa es de 60 % con tamaños de hasta 5 mm de largo, el cuarzo alcanza un 30% con tamaños entre 2 y 4 mm, existen pseudomorfos de biotita y hornblenda reemplazados a epidota, clorita y esmectitas (Fig. 4.11), estas fases máficas alteradas junto a opacos (fundamentalmente pirita) completan el 10 % restante de las muestras.

En lámina delgada se reconocen relictos de textura consertal entre granos de cuarzo y algunas plagioclasas. También, se observa zonación oscilatoria en algunas plagioclasas (Fig. 4.12) y texturas de desequilibrio por reacción y reemplazo de los minerales ferromagnesianos primarios por asociaciones de la alteración propilítica. Existe una presencia considerable de arcilla reemplazando preferentemente plagioclasas.

Esta unidad presenta una alteración propilítica de intensidad moderada, levemente mayor que en la roca caja (GRD). TON aparece brechizada en algunas zonas con clastos subangulosos y una matriz ígnea fina y oscura.

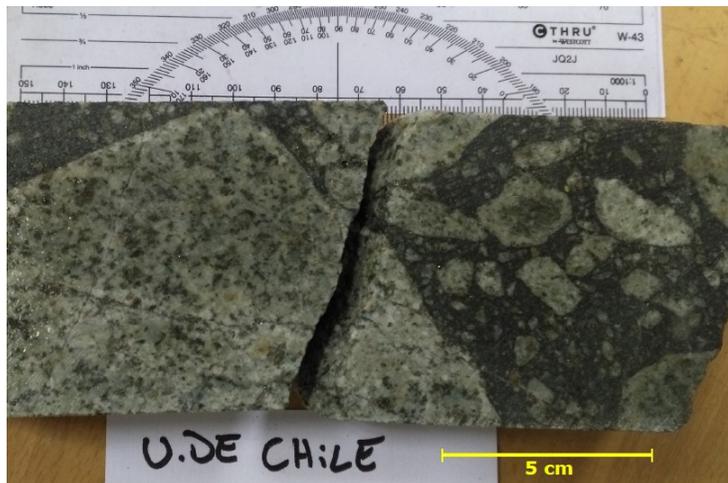


Fig. 4.9 – Muestra de mano B02-5 de brecha hidrotermal con matriz de turmalina, sección monomítica con clastos de TON.

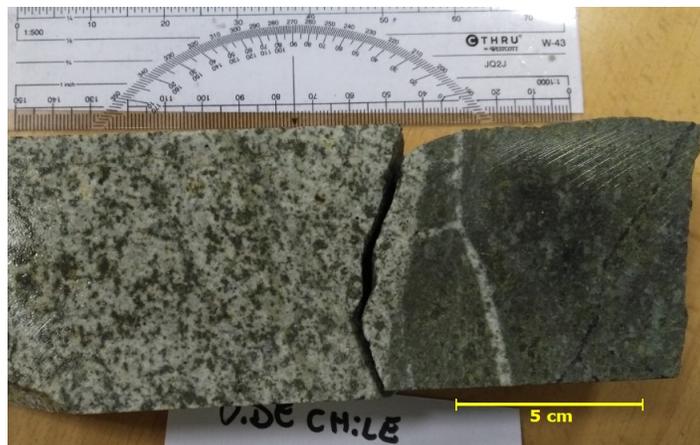


Fig. 4.10 – Muestra de mano B02-7 de la unidad TON intruyendo a PFHr.

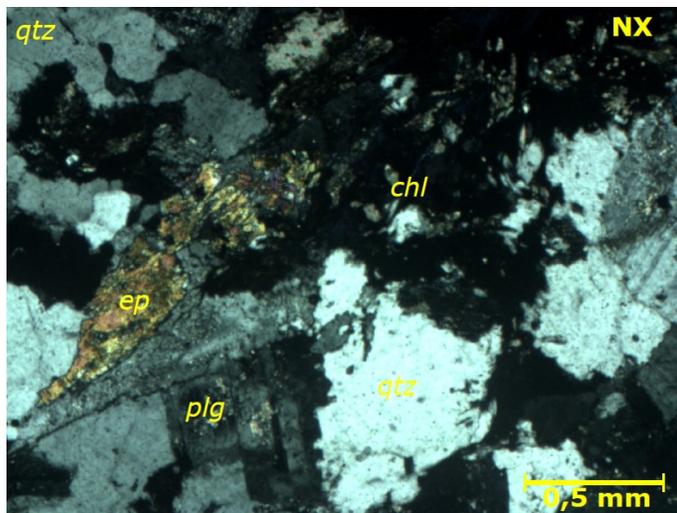


Fig. 4.11 – Microfotografía a nícoles cruzados con aumento de 5X de la muestra B03-472 correspondiente a la unidad TON. Se observan: pseudomorfo de hornblenda reemplazado por epidota, clorita también reemplazando máficos primarios, cuarzo y plagioclasa en textura consertal y con reabsorciones.

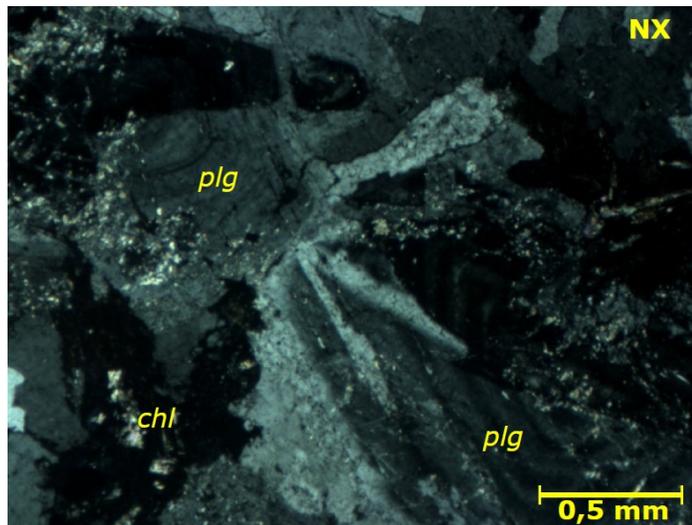


Fig. 4.12 – Microfotografía a nícoles cruzados con aumento de 5X de la muestra B02-159 correspondiente a la unidad TON . Se observan plagioclasas con zonación oscilatoria, clorita y smectitas reemplazan minerales primarios, también sericita reemplazan a plagioclasas.

#### 4.4 PÓRFIDO DE FELDESPATO Y HORNBLENDA (PFH)

Es un intrusivo de textura hipocristalina inequigranular, porfídica con aproximadamente 45 % de masa fundamental y 55 % de fenocristales. El índice de color de esta unidad es leucocrático. Su estructura y fábrica general es homogénea e isótropa como se observa en Fig. 4.13. Sin embargo, en ciertas secciones intermedias del sondaje BRA-004 y BRA-006, se observan unas leves lineaciones señaladas por la orientación preferencial de fenocristales de plagioclasa y hornblenda.

Los fenocristales de plagioclasa representan el 35 % de la roca con tamaños desde 2 mm a 8 mm. La fase hornblenda tiene una abundancia del 15 % con tamaños menores a 6 mm. El cuarzo y feldespato alcalino con 5 % cada uno completan la fracción de fenocristales con tamaños menores a 2 mm.

La masa fundamental corresponde a un mosaico muy fino de cuarzo y feldespato alcalino en textura felsítica como bien exhibe la Fig. 4.14. Se presentan apatitos de hasta 0,2 mm y piritas menores a 0,1 mm.

Además de la textura porfídica dominante, se observa textura glomeroporfídica de plagioclasas formando cúmulos de hasta 5 mm que son más frecuentes que en PFHr. También se reconoce descomposición de minerales hidratados, esto evidenciado por pseudomorfos de hornblendas reemplazados por fases anhidras en sus bordes. Se observa zonación oscilatoria en algunas plagioclasas. Nuevamente se reconocen texturas de microbrechización y fragmentación de cristales de plagioclasa y cuarzo junto a reabsorción desde los bordes como muestra la Fig. 4.15.

Contiene distintos arreglos de vetillas en general rectas a débilmente sinuosas de hasta 4 mm de ancho, rellenos de cuarzo-sericita, cuarzo-anhidrita, clorita-epidota, y en algunos casos acompañan piritita con menor calcopiritita y muy escasa bornita. En tramos intermedios y profundos de los sondajes, se observa que esta unidad presenta silicificación progresivamente más intensa

hacia el fondo de ellos. En ciertos tramos de los sondajes BRA-004 y BRA-005, PFH muestra fragmentos de un pórfido anterior mineralizado con vetillas de molibdenita y calcosina.



Fig. 4.13 – Muestra de mano B06-253 de la unidad PFH.

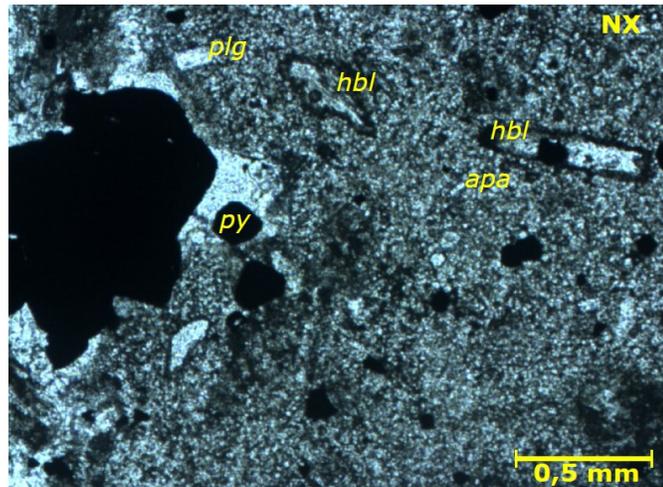


Fig. 4.14 – Microfotografía a nícoles paralelos con aumento de 5X de la muestra B06-253 correspondiente a la unidad PFH. Se observan hornblendas de hasta 0,5 mm reemplazadas parcialmente por epidota además de presentarse descompuestas desde sus bordes, pirita y apatito.

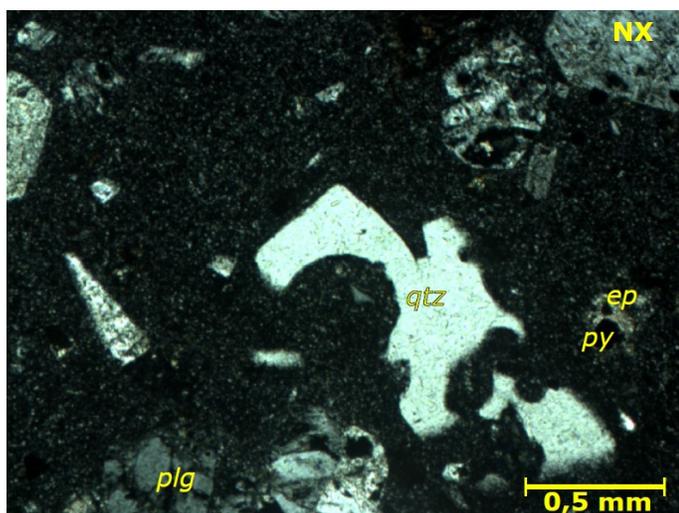


Fig. 4.15 – Microfotografía a nícoles cruzados con aumento de 5X de la muestra B05-272 correspondiente a la unidad PFH. Se observan fenocristales de cuarzo y plagioclasa fragmentados y con reabsorción avanzada en cuarzo, cristales de epidota como alteración y piritita.

#### 4.5 RESULTADOS GENERALES E INTERPRETACIÓN DE LA PETROGRAFÍA DE LAS MUESTRAS DE BRAHMA

A continuación, se detallan aquellos aspectos que es posible dilucidar desde la petrografía para cada unidad. En base a las 21 muestras recolectadas y su petrografía.

De la mineralogía presente en GRD, se observa que esta unidad proviene de un magma de diferenciación intermedia con una tasa de nucleación relativamente baja con respecto a la tasa de crecimiento de cristales. Estos procesos habrían ocurrido en una zona profunda de un sistema magmático, donde el enfriamiento puede ser lo suficientemente lento para conseguir los resultados observados, como lo son su tamaño granular medio y textura fanerítica equigranular.

Con su textura porfídica, PFHr refleja que tuvo al menos dos etapas de cristalización con condiciones diferenciables entre sí. La primera etapa habría tenido lugar a una mayor profundidad y con una tasa de crecimiento de cristales alta en comparación a la tasa de nucleación, condiciones en las cuales se desarrollan los fenocristales de plagioclasa, hornblenda, además de cuarzo y feldespato potásico en menor medida. Luego, habría ocurrido una etapa de rápido enfriamiento, alta nucleación y bajo crecimiento de cristales conformando la masa fundamental felsítica de cuarzo y feldespato potásico.

Las características petrográficas que presenta TON son una alteración propilitica de leve a moderada con reemplazo de clorita y epidota en las fases máficas primarias. Los cristales de biotita son casi irreconocibles salvo por algunos pseudomorfos. Este intrusivo tuvo un enfriamiento lento en profundidad que permitió conseguir una granulometría levemente mayor a GRD. La mineralogía es comparable a la de la roca huésped del prospecto, aunque TON tiene menor abundancia de feldespato potásico y de minerales máficos además de presentar magnetismo moderado.

Según las microtexturas observadas en TON, también se desprende que en etapas tardías de cristalización el sistema alcanzó la curva del solidus en condiciones eutécticas generando suturas aserradas en textura consertal.

PFH tiene una mineralogía y texturas similares a las de la unidad PFHr. Sin embargo, es posible distinguir ambas por varios aspectos. La característica más destacada es el gran tamaño que alcanzan las hornblendas en PFHr, incluso perdiendo el hábito tabular elongado característico de anfíboles y tomando un aspecto más redondeado. Además, PFHr tiene una mayor proporción de masa fundamental, lo que indica que la primera etapa de formación de fenocristales en este intrusivo fue menos prolongada en el tiempo que en PFH, alcanzando una menor densidad de cristales antes del evento de enfriamiento rápido que genera la masa fundamental.

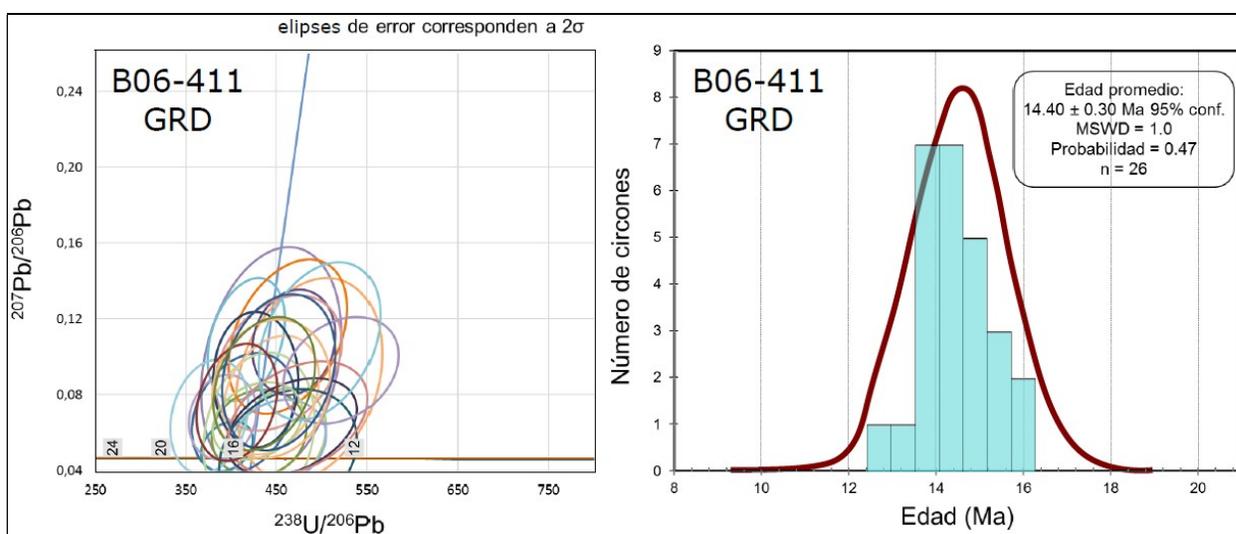
En ambos intrusivos porfídicos existen tramos de sondaje donde se observa brechización, y en lámina delgada es posible observar texturas de fragmentación de cristales primarios reflejando un proceso de microbrechización. En el contexto de un yacimiento de tipo pórfido cuprífero, esto se puede relacionar a las sucesivas sobrepresiones producidas por la acumulación de fluidos hidrotermales en las zonas apicales de los cuerpos intrusivos. Al exceder la presión confinante, la roca huésped y la encajante se fracturan, observándose este fenómeno también en escala microscópica en los fenocristales ya formados con anterioridad que se comportan de manera frágil.

## 5 GEOCRONOLOGÍA DEL PROSPECTO BRAHMA

Con el fin de asignar una edad absoluta a las unidades GRD, PFHr, TON y PFH, se seleccionan 5 del conjunto total de 21 muestras tomadas en Brahma. A cada una de ellas se les realizan dataciones de U-Pb en cristales individuales de circones mediante LA-ICP-MS en los laboratorios de la Universidad Autónoma de México. Es decir, cada unidad cuenta con una muestra datada a excepción de TON la cual cuenta con dos muestras datadas (Tabla 1.1). Los resultados completos de dataciones U-Pb para las 4 unidades identificadas en Brahma se presentan en el Anexo D (donde también se destacan selecciones de circones pertinentes a la determinación de edades para la unidad TON).

### 5.1 EDADES RADIOMÉTRICAS U-PB EN CIRCONES DE UNIDADES ÍGNEAS DE BRAHMA

De la unidad GRD se tomó una muestra para datación a los 411 m del sondaje BRA-006 (muestra B06-411). En la muestra analizada, se obtuvo un total de 25 puntos datados en distintos circones que se distribuyen en torno a una edad promedio de  $14,40 \pm 0,30$  Ma, con un MSWD de 1,0 y una probabilidad de 0,47 (Fig. 5.1).



La unidad PFHr fue datada en una muestra ubicada a los 155 m del sondaje BRA-003 (muestra B03-155). En esta muestra se obtuvo un total de 32 puntos datados en distintos circones, de los cuales se calcula un promedio de edad de  $14,10 \text{ Ma} \pm 0,23 \text{ Ma}$ , con un MSWD de 1,15 y una probabilidad de 0,26 (Fig. 5.2).

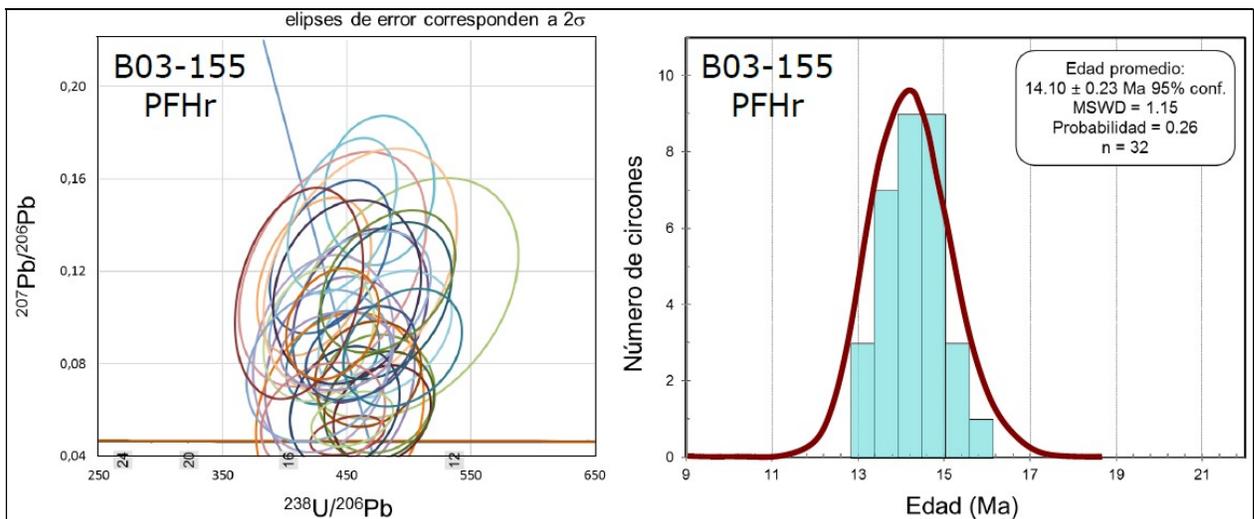


Fig. 5.2 – Concordia inversa, probabilidad relativa y edades  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  de 32 circones analizados en la muestra B03-155 correspondiente a la unidad PFHr.

De las observaciones de los sondajes descritos en este trabajo, el siguiente intrusivo en temporalidad corresponde a la unidad TON. Esta unidad fue datada mediante dos muestras tomadas a los 18 y a los 159 m del sondaje BRA-02 (muestras B02-9 y B02-159). En la muestra más somera datada (B02-9) se obtuvo un total de 33 puntos dados en distintos circones, los cuales presentan una distribución bimodal (Fig. 5.3). Entonces, se separó un conjunto de 16 circones más jóvenes para los cuales se calcula un promedio de edad de  $13,64 \pm 0,52$  Ma, con un MSWD de 1,5 y probabilidad de 0,11. Para el conjunto restante de 17 circones se obtiene una edad promedio de  $16,60 \pm 0,57$  Ma, con un MSWD de 0,50 y una probabilidad de 0,95 (Fig. 5.3).

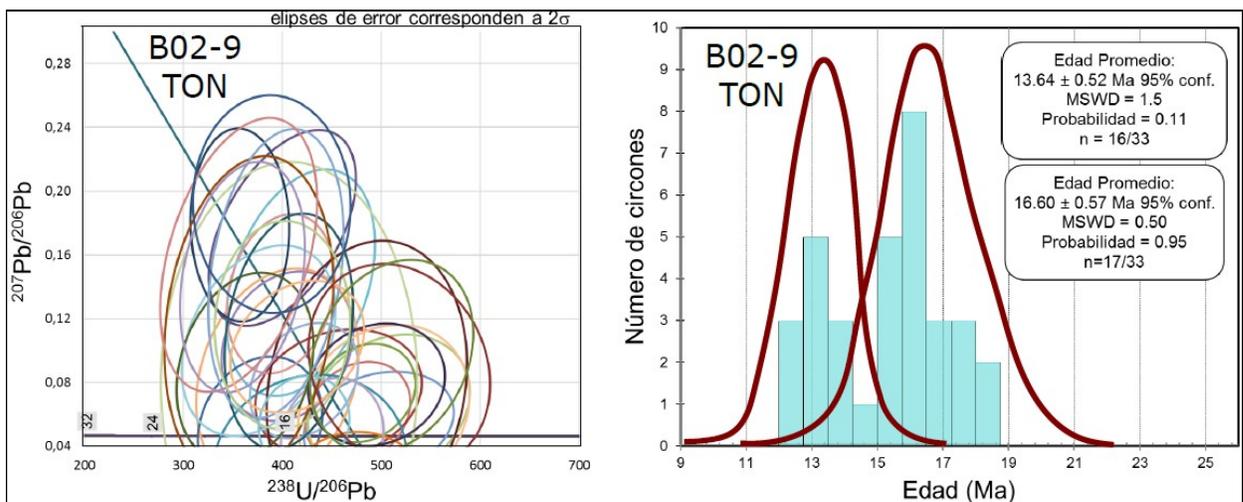


Fig. 5.3 – Concordia inversa, probabilidad relativa y edades  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  de 33 circones analizados en la muestra B02-9 correspondiente a la unidad TON.

En la muestra más profunda de TON datada (B02-159) se obtuvo un total de 31 puntos dados en distintos circones. Al igual que en B02-9 las edades de estos circones se distribuyen en torno a dos promedios, aunque esta vez de forma asimétrica (Fig. 5.4). Siguiendo el mismo

procedimiento que en la muestra anterior, para B02-159 se separó un conjunto de 21 circones más jóvenes para los cuales se calcula una edad promedio de  $13,84 \pm 0,54$  Ma, con un MSWD de 1,5 y una probabilidad de 0,06. Los 10 circones más antiguos restantes tienen un promedio de edad de  $17,50 \pm 0,90$  Ma, con un MSWD de 1,2 y una probabilidad de 0,29 (Fig. 5.4).

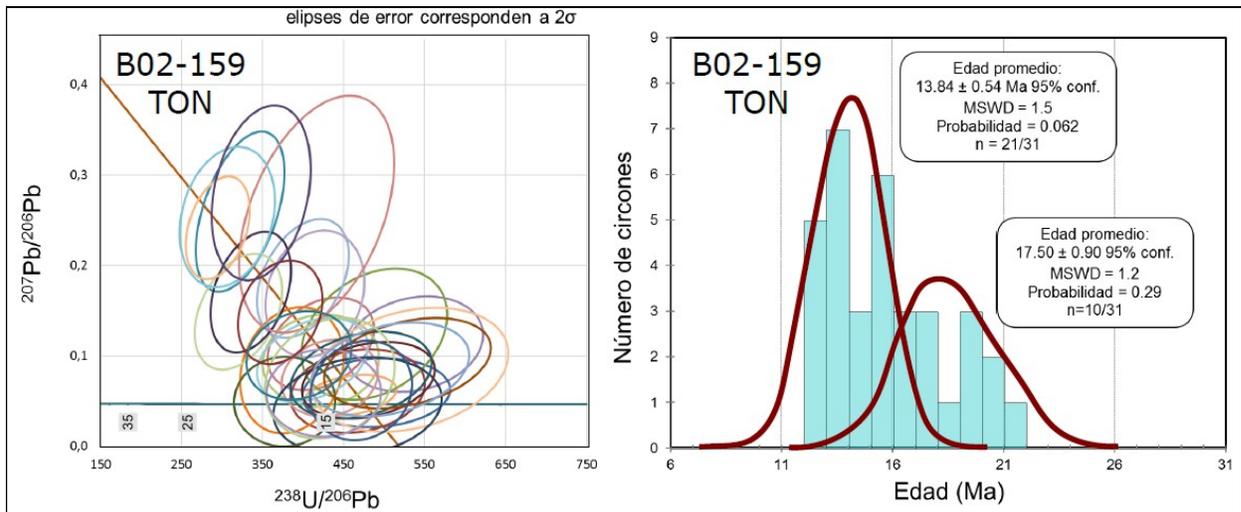


Fig. 5.4 – Concordia inversa, probabilidad relativa y edades  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  de 31 circones analizados en la muestra B02-159 correspondiente a la unidad TON.

La unidad más joven, PFH, fue datada en una muestra tomada a los 253 m del sondaje BRA-006 (muestra B06-253). En esta muestra se obtuvo un total de 23 puntos datados en distintos circones que se distribuyen en torno a un promedio de edad de  $9,28 \pm 0,23$  Ma, con un MSWD de 1,4 y una probabilidad de 0,08 (Fig. 5.5).

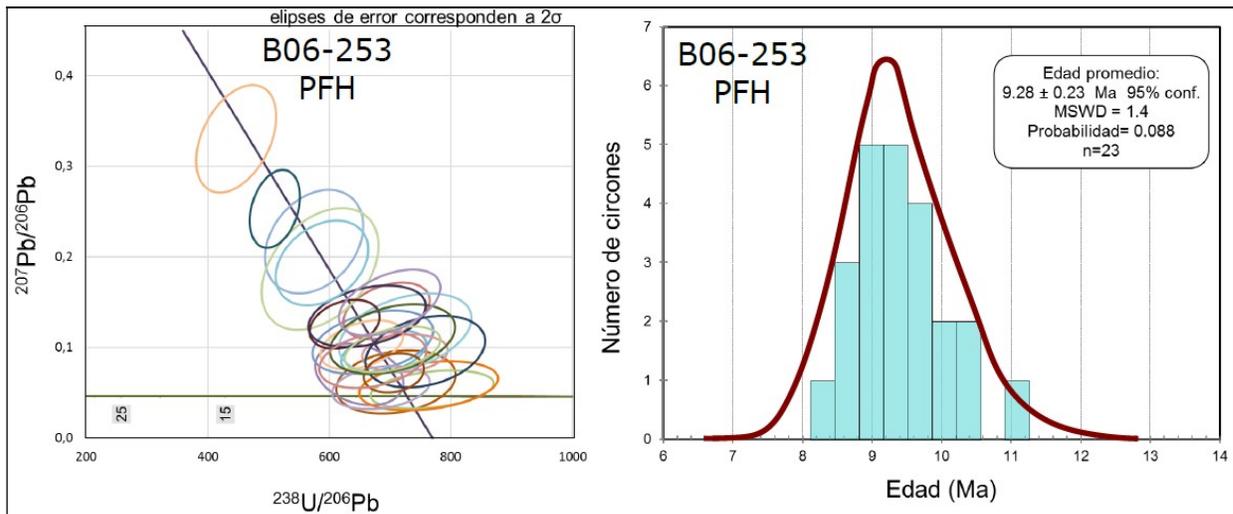


Fig. 5.5 – Concordia inversa, probabilidad relativa y edades  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  de 23 circones analizados en la muestra B06-253 correspondiente a la unidad PFH.

En la Tabla 5.1 se presenta un resumen de los resultados generales de dataciones U-Pb de las 4 unidades ígneas reconocidas en este trabajo en el prospecto Brahma. En síntesis, las 5 muestras

analizadas mediante este método geocronológico registran 3 edades diferenciables entre sí, las cuales son cercanas a los 17, 14 y 9 Ma.

Las edades antiguas cercanas a 17 Ma se registran en poblaciones de circones presentes en las dos muestras de la unidad TON. En la muestra B02-9 los circones que promedian una edad de ~ 17 Ma son proporcionalmente equiparables a los que promedian ~14 Ma, en cambio, en la muestra B02-159, los circones que promedian una edad de ~17 Ma presentan aproximadamente la mitad de aquellos que promedian una edad de 14 Ma, la cual sigue siendo una proporción importante del total de circones datados en la muestra (cerca de un tercio).

Tabla 5.1 – Resumen de los resultados de dataciones U-Pb efectuadas en el prospecto Brahma.

	Edad joven	2 $\sigma$	MSWD	n	Edad antigua	2 $\sigma$	MSWD	n	Unidad litológica
B06-411	14,40	0,30	1,0	26	-	-	-	-	GRD
B03-155	14,10	0,23	1,15	32	-	-	-	-	PFHr
B02-09	13,64	0,52	1,5	16	16,60	0,57	0,5	17	TON
B02-159	13,84	0,54	1,5	21	17,50	0,90	1,2	10	TON

## 5.2 INTERPRETACIÓN DE EDADES RADIOMÉTRICAS Y MODELO GEOLÓGICO DEL PROSPECTO BRAHMA

Las dataciones de las muestras de GRD y PFHr representan directamente edades de cristalización. Esto debido a que la distribución de los resultados de estas muestras es simple y no se observan datos que indiquen otra posibilidad para discutir algún otro proceso. Las muestras de TON registran 2 edades, la más antigua cercana a los 17 Ma, se interpreta como una edad heredada ya que las relaciones de contacto indican que TON es más joven que GRD y PFHr. Entonces la edad cercana a los 14 Ma representaría su edad de cristalización. Finalmente, PFHr refleja una edad cercana a 9 Ma que se interpreta directamente como edad de cristalización.

La edad de 17 Ma presente en TON como material (circones) heredado durante su evolución, debe corresponder a un pulso intrusivo anterior. Debido a la ubicación y edad, la fuente más probable para este material heredado es alguna de las múltiples facies intrusivas del batolito El Melado. Los antecedentes geológicos de la zona de estudio señalan que el batolito El Melado se emplaza en la zona luego de la inversión de Abanico (la cual ocurrió entre el Oligoceno tardío al Mioceno más temprano según Mpodozis y Ramos, 1989; Charrier *et al.*, 2002, 2005). Este sistema magmático multifásico de grandes proporciones habría estado activo al menos en el rango de 24 a 15 Ma aproximadamente (Drake *et al.* 1982).

En la latitud de estudio (35 – 36°S), entre los 14 y 12 Ma, el magmatismo de arco migró hacia el este junto a la deformación compresiva. Luego de este corrimiento, el magmatismo se situó en el límite actual entre el dominio de rocas cenozoicas y mesozoicas (*e.g.*, Astaburuaga, 2014). En la misma latitud, la actividad magmática posterior a esta migración queda representada por el plutón La Invernada. Este plutón registra edades entre 13 y 7 Ma aproximadamente (Drake, 1976; Astaburuaga, 2014). Entonces, los resultados de este trabajo indican que el desarrollo del prospecto Brahma es sincrónico a esta migración de la deformación y el magmatismo

El reconocimiento de alteraciones hidrotermales y su distribución son congruentes con las que registran los yacimientos de tipo pórfido cuprífero según los modelos clásicos de este tipo de yacimientos (e.g., Lowell y Guilbert, 1970; Camus, 2003). En este sentido y paralelo al análisis ígneo que se presenta en este trabajo, Díaz *et al.* (2018) han desarrollado estudios enfocados en la mineralización y actividad hidrotermal del prospecto Brahma. En dichos estudios se obtuvo, mediante geocronología de  $^{187}\text{Re}/^{187}\text{Os}$  en molibdenita y pirita presentes en vetillas, que la etapa de alteración hidrotermal en Brahma habría comenzado cerca de los 14 Ma y habría perdurado hasta al menos los 10 Ma.

Los eventos hidrotermales que tienen una edad cercana a 14 Ma pueden relacionarse con los intrusivos cercanos a esta edad. El hidrotermalismo con edades intermedias entre 14 y 10 Ma no es directamente relacionable a ningún cuerpo intrusivo reconocido en este trabajo, probablemente existan más unidades ígneas en el prospecto Brahma en profundidad las cuales no han sido interceptadas por los sondajes existentes. Por último, la actividad hidrotermal tardía de ~10 Ma podría relacionarse a la unidad ígnea más joven PFH. Ya que la última unidad intrusiva reconocida en la zona central de Brahma (PFH) presenta el mayor contenido de mineralización de cobre hasta ahora identificado, se interpreta que los eventos hidrotermales cercanos a los 9-10 Ma son aquellos de mayor relevancia metalogénica en el prospecto

Unificando los resultados de descripción de sondajes, observaciones de relaciones de contacto, definición de unidades litológicas y estudios geocronológicos de Brahma, se construye el perfil geológico que se muestra en Figura 5.7 siguiendo la traza A-A' presentada en Figura 3.1.

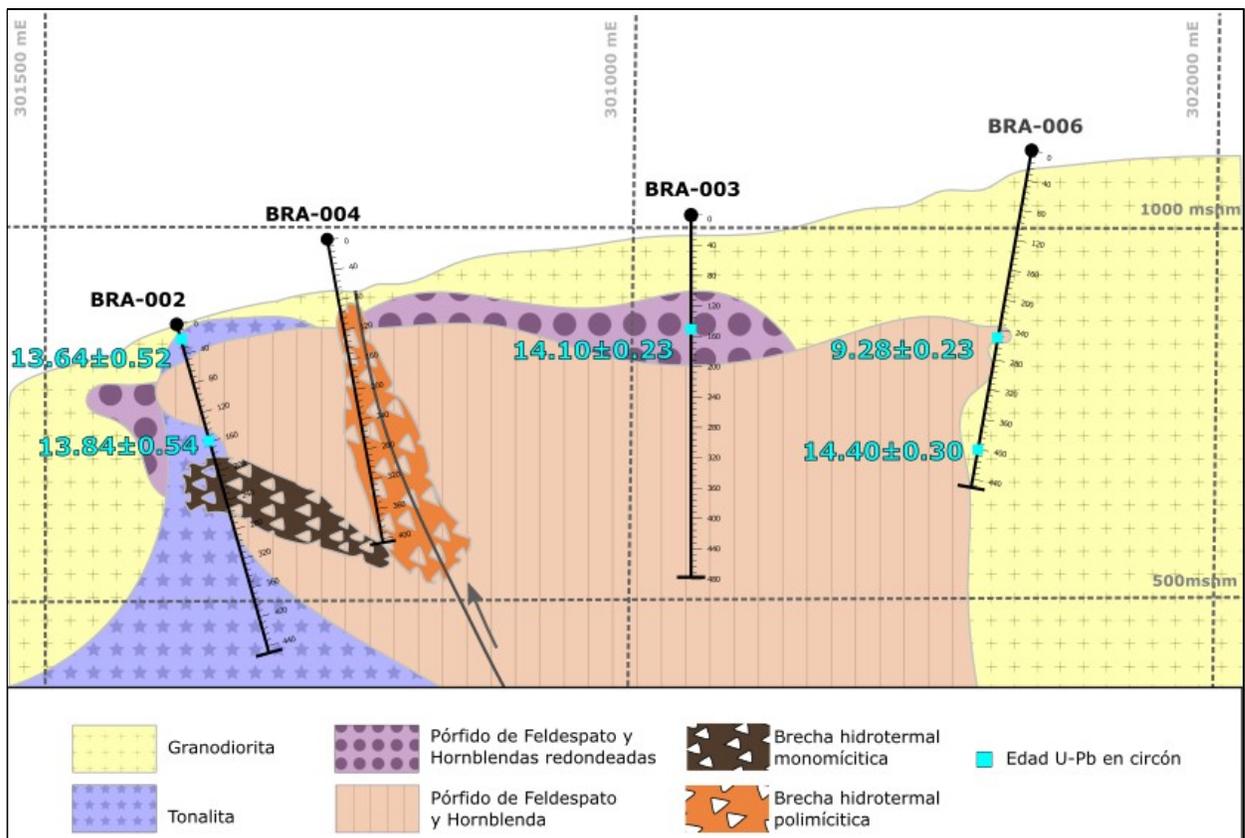


Fig. 5.7 – Perfil litológico del prospecto Brahma proyectado sobre la traza A-A' mostrada en la Fig. 3.1. Se incluye la ubicación de las muestras datadas mediante U-Pb en circones y las edades  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  en sí obtenidas.

## 6 PETROQUÍMICA DEL PROSPECTO BRAHMA

---

Se escogieron 15 del conjunto total de 21 muestras de roca según criterios de representatividad de la unidad a la que corresponden, distribución espacial, y bajo grado de alteración (Tabla 1.1 y Fig. 1.2). A ellas se les realizó análisis químico de roca total de elementos mayores (mediante ICP-OES) y de elementos trazas mediante espectrometría de masas (ICP-MS) en Activation Laboratories Ltda., Canadá.

De las 15 muestras analizadas, 12 de ellas sufrieron una pérdida de volátiles por calcinación durante el análisis (LOI) menor a 3,5 %. De las 3 muestras con mayor LOI, 2 corresponden a las únicas disponibles para representar a la unidad PFHr (B04-387 con LOI=6,28% y B02-403 con LOI=5,08%), por lo que no se descartan del análisis, la otra muestra con alto LOI corresponde a la unidad PFH (B05-193 con LOI= 5,49%) y tampoco se descarta del conjunto analizado debido a que las concentraciones de elementos estudiados siguen la misma tendencia que las demás muestras de la misma unidad. De todas formas, se destacan estos 3 especímenes en la tabla completa de resultados de análisis químico incluida en el Anexo E.

### 6.1 ELEMENTOS MAYORES

Las 15 muestras analizadas tienen un contenido de SiO<sub>2</sub> entre 55,5% y 68,8%. La muestra más básica (B07-298 correspondiente a GRD) se aleja de la tendencia composicional (Fig. 6.1). Por la razón anterior, B07-298 se encuentra individualizado con una simbología diferente (cuadrado verde) en todos los diagramas geoquímicos en este capítulo.

Se observa que los miembros más diferenciados del conjunto corresponden a las muestras de las unidades TON y PFH. Todos los especímenes de estas dos unidades contienen más de 66 % de sílice y se encuentran entonces en el campo de las dacitas (Fig. 6.1).

Las muestras que representan a la unidad PFHr se encuentran en el límite composicional entre andesitas y dacitas (63 % de sílice). Las muestras de GRD tienen una composición andesítica cercana al 62 % a excepción de la muestra B07-298 que escapa de la tendencia general del grupo analizado. Esta última muestra se ubica en el campo de andesitas basálticas según su contenido de sílice (Fig. 6.1).

Discriminar entre afinidad toleítica o calcoalcalina para las muestras analizadas solo en base al contenido de potasio con respecto a la sílice no sería acertado, lo anterior debido a que en todas las muestras se observa escasa mineralogía que incorpore potasio, la que además muestra un importante grado de alteración y reemplazo. Entonces, para determinar la afinidad de las muestras se utiliza un diagrama AFM (Fig. 6.2) y la razón entre FeO<sub>T</sub> y MgO con respecto al SiO<sub>2</sub> (Fig. 6.3), observándose que todas ellas se encuentran dentro del campo calcoalcalino, con una sola muestra de PFH (B05-272) que sobrepasa levemente el límite entre el campo calcoalcalino y toleítico debido a su alto contenido de FeO<sub>T</sub> relativo a su contenido de MgO. De todas formas, el promedio de muestras de todas las unidades queda totalmente inscrito en el campo calcoalcalino en ambos gráficos utilizados.

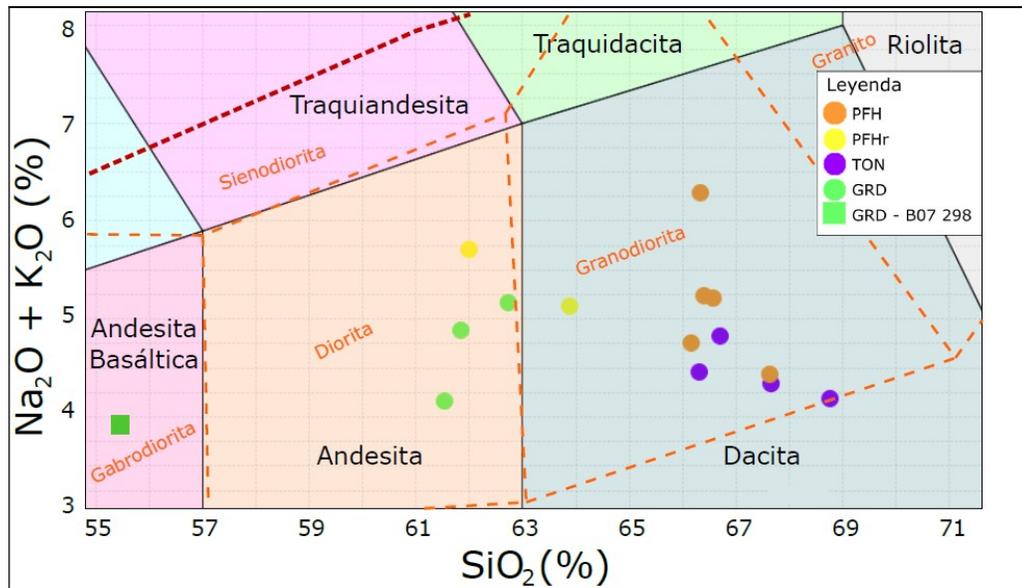


Fig. 6.1 – Diagrama TAS para las muestras del prospecto Brahma. En líneas negras continuas se presentan los límites composicionales para rocas extrusivas (Le Maitre *et al.*, 1989) y en líneas naranjas segmentadas los límites composicionales para rocas intrusivas (modificación TAS de Wilson, 1989) La línea segmentada burdeo muestra el límite entre campos de la serie alcalina y subalcalina de Irvine y Baragar (1971).

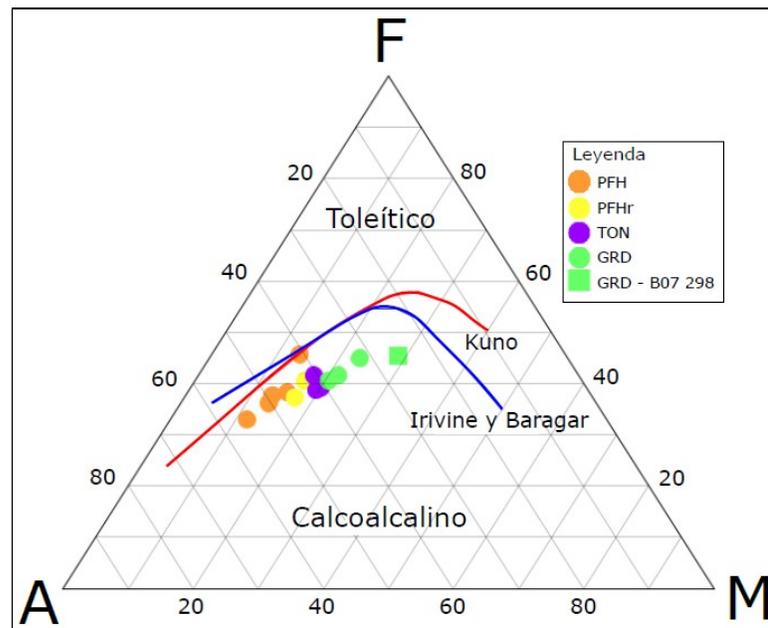


Fig. 6.2 – Diagrama AFM para las rocas intrusivas del prospecto Brahma. La línea azul representa el límite calcoalcalino-toleítico de Irvine y Baragar (1971) y la línea roja el mismo límite determinado por Kuno (1966). A:  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ; F:  $\text{FeO}_T$ ; M:  $\text{MgO}$ .

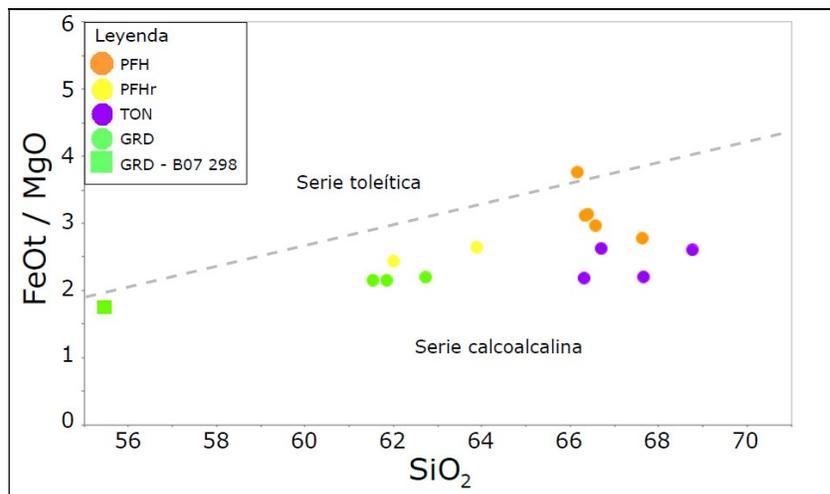


Fig. 6.3 – Diagrama FeO<sub>T</sub> / MgO vs. SiO<sub>2</sub>, donde FeO<sub>T</sub> corresponde al contenido total de hierro.

En Fig. 6.4 se presentan diagramas de variación con respecto a la sílice para 9 elementos mayores y para el número de magnesio. Las concentraciones de estos elementos se expresan en óxidos y el número de magnesio es calculado como  $\#Mg = MgO / (MgO + FeO_T)$ .

De la variación composicional de elementos mayores se observa que la concentración total de hierro exhibe un decrecimiento general a medida que aumenta el SiO<sub>2</sub>. Se observa también que el FeO<sub>T</sub> contenido en las unidades PFHr y PFH se distribuye de forma menos lineal que en GRD y TON (Fig. 6.4).

La concentración de aluminio exhibe un comportamiento similar a la del hierro, aunque esta vez el comportamiento monótono decreciente es más claro tanto para la totalidad de las muestras como evaluando cada unidad por separado. Además, se observa que el descenso de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en el caso de los intrusivos porfídicos (PFHr y PFH) sigue una tendencia lineal por encima del registrado en las unidades faneríticas (GRD y TON). Es decir, a concentraciones de sílice similares, las unidades porfídicas están más enriquecidas en Al con respecto a las faneríticas (Fig. 6.4).

Se observa que la concentración de CaO es decreciente con respecto al aumento de sílice para el conjunto general de las muestras. Las concentraciones de MgO presentan una tendencia análoga a las de CaO, esta vez observándose que, a concentraciones de sílice similares GRD y TON están más enriquecidas en Mg que las unidades PFHr y PFH (Fig. 6.4).

En el caso del K<sub>2</sub>O y del Na<sub>2</sub>O, no se observa una tendencia clara en la variación de los datos pues la dispersión de concentraciones no permite establecer patrones concluyentes. Las concentraciones de MnO y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> también tienen una alta dispersión en un rango acotado de valores menores al 0,4%, por lo que tampoco los datos reflejan alguna tendencia, aunque solo considerando las unidades faneríticas, se observa un decrecimiento lineal de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> con respecto al SiO<sub>2</sub> (Fig. 6.4).

El contenido de TiO<sub>2</sub> tiene un patrón general decreciente de concentraciones con respecto al aumento de SiO<sub>2</sub>. Por otra parte, el #Mg de las muestras analizadas varía en un rango aproximado de 0,2 a 0,4 y muestra un patrón decreciente con respecto al aumento de sílice. A valores

similares de  $\text{SiO}_2$  se observa que los #Mg de PFHr y PFH son menores a los de GRD y TON (Fig. 6.4).

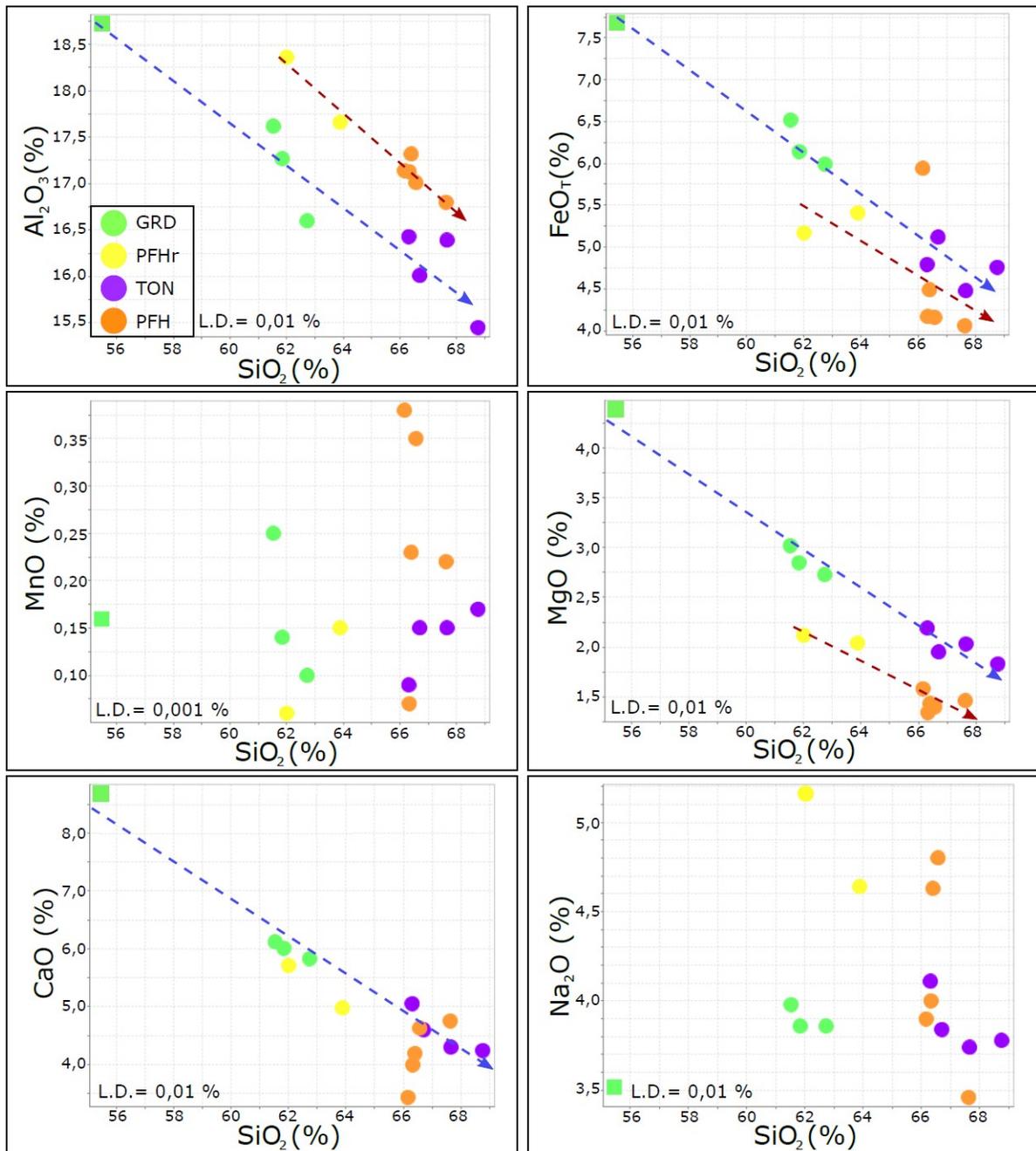


Fig. 6.4 – Diagramas Harker para 9 óxidos elementos mayores (Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ti y P) y el número de magnesio (#Mg) de rocas intrusivas de Brahma. Las flechas segmentadas representan las tendencias parciales de concentración (cuando se logran identificar) para las unidades faneríticas en azul y porfídicas en rojo.

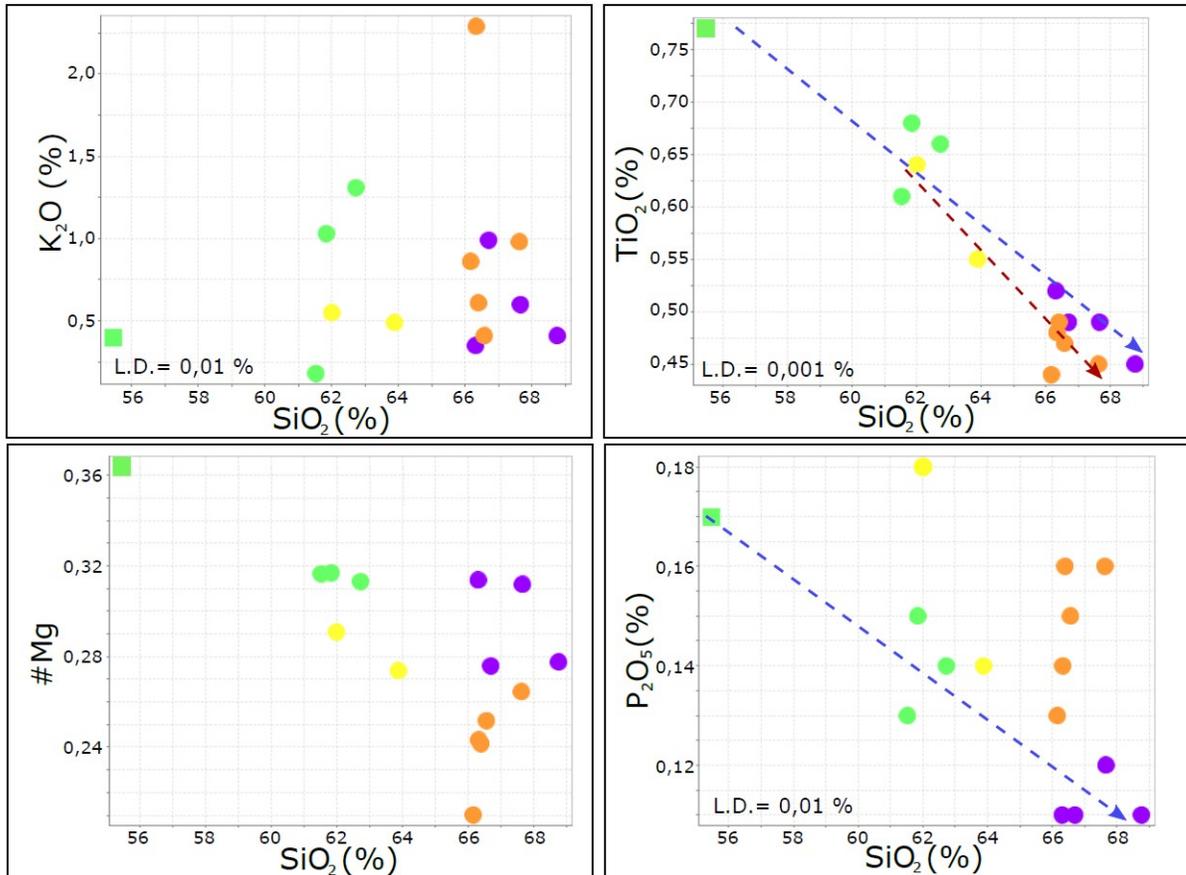


Fig. 6.4 (continuación) – Diagramas Harker para 9 óxidos elementos mayores (Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ti y P) y el número de magnesio (#Mg) de rocas intrusivas de Brahma. Las flechas segmentadas representan las tendencias parciales de concentración (cuando se logran identificar) para las unidades faneríticas en azul y porfídicas en rojo.

## 6.2 ELEMENTOS TRAZAS COMPATIBLES

Al analizar la concentración de los elementos Ni, V, Co, Sc y Cr (metales de transición de carácter inmóvil) en las muestras de Brahma, se observa que las unidades GRD y TON tienen en general una concentración mayor de estos elementos trazas con respecto a PFHr y PFH en rangos de similar contenido de SiO<sub>2</sub> (Fig. 6.5).

El contenido de V, Co, Sc y Cr es decreciente a medida que aumenta la concentración de SiO<sub>2</sub> para las muestras de GRD y TON. La concentración de V y Sc también es decreciente para las unidades PFHr y PFH, aunque con menor pendiente y magnitud de concentraciones. En las unidades PFHr y PFH el contenido de Co y Cr es invariable con respecto al SiO<sub>2</sub> y el contenido de Ni se encuentra por debajo del límite de detección en estas unidades porfídicas (Fig. 6.5).

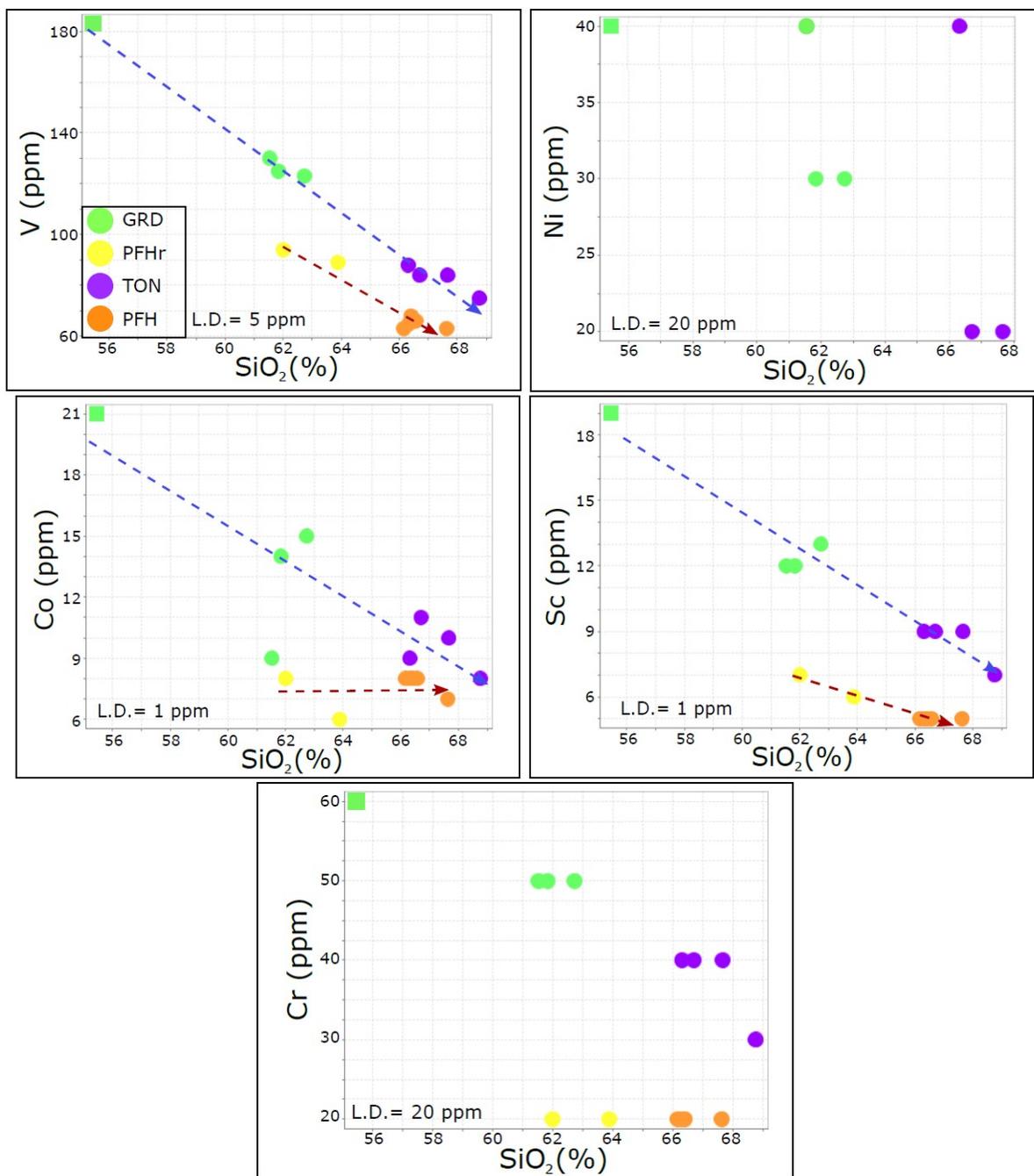


Fig. 6.5 – Diagramas Harker para los elementos trazas compatibles V, Ni, Co, Sc y Cr contenidos en las rocas intrusivas de Brahma. Las flechas segmentadas representan las tendencias parciales de concentración (cuando se logran identificar) para las unidades faneríticas en azul y porfídicas en rojo.

### 6.3 LILEs (*LARGE ION LITHOPHILE ELEMENTS*) Y HFSEs (*HIGH FIELD STRENGTH ELEMENTS*)

El contenido de los LILEs Ba y Rb no muestra ninguna tendencia a medida que varía el contenido de SiO<sub>2</sub>. Mientras que el contenido de Sr sigue una tendencia lineal decreciente con respecto al aumento de SiO<sub>2</sub> en las unidades GRD y TON. Además, se observa que PFHr y PFH

se encuentran enriquecidos en Sr con respecto a GRD y TON y su contenido decrece siguiendo una tendencia más empinada. (Fig. 6.6).

Las concentraciones de Y con respecto al contenido de SiO<sub>2</sub> no muestran una clara tendencia debido a la dispersión de los datos, aunque sí se observa una menor concentración de este HFSE en las muestras que corresponden a la unidad PFH y PFHr con respecto a GRD y TON. Por otra parte, el Zr y el Hf muestran un comportamiento muy similar entre sí con respecto a la variación de SiO<sub>2</sub>. Ambos elementos mantienen concentraciones casi constantes en las unidades PFHr y PFH. Se observa que en rangos similares de SiO<sub>2</sub>, el Y, Zr, Hf y Th se encuentran más concentrados en las unidades GRD y TON que en PFHr y PFH (Fig. 6.7).

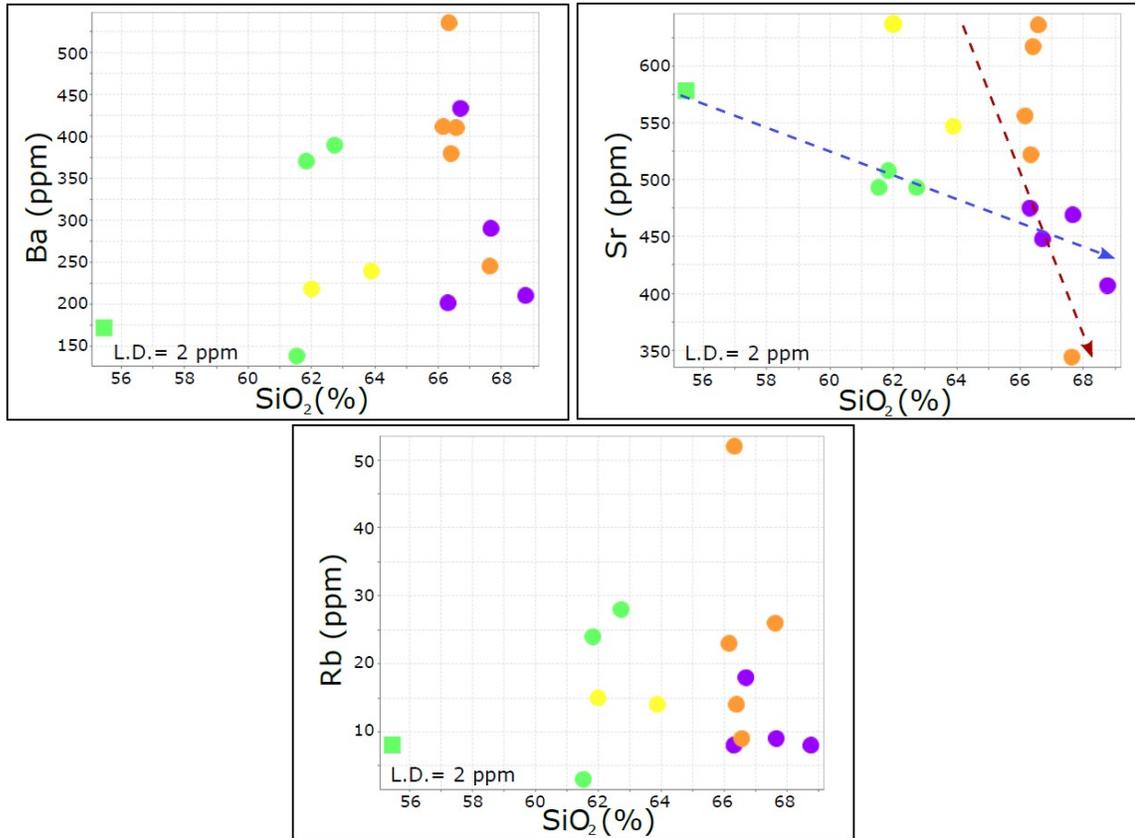


Fig. 6.6 – Diagramas Harker para los LILEs Ba, Sr y Rb contenidos en las rocas intrusivas de Brahma. Las flechas segmentadas representan las tendencias parciales de concentración (cuando se logran identificar) para las unidades faneríticas en azul y porfídicas en rojo.

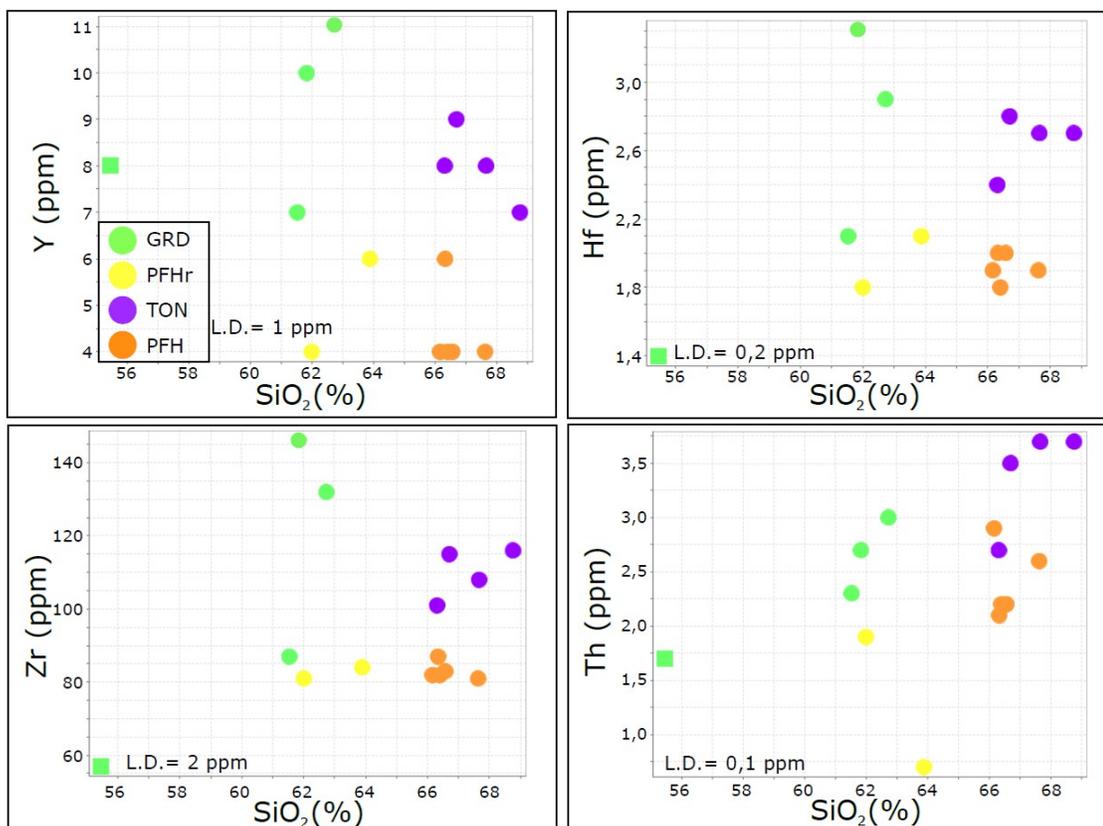


Fig. 6.7 – Diagramas Harker para los HFSEs Y, Hf, Zr y Th contenidos en las rocas intrusivas del prospecto Brahma.

#### 6.4 REEs (*RARE EARTH ELEMENTS*)

La concentración total de tierras raras es levemente mayor en promedio en las unidades GRD y TON que en PFHr y PFH. Al estudiar por separado las tierras raras pesadas y livianas (HREEs y LREEs respectivamente), se observa que la concentración promedio de LREEs no exhibe mayores diferencias entre las distintas unidades. Por otra parte, las HREEs muestran un empobrecimiento en PFHr y PFH en relación con GRD y TON en rangos análogos de sílice (Figs. 6.8 y 6.9).

Al analizar independientemente el La (LREE), se observa una tendencia general creciente de concentración a medida que aumenta el SiO<sub>2</sub> (Fig. 6.8). Por otra parte, el contenido de Yb (HREE) es mayor en las unidades GRD y TON que en PFHr y PFH a concentraciones análogas de SiO<sub>2</sub> (Figs. 6.8 y 6.9).

A medida que aumenta el SiO<sub>2</sub>, PFHr y PFH presentan razones La/Yb (LREE/HREE) crecientes. Estas razones son mayores en comparación a las registradas en GRD y TON (que también son crecientes con respecto al SiO<sub>2</sub>). Las razones de La/Sm (LREE/MREE) de las muestras de Brahma son linealmente crecientes con el aumento de sílice. No se observa que las razones Dy/Yb varíen en función del contenido de SiO<sub>2</sub>, aunque sí se observa que esta razón es mayor en PFHr y PFH que en GRD y TON (Fig. 6.8).

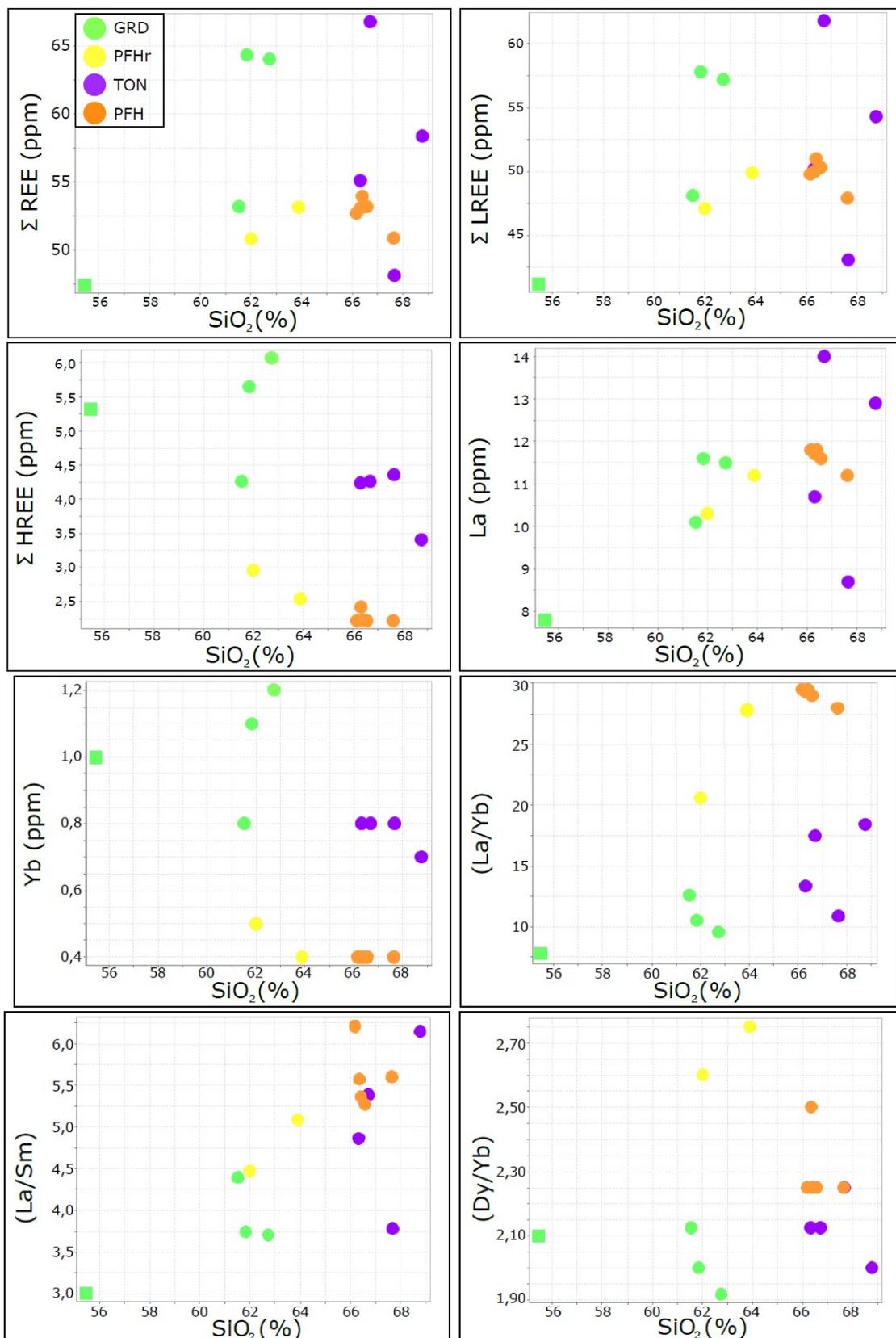


Fig. 6.8 – Diagrama de variación en la concentración de REEs con respecto a SiO<sub>2</sub> para las rocas intrusivas del prospecto Brahma.

En el primer tramo (LREEs desde La a Sm) del patrón de tierras raras normalizado a valores condriticos, no se observan diferencias mayores entre las distintas unidades (Fig. 6.9). En el siguiente tramo (MREEs desde Sm a Dy), las muestras de GRD tienen una pendiente levemente más suave que las de PFHr, observándose entonces que los patrones de REEs de GRD siguen una tendencia por encima de PFHr (Fig. 6.9). En este tramo de MREEs ocurre lo mismo para las muestras de TON, las cuales se observan por sobre las de PFH. Finalmente, en el tramo de tierras raras pesadas (HREEs desde Dy a Lu) las pendientes del patrón de REEs se aplanan para todas las muestras. También, en este último tramo se observa un empobrecimiento de HREEs en PFHr y PFH con respecto a GRD y TON respectivamente para rangos equivalentes de SiO<sub>2</sub> (Fig. 6.9).

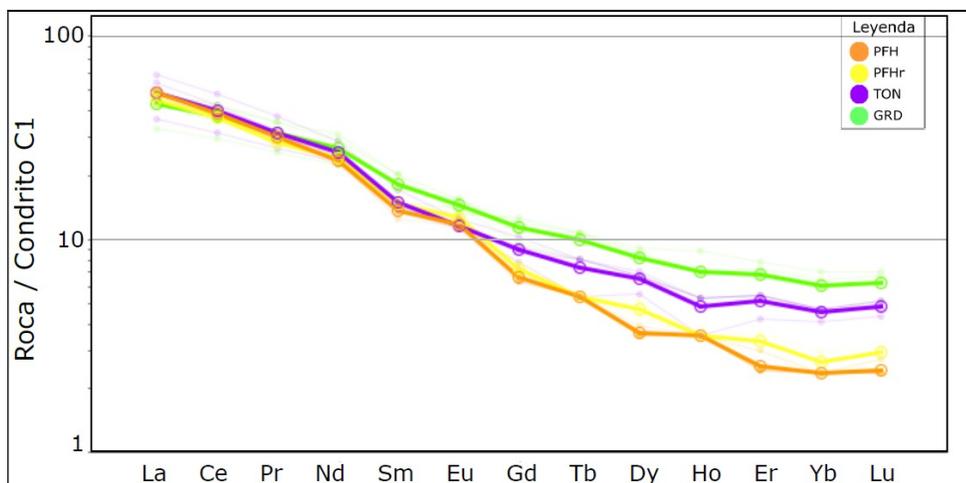


Fig. 6.9 – Diagramas de concentraciones de REEs normalizadas a valores condriticos de Sun y McDonough (1989).

## 6.5 OTROS RESULTADOS PETROQUÍMICOS

Al analizar las muestras de Brahma en un diagrama multielemento (Fig. 6.10), se observa que todas las muestras presentan un enriquecimiento en LILEs y un empobrecimiento en HFSEs relativo a la normalización utilizada. En los mismos diagramas, todas las muestras tienen un marcado empobrecimiento en los elementos Nb y Ta. Cabe mencionar que las grandes diferencias en los elementos Mo y Sb se deben a que su concentración en las unidades porfídicas se encuentra por debajo del límite de detección (2 y 0,5 ppm respectivamente).

Al construir diagramas de discriminación tectónica mediante el contenido de elementos incompatibles en las muestras de Brahma, se observa que todas ellas caen dentro de los campos de rocas graníticas de arco volcánico (Fig. 6.11). Además, todas las unidades presentan razones de La/Ta > 40, Ba/Ta > 20 y Zr/Y > 3 sin excepción, valores típicos para arcos magmáticos continentales (Hildreth y Moorbath, 1988; Kay *et al.*, 2005).

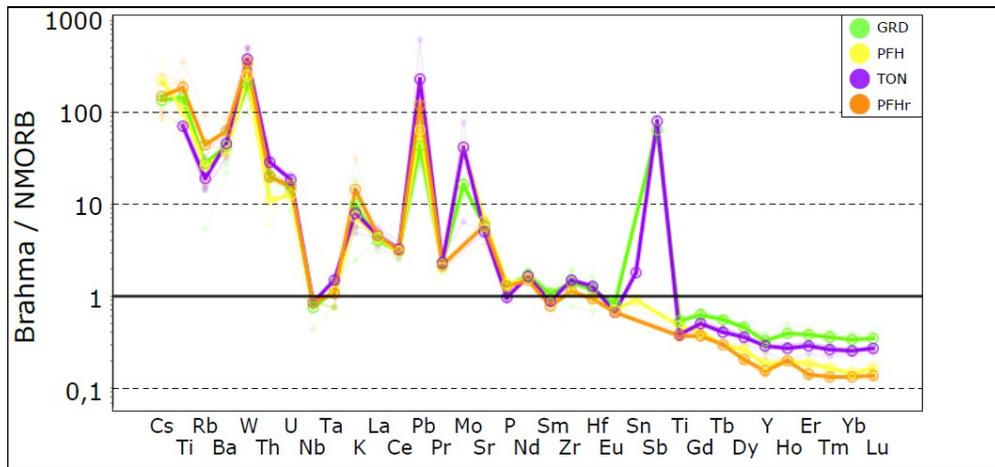


Fig. 6.10 – Diagrama multielementos normalizado a NMORB de Sun y McDonough (1989) Para las muestras de del prospecto Brahma.

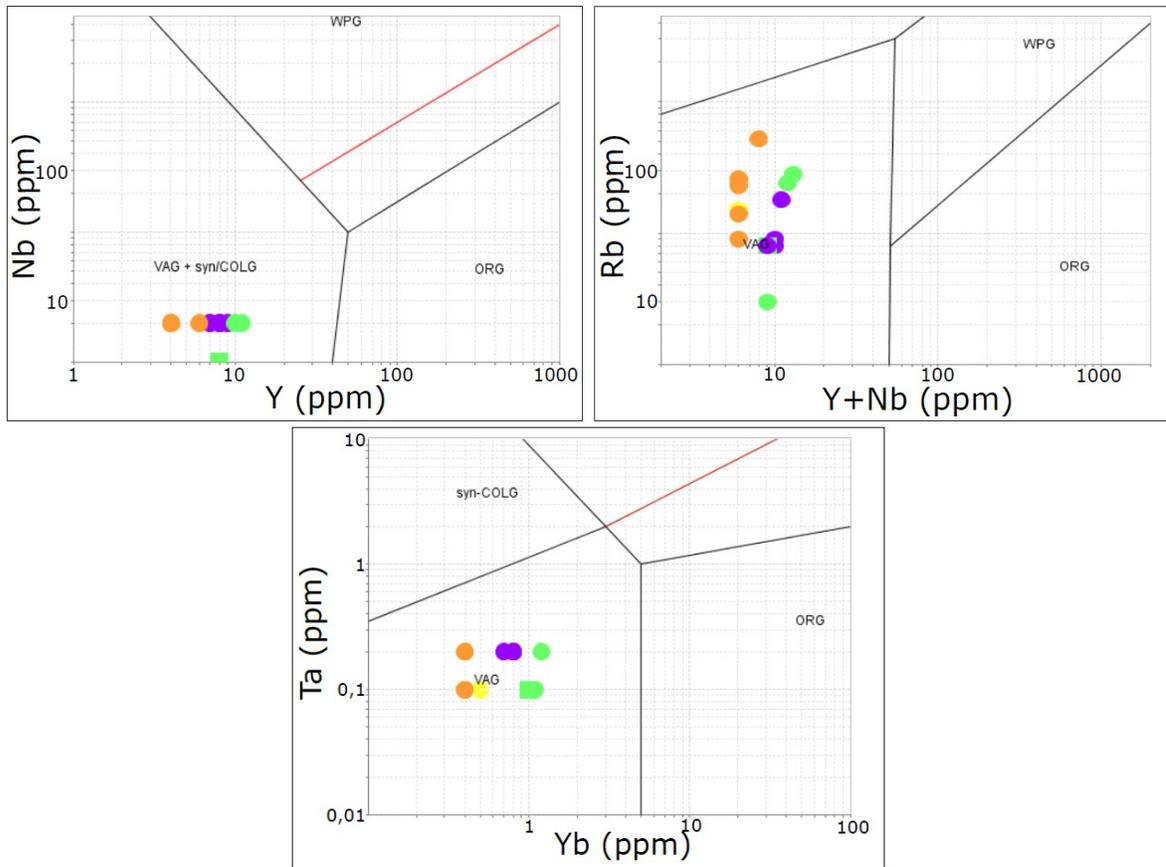


Fig. 6.11 – Diagramas de discriminación tectónica de Pearce *et al.* (1984). VAG: *Volcanic Arc Granites*; WPG: *Within Plate Granites*; syn-COLG: *syn-Collisional Granites*; ORG: *Ocean Ridge Granites*. Las líneas rojas delimitan a los ORG anómalos.

Por otra parte, basándose en una compilación de publicaciones referidas a las rocas adakíticas, se observa que Brahma presenta varias características que se reconocen en este tipo de rocas (Tabla 6.1). Al graficar las concentraciones de Sr/Y vs. Y, se observa que todas las muestras de Brahma

caen dentro del campo de rocas tipo adakita (Fig. 6.12). Observando las concentraciones de La/Yb vs. Yb, sólo las muestras de PFHr se encuentran dentro del campo con signatura adakítica, las muestras de PFH se ubican cercanas al límite de este campo y GRD junto a TON quedan totalmente fuera del campo adakítico (Fig. 6.12). En síntesis, las 4 unidades intrusivas presentan una signatura geoquímica de rocas tipo adakita y esta signatura es más acentuada en PFHr y PFH que en GRD y TON.

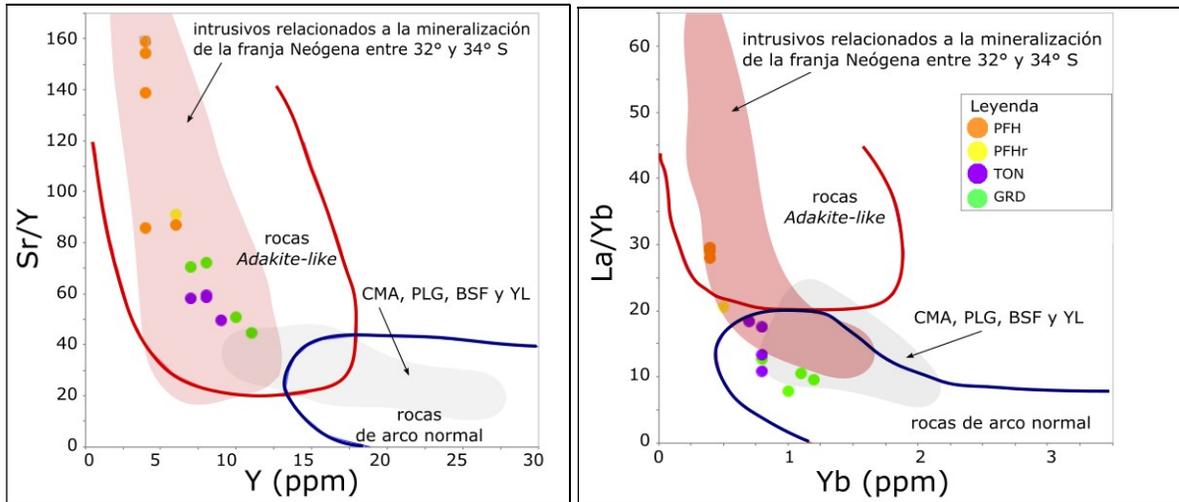


Fig. 6.12 – Diagramas de Sr/Y vs. Y y La/Yb vs. Yb, se incluyen los límites para rocas *adakite-like* y andesitas-dacitas-riolitas normales definidos por Richard y Kerrich (2007).

Tabla 6.1 – Compilación de características que reúnen las rocas de tipo adakítico según Richards y Kerrich (2007), se destaca si las muestras de Brahma cumplen cada una de ellas y comentarios adicionales.

	Rocas tipo adakíticas	Muestras de Brahma	Comentarios
SiO <sub>2</sub>	≥ 56%wt	todas menos B07-298	muestra anómala de GRD
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 15%wt	Todas	
MgO	normalmente < 3%wt	todas menos B07-298	muestra anómala de GRD
#Mg	~0,5	Ninguna	0,22 - 0,37
Sr	≥ 400ppm	todas menos B05-193	muestra de PFH con LOI = 5,5% y 344 ppm de Sr
Y	≤ 18ppm	Todas	
Yb	≤ 1,9ppm	Todas	
Ni	≥ 20ppm	Todas	
Cr	≥ 30ppm	GRD y TON	PFHr y PFH = 20 ppm L.D. = 20 ppm
Sr/Y	≥ 20ppm	Todas	PFHr y PFH: 80 - 160; GRD y TON: 40 - 70
La/Yb	≥ 20ppm	PFHr y PFH	GRD y TON entre 7,8 y 18,4

## 7 DISCUSIÓN GEOQUÍMICA Y PETROGÉNESIS ÍGNEA PARA EL PROSPECTO BRAHMA

---

La composición geoquímica de las unidades identificadas en Brahma presenta las características típicas observadas en rocas de un arco volcánico continental calcoalcalino (*e.g.*, Kay *et al.*, 2005). Entonces, Brahma es un producto del magmatismo de arco volcánico desarrollado durante el Mioceno en la región.

Los intrusivos más tempranos de Brahma, GRD y PFHr tienen un contenido de SiO<sub>2</sub> del 62 % aproximadamente, los intrusivos posteriores TON y PFH tienen aproximadamente un 67 % de SiO<sub>2</sub>. Entonces, se observa que con el avance del tiempo las unidades identificadas en Brahma se hicieron más diferenciadas.

De los resultados de análisis geoquímicos efectuados se observa en general que existen dos grupos con tendencias distintas, uno compuesto por las unidades faneríticas GRD y TON y otro por las unidades porfídicas PFHr y PFH. Para interpretar las diferencias entre estos dos grupos hay que discutir y evaluar tres opciones principales: (1) el conjunto de GRD y TON tuvieron una génesis y evolución diferente a la de PFH y PFHr; (2) las diferencias de nivel de emplazamiento (y por lo tanto textura, fábrica, permeabilidad, otros) implican que la alteración hidrotermal que sufrieron las unidades de Brahma tenga distinto grado y penetratividad, resultando dos conjuntos de signatura geoquímica distinta a rangos comparables de SiO<sub>2</sub>; (3) ocurrió una combinación de ambas opciones anteriores.

Siguiendo la idea anterior, se observa que la mineralogía primaria es similar para todas las unidades identificadas en Brahma, en todas las muestras la fase plagioclasa domina en abundancia con menor proporción de cuarzo y muy escaso feldespato alcalino, la hornblenda es la fase máfica más presente y se reconoce muy poca biotita. Sin embargo, efectivamente existen diferencias de penetratividad de las alteraciones hidrotermales entre ambos conjuntos de muestras. Las unidades porfídicas de Brahma se encuentran alteradas de forma más intensa y preferentemente en la matriz, junto a un alto grado de reemplazo de mineralogía primaria ferromagnesiana. Este hecho puede explicar que en los diagramas Harker, los elementos compatibles en fases máficas FeO<sub>T</sub>, MgO, #Mg, Cr, Ni, V y Co se observen enriquecidos en las unidades GRD y TON al comparar con PFHr y PFH (Figs. 6.4 y 6.5). El alto reemplazo en la matriz de PFH y PFHr por sericita probablemente es responsable del enriquecimiento observado en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Fig. 6.4). Entonces, al menos las variaciones de concentración de óxidos mayores y elementos de transición en las unidades de Brahma podrían tener una explicación en base a sus diferencias de permeabilidad e intensidad de alteración hidrotermal.

Las muestras de Brahma fueron seleccionadas de forma tal que no presentaran vetillas y presentaran un grado de alteración aceptable. La mineralogía de alteración presente en las muestras analizadas se restringe principalmente a las fases clorita, epidota, sericita y piritita, las cuales no suman más del 15% de abundancia en cada muestra analizada. Si el hidrotermalismo afectara la concentración de elementos incompatibles de forma diferencial entre los dos grupos de unidades en Brahma (faneríticos y porfídicos), esto se observaría de forma más evidente en los elementos más móviles (LILE más móviles que HFSE) y no es así. Más aún, al observar el

diagrama multielementos de Brahma (Fig. 6.10), no se identifican mayores diferencias salvo en los HFSE más compatibles (extremo derecho de Fig. 6.10). Este es un fuerte argumento a favor de que, en las unidades analizadas de Brahma las variaciones de concentración de elementos trazas incompatibles no tienen un factor hidrotermal importante, y entonces las diferencias geoquímicas entre los dos grupos se deben a que tienen una historia magmática distinta. Por lo tanto, para interpretar la génesis de las unidades ígneas de Brahma es preferible analizar los elementos incompatibles y preferentemente aquellos HFSE (REE incluidos).

Los patrones de REE de Brahma muestran una pendiente suave y decreciente en el rango de MREE y contenido casi constante de HREE para cada unidad (Fig. 6.9). Esto se interpreta como un fraccionamiento de estos elementos (MREE y HFSE) en una fase residual que estuvo en equilibrio en algún momento con los magmas que formaron Brahma. Se propone que la fase que provocó el fraccionamiento generalizado de tierras raras pesadas y medias que se observa en Brahma corresponde a hornblenda (Figs. 6.8 y 6.9). El argumento que sostiene esta afirmación es que en la hornblenda las MREE y HREE tienen coeficientes de partición comparables entre sí indistintamente del número atómico (Fig. 7.1). Este comportamiento de la compatibilidad de REE explicaría los patrones observados en las muestras de Brahma, los cuales presentan pendientes suaves en el rango de MREE y un *flat* de concentraciones de HREE. El proceso de fraccionamiento en hornblenda habría sido más acentuado en las unidades PFHr y PFH que en GRD y TON evidenciado en la mayor concavidad de los patrones REE (Fig. 6.9).

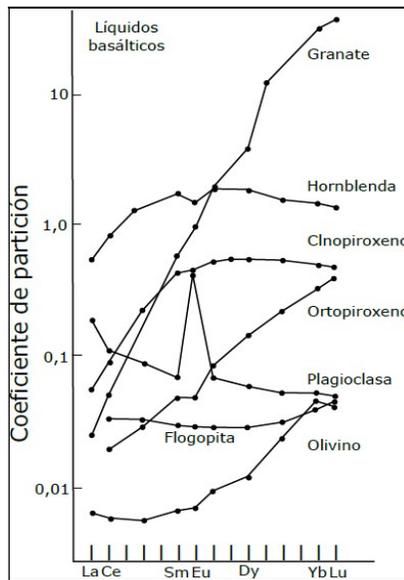


Fig. 7.1 – Coeficientes de partición para REEs en distintas fases minerales. Tomado de Rollinson (1993). Los datos de hornblenda son para una andesita basáltica.

Las muestras del prospecto Brahma con edades cercanas a 14 Ma (que representan a las unidades GRD, PFHr y TON), tienen una razón La/Yb promedio de 15,5 y promedian un 64,2 % de SiO<sub>2</sub> (Tabla 7.1). Los productos volcánicos actuales de la SVZ con valores La/Yb y SiO<sub>2</sub> más similares a los obtenidos en Brahma corresponden al volcán Nevados de Longaví (Hickey-Vargas *et al.*, 2016) bajo el cual se estima un espesor cortical actual de 40-45 km (Tassara *et al.*, 2006; Tassara y Echaurren, 2012). Por lo tanto, se estima que a los 14 Ma el espesor de la corteza bajo el

prospecto Brahma sería cercano a los 40-45 km. Según los mismos modelos gravimétricos, el espesor cortical bajo el arco volcánico actual a los 35°45'S es de aproximadamente 50 km (Tassara *et al.*, 2006; Tassara y Echaurren, 2012, Fig. 7.2).

Tabla 7.1 – Razones de La/Yb para las 15 muestras analizadas en el prospecto Brahma.

Muestra	SiO <sub>2</sub> (%)	La/Yb	Unidad	SiO <sub>2</sub> (%) por unidad	La/Yb por unidad	SiO <sub>2</sub> (%) por edad	La/Yb por edad
B07-298	55,46	7,80	GRD	60,4	10,1	64,2	15,5
B06-111	62,73	9,58					
B06-411	61,84	10,55					
B02-210	61,53	12,63					
B02-403	66,31	13,38	PFHr	64,6	20,7		
B04-387	62,00	20,60					
B02-403	63,88	28,00					
B02-064	67,66	10,88	TON	67,7	15,6		
B02-159	66,70	17,50					
B02-7	68,76	18,43					
B05-193	67,63	28,00	PFH	66,6	29,1	29,1	
B03-2	66,57	29,00					
B06-253	66,33	29,25					
B05-272	66,16	29,50					
B03-357	66,40	29,50					

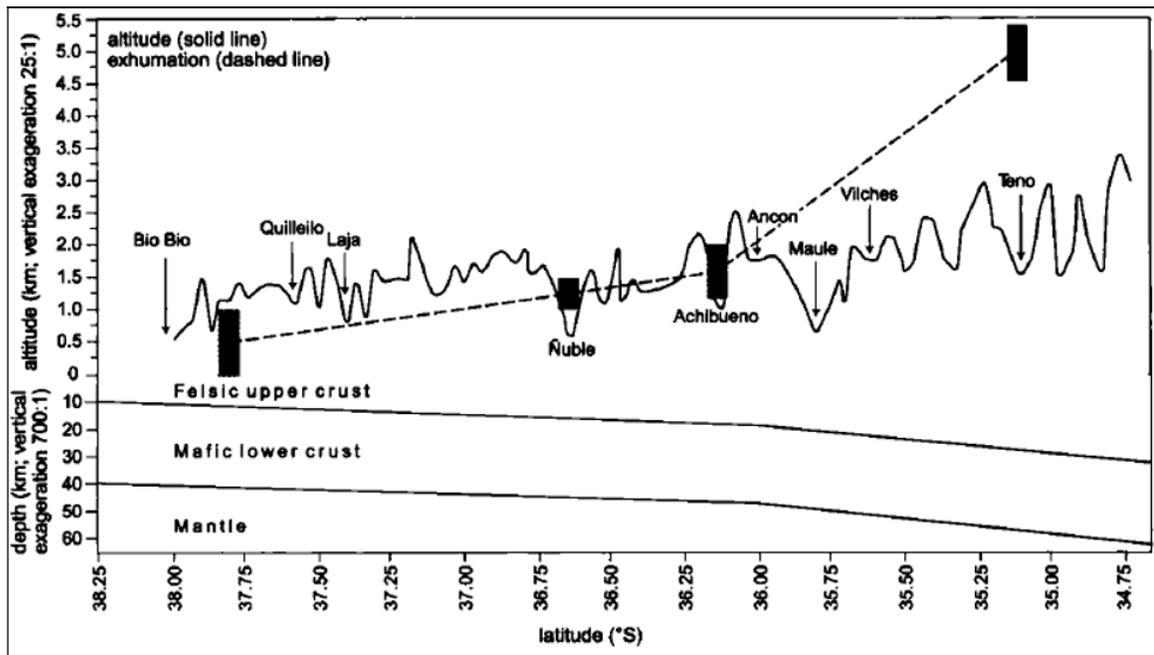


Fig. 7.2 – Modelo de espesor cortical según Tassara *et al.* (2006), se incluye la topografía a los pies de la Cordillera Principal de Chile entre 35° y 38°S tomada de NOAA, 2006. Las barras negras indican cálculos exhumación mínima y máxima según Spikings *et al.* (2008) y la línea segmentada corresponde a una interpolación lineal según los mismos autores. Tomado de Spikings *et al.* (2008).

## 7.1 BRAHMA FRENTE A OTROS YACIMIENTOS EN CHILE CENTRAL

Reuniendo la información obtenida del prospecto Brahma, se obtiene que este corresponde a un yacimiento del tipo pórfido cuprífero con edades del Mioceno medio a tardío. Más precisamente, las edades obtenidas en este trabajo para los intrusivos en Brahma son cercanas a los 14 y a los 9 Ma. La mineralización de Brahma registra al menos 3 edades de mineralización, cercanas a los 14, 12 y 10 Ma. Al comparar estos datos geocronológicos con los existentes en los grandes pórfidos cupríferos de clase mundial presentes en la franja metalogénica del Mioceno medio – Plioceno, aquel que presenta edades más similares a Brahma corresponde al sistema Los Pelambres – El Pachón (Fig.7.3).

La geología de Brahma también tiene similitudes con Los Pelambres, este último corresponde a un pórfido de Cu-Mo emplazado en las formaciones volcánicas y sedimentarias Fm. Los Pelambres y Fm. Abanico (Iriarte y Sellés, 2000) en las cuales, se han emplazado intrusivos dioríticos y granodioríticos incluyendo el stock de Los Pelambres. Además, el tamaño de Los Pelambres es muy similar al de Brahma con aproximadamente 5 km de largo N-S y 1 a 2 km de ancho E-O (Camus, 2003). Los principales minerales de mena en Los Pelambres corresponden a calcosina, calcopirita y bornita (Maksaev *et al.* 2007) tal como en Brahma.

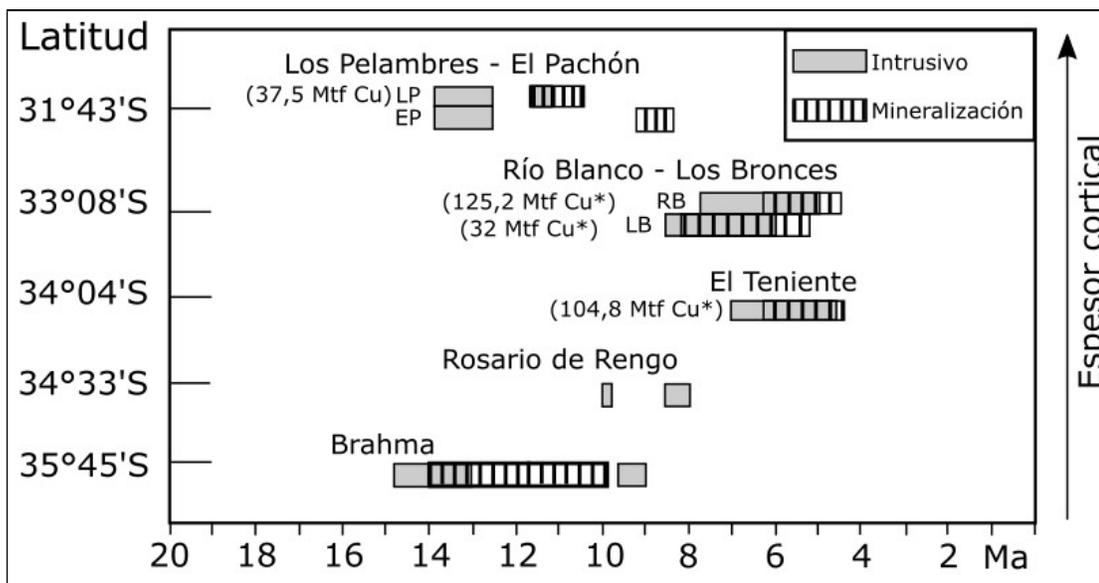


Fig. 7.3 – Edades de la Franja Neógena de Chile central y prospectos que guardan relación a ella. Edades obtenidas de Bertens (2003), Muñoz (2008), Lopez y Vergara (2010), Deckart *et al.* (2013) y Díaz *et al.* (2018). Los contenidos de cobre indicados entre parentesis corresponden a la suma de recursos, reservas y producción registrada que se presentan en la Tabla 7.2.

Para comparar los patrones de tierras raras de las unidades de Brahma con algunos intrusivos que no contienen mineralización económica importante, y que tienen edades similares y ubicación aproximadamente central en la franja del Mioceno medio – Plioceno, se eligen los intrusivos Batolito San Francisco (BSF), Yerba Loca (YL), Plutón La Gloria (PLG) y Cerro Mesón Alto (CMA). Se obtiene de esta comparación que el patrón de tierras raras para estos 4 intrusivos estériles es paralelo y mayor homogéneamente con respecto a las unidades GRD y TON de Brahma (Fig. 7.4), con una pendiente decreciente poco pronunciada. El enriquecimiento general

en REE de los 4 intrusivos estériles por sobre Brahma, se podría explicar debido a diferencias de espesor cortical, ya que Brahma se encuentra más al sur y por lo tanto se habría desarrollado sobre una corteza más delgada comparativamente. También, se puede interpretar que en las unidades porfídicas de Brahma se evidencia un fraccionamiento de hornblenda mucho más pronunciado debido a la concavidad más desarrollada en el rango de MREE y HREE.

Tabla 7.2 – Principales indicadores de contenido de cobre en los megayacimientos de cobre presentes en Chile central según Corporación Chilena del Cobre (2016).

	Reservas y recursos minerales Mt	Ley % de Cu	Producción de Cu Mt	Res+Rec+Prod Cu Mt	Comentarios
Los Pelambres	6.224	0,51	5,81	37,56	Entre 1999 y 2015
Río Blanco	19.766	0,6	6,64	125,24	Entre 1970 y 2015
Los Bronces	6.384	0,424	4,92	31,99	Entre 1986 y 2015 *sin registro entre 1906 y 1985
El Teniente	15.471	0,56	18,19	104,83	Entre 1950 y 2015 * sin registro desde 1906 y 1949

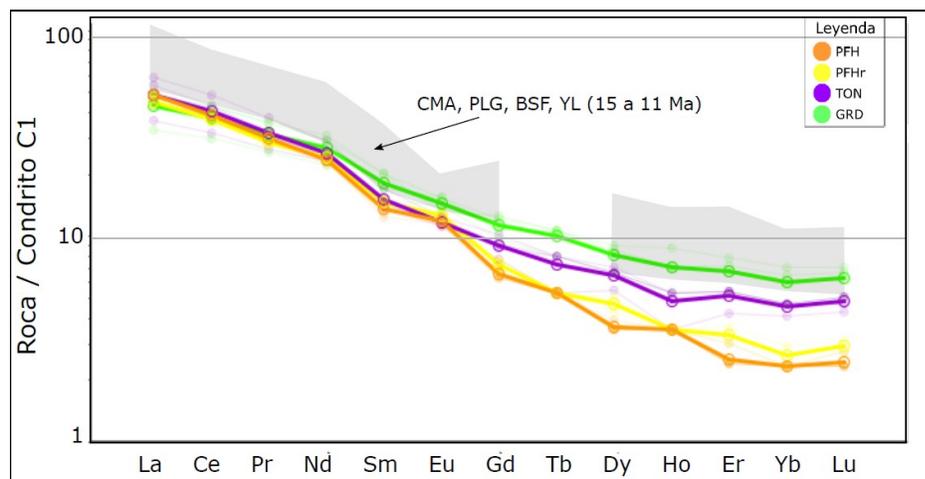


Fig. 7.4 – Patrón de tierras raras de Brahma comparado con los intrusivos estériles Cerro Mesón Alto (CMA, ~66% SiO<sub>2</sub>), Plutón La Gloria (PLG, ~64% SiO<sub>2</sub>), Batolito San Francisco (BSF, ~60% SiO<sub>2</sub>) y Yerba Loca (YL, 56% SiO<sub>2</sub>). Datos de los intrusivos estériles se presentan en sombra gris y fueron tomados de Deckart *et al.* (2010).

Los patrones de tierras raras de Los Pelambres muestran un comportamiento muy similar a los de Brahma. En el rango de LREE, los intrusivos mineralizadores de Los Pelambres tienen una mayor variación de concentraciones que los precursores de la mineralización del yacimiento, aunque en promedio ambos conjuntos son muy similares y subparalelos. Los intrusivos precursores de la mineralización en Los Pelambres tienen una señal de fraccionamiento en las MREE y HREE análoga a la observada en GRD y TON de Brahma, esta señal también es similar a la de los 4 intrusivos estériles anteriormente comparados. Por otra parte, los intrusivos mineralizadores de Los Pelambres, presentan el mismo comportamiento que PFHr y PFH en el rango de MREE y HREE, evidenciando un fraccionamiento de estas tierras raras en la fase hornblenda. Solo en el rango de LREE existe un contenido diferente y mayor en todas las unidades de Los Pelambres con respecto a Brahma, lo cual nuevamente puede ser explicado por

una diferencia de espesor cortical recordando que Pelambres representa el miembro más al norte de la franja.

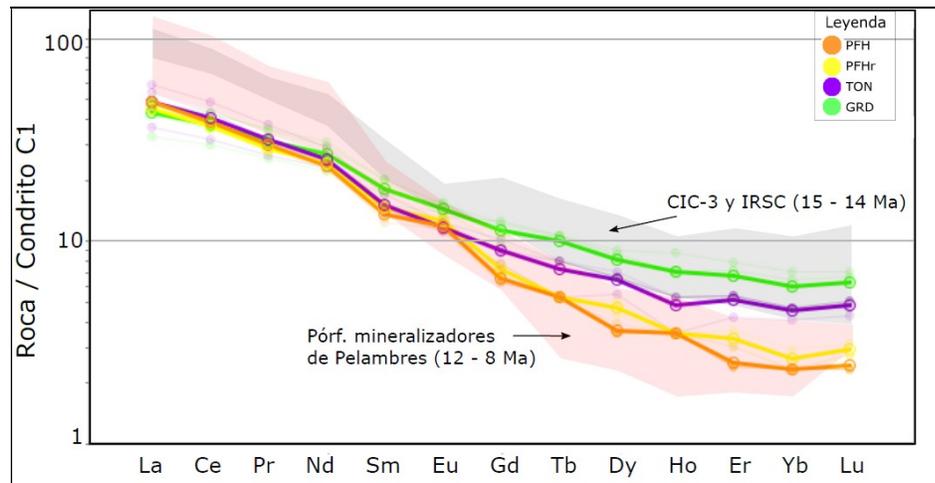


Fig. 7.5 – Patrón de tierras raras de Brahma comparado con los intrusivos de la región de Los Pelambres, intrusivos precursores de la mineralización (Perelló *et al.*, 2012) en sombra gris corresponden al Complejo Intrusivo Chalinga etapa 3 (CIC-3, ~62% SiO<sub>2</sub>) e Intrusivos hipabisales de Río Santa Cruz (IRSC, ~65% SiO<sub>2</sub>). Pórfidos mineralizadores de Pelambres en sombra rosada (~66% SiO<sub>2</sub>). Compilación de Los Pelambres tomada de Bergoeing (2016).

Para el yacimiento Río Blanco-Los Bronces los patrones de tierras raras de las unidades mineralizadoras y estériles presentan diferencias leves entre sí desde el rango de LREE (Fig. 7.6), las que se hacen más pronunciadas hacia las HREE, en este último rango nuevamente las unidades relacionadas a la mineralización presentan una señal de fraccionamiento más pronunciada en comparación a los intrusivos estériles de la zona (Fig. 7.6). Cabe destacar que la compilación de concentraciones utilizada no es completa y no permite observar variaciones concluyentes especialmente en el rango de MREE para comparar más detalladamente con Brahma, aunque si se observa que las concentraciones de REE en Río Blanco-Los Bronces siguen una tendencia mayor en general a la de todas las unidades de Brahma (Fig. 7.6).

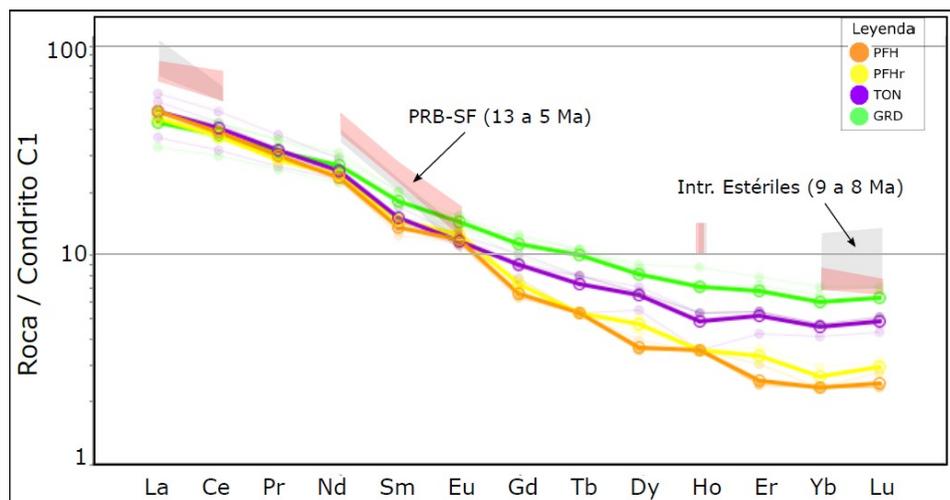


Fig. 7.6 – Patrón de tierras raras de Brahma comparado con los intrusivos de la región de Río Blanco-Los Bronces, intrusivos estériles en sombra gris (~67% SiO<sub>2</sub>) y Pórfido Río Blanco-San Francisco (PRB-SF, ~64% SiO<sub>2</sub>) en sombra rosada. Compilación de RB-LB tomada de Lopez y Vergara (1982).

Los patrones de tierras raras concentradas en El Teniente, son los más diferentes en comparación a los de Brahma. En El Teniente, las unidades precursoras de la mineralización y miembros del Teniente Volcanic Complex, presentan concentraciones menores de LREE y en promedio se van haciendo más similares a las de Brahma hacia el rango de MREE, finalmente en el rango de HREE las concentraciones de El Teniente terminan siendo levemente mayores a las de GRD y TON (Fig. 7.7). Estas diferencias se pueden fundamentar en base a que las unidades sin mineralización importante aquí consideradas (Maqui Chico, Guanaco, Lower Sewell y Upper Sewell) tienen un rango muy amplio de SiO<sub>2</sub> con varios productos de baja diferenciación (Kay *et al.*, 2005) los cuales explicarían las menores pendientes de REE. Por otra parte, los Pórfidos mineralizadores de El Teniente (PET), corresponden a miembros más diferenciados con un promedio de ~67% SiO<sub>2</sub>, mayor contenido de LREE y menor contenido de HREE que Brahma, esto se evidencia en la pendiente más pronunciada observada en el patrón de REE (Fig. 7.7).

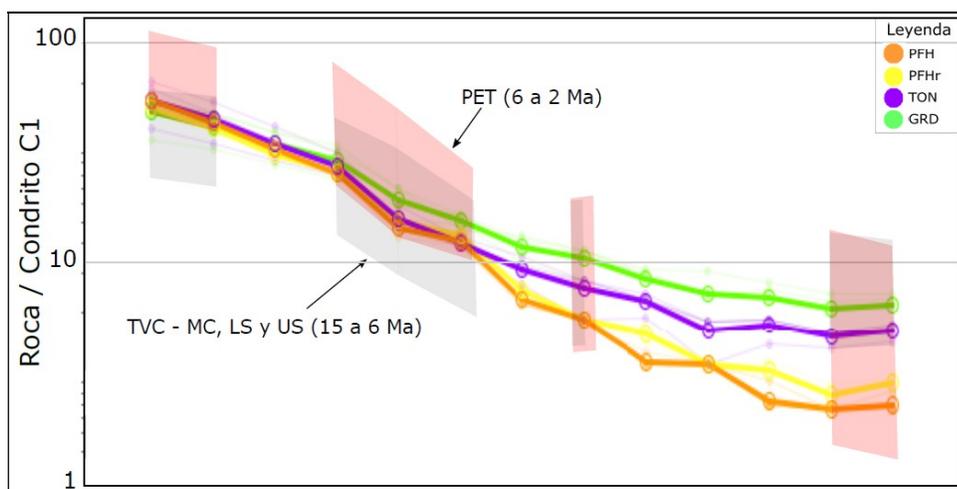


Fig. 7.7 - Patrón de tierras raras de Brahma comparado con los intrusivos de la región de El Teniente, intrusivos estériles en sombra gris corresponden a los miembros del Teniente Volcanic Complex (TVC): Maqui Chico (MC, ~63% SiO<sub>2</sub>), Lower Sewell (LS, ~58% SiO<sub>2</sub>) y Upper Sewell (US, ~ 58% SiO<sub>2</sub>). Pórfidos mineralizadores de El Teniente (PET, ~67% SiO<sub>2</sub>) en sombra rosada. Compilación de El Teniente tomada de Kay *et al.* (2005).

El prospecto Rosario de Rengo (10 a 8 Ma, ~34°30'S) presenta patrones de tierras raras con una concavidad poco desarrollada en el rango de MREE y HREE. Los contenidos de REE son muy similares a los obtenidos en las unidades GRD y TON de Brahma, salvo en las primeras LREE que se observan más concentradas en Rosario de Rengo (Fig. 7.8). Estos patrones de Rosario de Rengo son muy similares a los que presentan los 4 intrusivos estériles CMA, YL, BSF y PLG, aunque con un empobrecimiento levemente mayor en las HREE (Fig. 7.4 y 7.8).

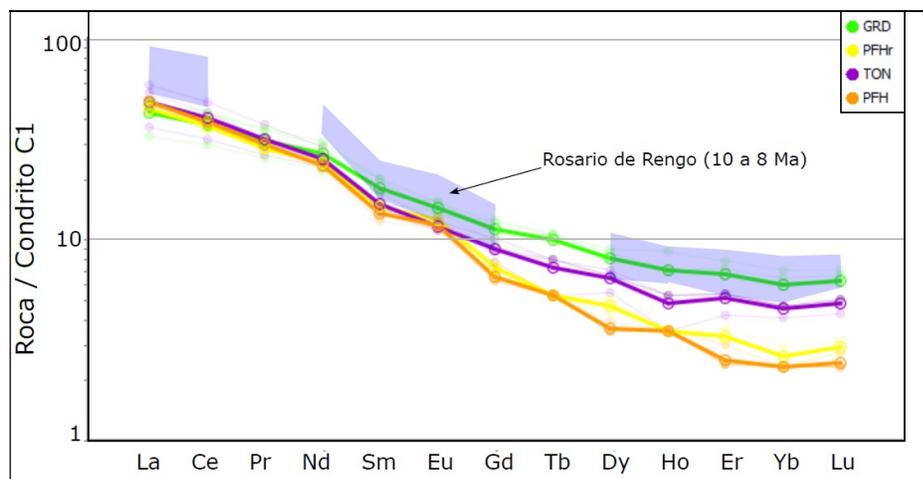


Fig. 7.8 – Patrón de tierras raras de Brahma comparado con los intrusivos del prospecto Rosario de Rengo en sombra azul (promedio de SiO<sub>2</sub> de ~64%). Compilación de Rosario de Rengo tomada de Muñoz (2008).

En síntesis, los patrones de tierras raras de Brahma reflejan que las unidades GRD y TON tienen una similitud general a los intrusivos estériles comparados. Mientras que las unidades PFH y PFHr tienen patrones más similares a los intrusivos mineralizadores de los yacimientos Neógenos de Chile central. La mayor similitud con los patrones REE de Brahma la presenta Los Pelambres y los patrones REE más diferentes los presenta El Teniente con una inclinación mucho más fuerte.

Como se observa en Fig. 7.9, los valores de La/Yb registrados en Brahma son comparables con los de las rocas más tardías de Abanico (Mioceno temprano) y son similares en promedio a las razones que registran los actuales productos volcánicos de la SVZ a los 33° - 34°S (e.g., Hickey-Vargas, 2016; Kay *et al.*, 2005, Tabla 7.1). La unidad PFH (~9 Ma) con su composición dacítica y razones La/Yb promedio de 29,1 (Tabla 7.1) no es comparable con los valores típicos de SVZ, sino que es más bien similar al complejo plutónico joven (Young Plutonic Complex) del yacimiento El Teniente de aproximadamente 5 a 7 Ma (Kay *et al.*, 2005; Kurtz *et al.*, 1997, Fig. 7.9).

Las razones de La/Yb y edades de las unidades GRD y TON de Brahma son también comparables a las observadas en IRSC de Los Pelambres (Fig. 7.10, Tabla 7.1). Las razones La/Yb de PFHr (Tabla 7.1) son similares a las que presenta Cerro Bayo del Cobre ligeramente más joven y también estas razones son similares a los pórfidos mineralizadores de Los Pelambres más jóvenes y de menor fraccionamiento LREE/HREE (Fig. 7.10). Finalmente, la unidad PFH tiene mayor correspondencia en cuanto a edad y razones de La/Yb con los pórfidos mineralizadores de Los Pelambres (Tabla 7.1), aunque cabe mencionar que estos últimos tienen un rango de valores de La/Yb muy amplio que varía entre 20 y 72,2 (Bergoeing, 2016 y referencias ahí citadas, Fig. 7.10).

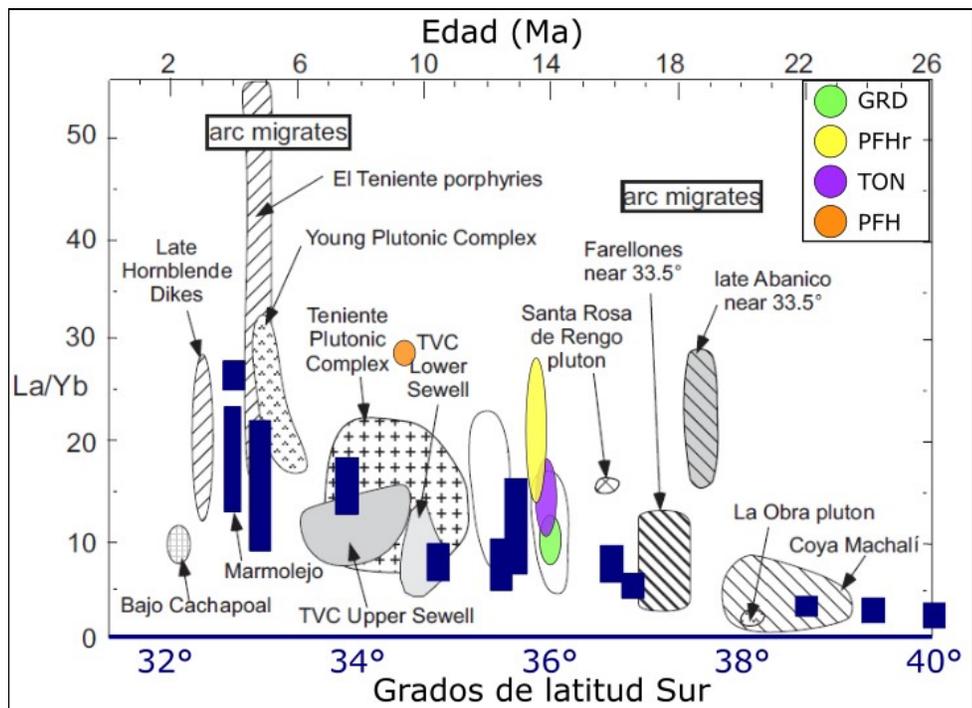


Fig. 7.9 – Razones de La/Yb vs. edad de las unidades identificadas en este trabajo en Brahma frente a las que se registran en las rocas magmáticas de El Teniente y de la SVZ (barras azules). El eje inferior azul representa la latitud de los centros eruptivos de SVZ y no es válida la posición de latitud para las demás unidades. Modificado de Kay *et al.* (2005).

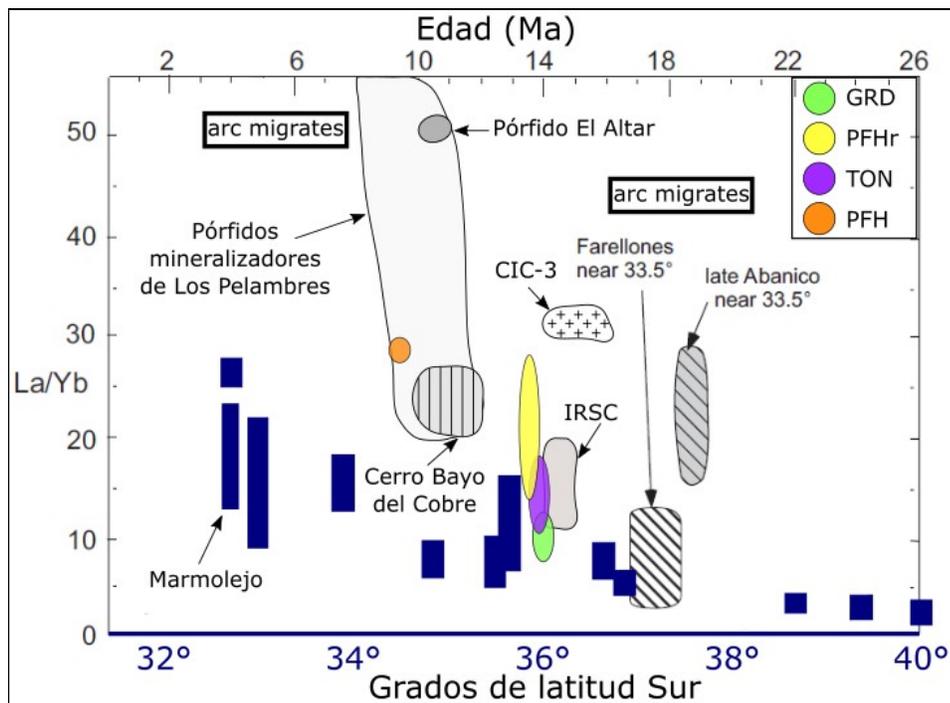


Fig. 7.10 – Razones de La/Yb vs. edad de las unidades identificadas en este trabajo en Brahma frente a las que se registran en las rocas magmáticas de Los Pelambres (compilación de Bergoeing, 2016) y de la SVZ (barras azules). El eje inferior azul representa la latitud de los centros eruptivos de SVZ y no es válida la posición de latitud para las demás unidades. Modificado de Kay *et al.* (2005).

Las razones de La/Sm vs. Sm/Yb registradas en Brahma indican que, por una parte, GRD y TON presentan los valores más bajos de Sm/Yb y caen dentro del campo que indica una fuente que estuvo en condiciones de equilibrio con piroxeno (Fig. 7.11). El otro conjunto formado por PFHr y PFH presenta mayores valores de Sm/Yb y estos se distribuyen cercanos al límite que indica un equilibrio con las fases hornblenda y granate. Estas razones de La/Sm vs. Sm/Yb obtenidas en las unidades de Brahma muestran gran similitud con las observadas en algunas unidades intrusivas del yacimiento Los Pelambres (Bergoing, 2016, Fig. 7.11). Las unidades GRD y en mayor medida TON de Brahma son similares en estas razones con el Complejo Intrusivo Chalinga en la etapa 3 (CIC3, 16 – 14 Ma), el que aflora en el dominio occidental de la Cordillera Principal. Los intrusivos con mayor mineralización en Brahma, PFHr y PFH tienen razones de Sm/Yb muy similares a las observadas en los pórfidos miocenos mineralizadores de Los Pelambres, aunque estos últimos tienen razones de La/Sm más elevadas. Cabe mencionar que el CIC-3 y el IRSC son prácticamente coetáneos y ambos no presentan mineralización importante (son precursores de ella *e.g.* Perelló *et al.*, 2012), pero IRSC aflora hacia el dominio de la Cordillera Frontal, por lo que se infiere que un factor principal en las diferencias de razones La/Sm y Sm/Yb es el espesor de la corteza en la que se desarrollan estos intrusivos. Por la razón anterior, se interpreta que las diferencias entre PFHr y PFH con respecto a los pórfidos mineralizadores de Los Pelambres se deben principalmente al espesor menor de la corteza en la que se desarrolló Brahma.

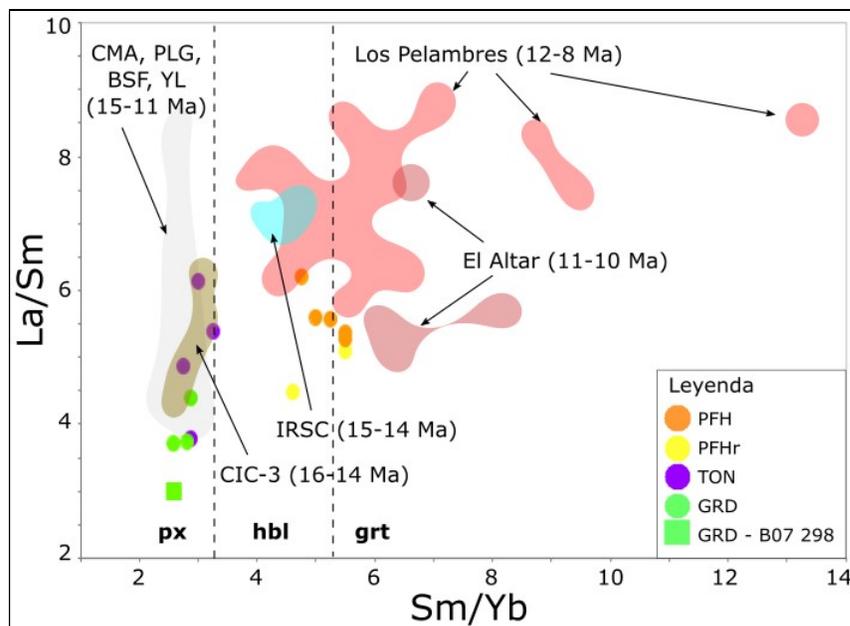


Fig. 7.11 – Diagramas de La/Sm vs. Sm/Yb para las unidades identificadas en el prospecto Brahma. Se incluyen las mismas razones para las unidades estériles CMA, PLG, BSF y YL (Deckart *et al.* 2010) y para los intrusivos Miocenos de Pelambres (Bergoing, 2016; Reich *et al.* 2003; Maydagán *et al.*, 2011).

## 8 CONCLUSIONES

---

De las descripciones de sondajes, observaciones de terreno y de trabajos anteriores, se obtiene que Brahma corresponde a un yacimiento de tipo pórfido cuprífero. Esto en base a que la existencia y distribución de las alteraciones hidrotermales reconocidas en el prospecto, mineralización contenida y estilo en la que ella ocurre, son congruentes con los modelos clásicos que caracterizan este tipo de yacimientos (*e.g.*, Lowell y Guilbert, 1970; Camus, 2003).

Las rocas magmáticas que dieron génesis a Brahma registran edades cercanas a 14 y 9 Ma. Además, se registra una edad heredada de 17 Ma que provendría desde El Melado. Por lo tanto, Brahma corresponde a un pórfido cuprífero del Mioceno medio a tardío ubicado en el flanco occidental de la Cordillera Principal a los 35°45'S. El desarrollo del prospecto Brahma es sincrónico con una migración de la deformación y actividad magmática hacia el este en la zona de estudio.

Brahma se formó como producto del magmatismo de arco continental durante el Mioceno medio a tardío. Este magmatismo presenta características calcoalcalinas propias de una corteza levemente engrosada para la cual, en este trabajo se estima un espesor de 40 – 45 km bajo el prospecto Brahma a los 14 Ma. Durante el ascenso de los magmas derivados de la subducción de este período, estos habrían fraccionado MREEs y HREEs en la fase hornblenda presente en la base de la corteza continental del Mioceno medio (14 Ma).

Las unidades de Brahma reúnen muchas características que registran los megayacimientos del Mioceno medio - Plioceno en los Andes centrales. Destaca la similitud con el yacimiento Los Pelambres con el cual además de compartir características litológicas y de tamaño, presentan edades muy similares. Las edades de cristalización de las unidades analizadas en Brahma registran edades de 14 y 9 Ma mientras que Pelambres (31°45'S) se desarrolla entre aproximadamente 14 y 10 Ma (*e.g.*, Perelló *et al.*, 2009, Mpodozis, 2015). La alteración hidrotermal en Brahma tuvo un amplio período de actividad registrándose edades de alteración temprana cercanas a 14 Ma, y esta actividad habría perdurado hasta al menos los 10 Ma (Díaz *et al.*, 2018), mientras que Los Pelambres registra edades de alteración de entre 12 y 8 Ma (*e.g.*, Perelló *et al.*, 2009, Mpodozis, 2015).

Brahma y todos los pórfidos cupríferos de la franja del Mioceno medio – Plioceno en Chile central presentan una concavidad en el rango de MREE y HREE, la cual se desarrolla en distintos grados de magnitud (Figs. 7.5, 7.6 y 7.7). Esta característica se relaciona al fraccionamiento de REE en la fase hornblenda, proceso que tiene gran importancia en la generación de pórfidos cupríferos gigantes según modelos de génesis recientes (*e.g.* Kay *et al.*, 1999, Kay y Mpodozis, 2001). Nuevamente el yacimiento de tipo pórfido cuprífero más similar a Brahma dentro de la franja estudiada en cuanto a geoquímica y patrones de REE es Los Pelambres, aunque este último registra razones de La/Yb mayores en magnitud y rango de variación, principalmente por un mayor contenido de LREE asociado a que se desarrolla sobre una corteza más gruesa en comparación a Brahma.

Los intrusivos relacionados a la mineralización de la misma franja presentan una signatura de rocas tipo adakita (Fig. 6.12), Brahma también presenta esta signatura especialmente en las

unidades PFHr y PFH que están más asociadas a la mineralización y alteración del prospecto. La signatura adakítica de estos intrusivos también es consistente con el fraccionamiento de la fase hornblenda y junto con la “forma lítrica” observada en los patrones de REE normalizados a valores condríticos, se han registrado ampliamente en magmatismo calcoalcalino asociado a pórfidos cupríferos (Richards y Kerrich, 2007 y referencias ahí citadas).

Hay que considerar que Los Pelambres corresponde al pórfido cuprífero reconocido más al norte de la franja metalogénica del Mioceno medio – Plioceno, y se desarrolla sobre la zona de subducción plana en un contexto de corteza engrosada, sin embargo, no corresponde al yacimiento con mayor contenido de cobre (Vilella y Cantalloppts, 2016, Fig. 7.3, Tabla 7.2). Río Blanco – Los Bronces se ubica al límite sur de la zona de subducción plana y estimaciones actuales indican que su contenido de cobre es mayor, aunque del mismo orden que El Teniente ubicado en la zona de transición entre subducción plana y normal (Vilella y Cantalloppts, 2016, Fig. 7.3, Tabla 7.2). Estos antecedentes indican que el espesor cortical no es el único condicionante del volumen ni del contenido de cobre en los yacimientos de tipo pórfido cuprífero al menos en esta franja, por lo tanto, extender la exploración de yacimientos hacia el sur (donde la corteza es y ha sido más delgada en comparación a la dirección norte) puede resultar en descubrimientos de contenido relevante de cobre.

La ubicación geográfica, contexto geológico, composición geoquímica y edades radiométricas que presenta el prospecto Brahma, sugieren que este pórfido corresponde a la franja metalogénica del Neógeno reconocida en Chile central formalmente entre 31° y 34°S aproximadamente. Entonces, esta franja podría extenderse hasta al menos los 35°45'S. Por otra parte, los límites de los intrusivos mineralizados identificados, extensión de las brechas mineralizadas, presencia de otros cuerpos mineralizados y contenido de cobre, son variables aún abiertas en profundidad y no se descarta que aún exista mineralización económica importante en Brahma sin identificar. El hallazgo del prospecto Brahma se considera de todas formas interesante, ya que permite abrir cuestionamientos sobre el potencial metalogénico más allá de las regiones en las cuales se ha centrado el interés de exploración con anterioridad.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Aguirre, L., 1960. Geología de los Andes de Chile Central, provincia de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Geológicas, Universidad de Chile, v.9, 70 p.
- Aguirre-Urreta, B., Tunik, M., Naipauer, M., Pazos, P., Ottone, E., Fanning, M. y Ramos, V. A., 2011. Malargüe Group (Maastrichtian–Danian) deposits in the Neuquén Andes, Argentina: implications for the onset of the first Atlantic transgression related to Western Gondwana break-up. *Gondwana Research*, v. 19, p. 482-494.
- Araneda, M., Avendaño, M. y Merlo, C., 2000. Modelo gravimétrico de la Cuenca de Santiago, etapa III final. *Actas, Congreso Geológico Chileno*, N°9, v. 2, p. 404-408, Puerto Varas.
- Astaburuaga, D., 2014. Evolución estructural del límite mesozoico-cenozoico de la cordillera principal entre 35°30' y 36°S, Región del Maule, Chile. Tesis M.Sc., Departamento de Geología, Universidad de Chile, 130 p.
- Baeza, O., 1999. Análisis de litofacies, evolución depositacional y análisis estructural de la Formación Abanico en el área comprendida entre los ríos Yeso y Volcán, Región Metropolitana. Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile. 119 p.
- Bergoeing, J., 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. Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 131 p.
- Bertens, A., Deckart, K., Gonzales, A., 2003. Geocronología U-Pb, Re-Os y <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar del pórfido de Cu-Mo Los Pelambres, Chile Central. *Actas, Congreso Geológico Chileno*, N°10, p. 5, Concepción.
- Bravo, P., 2001. Geología del borde oriental de la Cordillera de la Costa entre los ríos Mataquito y Maule, VII Región. Tesis M.Sc., Departamento de Geología, Universidad de Chile. 113 p.
- Burnz, P., Marquez, E. y Arias, S., 2008. Condor Resources Inc. Brahma Cu-Mo porphyry Chile, Drill report. 452 p.
- Camus, F., 2003. Geología de los Sistemas Porfíricos en los Andes de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, 267 p. Santiago.
- Charrier, R., 1973. Interruptions of spreading and the compressive tectonic phases of the meridional Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 20, p. 242-249.
- Charrier, R., 1981. Mesozoic and Cenozoic stratigraphy of the Central Argentinian-Chilean Andes (32°-35°S) and chronology of their tectonic evolution. *Zbl. Geol. Paläontol.*, v. 1, p. 344-355.
- Charrier, R. y Muñoz, N., 1994. Jurassic cretaceous palaeogeographic evolution of the Chilean Andes at 23°-24°S and 34°-35°S latitude: A comparative analysis. En: Reutter, K.

- Scheuber, E., Wigger, P. (eds.), *Tectonics of the Southern Central Andes*. Springer Verlag, Berlin, p. 233-242.
- Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher III, C., Norell, M., Zapatta, F., McKenna, M. y Novacek, M., 1996. New evidence for Late Mesozoic-Early Cenozoic evolution of the Chilean Andes in the Upper Tinguiririca Valley (35°S), central Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 9, p. 393-422.
- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J., Gans, P., Kay, S., Muñoz, N., Wyss, A., y Zurita, E., 2002. Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36°S.L.). *Journal of South American Earth Sciences*, v. 15, p. 117-139.
- Charrier, R., Bustamante, M., Comte, D., Elgueta, S., Flynn, J., Iturra, N., Muñoz, N., Pardo, M., Thiele, R., y Wyss, A., 2005. The Abanico extensional basin: Regional extension, chronology of tectonic inversion and relation to shallow seismic activity and Andean uplift. *Neues Jahrbuch Fur Geologie Und Palaontologie-Abhandlungen*, v. 236, p. 43-77.
- Charrier, R., Pinto, L. y Rodríguez, M., 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. En: Moreno, T. y Gibbons, W. (eds.) *The Geology of Chile*. Geological Society, London, p. 21-114.
- Coloma, F., Valin, X., Oliveros, V., Vásquez, P., Creixell, C., Salazar, E., Ducea, M., 2017. Geochemistry of Permian to Triassic igneous rocks from northern Chile (28°-30°15'S): Implications on the dynamics of the proto-Andean margin. *Andean Geology*, v. 22, p. 147 – 178.
- Culbert, R., 2007. Condor Resources Inc. Technical report on the Brahma copper property of South – Central Chile. 14 p.
- Davidson, J., y Vicente J., 1973. Características paleogeográficas y estructurales del área fronteriza de las nacientes del Teno (Chile) y Santa Elena (Argentina). *Cordillera Principal, 35° a 35°15' de latitud Sur*. Actas, Congreso Geológico Argentino, N°5, v. 5, p. 11-55, Buenos Aires.
- Deckart, K., Clark, A., Aguilar, C., Vargas, R., 2005. Magmatic and hydrothermal chronology of the supergiant Río Blanco Copper Deposit, Central Chile: Implications of an integrated U-Pb and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar database. *Economic Geology*, v. 100, p. 905-934.
- Deckart, K., Clark, A., Cuadra, P., y 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 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar thermochronology data. *Mineralium Deposita*, v. 48, 57-79.
- Deckart, K., Godoy, E., Bertens, A., Jerez, D. y Saeed, A., 2010. Barren Miocene granitoids in the Central Andes metallogenic belt, Chile: Geochemistry and Nd-Hf isotope systematics. *Andean Geology*, v. 37, p. 1-31.

- Del Rey, A., Deckart, K., Arriagada, C. y Martínez, F., 2016. Resolving the paradigm of the Late Paleozoic – Triassic Chilean magmatism: Isotopic approach. *Gondwana Research*, v. 37, p. 172 – 181.
- Díaz, V., Muñoz, M., Deckart, K., Townley, B., Marthur, R., y Martínez, O., 2018. Geochronology of the Brahma Porphyry Cu-Mo Prospect, Chilean Andes at ~35°45'S. *Actas, Congreso Geológico Chileno*, N°15, p. 916, Concepción.
- Drake, R., 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*, v. 1, p. 265-284.
- Drake, R., Vergara, M., Munizaga, F., y Vicente, J., 1982. Geochronology of mesozoic-cenozoic magmatism in central Chile, lat. 31–36 S. *Earth-Science Reviews*, v. 18, p. 353-363.
- Farías, M., 2007. Tectónica de la erosión en la evolución del relieve de los Andes de Chile Central durante el Neógeno. Tesis Ph.D., Departamento de Geología, Universidad de Chile. 194 p.
- Farías, M., Charrier, R., Carretier, S., Martinod, J., Fock, A., Campbell, D., Cáceres J., y Comte, D., 2008. Late Miocene high and rapid surface uplift and its erosional response in the Andes of Central Chile (33°-35°S). *Tectonics*, v. 27, TC1005, 22 p.
- Farías, M., Comte, D., Charrier, R., Martinod, J., Tassara, A. y Fock, A., 2010. Crustal scale structural architecture of the central Chile Andes based on 3D seismic tomography, seismicity, and surface geology: implications for mountain building in subduction zones. *Tectonics*, v. 29, TC3006, 22 p.
- Flynn, J., Wyss, A., Croft, D., y Charrier, R., 2003. The Tinguiririca Fauna, Chile: biochronology, paleoecology, biogeography, and a new earliest Oligocene South American Land Mammal Age. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 195, p. 229-259.
- Fock, A., 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34°S. Tesis M.Sc., Departamento de Geología, Universidad de Chile, 179 p.
- Fock, A., Charrier, R., Farías, M. y Muñoz, M., 2006. Fallas de vergencia oeste en la Cordillera Principal de Chile Central: Inversión de la cuenca de Abanico. *Asociación Geológica Argentina, Serie D, Publicación especial N°10*, p. 48-55.
- Fuentes, F., 2004. Petrología y metamorfismo de muy bajo grado de unidades volcánicas oligomiocenas en la ladera occidental de los Andes de Chile Central (33°S). Tesis Ph.D., Departamento de Geología, Universidad de Chile, 398 p.

- Giambiagi, L. y Ramos, V., 2002. Structural evolution of the Andes between 33°30 and 33°45'S, above the transition zone between the flat and normal subduction segment, Argentina and Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 15, p. 99-114.
- Giambiagi, L., Ramos, V., Godoy, E., Álvares, P. y Orts, S., 2003. Cenozoic deformation and tectonic style of the Andes, between 33° and 34°S. *Tectonics*, v. 22, p. 1041-1059.
- Godoy, E., Yañez, G. y Vera, E., 1999. Inversion of an Oligocene volcano-tectonic basin and uplifting of its superimposed Miocene magmatic arc in the Chilean central Andes: first seismic and gravity evidences. *Tectonophysics*, v. 306, p. 117-736.
- González, O. y Vergara, M., 1962. Reconocimiento geológico de la Cordillera de los Andes entre los paralelos 35° y 38° latitud S. Instituto de investigaciones geológicas, Universidad de Chile, v. 24, 121 p.
- Hickey-Vargas, R., Holbik, S., Tormey, D., Frey, F., Moreno, H., 2016. Basaltic rocks from the Andean Southern Volcanic Zone: Insights from the comparison of along-strike and small-scale geochemical variations and their sources. *Lithos*, vs. 258-259, p. 115-132.
- Hildreth, W. y Moorbath, S., 1988. Crustal contributions to arc magmatic in the Andes of central Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 98, p. 455-489.
- Iriarte, S. y Sellés, D., 2000. Geología de exploración básica generativa entre el paso Libertadores y Mina Pelambres. Informe Corporación Nacional del Cobre (Chile), Gerencia de Exploraciones, 20 p.
- Jordan, T., Isacks, B., Allemendinger, R., Brewer, J., Ramos, V. y Ando, C., 1983. Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geological Society of America*, v. 94, p. 341-361.
- Jordan, T., Burns, W., Veiga, R., Pangara, R., Copeland, P., Kelley, S. y Mpodozis, C., 2001. Extension and basin formation in the Southern Andes caused by increased convergence rate: a mid-Cenozoic trigger for the Andes. *Tectonics*, v. 20; p. 308-324.
- Kay, S., Godoy, E. y Kurtz, A., 2005. Episodic arc migration, crustal thickening, subduction erosion, and magmatism in the south-central Andes. *Geological Society of America Bulletin* v. 117, p. 67-88.
- Kay, S., Mpodozis, C., Ramos, V. y Munizaga, F., 1991. Magma source variation for mid-late Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone and thickening crust in central Andes. *Geological Society of America Special Paper*, v. 265, p. 113-137.
- Kay, S., Mpodozis, C., y Coira, B., 1999. Neogene magmatism, tectonism and mineral deposits of the central Andes. *Society of Economic Geologists Special Publication* v. 7, p. 27-59.
- Kay, S. y Mpodozis, C., 2001. Central Andes ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust. *Geological Society of America*, v. 11, p. 4-9.

- Kay, S. y Mpodozis, C., 2002. Magmatism as a probe to the Neogene shallowing of the Nazca plate beneath the modern Chilean flat-slab. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 15, p. 39-57.
- Klohn, C., 1960. *Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Universidad de Chile, v. 8, 95 p.
- Kurtz, A., Kay, S., Charrier, R. y Farrar, E., 1997. Geochronology of Miocene plutons and exhumation history of the El Teniente region, Central Chile (34°-35°S). *Revista Geológica de Chile*, v. 24, p. 75-90.
- Levi, B., Aguirre, L., Nyström, J., Padilla H. y Vergara, M., 1989. Low-grade regional metamorphism in the Mesozoic-Cenozoic volcanic sequences of the Central Andes. *Journal of Metamorphic Geology*, v.7, p. 487- 495.
- Lopez, L., y Vergara, M., 2010. Geoquímica y petrogénesis de rocas granodioríticas asociadas con el yacimiento cuprífero Río Blanco-WS Bronces. *Andean Geology*, v. 15, p. 59 – 70.
- Lowell, J. y Gilbert, J., 1970. Lateral and vertical alteration – mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, v. 65, p. 373-407.
- Maksaev, V., Munizaga, F., McWilliams, M., Fanning, M., Mathur, R., Ruiz, J. y Zentilli, M., 2004. New chronology for El Teniente, Chilean Andes, from U/Pb, <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar, Re/Os and fission-track dating: Implications for the evolution of a supergiant porphyry Cu-Mo deposit. *Society of Economic Geologists Special Publication*, v. 11, p. 15-54.
- Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C. y Camus, F., 2007. Metallic ore deposits. En: Moreno, T. y Gibbons, W. (eds.) *The Geology of Chile*. Geological Society, London, p. 179-1999.
- Maksaev, V., Munizaga, F., Zentilli, M. y Charrier, R., 2009. Fission track thermochronology of Neogene plutons in the Principal Andean Cordillera of central Chile (33-35°S): implications for tectonic evolution and porphyry Cu-Mo mineralization. *Revista Geológica de Chile*, v. 36, p. 153-171.
- McInnes, B., Evans, N., Fu, F., Garwin, S., Belousova, E., Griffin, W., Bertens, A., Sukarma, D., Permanadewi, S., Andrew, R. y Deckart, K., 2005. Thermal history analysis of selected Chilean, Indonesian and Iranian porphyry Cu-Mo-Au deposits. En: Porter, T.M. (ed.), *Super Porphyry Copper & Gold Deposits: A Global Perspective*, PGC Publishing, Adelaide, v. 1, p. 27-42.
- Montanari, D., Corti, G., Sani, F., Del Ventisette, C., Bonini, M. y Moratti, G., 2010. Experimental investigation on granite emplacement during shortening. *Tectonophysics*, v. 484, p. 147-155.
- Montecinos, P., Schärer, U., Vergara, M. y Aguirre, L., 2008. Lithospheric origin of Oligocene-Miocene magmatism in central Chile: U-Pb ages and Sr-Pb-Hf isotope composition of minerals. *Journal of Petrology*, v. 49, p. 555-580.

- Mpodozis, C. y Ramos, V., 1989. The Andes of Chile and Argentina. In *Geology of the Andes and its relation to Hydrocarbon and Mineral Resources*. En: Ericksen, G., Cañas, M., y Reinemud, J. (eds.) Circumpacific Council for Energy and Mineral Resources. v. 11, p. 59-90.
- Muñoz, M., Fuentes, F., Vergara, M., Aguirre, L., Nyström, J., Féraud, G. y Demant, A., 2006. Abanico East Formation: petrology and geochemistry of volcanic rocks behind the Cenozoic arc front in the Andean Cordillera, central Chile (33°50'S). *Revista Geológica de Chile*, v. 33, p. 109–140.
- Muñoz, J., y Niemeyer, H., 1984. *Geología de la Hoja Laguna del Maule: Regiones del Maule y del Bio-Bio*. Servicio Nacional de Geología y Minería, 98 p.
- Muñoz, P., 2008. Antecedentes petrográficos, geoquímicos y geocronológicos de rocas intrusivas del sector Rosario de Rengo, Región del Libertador Bernardo O'Higgins. Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 67 p.
- Nelson, S., Davidson, J., Heizler, M. y Kowallis, B., 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*, v. 111, p. 1387-1404.
- Niemeyer, H. y Muñoz, J., 1983. *Geología de la Hoja Laguna de La Laja*. Servicio Nacional de Geología y Minería, 52 p.
- Nyström, J., Vergara, M., Morata, D., y Levi, B., 2003. Tertiary volcanism during extension in the Andean foothills of central Chile (33°15'-33°45'S). *Geological Society of America*, v. 115, p. 1523- 1537.
- Pardo-Casas, F. y Molnar, P., 1987. Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time. *Tectonics*, v. 6, p. 233–248.
- Perelló, J., Sillitoe, R., Brockway, H., Posso, H. y Mpodozis, C., 2009. Contiguous porphyry Cu-Mo and Cu-Au mineralization at Los Pelambres, central Chile. *Actas, Congreso Geológico Chileno, N°12, S11\_049*, Santiago.
- Perelló, J., Sillitoe, R., Mpodozis, C., Brockway, H., y Posso, H., 2012. GEologic setting and evolution of the porphyry copper-molybdenum and copper-gold deposits, at Los Pelambres, central Chile. *Society of Economic Geologists Special Publication*, v. 16, p. 79-104.
- Piquer, J., 2004. Ambiente geológico del Prospecto Infiernillo, cordillera de Curicó, VII Región. Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 100 p.
- Radic, J., 2010. Las cuencas cenozoicas y su control en el volcanismo de los Complejos Nevados de Chillán y Copahue-Callaqui (Andes del Sur, 36-39°S). *Revista Geológica de Chile*, v.37, p. 220- 246.

- Rauld, R., 2002. Análisis morfoestructural del frente cordillerano Santiago Oriente entre el río Mapocho y la Quebrada de Macul. Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 57 p.
- Richards, J. y Kerrich, R., 2007. Adakite-like rocks: their diverse origins and questionable role in metallogenesis. Society of Economic Geologists Special Publication, v. 102, p. 537-576.
- Richter, P., Ring, U., Willner, A. y Leiss, B., 2007. Structural contacts in subduction complexes and their tectonic significance: the Late Paleozoic coastal accretionary wedge of central Chile. Journal of the Geological Society, London, v. 164, p. 203–214.
- Rivera, O. y Cembrano, J., 2000. Modelo de formación de cuencas volcano-tectónicas en zonas de transferencia oblicuas a la cadena Andina: el caso de las cuencas Oligo-Miocenas de Chile central y su relación con estructuras WNW-NW (33°00'-34°30'LS). Actas, Congreso Geológico Chileno, N°9, v. 2, p. 631-636, Puerto Varas.
- Rivera, O. y Falcón, M., 2000. Las formaciones Farellones, Coya-Machalí y Abanico en los alrededores del yacimiento El Teniente: secuencias de cuencas volcano-tectónicas transversales del Oligoceno-Mioceno de Chile central (33°45'-34°30' LS). Actas, Congreso Geológico Chileno, N°9, v.1, p. 819-823, Puerto Varas.
- Rodríguez, M., Pinto, L. y Encinas, A., 2012. Cenozoic erosion in the Andean forearc in Central Chile (33°–34°S): Sediment provenance inferred by heavy mineral studies. En: Rasbury, E., Hemming, S. y Riggs, N. (eds.) Mineralogical and Geochemical Approaches to Provenance. Geological Society of America Special Paper, v. 487, p. 141-162.
- Sanchez, J. y Motta, H. 2013. Informe final, proyecto Brahma - Austral, campaña de exploración de los targets, Teatino-Calabozo-Roblería. Informe para Geovectra, 40 p.
- Sellés, D. y Gana, P., 2001. Geología de la Hoja de Talagante-San Francisco de Mostazal, Regiones metropolitana y del Libertador Bernardo O'Higgins. Servicio Nacional de Geología y Minería, 74 p.
- Sillitoe, R., 2010. Porphyry Copper Systems. Economic Geology, v. 105, p. 3-41.
- Somoza, R., 1998. Updated Nazca (Farallon) - South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region. Journal of South American Earth Sciences, v. 11, p. 211- 215.
- Somoza, R. y Ghidella, M., 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, v. 60, p. 797-809.
- Spikings, R., Dungan, M., Foeken, J., Carter, A., Page, L. y 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, v. 165, p. 941-953.

- Stern, C. y Skewes, A., 1995. Miocene to present magmatic evolution at the northern end of the Andean Southern Volcanic Zone. *Revista Geológica de Chile*, v. 22, p. 261-272.
- Streck, M. Leeman, W., y Chesley, J., 2007. Mount Shasta: A product of magma mixing and contamination, not a primitive mantle melt. *Geology*, v. 35, p. 351–354.
- Suárez, M. y Emparan, C., 1997. Geología de la Hoja de Curacautín, Regiones de Araucanía y Bío-Bío. Servicio Nacional de Geología y Minería, 71 p.
- Tassara, A., Götze, H., Schmidt, S. y Hackney, R., 2006. Three-dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, B09404.
- Tassara, A. y Echaurren, A., 2012. Anatomy of the Andean subduction zone: three-dimensional density model upgraded and compared against global-scale models. *Geophysical Journal International*, v. 189, p. 161-168.
- Thiele, R., 1980. Geología de la Hoja de Santiago, Región Metropolitana, Servicio Nacional de Geología y Minería, 51 p.
- Thomas, H., 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el valle de La Ligua y la cuesta de Barriga. Instituto de Investigaciones Geológicas, Universidad de Chile, v. 2, p. 1-80.
- Tunik, M., 2003. Interpretación paleoambiental de los depósitos de la Formación Saldeño (Cretácico Superior), en la alta cordillera de Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, v. 58, p. 417-433.
- Tunik, M., Folguera, A., Naipauer, M., Pimentel, M. y Ramos, V., 2010. Early uplift and orogenic deformation in the Neuquén basin: constraints on the Andean uplift from U–Pb and Hf isotopic data of detrital zircons. *Tectonophysics*, v. 489, 258-273.
- Villela, D. y Cantallops, J., 2016. Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera. Informe Comisión Chilena Cobre (Chile). Dirección de Estudios y políticas públicas, 55 p.
- Wall, R., Gana, P. y Gutiérrez, A. 1996. Mapa Geológico del área de San Antonio-Melipilla. Regiones de Valparaíso, Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins, Servicio Nacional de Geología y Minería, 2 p. Mapa escala 1:100.000
- Wall, R., Sellés D. y Gana, P., 1999. Mapa Geológico del área de Tiltil-Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, 2 p. Mapa escala 1:100.000.
- Willner, A., Thomson, S., Kröner, A., Wartho, J., Wijbrans, J. y Hervé, F., 2005. Time markers for the evolution and exhumation history of a Late Palaeozoic paired metamorphic belt in North-Central Chile (34°–35°30'S). *Journal of Petrology*, v. 46, p. 1835-1858.
- Zurita, E., 1999. Historia de enterramiento y exhumación de la Formación Abanico=Coya-Machalí, Cordillera Principal, Chile Central. Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago. 156 p

# Anexo A

## *Descripciones de sondajes*















































































# Anexo B

*Descripciones petrográficas de  
muestras de mano*

MUESTRA : B02 064	
Coordenadas:	6039775 N / 301126 E
Textura	Holocristalina equigranular, fanerítica de granos medios hipidiomórficos
Estructura	Homogénea sin morfologías especiales observadas
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Leucocrático
Mineralogía primaria	Plagioclasa hasta 4mm, tabular subhedral 65% Feldespato-K < 2mm, anhedral masivo 5% Cuarzo <2mm, anhedral masivo 10% Hornblenda <4mm, subredondeado anhedral 20%
Nombre de la roca	Tonalita



A photograph showing a rock sample of Tonalite (B02 064). The rock is dark grey with a fine-grained, equigranular texture. A silver pencil is placed horizontally across the rock to provide scale. Below the rock, a small white label with blue handwritten text reads "B02 064-6".

MUESTRA : B02 159	
Coordenadas:	6039747 N / 301142 E
Textura	Holocristalina equigranular, fanerítica de granos medios hipidiomórficos
Estructura	Homogénea sin morfologías especiales observadas
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Leucocrático
Mineralogía primaria	Plagioclasa hasta 4mm, tabular subhedral 60% Cuarzo <2mm, anhedral masivo 10% Hornblenda <3mm, tabular subhedral 30% Presenta magnetismo moderado
Nombre de la roca	Tonalita

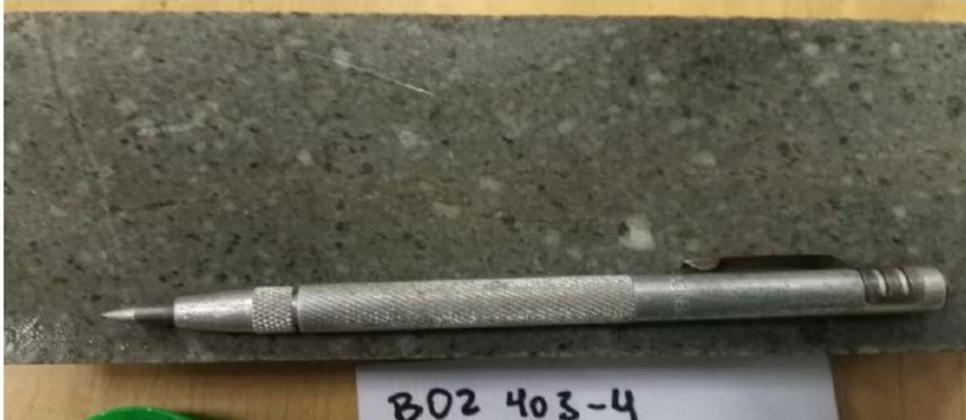


A photograph showing a rock sample of Tonalite (B02 159). The rock is dark grey with a fine-grained, equigranular texture. A silver pencil is placed horizontally across the rock to provide scale. Below the rock, a small white label with blue handwritten text is partially visible, showing "B02 159".

MUESTRA : B02 210	
Coordenadas:	6039732 N / 301151 E
Textura	Holocristalina equigranular, fanerítica de grano medio hipidiomórficos
Estructura	Homogénea sin morfologías especiales observadas
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Mesocrático
Mineralogía primaria	Plagioclasa hasta 5mm, tabular subhedral subredondeado 35% Cuarzo <2mm, anhedral masivo 10% Feldespato potásico <2mm, anhedral masivo 5% Hornblenda <4mm, subredondeado anhedral 40%
Nombre de la roca	Granodiorita



MUESTRA : B02 403	
Coordenadas:	6039675 N / 301183 E
Textura	Hipocristalina inequigranular, porfirica de grano medio a grueso hipidiomórficos
Estructura	Homogénea sin morfologías especiales observadas
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Leucocrático
Mineralogía primaria	Plagioclasa hasta 4mm, tabular subhedral 15% Cuarzo <2mm, anhedral masivo 10% Hornblenda <4mm, subredondeado anhedral 10% Masa fundamental 65%
Nombre de la roca	Dacita



MUESTRA : B02-2	
Coordenadas:	6039676 N / 301183 E
Textura	Holocristalina equigranular, fanerítica de granos medios e hipidiomórficos
Estructura	Homogénea sin morfologías especiales observadas
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Leucocrático
Mineralogía primaria	Plagioclasa hasta 4mm, tabular subhedral 40% Cuarzo <2mm, anhedral masivo 10% Hornblenda <4mm, subredondeado anhedral 15% Alteración hidrotermal considerable oblitera mineralogía y texturas primarias
Nombre de la roca	Tonalita



MUESTRA : B02-7	
Coordenadas:	6039730 N / 301152 E
Textura	Holocristalina equigranular, fanerítica de granos medios hipidiomórficos
Estructura	Homogénea sin morfologías especiales observadas
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Leucocrático
Mineralogía primaria	Plagioclasa hasta 4mm, tabular subhedral 60% Cuarzo <2mm, anhedral masivo 15% Hornblenda <3mm, tabular subhedral 25% Presenta magnetismo moderado
Nombre de la roca	Tonalita



<b>MUESTRA : B02-9</b>	
<b>Coordenadas:</b>	6039787 N / 301119 E
<b>Textura</b>	Holocristalina equigranular, fanerítica de granos medios e hipidiomórficos
<b>Estructura</b>	Homogénea sin morfologías especiales observadas
<b>Fábrica</b>	Isótropa
<b>Índice de color</b>	Leucocrático
<b>Mineralogía primaria</b>	Plagioclasa hasta 4mm, tabular subhedral 55% Feldespato-K < 2mm, anhedral masivo 15% Cuarzo <2mm, anhedral masivo 10% Hornblenda <4mm, subredondeado anhedral 20%
<b>Nombre de la roca</b>	Tonalita



<b>MUESTRA : B03 155</b>	
<b>Coordenadas:</b>	6039546 N / 301550 E
<b>Textura</b>	Hipocristalina inequigranular, porfírica de grano medio a grueso hipidiomórficos
<b>Estructura</b>	Homogénea sin morfologías especiales observadas
<b>Fábrica</b>	Isótropa
<b>Índice de color</b>	Mesocrático
<b>Mineralogía primaria</b>	Plagioclasa hasta 4mm, tabular subhedral 15% Hornblenda <4mm, subredondeado anhedral 25% Masa fundamental 60%
<b>Nombre de la roca</b>	Dacita



<b>MUESTRA : B03 357</b>	
<b>Coordenadas:</b>	6039599 N / 301550 E
<b>Textura</b>	Hipocristalina inequigranular, porfirica de grano grueso hipidiomórficos
<b>Estructura</b>	Homogénea sin morfologías especiales observadas
<b>Fábrica</b>	Isótropa
<b>Índice de color</b>	Leucocrático
<b>Mineralogía primaria</b>	Plagioclasa hasta 4mm, tabular subhedral 60% Cuarzo hasta 2mm, anhedral 10% Hornblenda <4mm, subredondeado anhedral 15% Masa fundamental 15%
<b>Nombre de la roca</b>	Dacita



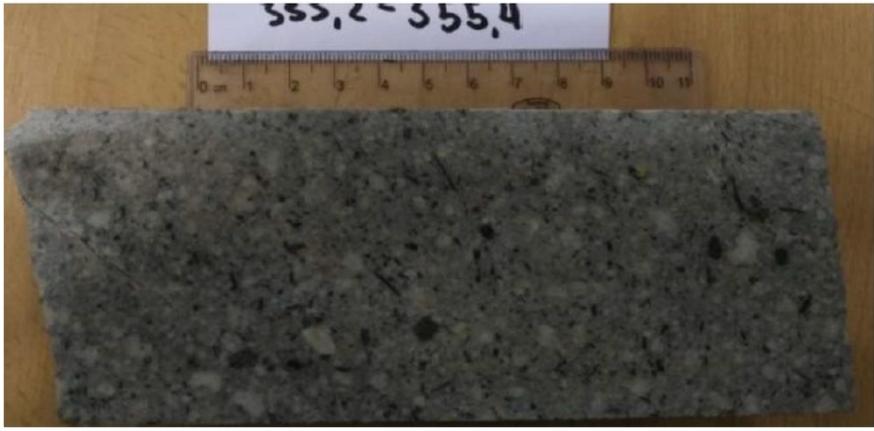
<b>MUESTRA : B03 399</b>	
<b>Coordenadas:</b>	6039599 N / 301550 E
<b>Textura</b>	Afanítico equigranular
<b>Estructura</b>	Homogénea sin morfologías especiales observadas
<b>Fábrica</b>	Isótropa
<b>Índice de color</b>	Mesocrático
<b>Mineralogía primaria</b>	Plagioclasa < 2mm, 5% Masa fundamental 95%
<b>Nombre de la roca</b>	Dique andesítico



MUESTRA : B03 472	
Coordenadas:	6039628 N / 301550 E
Textura	Hipocristalina inequigranular, porfirica de grano medio hipidiomórficos
Estructura	Homogénea sin morfologías especiales observadas
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Leucocrático
Mineralogía primaria	Plagioclasa hasta 3mm, tabular subhedral 35% Cuarzo <2mm, anhedral masivo 10% Hornblenda <2mm, tabular y anhedral 10% Masa fundamental 45%
Nombre de la roca	Dacita



MUESTRA : B03-2	
Coordenadas:	6039597 N / 301550 E
Textura	Hipocristalina inequigranular, porfirica de grano medio hipidiomórficos
Estructura	Homogénea sin morfologías especiales observadas
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Leucocrático
Mineralogía primaria	Plagioclasa hasta 4mm, tabular subhedral 20% Cuarzo <2mm, anhedral masivo 10% Hornblenda <4mm, tabular elongado 10% Masa fundamental 60%
Nombre de la roca	Dacita



MUESTRA : B04 387	
Coordenadas:	6039341 N / 301285 E
Textura	Hipocristalina inequigranular, porfirica de grano medio hipidiomórficos
Estructura	Homogénea sin morfologías especiales observadas
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Leucocrático
Mineralogía primaria	Plagioclasa hasta 4mm, tabular subhedral 60% Cuarzo hasta 2mm, anhedral 10% Hornblenda <3mm, subredondeado anhedral y tabular 15% Masa fundamental 15%
Nombre de la roca	Dacita



MUESTRA : B05 193	
Coordenadas:	6038971 N / 301209 E
Textura	Hipocristalina inequigranular, porfirica de grano grueso hipidiomórficos
Estructura	Homogénea sin morfologías especiales observadas
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Leucocrático
Mineralogía primaria	Plagioclasa hasta 4mm, tabular subhedral 55% Cuarzo hasta 2mm, anhedral 10% Hornblenda <4mm, tabular 15% Masa fundamental 20%
Nombre de la roca	Dacita



MUESTRA : B05 272	
Coordenadas:	6038990 N / 301228 E
Textura	Hipocristalina inequigranular, porfirica de grano grueso hipidiomórficos
Estructura	Homogénea general, y hornblendas en estructura lineal
Fábrica	Levemente anisótropa
Índice de color	Leucocrático
Mineralogía primaria	Plagioclasa hasta 4mm, tabular subhedral 40% Cuarzo <2mm, anhedral masivo 10% Hornblenda <4mm, tabular elongadol 20% Masa fundamental 30%
Nombre de la roca	Dacita
	

MUESTRA : B06 111	
Coordenadas:	6039536 N / 301821 E
Textura	Holocristalina equigranular, fanerítica de granos medios hipidiomórficos
Estructura	Homogénea sin morfologías especiales observadas
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Mesocrático
Mineralogía primaria	Plagioclasa hasta 5mm, tabular subhedral 40% Feldespatos-K < 3mm, anhedral masivo 10% Cuarzo <3mm, anhedral masivo 10% Hornblenda <5mm, tabular subhedral 40%
Nombre de la roca	Granodiorita
	

MUESTRA : B06 253	
Coordenadas:	6039536 N / 301797 E
Textura	Hipocristalina inequigranular, porfírica de granos gruesos hipidiomórficos
Estructura	Homogénea sin morfologías especiales observadas
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Leucocrático
Mineralogía primaria	Plagioclasa hasta 1cm, anhedral subredondeadas 25% Cuarzo <3mm, anhedral masivo 5% Hornblendas <5mm, tabular elongado subhedral 10% Masa fundamental 60%
Nombre de la roca	Dacita



MUESTRA : B06 411	
Coordenadas:	6039536 N / 301769 E
Textura	Holocristalina equigranular, fanerítica de granos medios hipidiomórficos
Estructura	Homogénea sin morfologías especiales observadas
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Mesocrático
Mineralogía primaria	Plagioclasa hasta 5mm, tabular subhedral 40% Feldespato-K < 3mm, anhedral masivo 10% Cuarzo <3mm, anhedral masivo 10% Hornblenda <5mm, tabular subhedral 40%
Nombre de la roca	Granodiorita



MUESTRA : B07 053	
Coordenadas:	6038582 N / 301034 E
Textura	Holocristalina equigranular, fanerítica de granos medios hipidiomórficos
Estructura	Homogénea sin morfologías especiales observadas
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Leucocrático
Mineralogía primaria	Plagioclasa hasta 4mm, tabular subhedral 50% Feldespato-K <2mm, anhedral masivo 7% Cuarzo <2mm, anhedral masivo 8% Hornblenda <3mm, tabular subhedral 35%
Nombre de la roca	Granodiorita
	

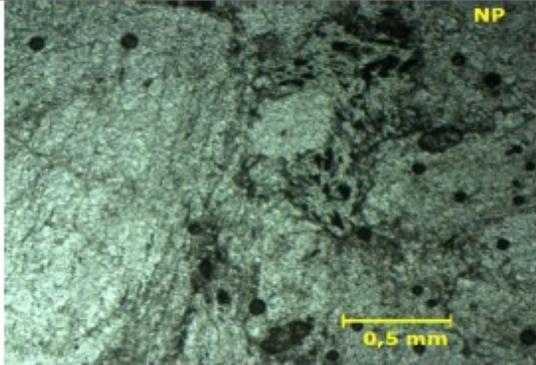
MUESTRA : B07 222	
Coordenadas:	6038603 N / 301055 E
Textura	Holocristalina equigranular, fanerítica de granos medios hipidiomórficos
Estructura	Homogénea sin morfologías especiales observadas
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Leucocrático
Mineralogía primaria	Plagioclasa hasta 4mm, tabular subhedral 50% Feldespato-K <2mm, anhedral masivo 7% Cuarzo <2mm, anhedral masivo 8% Hornblenda <4mm, tabular subhedral 35%
Nombre de la roca	Granodiorita
	

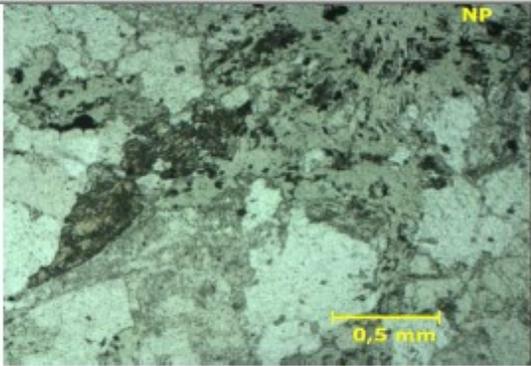
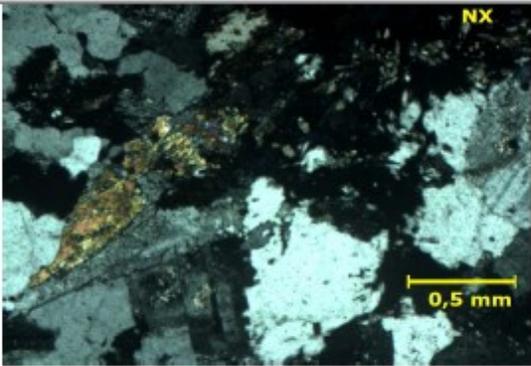
<b>MUESTRA : B07 298</b>	
<b>Coordenadas:</b>	6038612 N / 301064 E
<b>Textura</b>	Holocristalina equigranular, fanerítica de granos medios hipidiomórficos
<b>Estructura</b>	Homogénea sin morfologías especiales observadas
<b>Fábrica</b>	Isótropa
<b>Índice de color</b>	Leucocrático
<b>Mineralogía primaria</b>	Plagioclasa hasta 4mm, tabular subhedral 50% Feldespato-K <3mm, anhedral masivo 7% Cuarzo <3mm, anhedral masivo 8% Hornblenda <5mm, tabular subhedral 35%
<b>Nombre de la roca</b>	Granodiorita

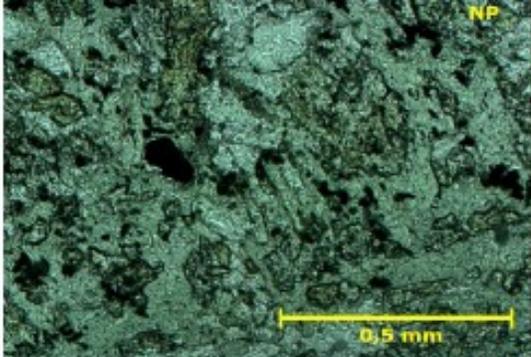
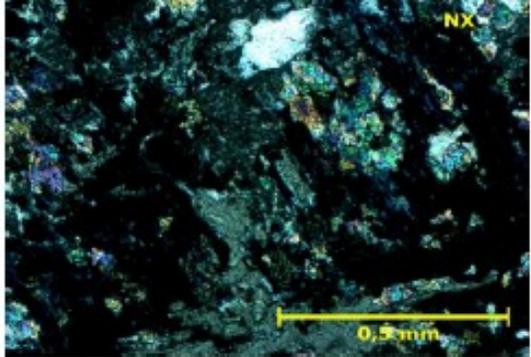


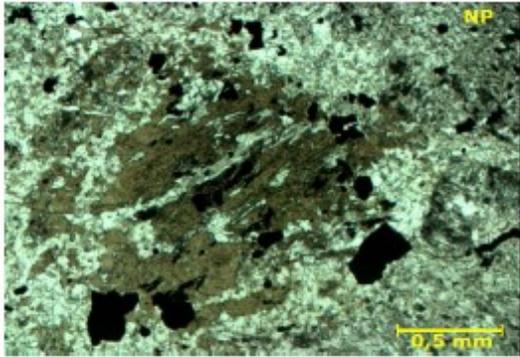
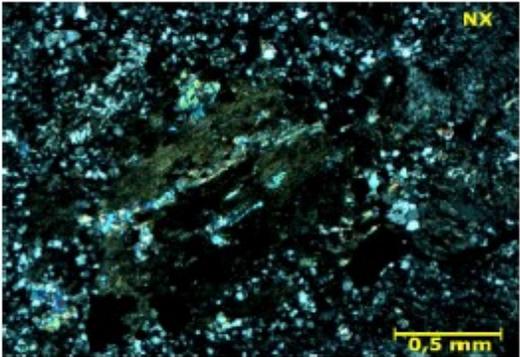
# Anexo C

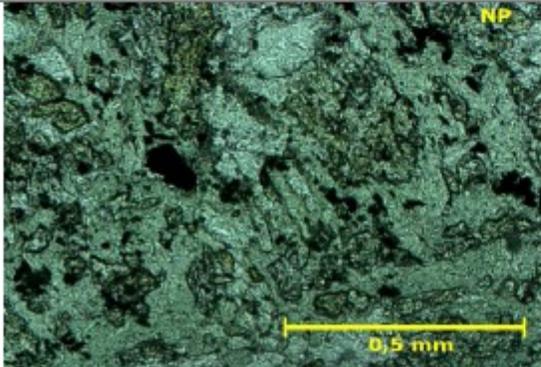
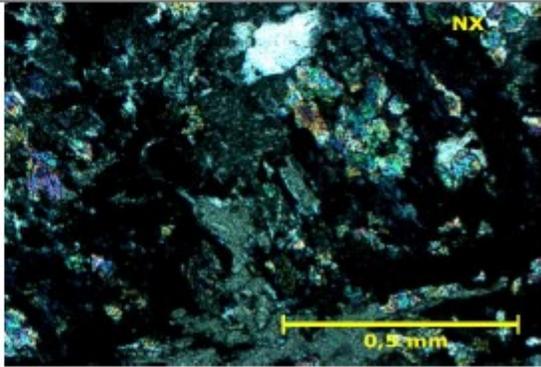
*Descripciones petrográficas de  
láminas delgadas*

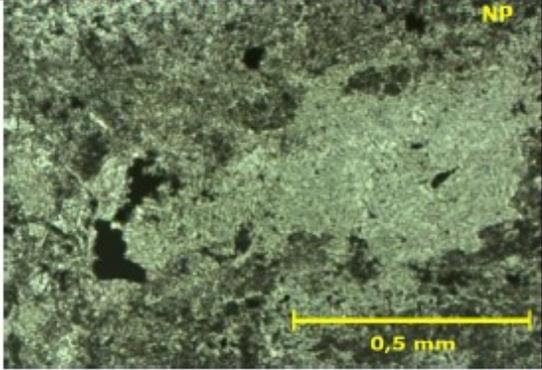
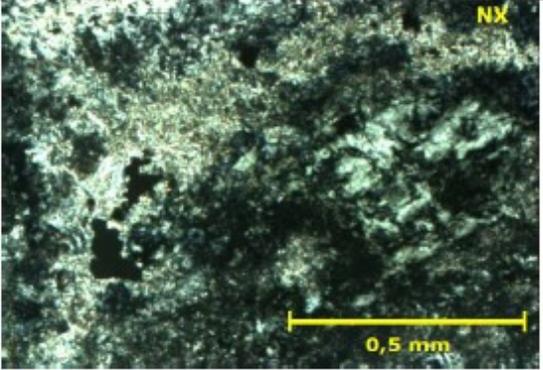
Muestra: B02-064				
Coordenadas UTM	6039776N / 301126E			
Texturas	Fanerítica, equigranular isótropa			
Características	Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	Plagioclasa	70	Cristales euhedrales de 1 a 2 mm, zonaciones oscilatorias intensas	sericita
	Cuarzo	20	masivo contactos por sutura con los demas cristales, tamaños menores a 4 mm	no presenta
	Hornblenda	5	Prismáticos euhedrales a subhedrales, tamaño de 0,2 a 0,6 mm	Epidota reemplazo leve
	Biotita	5	anhedrales, reempazados por clorita acompañada de opacos, tamaño menor a 2 mm.	clorita reemplazo de intensidad media
Otros	Textura intercrystalina consertal			
Nombre: Tonalita - Aumento de 5X				
				
Unidad: TON				

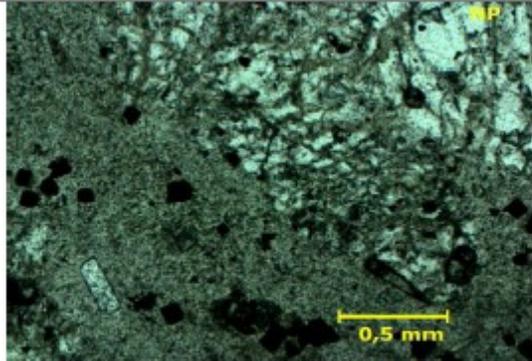
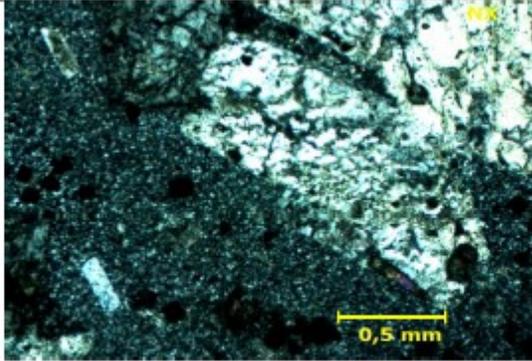
Muestra: B02-159				
Coordenadas UTM	6039747N / 301142E			
Texturas	Fanerítica, equigranular isótropa			
Características	Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	Plagioclasa	40	Cristales euhedrales de 1 a 2 mm, zonaciones oscilatorias intensas	sericita
	Cuarzo	50	masivo contactos por sutura con los demas cristales, tamaños menores a 4 mm	no presenta
	Hornblenda	10	Prismáticos subhedrales, tamaño de 0,2 a 0,8 mm	Epidota reemplazo leve
	Biotita	5	anhedrales, reempazados por clorita acompañada de opacos, tamaño de 0,6 a 1,4 mm.	clorita reemplazo moderado a alto
Otros	Textura intercrystalina consertal			
Nombre: Tonalita - Aumento de 5X				
				
Unidad: TON				

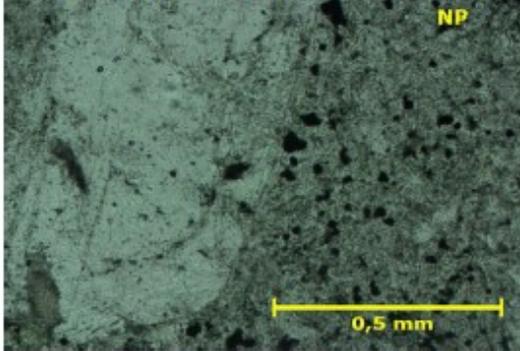
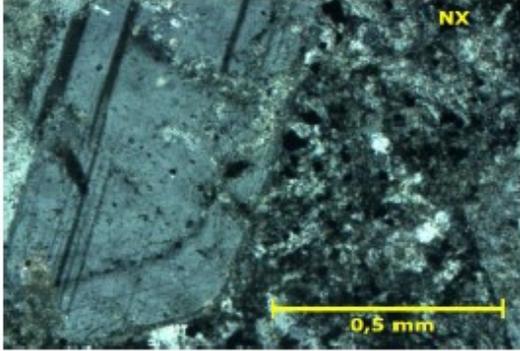
Muestra: B02-210				
Coordenadas UTM	8039732N / 301151E			
Texturas	Fanerítica, equigranular isótropa			
Características	Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	Plagioclasa	40	Cristales euhedrales de 1 a 6 mm, sieves, zonaciones oscilatorias en algunos cristales	fragmentada leve
	Feldespato K	15	masivo contactos por sutura con los demas cristales, tamaños menores a 4 mm	sericita muy leve, fragmentado leve
	Cuarzo	20	masivo contactos por sutura con los demas cristales, tamaños menores a 4 mm	no presenta
	Hornblenda	10	Prismáticos subhedrales, tamaño menor a 3 mm	Epidota reemplazo moderado
	Biotita	15	anhedrales, reempazados por clorita acompañada de opacos, tamaño de 0,6 a 1,4 mm.	clorita reemplazo moderado
Otros	Textura intercristalina consertal			
Nombre: Granodiorita - Aumento de 10X				
				
Unidad: GRD				

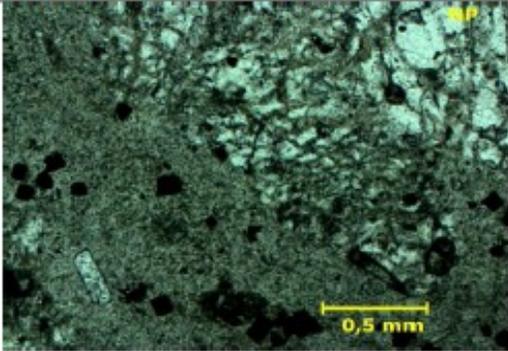
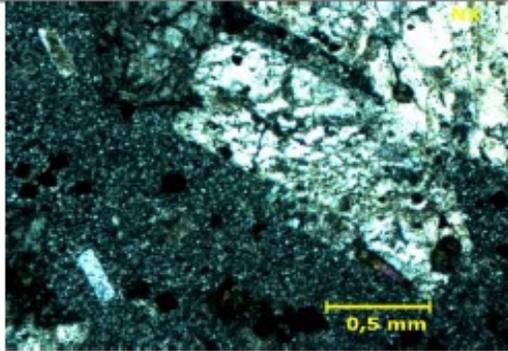
Muestra: B02-403					
Coordenadas UTM		6039675N / 301184E			
Texturas		Porfídica, hipocristalina, hipidiomórfica			
Características		Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	<b>Fenocristales</b>	Plagioclasa	30	Cristales euhedrales de 0,5 a 4 mm con presencia de macla carlsbad y periclina. Inclusiones de opacos. Algunos cristales presentan zonación	sericita, clorita, anhidrita
		Opacos	15	Cristales subhedrales y euhedrales prismáticos de hasta 3 mm, en ocasiones reemplazando a minerales máficos anteriores	No presenta
		Biotita	1	Cristales anhedrales de hasta 1 mm muy baja integridad	opacos (py) y clorita
	<b>Masa Fundamental</b>	Cuarzo	30	Cristales anhedrales menores a 0.1 mm dispuestos en mosaico homogéneo con feldespato potásico (textura felsítica)	no presenta
		Feldespato K	24	Cristales anhedrales menores a 0,1 mm en textura felsítica	sericita, arcillas
Otros		Vetillas de anhidrita+cuarzo+opacos menor 0.2 mm de ancho			
Nombre: Dacita de biotita - Aumento de 5X					
					
Unidad: PFHr					

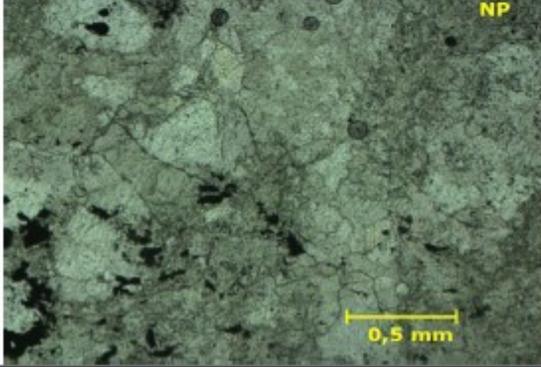
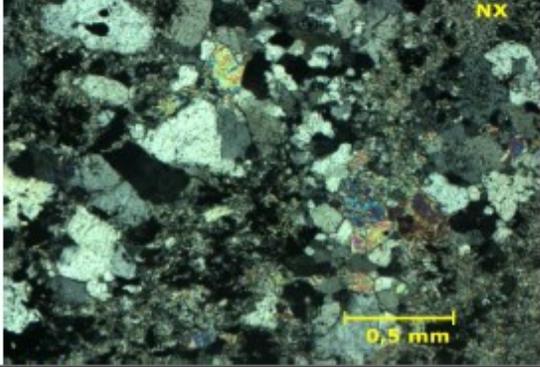
Muestra: B02-9				
Coordenadas UTM	6039788N / 301119E			
Texturas	Fanerítica, equigranular isótropa			
Características	Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	Plagioclasa	40	Cristales euhedrales de 1 a 4 mm, sieves, zonaciones oscilatorias en algunos cristales	sericita
	Cuarzo	50	masivo contactos por sutura con los demas cristales, tamaños menores a 4 mm	no presenta
	Hornblenda	10	pseudomorfos prismáticos subhedrales, tamaño menor a 3 mm	Epidota reemplazo moderado a alto
	Biotita	5	anhedrales, reempazados por clorita acompañada de opacos, tamaño de 0,6 a 1,4 mm.	clorita reemplazo moderado
Otros	Textura intercrystalina consertal			
Nombre: Tonalita - Aumento de 5X				
				
Unidad: TON				

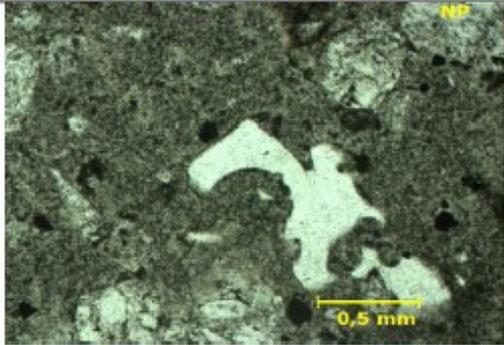
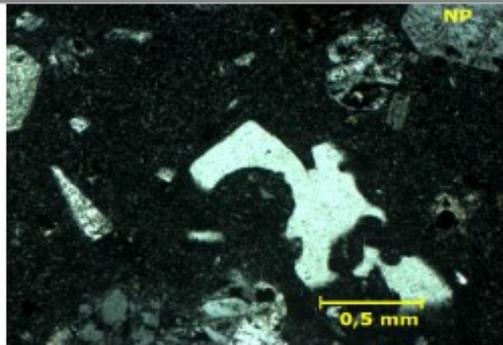
Muestra: B03-155					
Coordenadas UTM		6039546N / 301550E			
Texturas		Porfídica, hipocristalina, hipidiomórfica			
Características		Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	<b>Fenocristales</b>	Plagioclasa	30	Cristales euhedrales de 0,5 a 4 mm con presencia de macla carlsbad y periclina. Inclusiones de opacos. Algunos cristales presentan zonación	clorita, smectitas
		Hornblenda	10	Cristales anhedrales subredondeados con alto grado de reemplazo y/o descompuestos y tamaños de 2 a 8 mm. Familias subhedrales tabulares de menor tamaño (0,5 a 2mm)	epidota reemplazo selectivo
	<b>Masa Fundamental</b>	Cuarzo	30	masivos anhedrales menores a 0.1 mm dispuestos en mosaico homogéneo con feldespato potásico (textura felsítica)	no presenta
		Feldespato K	30	masivos anhedrales menores a 0,1 mm en textura felsítica	sericita, arcillas
Otros		vetillas con opacos, fenocxs. de cuarzo con reabsorción			
Nombre: Dacita de hornblenda - Aumento de 10X					
					
Unidad: PFHr					

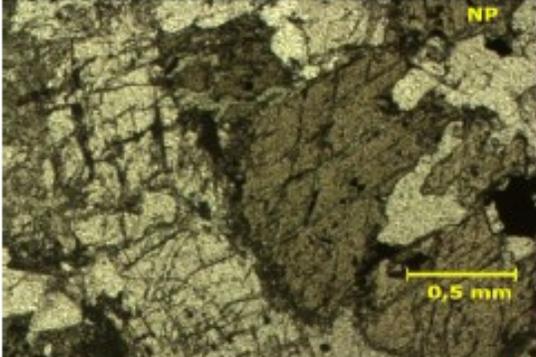
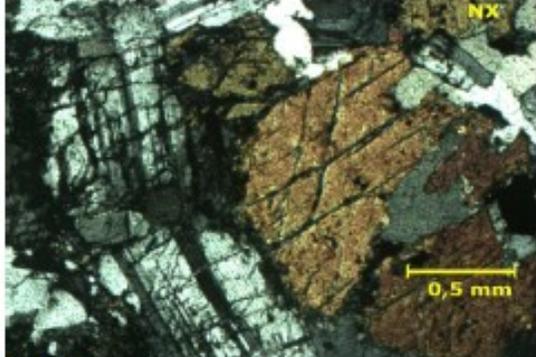
Muestra: B03-357					
Coordenadas UTM		6039599N / 301550E			
Texturas		Porfídica, hipocristalina, hipidiomórfica			
Características		Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	<b>Fenocristales</b>	Plagioclasa	35	Cristales euhedrales de 0,5 a 4 mm con presencia de macla carlsbad y periclina. Inclusiones de opacos. Algunos cristales presentan zonación	sericita, clorita, anhidrita
		Biotita	5	Cristales anhedrales de hasta 1 mm muy baja integridad	reemplazan clorita y opacos
	<b>Masa Fundamental</b>	Cuarzo	30	Cristales anhedrales menores a 0.1 mm dispuestos en mosaico homogéneo con feldespato potásico (textura felsítica)	reabsorción
		Feldespato K	25	Cristales anhedrales menores a 0,1 mm en textura felsítica	sericita, arcillas
Otros		vetillas de anh+qtz+opacos menores a 0.2mm de ancho, apatitos de hasta 0,3 mm tabular prismáticos. todos suman ~5% del área del corte.			
Nombre: Dacita de hornblenda - Aumento de 5X					
					
Unidad: PFH					

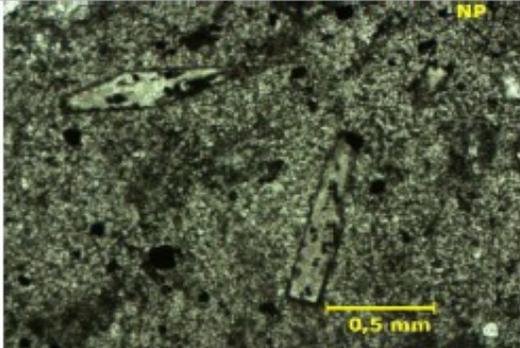
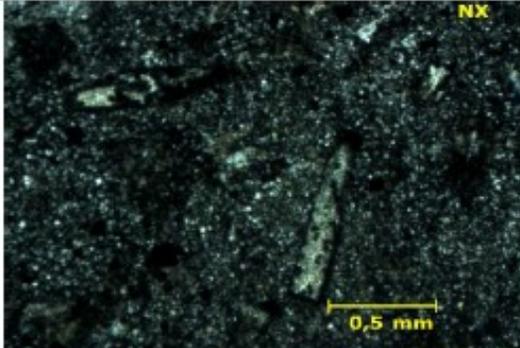
Muestra: B03-399					
Coordenadas UTM		6039628N / 301550E			
Texturas		Porfídica, hipocristalina, hipidiomórfica			
Características		Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	<b>Fenocristales</b>	Plagioclasa	35	subhedral de hasta 2 mm	sericita, epidota, anh.
		Hornblenda	15	anhedral baja estructuralidad, descompuestas	reemplazo leve a moderado por epidota
		Biotita	10	subhedral y anhedral, menores a 0,4mm, muy baja estructuralidad e integridad, reemplazadas a epidota y descompuestas	reemplazo moderado por clorita
	<b>Masa Fur</b>	Plagioclasa	40	Cristales anhedral menores a 0.1 mm dispuestos en mosaico homogéneo junto a algunos opacos	sericita
Otros		masa fundamental alterada a sericita			
Nombre: Dique andesítico - Aumento de 10X					
					
Unidad: Diques Andesíticos					

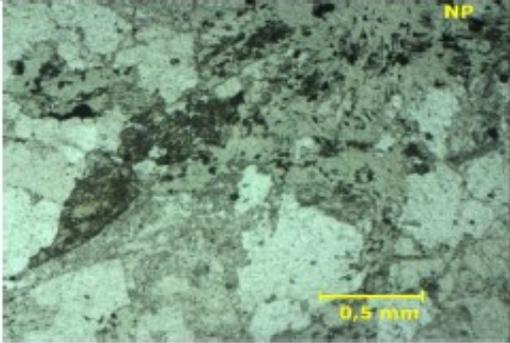
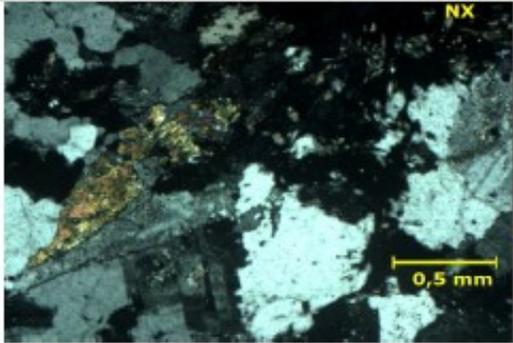
Muestra: B03-472					
Coordenadas UTM		6039628N / 301550E			
Texturas		Porfídica, hipocristalina, hipidiomórfica			
Características		Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	<b>Fenocristales</b>	Plagioclasa	50	Familia euhedral de hasta 3mm con integridad y estructuralidad aceptables (15%), otra familia de plgs. fragmentadas con tamaños entre 0,1 y 1 mm(35%)	sericita, epidota, anh.
		Cuarzo	10	subhedrales y fragmentados entre 0,2 y 1 mm aproximadamente	solo fragmentados
		Hornblenda	5	subhedrales y anhedrales, menores a 0,4mm, muy baja estructuralidad e integridad, reemplazadas a epidota y descompuestas	intenso reemplazo a ep. y descomposición
	<b>Masa Fundamental</b>	Cuarzo	20	Cristales anhedrales menores a 0.1 mm dispuestos en mosaico homogéneo con feldespato potásico (textura felsítica)	no presenta
		Feldespato K	15	Cristales anhedrales menores a 0,1 mm en textura felsítica	sericita, arcillas
Otros		vetillas de qtz+anh menores a 2mm de ancho (escasas <1% del área total)			
Nombre: Dacita de hornblenda - Aumento de 5X					
					
Unidad: PFH					

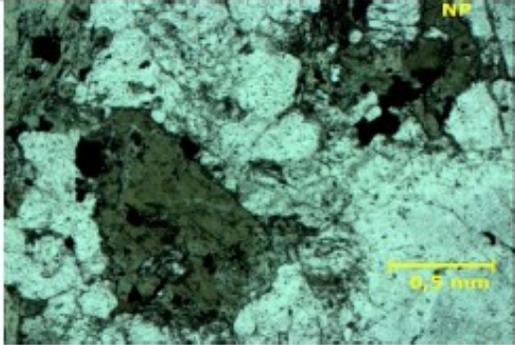
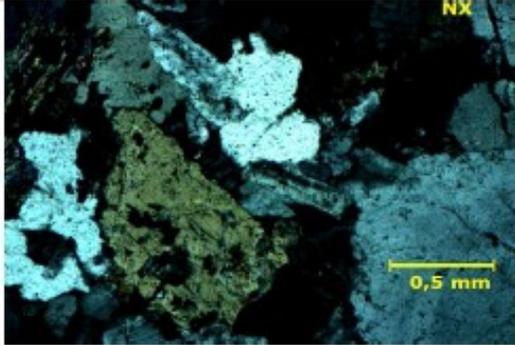
Muestra: B04-387					
Coordenadas UTM		6039342N / 301286E			
Texturas		Porfídica, hipocristalina, hipidiomórfica			
Características		Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	<b>Fenocristales</b>	Plagioclasa	15	Cristales euhedrales de 0,5 a 4 mm con presencia de macla carlsbad y periclina. Inclusiones de opacos. Algunos cristales presentan zonación	sericita, clorita, anhidrita
		Hornblenda	10	Cristales subhedrales y anhedrales de hasta 6 mm reemplazados a epidota y descompuestos en los bordes	reemplazo a epidota
	<b>Masa Fundamental</b>	Cuarzo	30	Cristales anhedrales menores a 0.1 mm dispuestos en mosaico homogéneo con feldespato potásico (textura felsítica)	no se observa
		Feldespato K	25	Cristales anhedrales menores a 0,1 mm en textura felsítica	sericita, arcillas
Otros		abundantes vetillas de anh+qtz cubren ~ 20% del área del corte			
Nombre: Dacita de hornblenda - Aumento de 5X					
					
Unidad: PFHr					

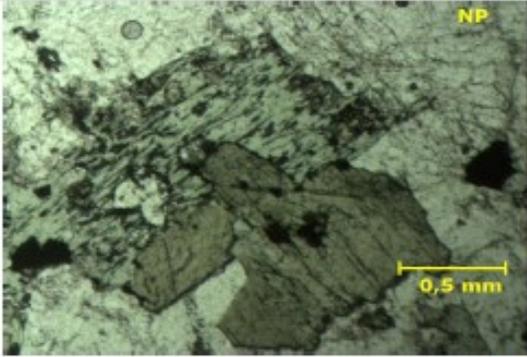
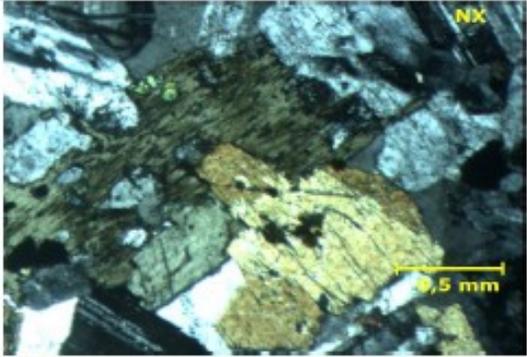
Muestra: B05-272					
Coordenadas UTM		6038991N / 301229E			
Texturas		Porfídica, hipocristalina, hipidiomórfica			
Características		Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	<b>Fenocristales</b>	Plagioclasa	30	Familia euhedral de hasta 3mm con integridad y estructuralidad aceptables (15%), otra familia de plgs. fragmentadas con tamaños entre 0,1 y 1 mm(35%)	sericita, epidota, anh.
		Cuarzo	20	subhedrales y fragmentados etre 0,2 y 1 mm aproximadamente	fragmentación y reabsorción
		Hornblenda	5	euhedral prismático a subhedral, menores a 0,6mm y bien conservadas, reemplazadas a epidota	reemplazo parcial a total por epidota
	<b>Masa Fundamental</b>	Cuarzo	25	Cristales anhedrales menores a 0.1 mm dispuestos en mosaico homogéneo con feldespato potásico (textura felsítica)	no se observa
		Feldespato K	20	Cristales anhedrales menores a 0,1 mm en textura felsítica	sericita, arcillas
Otros		apatitos euhedral tabular prismático menores a 0,3 mm (<1%)			
Nombre: Dacita de hornblenda - Aumento de 5X					
					
Unidad: PFH					

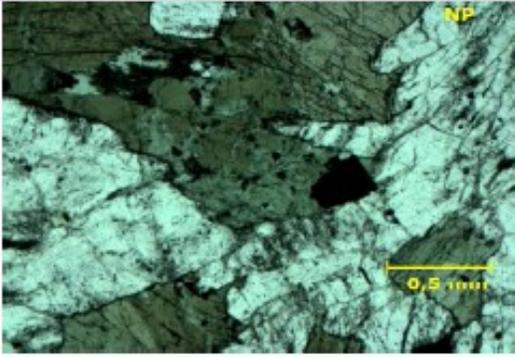
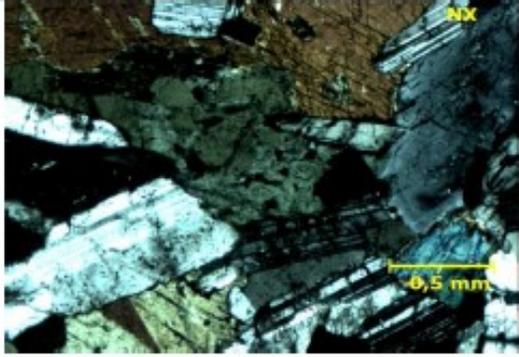
Muestra: B06-111				
Coordenadas UTM	8039536N / 301822E			
Texturas	Fanerítica, equigranular isótropa			
Características	Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	Plagioclasa	40	Cristales euhedrales de 1 a 8 mm, sieves, zonaciones oscilatorias en algunos cristales	fragmentada leve
	Feldespatos K	15	masivo contactos por sutura con los demás cristales, tamaños menores a 4 mm	sericita muy leve, fragmentado leve
	Cuarzo	20	masivo contactos por sutura con los demás cristales, tamaños menores a 4 mm	no presenta
	Hornblenda	10	Prismáticos subhedrales, tamaño de 0,2 a 0,8 mm	Epidota reemplazo moderado
	Biotita	15	anhedrales, reemplazados por clorita acompañada de opacos, tamaño de 0,6 a 1,4 mm.	clorita reemplazo moderado
Otros	Textura intercrystalina consertal			
Nombre: Granodiorita - Aumento de 5X				
				
Unidad: GRD				

Muestra: B06-253					
Coordenadas UTM		6039536N / 301797E			
Texturas		Porfídica, hipocristalina, hipidiomórfica			
Características		Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	<b>Fenocristales</b>	Plagioclasa	20	crisales subhedrales, tamaños entre 0,2 a 1 mm, algunas plagioclasas con zonación oscilatoria	sericita, epidota, anh. Fragmentación leve a moderada
		Cuarzo	15	anhedral masivo a subhedral, tamaños menores a 0,4 mm	fragmentación muy leve
		Hornblenda	10	euhedrales prismáticas a subhedrales, menores a 0,8mm, bien conservadas, reemplazadas a epidota y descompuestas	reempl. parcial a total por epidotay opacos, descomposición
	<b>Masa Fundamental</b>	Cuarzo	30	Cristales anhedrales menores a 0.1 mm dispuestos en mosaico homogéneo con feldespato potásico (textura felsítica)	no presenta
		Feldespato K	25	Cristales anhedrales menores a 0,1 mm en textura felsítica	sericita, arcillas
Otros		apatitos euhedrales prismáticos menores a 3mm (<1% del área total del corte)			
Nombre: Dacita de hornblenda - Aumento de 5X					
					
Unidad: PFH					

Muestra: B06-411				
Coordenadas UTM	8039536N / 301769E			
Texturas	Fanerítica, equigranular isótropa			
Características	Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	Plagioclasa	35	Cristales euhedrales de 1 a 2 mm, zonaciones oscilatorias intensas	sericita
	Feldespato K	15	masivo contactos por sutura con los demas cristales, tamaños menores a 4 mm	sericita, arcillas
	Cuarzo	25	masivo contactos por sutura con los demas cristales, tamaños menores a 4 mm	no presenta
	Hornblenda	5	Prismáticos subhedrales, tamaño de 0,2 a 0,8 mm	Epidota reemplazo leve
	Biotita	20	anhedrales, reempazados por clorita acompañada de opacos, tamaño de 0,6 a 1,4 mm.	clorita reemplazo moderado a alto
Otros	Textura intercrystalina consertal			
Nombre: Granodiorita - Aumento de 5X				
				
Unidad: GRD				

Muestra: B07-053				
Coordenadas UTM	8038583N / 301035E			
Texturas	Fanerítica, equigranular isótropa			
Características	Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	Plagioclasa	35	Cristales euhedrales de 1 a 2 mm, zonaciones oscilatorias intensas	sericita
	Feldespato K	10	masivo contactos por sutura con los demas cristales, tamaños menores a 4 mm	sericita, arcillas
	Cuarzo	40	masivo contactos por sutura con los demas cristales, tamaños menores a 4 mm	no presenta
	Hornblenda	5	Prismáticos subhedrales, tamaño de 0,2 a 0,8 mm	Epidota reemplazo leve
	Biotita	10	anhedrales, reempazados por clorita acompañada de opacos, tamaño de 0,6 a 1,4 mm.	clorita reemplazo moderado a alto
Otros	Textura intercrystalina consertal			
Nombre: Granodiorita - Aumento de 5X				
				
Unidad: GRD				

Muestra: B07-222				
Coordenadas UTM	8038603N / 301055E			
Texturas	Fanerítica, equigranular isótropa			
Características	Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	Plagioclasa	40	Cristales euhedrales de 1 a 6 mm, sieves, zonaciones oscilatorias en algunos cristales	fragmentada leve
	Feldespatos K	15	masivo contactos por sutura con los demas cristales, tamaños menores a 4 mm	sericita muy leve, fragmentado leve
	Cuarzo	20	masivo contactos por sutura con los demas cristales, tamaños menores a 4 mm	no presenta
	Hornblenda	10	Prismáticos subhedrales, tamaño menor a 2 mm	Epidota reemplazo moderado
	Biotita	15	anhedrales, reemplazados por clorita acompañada de opacos, tamaño de 0,6 a 1,4 mm.	clorita reemplazo moderado
Otros	Textura intercristalina consertal			
Nombre: Granodiorita - Aumento de 5X				
				
Unidad: GRD				

Muestra: B07-298				
Coordenadas UTM	8038813N / 301065E			
Texturas	Fanerítica, equigranular isótropa			
Características	Mineral	%	Texturas y observaciones	Alteración
<b>Mineralogía</b>	Plagioclasa	50	Cristales euhedrales de 2 a 5 mm, algunas con zonación oscilatoria	sericita leve
	Feldespato K	15	masivo contactos por sutura con los demas cristales, tamaños menores a 3 mm	sericita, arcilla
	Cuarzo	15	masivo contactos por sutura con los demas cristales, tamaños menores a 3 mm	no presenta
	Hornblenda	10	Prismáticos subhedrales, tamaño menor a 1,4 mm	Epidota reemplazo moderado
	Biotita	10	anhedrales, reempazados por clorita acompañada de opacos, tamaño de 0,6 a 1,4 mm.	clorita reemplazo moderado
Otros	Textura intercrystalina consertal			
Nombre: Granodiorita - Aumento de 5X				
				
Unidad: GRD				

# Anexo D

*Dataciones radiométricas de  
U-Pb en circones*

RAZONES CORREGIDAS														EIDADES CORREGIDAS (Ma)					
	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Edad (Ma)	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	Disc %
B06-411	Unidad: <i>Granodiorita - Ubicación: 6039536N; 301769E; 700 m s.n.m.</i>																		
Zrc 106	87,8	80,8	0,92	0,0650	0,0240	0,0175	0,0062	0,0022	0,0002	0,0010	0,0002	0,0010	0,0002	14,1	1,2	17,4	6,2	19,0	
Zrc 107	28,8	21,13	0,73	0,2300	0,1300	0,0300	0,0150	0,0023	0,0003	0,0015	0,0003	0,0015	0,0003	14,5	2	29	14	50,0	
Zrc 108	101	54,7	0,54	0,1160	0,0270	0,0361	0,0083	0,0024	0,0002	0,0013	0,0003	0,0013	0,0003	15,4	1,3	35,8	8	57,0	
Zrc 109	41,1	20,06	0,49	0,1280	0,0580	0,0250	0,0120	0,0021	0,0003	0,0016	0,0005	0,0016	0,0005	13,3	1,8	25	11	46,8	
Zrc 110	63,1	33,2	0,53	0,0970	0,0380	0,0234	0,0083	0,0024	0,0003	0,0019	0,0004	0,0019	0,0004	15,6	1,8	23,1	8,1	32,5	
Zrc 111	54,5	44,6	0,82	0,2200	0,1800	0,0108	0,0088	0,0017	0,0003	0,0008	0,0002	0,0008	0,0002	11,1	1,9	10,7	8,7	-3,7	
Zrc 112	72,6	64	0,88	0,0650	0,0220	0,0191	0,0061	0,0023	0,0002	0,0008	0,0002	0,0008	0,0002	14,9	1,5	19	6	21,6	
Zrc 113	77,4	38,1	0,49	0,1110	0,0220	0,0316	0,0068	0,0021	0,0002	0,0013	0,0002	0,0013	0,0002	13,7	1,1	31,3	6,6	56,2	
Zrc 115	122	124,6	1,02	0,1450	0,0420	0,0330	0,0092	0,0022	0,0003	0,0007	0,0001	0,0007	0,0001	13,9	1,6	32,8	9	57,6	
Zrc 116	124,8	65,8	0,53	0,0550	0,0200	0,0168	0,0055	0,0022	0,0002	0,0012	0,0002	0,0012	0,0002	14,3	1,4	16,8	5,4	14,9	
Zrc 117	69,3	40,1	0,58	0,1060	0,0410	0,0295	0,0085	0,0022	0,0003	0,0013	0,0003	0,0013	0,0003	14,2	1,8	29,1	8,3	51,2	
Zrc 118	49,8	25,5	0,51	0,0690	0,0440	0,0190	0,0110	0,0023	0,0003	0,0008	0,0003	0,0008	0,0003	15	1,8	19	11	21,1	
Zrc 121	87	52,3	0,60	0,0950	0,0250	0,0248	0,0076	0,0023	0,0002	0,0010	0,0002	0,0010	0,0002	14,5	1,4	24,6	7,4	41,1	
Zrc 123	60,4	37,3	0,62	0,0870	0,0320	0,0284	0,0098	0,0023	0,0002	0,0011	0,0004	0,0011	0,0004	15,1	1,3	28	9,5	46,1	
Zrc 124	55,8	45,5	0,82	0,1850	0,0800	0,0370	0,0100	0,0021	0,0003	0,0010	0,0002	0,0010	0,0002	13,6	2,1	36	10	62,2	
Zrc 125	48,3	27,64	0,57	0,1440	0,0490	0,0400	0,0120	0,0024	0,0003	0,0010	0,0004	0,0010	0,0004	15,4	2,1	42	11	63,3	
Zrc 126	78,8	51,9	0,66	0,1000	0,0370	0,0186	0,0058	0,0021	0,0003	0,0008	0,0002	0,0008	0,0002	13,8	1,8	19,7	6,1	29,9	
Zrc 127	65,8	51,8	0,79	0,0640	0,0310	0,0145	0,0081	0,0022	0,0003	0,0009	0,0002	0,0009	0,0002	13,9	1,9	14,4	8	3,5	
Zrc 128	39,4	22,01	0,56	-0,0800	0,5400	0,0340	0,0100	0,0021	0,0004	0,0013	0,0004	0,0013	0,0004	13,5	2,4	35,4	9,8	61,9	
Zrc 130	41,9	26,82	0,64	0,1730	0,0490	0,0540	0,0160	0,0025	0,0003	0,0012	0,0003	0,0012	0,0003	15,8	2,1	52	15	69,6	
Zrc 131	61,6	49	0,80	0,0800	0,0310	0,0197	0,0067	0,0021	0,0003	0,0013	0,0003	0,0013	0,0003	13,6	1,8	21,1	6,6	35,5	
Zrc 132	105	101,5	0,97	0,0680	0,0220	0,0213	0,0052	0,0023	0,0002	0,0011	0,0002	0,0011	0,0002	15	1,4	21,3	5,2	29,6	
Zrc 136	62,4	34,5	0,55	0,0810	0,0380	0,0258	0,0094	0,0023	0,0003	0,0013	0,0003	0,0013	0,0003	14,5	1,7	25,5	9,3	43,1	
Zrc 137	52,3	30,3	0,58	0,0930	0,0350	0,0280	0,0100	0,0022	0,0003	0,0011	0,0004	0,0011	0,0004	14,2	1,6	27	10	47,4	
Zrc 139	74,7	65,7	0,88	0,0760	0,0260	0,0258	0,0083	0,0025	0,0002	0,0007	0,0002	0,0007	0,0002	15,8	1,4	25,5	8,2	38	
Zrc 140	63,4	33,3	0,53	0,0690	0,0260	0,0271	0,0087	0,0023	0,0002	0,0012	0,0003	0,0012	0,0003	14,7	1,5	26,6	8,5	44,7	

RAZONES CORREGIDAS														EDADES CORREGIDAS (Ma)			
U (ppm)	Th (ppm)	Tb/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 2\sigma$ abs	Edad (Ma)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	Disc %	
Unidad: PFHr - Ubicación: 6039546N; 301550E; 870 m s.n.m.																	
B03-155																	
Zre 01	48,8	32,4	0,66	0,1350	0,0590	0,0300	0,0110	0,0020	0,0003	0,0006	0,0003	12,9	1,9	29,0	11,0	55,5	
Zre 02	45,7	28,2	0,62	0,0790	0,0430	0,0230	0,0110	0,0023	0,0003	0,0013	0,0004	14,5	1,6	23,0	11,0	37,0	
Zre 03	125,5	140,8	1,12	0,1590	0,0300	0,0449	0,0081	0,0021	0,0002	0,0009	0,0002	13,5	1,0	44,3	7,8	69,5	
Zre 04	85,3	68,3	0,80	0,1230	0,0290	0,0383	0,0085	0,0024	0,0002	0,0010	0,0002	15,2	1,3	37,9	8,2	59,9	
Zre 05	73,8	38,5	0,52	0,1180	0,0320	0,0399	0,0078	0,0023	0,0002	0,0018	0,0004	14,8	1,4	39,3	7,7	62,3	
Zre 06	264	555	2,10	0,0504	0,0071	0,0150	0,0020	0,0022	0,0001	0,0007	0,0000	14,3	0,8	15,1	2,0	5,2	
Zre 07	95,6	48,1	0,50	0,0610	0,0240	0,0195	0,0062	0,0021	0,0002	0,0010	0,0002	13,6	1,1	19,5	6,1	30,3	
Zre 08	76,6	47,4	0,62	0,1190	0,0320	0,0302	0,0088	0,0022	0,0002	0,0013	0,0003	14,0	1,3	30,0	8,6	53,3	
Zre 09	126,7	72,1	0,57	0,0780	0,0160	0,0260	0,0049	0,0023	0,0002	0,0011	0,0002	14,6	1,0	26,0	4,8	43,8	
Zre 10	58,7	34,9	0,59	0,0600	0,0430	0,0180	0,0110	0,0023	0,0003	0,0010	0,0003	14,5	1,8	17,0	11,0	14,7	
Zre 11	85,4	54,5	0,64	0,1160	0,0370	0,0317	0,0075	0,0022	0,0003	0,0011	0,0002	14,2	1,7	31,4	7,4	54,8	
Zre 12	54,8	27,5	0,50	0,1620	0,0530	0,0380	0,0120	0,0023	0,0003	0,0020	0,0004	14,7	2,1	37,0	12,0	60,3	
Zre 13	75,3	50	0,66	0,0950	0,0340	0,0300	0,0075	0,0023	0,0002	0,0013	0,0002	15,1	1,3	29,9	7,3	49,5	
Zre 14	63,1	42,2	0,67	0,0870	0,0400	0,0270	0,0110	0,0023	0,0003	0,0010	0,0003	14,9	1,6	26,0	10,0	42,7	
Zre 15	129,9	94,7	0,73	0,1030	0,0250	0,0266	0,0060	0,0021	0,0002	0,0008	0,0002	13,4	1,2	26,5	6,1	49,4	
Zre 16	54,4	40,4	0,74	0,1060	0,0470	0,0360	0,0120	0,0022	0,0003	0,0012	0,0002	14,0	1,9	36,0	11,0	61,1	
Zre 17	95,6	75,5	0,79	0,0700	0,0240	0,0188	0,0065	0,0022	0,0002	0,0008	0,0002	14,3	1,2	18,8	6,4	23,9	
Zre 18	132,9	98,1	0,74	0,0640	0,0200	0,0167	0,0049	0,0021	0,0001	0,0009	0,0002	13,4	0,9	16,8	4,9	20,1	
Zre 19	137	121	0,88	0,0570	0,0200	0,0179	0,0055	0,0021	0,0002	0,0009	0,0001	13,5	1,0	17,9	5,5	24,6	
Zre 20	54,1	25,8	0,48	0,1190	0,0340	0,0340	0,0100	0,0022	0,0002	0,0018	0,0004	14,3	1,5	33,8	9,8	57,7	
Zre 21	78	55,4	0,71	0,1150	0,0310	0,0308	0,0075	0,0021	0,0002	0,0012	0,0003	13,4	1,2	30,5	7,3	56,1	
Zre 22	105	58,1	0,55	0,0810	0,0210	0,0223	0,0055	0,0021	0,0002	0,0007	0,0002	13,7	1,0	22,2	5,6	38,3	
Zre 23	83,4	47,3	0,57	0,0780	0,0290	0,0255	0,0085	0,0023	0,0003	0,0016	0,0003	15,1	1,7	25,4	8,2	40,6	
Zre 24	85,4	47,4	0,56	0,0670	0,0260	0,0181	0,0061	0,0023	0,0002	0,0008	0,0002	14,9	1,4	19,6	6,3	24,0	
Zre 25	277	323	1,17	0,0600	0,0110	0,0170	0,0028	0,0022	0,0001	0,0007	0,0001	14,2	0,8	17,0	2,8	16,6	
Zre 26	103	100,7	0,98	0,0780	0,0190	0,0266	0,0046	0,0023	0,0002	0,0007	0,0001	14,5	1,3	26,5	4,6	45,3	
Zre 27	125	91,6	0,73	0,1490	0,0290	0,0445	0,0078	0,0022	0,0002	0,0012	0,0003	14,4	1,2	45,9	7,5	68,6	
Zre 30	104,4	60,7	0,58	0,0810	0,0160	0,0253	0,0047	0,0022	0,0002	0,0011	0,0002	14,0	1,1	25,2	4,6	44,4	
Zre 31	86	70	0,81	0,0930	0,0520	0,0370	0,0120	0,0024	0,0003	0,0015	0,0003	15,7	1,6	37,0	12,0	57,6	
Zre 32	127,9	97	0,76	0,1330	0,0270	0,0330	0,0067	0,0021	0,0002	0,0009	0,0002	13,3	1,2	32,7	6,6	59,3	
Zre 34	132	179	1,36	0,0880	0,0190	0,0242	0,0056	0,0020	0,0002	0,0007	0,0001	13,0	1,0	24,1	5,6	46,1	
Zre 35	93,9	56,5	0,60	0,0950	0,0220	0,0306	0,0060	0,0023	0,0002	0,0011	0,0002	14,6	1,0	30,4	5,9	52,0	

RAZONES CORREGIDAS														EDADES CORREGIDAS (Ma)			
U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 2\sigma$ abs	Edad (Ma)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	Disc %	
Unidad: TON - Ubicación: 6039787N; 301119E; 854 m s.n.m.																	
Zrc 141	61,8	51,9	0,84	0,0630	0,0360	0,0149	0,0073	0,0020	0,0003	0,0011	0,0003	12,9	1,6	14,8	7,3	12,8	
Zrc 143	97,1	95,6	0,98	0,0540	0,0340	0,0177	0,0074	0,0021	0,0002	0,0006	0,0002	13,5	1,3	17,6	7,3	23,3	
Zrc 144	58,1	29,1	0,50	0,0690	0,0440	0,0176	0,0098	0,0020	0,0003	0,0013	0,0004	12,7	1,6	17,3	9,7	26,6	
Zrc 145	44,1	25,6	0,58	0,0950	0,0440	0,0350	0,0130	0,0025	0,0003	0,0014	0,0004	15,9	2,1	34	13	53,2	
Zrc 146	49,1	30,7	0,63	0,1690	0,0850	0,0470	0,0180	0,0024	0,0004	0,0013	0,0003	15,4	2,2	48	17	67,9	
Zrc 147	25,28	16,46	0,65	0,1700	0,1200	0,0290	0,0190	0,0025	0,0004	0,0015	0,0005	16,3	2,8	27	19	39,6	
Zrc 148	38,6	29,65	0,77	0,1000	0,0620	0,0190	0,0130	0,0027	0,0004	0,0012	0,0004	17	2,3	19	13	10,5	
Zrc 149	50,6	49,4	0,98	0,0800	0,0470	0,0220	0,0100	0,0022	0,0003	0,0010	0,0002	14,1	2,1	22	10	35,9	
Zrc 150	92,6	78,5	0,85	0,0800	0,0340	0,0209	0,0071	0,0021	0,0002	0,0007	0,0002	13,3	1,1	20,8	7	36,1	
Zrc 151	44,6	37,6	0,84	0,2070	0,0710	0,0610	0,0150	0,0025	0,0004	0,0015	0,0004	16,1	2,4	59	14	72,7	
Zrc 152	32,9	19,78	0,60	0,0800	0,1300	0,0090	0,0150	0,0023	0,0004	0,0013	0,0005	15	2,8	8	15	-87,5	
Zrc 153	49,2	44,5	0,90	0,0110	0,0410	0,0020	0,0100	0,0021	0,0003	0,0009	0,0003	13,5	1,7	1	11	-1250,0	
Zrc 155	105,3	100,6	0,96	0,0900	0,0400	0,0265	0,0093	0,0024	0,0003	0,0012	0,0002	15,2	1,6	26,1	9,2	41,8	
Zrc 156	61,5	56,9	0,93	0,1640	0,0550	0,0470	0,0140	0,0025	0,0003	0,0018	0,0006	16,2	1,8	46	14	64,8	
Zrc 157	62,7	55	0,88	0,1040	0,0800	0,0270	0,0390	0,0025	0,0006	0,0011	0,0011	15,8	4,1	27	33	41,5	
Zrc 158	67	59,7	0,89	0,0490	0,0360	0,0139	0,0093	0,0022	0,0002	0,0010	0,0002	14,3	1,3	15,5	9,3	7,7	
Zrc 159	38,3	21,17	0,55	0,1210	0,0950	0,0390	0,0170	0,0027	0,0005	0,0025	0,0006	17,2	2,9	37	17	53,5	
Zrc 160	53,1	29	0,55	0,0640	0,0430	0,0170	0,0120	0,0020	0,0003	0,0009	0,0005	12,8	1,8	16	11	20,0	
Zrc 161	42,1	24,8	0,59	0,1980	0,0670	0,0690	0,0210	0,0028	0,0003	0,0025	0,0006	18	2	66	22	72,7	
Zrc 162	36,6	20,18	0,55	0,0500	0,1200	0,0220	0,0210	0,0021	0,0004	0,0021	0,0005	13,2	2,2	25	20	47,2	
Zrc 163	30,1	19,7	0,65	-0,0200	0,1700	0,0340	0,0180	0,0028	0,0004	0,0020	0,0005	17,7	2,7	32	18	44,7	
Zrc 164	79	77,9	0,99	0,0760	0,0380	0,0219	0,0087	0,0020	0,0002	0,0012	0,0002	13	1,4	21,8	8,6	40,4	
Zrc 165	36,7	22,44	0,61	0,0950	0,0520	0,0380	0,0200	0,0025	0,0003	0,0016	0,0004	15,8	2,1	36	19	56,1	
Zrc 166	20,28	10,19	0,50	0,1600	0,2100	0,0450	0,0310	0,0027	0,0005	0,0024	0,0010	17,5	3,3	48	29	63,5	
Zrc 167	31,3	20,04	0,64	0,2700	0,1700	0,0520	0,0250	0,0025	0,0004	0,0024	0,0007	16,4	2,3	48	24	65,8	
Zrc 168	34	27,08	0,80	0,3200	0,1800	0,0620	0,0250	0,0028	0,0005	0,0012	0,0003	18,1	3,3	58	24	68,8	
Zrc 169	34,1	20,15	0,59	0,1580	0,0990	0,0400	0,0190	0,0025	0,0004	0,0036	0,0007	16,1	2,3	38	18	57,6	
Zrc 170	27,09	13,25	0,49	0,1700	0,0870	0,0560	0,0220	0,0028	0,0004	0,0037	0,0009	17,9	2,6	54	21	66,9	
Zrc 171	86,4	78,1	0,90	0,0530	0,0270	0,0178	0,0080	0,0024	0,0002	0,0010	0,0002	15,3	1,4	17,6	7,9	13,1	
Zrc 172	60,9	32,3	0,53	0,1010	0,0380	0,0340	0,0110	0,0024	0,0003	0,0017	0,0004	15,5	2	33	10	53,0	
Zrc 173	35,8	21,8	0,61	0,2090	0,0740	0,0680	0,0230	0,0026	0,0004	0,0024	0,0008	16,5	2,8	65	23	74,6	
Zrc 174	47,6	29	0,61	0,0790	0,0620	0,0240	0,0150	0,0019	0,0003	0,0013	0,0005	12,4	1,8	23	15	46,1	
Zrc 175	75,5	63,3	0,84	0,1430	0,0640	0,0260	0,0130	0,0020	0,0003	0,0010	0,0002	12,6	1,7	26	12	51,5	
Edades jóvenes para las muestras de TON														Edades antiguas para las muestras de TON			



		RAZONES CORREGIDAS										EIDADES CORREGIDAS (Ma)					
U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 2\sigma$ abs	Edad (Ma)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	Disc %	
<i>Pórfido de Faldespato y Hornblendas; 6039536N - 301797E</i>																	
B06-253																	
Zrc 71	104,1	47,25	0,45	0,0620	0,0310	0,0120	0,0054	0,0014	0,0002	0,0002	0,0009	0,0002	9,1	1	12	5,4	24,2
Zrc 72	108,2	51,3	0,47	0,1170	0,0440	0,0217	0,0055	0,0015	0,0002	0,0002	0,0012	0,0002	9,6	1,2	21,6	5,4	55,6
Zrc 73	196,8	165,2	0,84	0,1410	0,0280	0,0279	0,0047	0,0014	0,0001	0,0001	0,0008	0,0001	9,29	0,76	27,9	4,6	66,7
Zrc 74	155,5	81,2	0,52	0,0540	0,0160	0,0096	0,0029	0,0013	0,0001	0,0001	0,0006	0,0001	8,38	0,92	9,7	2,9	13,6
Zrc 75	91,7	54,6	0,60	0,0760	0,0300	0,0149	0,0064	0,0015	0,0001	0,0001	0,0008	0,0002	9,94	0,91	14,8	6,4	32,8
Zrc 76	242,3	228,9	0,94	0,1110	0,0210	0,0189	0,0036	0,0015	0,0001	0,0001	0,0005	0,0001	9,36	0,77	19	3,5	50,7
Zrc 78	78,9	29,5	0,37	0,0780	0,0370	0,0103	0,0051	0,0016	0,0002	0,0010	0,0010	0,0003	10	1,2	10,3	5,1	2,9
Zrc 80	95,6	51,2	0,54	0,2440	0,0520	0,0366	0,0078	0,0014	0,0002	0,0011	0,0003	0,0003	8,8	1,1	36,3	7,6	75,8
Zrc 82	153,8	92,3	0,60	0,0940	0,0260	0,0180	0,0045	0,0016	0,0002	0,0007	0,0002	0,0002	10,3	1,1	18	4,7	42,8
Zrc 84	116,4	49	0,42	0,0600	0,0270	0,0104	0,0038	0,0013	0,0002	0,0006	0,0002	0,0002	8,5	1,1	10,4	3,8	18,3
Zrc 87	187,3	112,1	0,60	0,0970	0,0180	0,0178	0,0033	0,0014	0,0001	0,0007	0,0001	0,0001	8,86	0,7	17,9	3,3	50,5
Zrc 89	139,1	87,8	0,63	0,0620	0,0230	0,0112	0,0038	0,0015	0,0001	0,0007	0,0001	0,0001	9,43	0,92	11,2	3,8	15,8
Zrc 90	76,5	34,8	0,45	0,1710	0,0690	0,0221	0,0063	0,0014	0,0002	0,0008	0,0002	0,0002	8,9	1,1	22	6,2	59,5
Zrc 91	171,2	141,6	0,83	0,1160	0,0240	0,0217	0,0043	0,0015	0,0001	0,0007	0,0001	0,0001	9,84	0,84	21,7	4,3	54,7
Zrc 92	99,7	59,5	0,60	0,0950	0,0350	0,0174	0,0056	0,0013	0,0001	0,0008	0,0001	0,0002	8,52	0,89	17,4	5,6	51,0
Zrc 93	183,9	125,3	0,68	0,1230	0,0200	0,0277	0,0047	0,0016	0,0001	0,0010	0,0010	0,0002	10,31	0,74	27,7	4,6	62,8
Zrc 94	126,9	57,1	0,45	0,1120	0,0300	0,0214	0,0058	0,0014	0,0002	0,0010	0,0010	0,0002	9,1	1,1	21,4	5,7	57,5
Zrc 96	157,4	97	0,62	0,1440	0,0320	0,0280	0,0056	0,0015	0,0002	0,0011	0,0002	0,0002	9,7	1,2	27,8	5,5	65,1
Zrc 98	202,6	162,7	0,80	0,0680	0,0170	0,0140	0,0034	0,0014	0,0001	0,0005	0,0001	0,0001	9,12	0,52	14	3,4	34,9
Zrc 99	221,6	167	0,75	0,0950	0,0230	0,0162	0,0035	0,0014	0,0002	0,0007	0,0001	0,0001	8,7	0,96	16,2	3,5	46,3
Zrc 100	127,6	56,4	0,44	0,0920	0,0290	0,0177	0,0049	0,0015	0,0002	0,0009	0,0002	0,0002	9,6	1	17,7	4,9	45,8
Zrc 101	137,4	75,3	0,55	0,1060	0,0250	0,0192	0,0037	0,0014	0,0001	0,0008	0,0001	0,0001	9,18	0,85	19,2	3,7	52,2
Zrc 102	154,6	155,2	1,00	0,1520	0,0270	0,0295	0,0052	0,0014	0,0001	0,0008	0,0001	0,0001	9,21	0,91	29,4	5,1	68,67

# Anexo E

*Análisis químicos de roca  
total*

Analyte Symbol	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (T)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Total
Unit Symbol	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Detection Limit	0,01	0,01	0,01	0,001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,001	0,01		0,01
Analysis Method	FUS-ICP											
BO7 298 (GRD)	55,46	18,72	7,68	0,16	4,39	8,68	3,52	0,4	0,77	0,17	1,23	99,95
BO2 210 (GRD)	61,53	17,62	6,52	0,25	3,02	6,12	3,98	0,18	0,61	0,13	2,06	99,96
BO6 411 (GRD)	61,84	17,27	6,14	0,14	2,85	6,01	3,86	1,03	0,68	0,15	1,45	99,97
BO6 111 (GRD)	62,73	16,6	5,99	0,1	2,73	5,83	3,86	1,31	0,66	0,14	0,67	99,95
BO4 387 (PFHr)	62	18,36	5,17	0,06	2,12	5,71	5,16	0,55	0,64	0,18	6,28	99,95
BO2 403 (PFHr)	63,88	17,66	5,41	0,15	2,04	4,98	4,64	0,49	0,55	0,14	5,08	99,94
BO2 2 (TON)	66,31	16,43	4,79	0,09	2,19	5,05	4,11	0,35	0,52	0,11	3,46	99,95
BO2 159 (TON)	66,7	16,01	5,12	0,15	1,95	4,6	3,84	0,99	0,49	0,11	1,52	99,96
BO2 064 (TON)	67,66	16,39	4,48	0,15	2,03	4,3	3,74	0,6	0,49	0,12	1,43	99,96
BO2 7 (TON)	68,76	15,45	4,76	0,17	1,83	4,24	3,78	0,41	0,45	0,11	2,18	99,96
BO6 253 (PFH)	66,33	17,13	4,17	0,07	1,34	3,99	4	2,29	0,48	0,14	3,24	99,94
BO3 357 (PFH)	66,4	17,32	4,49	0,23	1,43	4,19	4,63	0,61	0,49	0,16	3,44	99,95
BO3 2 (PFH)	66,57	17,01	4,16	0,35	1,4	4,63	4,8	0,41	0,47	0,15	3,22	99,95
BO5 193 (PFH)	67,63	16,8	4,06	0,22	1,46	4,75	3,46	0,98	0,45	0,16	5,49	99,97
BO5 272 (PFH)	66,16	17,14	5,94	0,38	1,58	3,43	3,9	0,86	0,44	0,13	3,38	99,96

Sc	Be	V	Ba	Sr	Y	Zr	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Rb	Nb	Mo
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	1	5	2	2	1	2	20	1	20	10	30	1	1	5	2	1	2
FUS-ICP							FUS-MS										
19	< 1	183	171	578	8	57	60	21	40	90	140	20	1	< 5	8	1	< 2
12	< 1	130	138	493	7	87	50	9	40	400	240	19	1	13	3	2	4
12	< 1	125	370	508	10	146	50	14	30	180	110	19	< 1	16	24	2	6
13	< 1	123	389	493	11	132	50	15	30	80	70	18	1	< 5	28	2	< 2
7	< 1	94	218	637	4	81	20	8	< 20	430	100	18	1	29	15	2	13
6	< 1	89	239	547	6	84	20	6	< 20	140	200	20	1	24	14	< 1	< 2
9	< 1	88	201	475	8	101	40	9	40	370	140	17	1	8	8	2	24
9	< 1	84	433	448	9	115	40	11	20	120	260	18	1	10	18	2	2
9	1	84	290	469	8	108	40	10	20	40	330	18	1	9	9	2	< 2
7	1	75	210	407	7	116	30	8	< 20	330	190	17	1	46	8	2	< 2
5	1	65	535	522	6	87	20	8	< 20	70	200	19	< 1	84	52	2	< 2
5	1	68	379	617	4	82	20	8	< 20	120	880	19	1	35	14	2	< 2
5	1	66	410	636	4	83	< 20	8	< 20	90	850	20	1	17	9	2	< 2
5	1	63	245	344	4	81	20	7	< 20	50	1410	18	< 1	81	26	2	< 2
5	1	63	411	556	4	82	20	8	< 20	150	210	19	< 1	52	23	2	< 2

Ag	In	Sn	Sb	Cs	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
0.5	0.2	1	0.5	0.5	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.01
FUS-MS																		
< 0.5	< 0.2	< 1	< 0.5	< 0.5	7.8	18.2	2.43	10.4	2.6	0.9	2.2	0.4	2.1	0.4	1.1	0.16	1	0.16
< 0.5	< 0.2	< 1	0.8	< 0.5	10.1	22.1	2.8	11.6	2.3	0.82	2	0.3	1.7	0.3	0.9	0.13	0.8	0.13
< 0.5	< 0.2	< 1	0.5	1.1	11.6	26.1	3.41	14.5	3.1	0.89	2.5	0.4	2.2	0.4	1.2	0.18	1.1	0.17
< 0.5	< 0.2	< 1	< 0.5	0.8	11.5	26.3	3.35	13.7	3.1	0.77	2.6	0.4	2.3	0.5	1.3	0.19	1.2	0.18
< 0.5	< 0.2	1	< 0.5	2.5	10.3	21.7	2.72	11.2	2.3	0.76	1.6	0.2	1.3	0.2	0.6	0.08	0.5	0.08
< 0.5	< 0.2	< 1	< 0.5	0.6	11.2	23.8	2.69	11.3	2.2	0.7	1.4	0.2	1.1	0.2	0.5	0.07	0.4	0.07
< 0.5	< 0.2	< 1	< 0.5	< 0.5	10.7	23.6	2.88	11.9	2.2	0.67	1.8	0.3	1.7	0.3	0.9	0.12	0.8	0.12
< 0.5	< 0.2	2	0.7	< 0.5	14	29.6	3.59	13.5	2.6	0.72	2.1	0.3	1.7	0.3	0.9	0.13	0.8	0.13
< 0.5	< 0.2	< 1	0.9	< 0.5	8.7	19.4	2.53	10.8	2.3	0.66	1.9	0.3	1.8	0.3	0.9	0.13	0.8	0.13
< 0.5	< 0.2	< 1	< 0.5	< 0.5	12.9	26.3	3.04	11.4	2.1	0.65	1.6	0.2	1.4	0.2	0.7	0.1	0.7	0.11
< 0.5	< 0.2	< 1	< 0.5	0.6	11.7	24	2.88	10.8	2.1	0.66	1.4	0.2	1	0.2	0.5	0.06	0.4	0.06
< 0.5	< 0.2	< 1	< 0.5	0.7	11.8	24.2	2.95	11.3	2.2	0.7	1.5	0.2	0.9	0.2	0.4	0.06	0.4	0.07
< 0.5	< 0.2	< 1	< 0.5	0.7	11.6	24.1	2.88	11.1	2.2	0.65	1.3	0.2	0.9	0.2	0.4	0.06	0.4	0.06
< 0.5	0.4	< 1	< 0.5	1.4	11.2	22.9	2.75	10.5	2	0.75	1.3	0.2	0.9	0.2	0.4	0.06	0.4	0.06
< 0.5	1.1	< 1	< 0.5	1.8	11.8	23.9	2.87	10.9	1.9	0.67	1.3	0.2	0.9	0.2	0.4	0.06	0.4	0.06

Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
0.2	0.1	1	0.1	5	0.4	0.1	0.1
FUS-MS							
1.4	0.1	3	< 0.1	9	< 0.4	1.7	0.4
2.1	0.2	2	< 0.1	24	< 0.4	2.3	0.7
3.3	0.1	2	0.2	11	< 0.4	2.7	0.8
2.9	0.2	1	0.2	8	< 0.4	3	0.9
1.8	0.1	3	0.2	19	< 0.4	1.9	0.6
2.1	0.2	2	0.1	20	< 0.4	0.7	0.6
2.4	0.2	5	0.1	17	< 0.4	2.7	0.8
2.8	0.2	5	0.1	49	< 0.4	3.5	1
2.7	0.2	3	0.1	185	< 0.4	3.7	0.9
2.7	0.2	2	0.1	22	< 0.4	3.7	0.8
2	0.2	3	0.5	29	< 0.4	2.1	0.7
1.8	0.1	5	0.1	35	0.7	2.2	0.6
2	0.2	4	0.1	57	0.4	2.2	0.7
1.9	0.1	2	0.3	38	0.5	2.6	0.8
1.9	0.1	3	0.3	19	0.5	2.9	0.9

# Anexo F

## *Procedimientos analíticos*

## **Preparación de muestras - molienda**

Del conjunto total de especímenes recolectados en terreno se realizó una selección de 15 muestras de roca mediante el uso de observaciones macroscópicas y microscópicas. Se utilizó microscopio petrográfico y luz transmitida en láminas delgadas en los laboratorios de microscopía óptica del Advanced Mining Technology Center y del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. El criterio de selección fue tomar aquellas muestras que representaran de mejor forma las características primarias de las unidades a las que corresponden, que tuvieran ausencia de vetillas y presentaran el menor grado de alteración posible. Luego se tomó aproximadamente 1.000 cm<sup>3</sup> de cada muestra seleccionada y se enviaron a molienda a la empresa Bureau Veritas Chile Group. El proceso de molienda incluye una fase inicial de secado a 60°C, luego se realiza un proceso de trituración del cual se obtienen fragmentos de aproximadamente 2 mm, finalmente se realiza una pulverización fina de estos fragmentos utilizando un molino de cuba móvil con disco (“*bowl and puck*”) obteniéndose para cada una de las 15 muestras aproximadamente 250 g de polvo de ~75 µm nominales. Luego de recibir de vuelta las muestras de polvo, se almacenaron aproximadamente 100 g de cada muestra en recipientes de plástico herméticos para su posterior envío a Canadá al siguiente análisis.

## **Dataciones radiométricas de U-Pb en circones**

Se escogieron 6 muestras para realizar el procedimiento de datación, el criterio de selección fue tener al menos una muestra que representara cada unidad y repetir muestra para aquellas litologías similares. A estas 6 muestras se les realizó un proceso de separación de cristales de circón mediante molienda, lavado, y uso de líquido denso en el Laboratorio de Separación de Muestras de Juan Vargas Osorio, Chile. Este proceso fue exitoso para 5 muestras, mientras que para una de ellas no se obtuvo suficiente cantidad de circones para realizar el proceso de datación posterior (muestra B03-399 correspondiente a un dique andesítico).

Se efectuaron dataciones radiométricas en 5 muestras mediante determinación *in situ* de U-Pb en cristales de circón, esto con el uso de ablación laser en el Centro de Geociencias de la Universidad Autónoma de México, México. Los análisis de U-Pb se efectuaron mediante *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (LA-ICP-MS) empleando un espectrómetro de cuadrupolo Thermo iCap Qc junto con un equipo laser Resonectics, Resolution M050. Las concentraciones de U y Th fueron calculadas usando los circones externos estandarizados 91500 (1.065,4 ± 0,6 Ma; Wiedenbeck et al. 1995) y Plešovice (337.13 ± 0.37 Ma; Sláma et al. 2008), como en Paton et al. (2010). Las razones isotópicas, edades y errores fueron calculadas de acuerdo con Petrus & Kamber (2012). Los valores 2σ reportados en las tablas de resultados geocronológicos fueron calculadas según Paton et al. (2010). Los puntos de ablación fueron de 23µm, usando un protocolo analítico modificado de Solari et al. (2010). Para cada punto se midió la concentración de elementos traza con el fin de detectar posibles inclusiones en los cristales de circón, esto usando el vidrio NIST-SRM 610 como referencia estandarizada y <sup>29</sup>Si como estándar interno (valor estequiométrico asumido de 15,323%). Los diagramas de concordia, histogramas de frecuencia y promedios ponderados de edad <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U fueron obtenidos usando la extensión ISOPLOT/EX 4.15.

## **Análisis geoquímico de roca total**

Se realizó análisis geoquímico a 15 muestras, estos análisis se realizaron en Activation Laboratories Ltda., Ontario, Canadá. Para ello se enviaron 15 polvos de roca de tamaño ~75  $\mu\text{m}$  a los cuales se les aplicó la técnica 4Litho para elementos mayores y trazas. En esta técnica, primero se realiza una etapa de fusión a 5 g de polvo de muestra con metaborato de litio y tetraborato, luego se aplica una solución de ácido nítrico débil permitiendo digerir el polvo y que la muestra completa se disuelva. Finalmente, la muestra ya fundida y digerida se somete al análisis químico en un espectrómetro de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) modelo Perkin Elmer Sciex Elan 6000. Las concentraciones de elementos mayores y trazas fueron calculadas de acuerdo con 5 muestras estandarizadas de control, las cuales corresponden a NIST 694, DNC-1, W-2a, SY-4 y BIR-1a y también se analizó un duplicado de la muestra B03-2 correspondiente a la muestra inicial del conjunto. Todos los diagramas presentados en este estudio referidos a la geoquímica de las muestras de Brahma se obtuvieron usando el software iOGas 5.1.15.

## Referencias

- 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. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 11, Q0AA06.
- Petrus, J., Kamber, B., 2012. VizualAge: a novel approach to laser ablation ICP-MS U-Pb geochronology data reduction. *Geostand. Geoanal. Res.* 36, 247–270.
- Sláma, J., Košlora, 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. *Chem. Geol.* 249, 1–35.
- Solari, L., Gómez-Tuena, A., Bernal, J.P., Pérez-Arvizu, O., Tanner, M., 2010. U-Pb zircon geochronology with an integrated LA-ICP-MS microanalytical workstation: achievements in precision and accuracy. *Geostand. Geoanal. Res.* 34, 5–18.
- 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. *Geostand. Geoanal. Res.* 19, 1–23.