



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

**DOCUMENTOS SOBRE INCLUSIONES FLUIDAS III:
BÚSQUEDA DE ELEMENTOS ESTRATÉGICOS
EN PEGMATITAS DE PUYUHUAPI, REGIÓN DE AYSÉN**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

JUAN PABLO TAPIA VELÁSQUEZ

PROFESOR GUÍA:
JORGE DANIEL MONCADA DE LA ROSA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CLAUDIA CANNATELLI
JAMIE BUSCHER

SANTIAGO DE CHILE
2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geólogo
POR: Juan Pablo Tapia Velásquez
FECHA: 15/06/2017
PROF. GUÍA: Dr. Daniel Moncada.

“Documentos sobre inclusiones fluidas III: Búsqueda de elementos estratégicos en pegmatitas de Puyuhuapi, Región de Aysén”

El incremento en las demandas energéticas en Chile y el mundo y su creciente demanda ha conllevado a la necesidad de buscar distintas alternativas para el desarrollo de nuevas tecnologías. En este contexto nace este estudio en pegmatitas, que por su naturaleza que corresponden a un magma usualmente granítico y altamente diferenciado, suelen estar enriquecidas en elementos incompatibles, entre los que destacan Li, Cs, Be, Ta, Sn, REE, entre otros.

Las rocas estudiadas corresponden a una veta pegmatítica en la Región de Aysén, alojada en la Tonalita Puyuhuapi, cercano a la localidad del mismo nombre, en un área que estructuralmente está dominada por el Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui. El objetivo del estudio es caracterizar los fluidos formadores de este tipo de rocas y su evolución, evaluando su potencial enriquecimiento en elementos estratégicos.

Las pegmatitas tienen una composición granítica con minerales principales como feldespato gráfico y subhedral, cuarzo subhedral y en menor medida plagioclasa, muscovita y biotita. Un análisis químico de roca total reveló enriquecimientos en Ba, Th y Se con respecto a la composición de la corteza superior. En tanto, datos de LA-ICPMS en cuarzo pegmatítico entregan enriquecimiento en Sc y Cd. Sin embargo, ninguno de estos elementos alcanza concentraciones para extracción económica.

El estudio de inclusiones fluidas permitió definir tres etapas principales en la evolución del sistema. En la etapa 1 se habrían formado arreglos de inclusiones fluidas (FIA's) primarias, testigos del fluido mineralizador de estas rocas, en un sistema H₂O-NaCl con salinidades del orden de 20% en peso de NaCl, enriquecidas en B y formadas a condiciones de entre 500-560°C y 4900-5800 bar. Luego se habría producido una descompresión de alrededor de 1500 bar generando decrepitación de algunas inclusiones primarias. La etapa 2 habría generado numerosos FIA's secundarios en un sistema H₂O-NaCl-CaCl₂ con salinidades mayores a 25% en peso de NaCl, enriquecidas en Ba y Sr, formadas en un rango de 278-360°C y 842-3300 bar. La etapa 2' corresponde a la entrada de un fluido carbónico que se mezcló con este fluido secundario, permitiendo así la formación de FIA's en un sistema H₂O-NaCl-CO₂, a condiciones de 227 a 278°C y 685 a 842 bar. La evolución del sistema culminó en la etapa 3 con un fluido en un sistema H₂O-NaCl con salinidades del orden de 20% en peso de NaCl que cortó todos los minerales de las pegmatitas.

Dado el bajo enriquecimiento en elementos estratégicos y falta de mineralogía exótica estas rocas no son económicamente rentables. Los fluidos primarios tienen concordancia con esto, revelando un bajo enriquecimiento en elementos incompatibles desde un comienzo de la formación de estas rocas.

Agradecimientos

Esta memoria fue apoyada por FCFM-UChile concedida a Moncada D, y se ha realizado en el marco de los Proyectos Fondap-Conicyt #15090013 “Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA)” y Fondecup EQM140009 (“Microtermometría de Inclusiones Fluidas”).”

Primero que nada, quisiera agradecer al profesor guía de esta memoria, el Dr. Daniel Moncada, por su apoyo, paciencia y siempre buena disposición a responder las dudas que surgieran. A los miembros de la comisión, la Dra. Claudia Cannatelli y el Dr. Jamie Buscher, por sus asertivos comentarios, consejos y correcciones a lo largo de este trabajo.

A Julio, del taller de cortes y su equipo de trabajo por su gran disposición y buena energía para producir las muestras y arreglarlas en caso de ser necesario. Al grupo de memoristas de Daniel por sus consejos, comentarios y siempre buena onda a lo largo de todo este tiempo, especialmente a Andrés y Berni por sus enseñanzas y consejos de trabajo así como resolución de dudas.

A mi familia, infinitas gracias, y especialmente a mis padres, por su apoyo incondicional y el tremendo esfuerzo que han hecho siempre para que no nos falte nada a mí y mis hermanos.

A Angélica, el amor de mi vida, por su compañía y apoyo incondicional. Hubiera sido imposible sacar esto adelante sin tu apoyo. Infinitas gracias por compartir conmigo los buenos y malos momentos, y espero de corazón que sigamos acompañándonos por el resto de la vida.

Finalmente agradecer a todas las personas que han sido parte de mi vida y que de una u otra forma me han ayudado a ser la persona que soy hoy. A Pais y Cannobbio, por su amistad incondicional desde hace más de 20 años, así como a Connie por su gran amistad forjada en una inolvidable experiencia en el extranjero. A mi prima Paula por su buena onda y gran confianza A los amigos de la universidad, por todos los buenos momentos que hemos pasado a lo largo de la carrera, especialmente a Bastro, Matro, Aracena, Compadrito, Mati-jipister, Lalo, Vero, Giselle, Pauli, Cony, y muchos otros!

Tabla de contenido

Introducción	1
Objetivos	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	2
Hipótesis de trabajo	2
Marco teórico	3
Pegmatitas.....	3
Introducción	3
Composición.....	3
Textura	4
Zonación (anatomía)	4
Distribución	5
Clasificación	6
Clases.....	6
Familias	8
Modelos de origen	10
Inclusiones fluidas.....	13
Introducción	13
Filosofía de inclusiones fluidas.....	13
Clasificación	14
Métodos de estudio	16
Microtermometría.....	16
Raman	20
LA-ICPMS	21
Trabajos anteriores.....	22
Ubicación y accesos.....	22
Marco geológico.....	24
Introducción.....	24
Rocas estratificadas.....	24
Formación Traiguén (Eoceno-Mioceno):	24
Grupo Volcánico Puyuhuapi (Holoceno):	24
Depósitos sedimentarios no consolidados (Pleistoceno-Holoceno):	25

Rocas intrusivas	25
Diorita Risopatrón (Mioceno-Plioceno):	25
Tonalita Puyuhuapi (Mioceno):.....	25
Geología estructural:	25
Petrografía	28
Metodología.....	28
Datos y resultados	29
Inclusiones fluidas	32
Petrografía de inclusiones fluidas	32
Microtermometría:	38
Metodología.....	38
Procesamiento de datos.....	39
Datos y resultados.....	39
Raman.....	45
Datos y resultados.....	45
LA-ICPMS.....	48
Procesamiento de datos.....	48
Datos y resultados.....	49
Análisis químico	52
Discusiones.....	54
Clasificación de pegmatita.....	54
Enriquecimientos de elementos estratégicos de pegmatita.....	56
Características de los fluidos presentes.....	58
Inclusiones primarias	58
Inclusiones secundarias	58
Etapas de evolución del sistema	61
Variación composicional	65
Modelo final.....	68
Conclusiones	71
Bibliografía	73
Anexos.....	79
Anexo A: Descripción petrográfica de muestras.....	79
Anexo B: Tablas de microtermometría	84
Anexo C: Datos de Raman.....	92

Anexo D: Datos de LA-ICPMS	95
Anexo E: Análisis químico	106
Anexo F: Ecuaciones de estado	109

Índice de figuras

Figura 1: Patrones de zonación idealizada de una pegmatita (extraído de Bradley y McCauley, 2013).	4
Figura 2: Distribución regional de pegmatitas desde fuente plutónica (extraído de London, 2008).	6
Figura 3 Esquema de clases pegmatíticas. Las clases MI es miarolítica, RE es de elementos raros, MS es muscovita, y AB es abisal. Se muestra línea roja correspondiente a polimorfos de aluminosilicatos (modificado de London 2008).	7
Figura 4: Evolución en formación de pegmatitas en base a CZR. (A): En un principio se forma una capa rica en fundentes que acumula elementos incompatibles. (B): Luego se observa cómo va avanzando esta capa y cristalizando minerales con elementos comunes. (C): Finalmente pueden cristalizar elementos acumulados en la capa si las condiciones son las adecuadas (extraído de London, 2013).....	12
Figura 5: Esquema mostrando los distintos tipos de inclusiones en un cristal euedral de cuarzo.....	14
Figura 6: (A): Extraído de Van den Kerkhof y Hein (2001). Gráfico mostrando los distintos tipos de decrepitación que pueden sufrir las inclusiones por un enfriamiento isobárico (IBC) o descompresión isothermal (ITD). (B:) Modificado de Laccazzete (1990). Diagrama experimental de Bodnar (1989) mostrando relación entre tamaño de inclusión y presión mínima para que suceda una decrepitación, con distintos parámetros.....	16
Figura 7: Diagrama de fases H ₂ O de presión vs temperatura con líneas de misma densidad. El recuadro rojo inferior esta amplificado en la parte superior donde se muestra la línea de ebullición y gráficamente una inclusión en el estado líquido cuando se atrapa, conforme se enfria se puede apreciar la burbuja a temperatura ambiente (Modificado de Yardley y Bodnar 2015).....	17
Figura 8: (A): Extraído de Hurai et al., 2015. Diagrama de fases del agua mostrando su punto triple (TP) y punto crítico (CP) (B): Extraído de Bodnar, 1993. Diagramas de fase de sistema H ₂ O-NaCl para bajas (izquierda) y altas (derecha) temperaturas. L, G y H, Hh, corresponden a líquido, vapor, halita e hidrohálita, respectivamente. Los puntos E y P son el eutéctico y peritéctico. (C): Extraído de Hedenquist y Henley, 1985. Diagrama de fases de sistema H ₂ O-CO ₂ con énfasis en aparición de clatrato. C=clatrato; V=vapor; L=líquido; I=hielo. (D): Extraído de Duan et al., 1995. Diagrama ternario de sistema H ₂ O-NaCl-CO ₂ a 1 kbar. Se marcan secciones isotermales I, II, III y IV que indican distintas fases coexistentes del sistema. (E): Extraído de Vanko et al., 1988. Diagrama ternario H ₂ O-NaCl-CaCl ₂ . Se muestra este sistema para notar las distintas fases que pueden aparecer durante ensayos microtermométricos cuando el fluido atrapado pertenece a este sistema. Dependiendo de la temperatura a la que se funde cada sólido se calcula la composición exacta entre estos 3 componentes.....	19
Figura 9: De Lamadrid et al., 2017. Gráfico mostrando los picos característicos de CO ₂ y el cálculo del doblete de Fermi.....	20

Figura 10: Ubicación de la zona estudiada. Se destaca el pueblo de Puyuhuapi en la parte superior del mapa, y el punto de estudio en una estrella azul al sur de dicha localidad. Modificado de Google Maps (2017).	23
Figura 11: Modificado de “Mapa Geología Base Área Puerto Puyuhuapi, región de Aysén” (Mella y Duhart, 2011). En zona inferior se muestra en estrella azul la ubicación de las muestras de estudio.	27
Figura 12: Microscopio Olympus BX53 utilizado conectado con LINKAM THN-600.	28
Figura 13: Imagen de la veta estudiada en terreno. (A): Vista desde lejos, observándose como el dique corta al granito caja. (B): Vista desde más cerca, siendo claro el contacto por un visible cambio de color, siendo más clara la pegmatita que el granito.	29
Figura 14: Muestra JPT-1. (A): Se observan marcas que distinguen límite de granito y pegmatita, observándose los principales minerales que componen a esta última. (B): Vista de pegmatita siendo visible cambio de feldespato a cuarzo.....	30
Figura 15: Textura gráfica de feldespato con cuarzo a nícoles paralelos (NP) y a nícoles cruzado (NX).	31
Figura 16: Rutilo diseminado en cuarzo con su textura de agujas.	31
Figura 17: Inclusiones fluidas tipo 1. (A): Ubicación con respecto a otros tipos de inclusiones. (B): Forma detallada de su morfología con más acercamiento.....	32
Figura 18: Inclusiones fluidas ricas en líquido tipo 2. (A): Pequeño clúster con inclusiones ricas en líquido con visibles modificaciones de fuga y estrangulamiento. (B): Vista desde más cerca de la inclusión, observándose su proporción mayor de líquido con respecto a vapor, y un pequeño sólido en su interior.....	33
Figura 19: Inclusiones fluidas tipo 3 ricas en líquido en claros trails. (A): Vista general de este tipo de FIA, siendo claro las rectas que forman a lo largo del cuarzo. (B): Vista con de cerca, siendo clara su naturaleza rica en líquido.....	34
Figura 20: Inclusiones fluidas tipo 4 con visibles sólidos consistentes en las numerosas inclusiones del mismo FIA.....	34
Figura 21: FIA tipo 5 con inclusiones trifásicas en que se ve porción de CO ₂ vapor, CO ₂ líquido y parte líquida.	35
Figura 22: FIA tipo 6 con inclusiones ricas en CO ₂ coexistiendo con inclusiones ricas en líquido.....	35
Figura 23: FIA tipo 7 con inclusiones ricas en vapor.	36
Figura 24: FIA tipo 8 con inclusiones ricas en líquido que cortan a los demás tipos ya descritos además de los límites de granos de cuarzo.	37
Figura 25: Secuencia de cambios de fase de inclusión fluida tipo 5 rica en CO ₂ con porción líquida visible ante ensayos de microtermometría. (A): Al enfriar, se observa que a -65°C se tiene una inclusión congelada, con el CO ₂ sólido visible. (B): Al empezar a calentar, se observa la T _e alrededor de -60.2°C por la fusión del CO ₂ sólido. (C): Con el continuo aumento de temperatura, a -30°C se pueden aún ver cristales de hielo en la parte rica en líquido, que desaparecen alrededor de -23.4°C. (D): A los -10°C, una vez fundidos los sólidos congelados, se pueden ver las 3 fases típicas de las inclusiones con CO ₂ , que son CO ₂ gaseoso, CO ₂ líquido y porción líquida. (E): Al calentar a 20°C se sigue observando lo mismo, no pudiéndose observar el cambio de fase correspondiente al clatrato que debería estar entre -10 y 10°C (Hedenquist y Henley, 1985). (F) La T _h de la parte de CO ₂ es a líquido, a los 25.6°C. (G): Una vez calentado hasta 300°C no se consiguió la homogenización, pero si sucedió una decrepitación, quedando totalmente negras estas inclusiones. (H): Finalmente, una vez enfriado a temperatura ambiente se	

observa que las inclusiones se mantuvieron en su estado decrepitado, no pudiendo por lo tanto iterar este proceso de microtermometría.	41
Figura 26: Gráfico mostrando T_h versus T_m de cada tipo de inclusión fluida catalogada.	43
Figura 27: (A): Raman utilizado conectado a microscopio y Linkam, de Virginia Tech, USA (http://www.geochem.geos.vt.edu/fluids/facilities.shtml). (B): Ejemplo de espectro obtenido al procesar datos de Raman.....	45
Figura 28: Espectros Raman. (A): Espectro de sólidos de inclusiones tipo 4 en comparación con cuarzo huésped. (B): Espectro de inclusiones ricas en vapor tipo 7, correspondientes claramente a CO_2 , marcándose también el espectro de las luces de Neón utilizadas en el experimento.	46
Figura 29: (A): LA-ICPMS utilizado. Ambos ubicados en Virginia Tech, USA. De http://www.geochem.geos.vt.edu/fluids/facilities.shtml . (B): Ejemplo de espectro obtenido al procesar datos de LA-ICPMS, con énfasis en intervalo donde se ubica la IF analizada.	48
Figura 30. Espectro de LA-ICPMS de inclusiones ricas en líquido tipo 2.	49
Figura 31: Espectro de LA-ICPMS de inclusiones ricas en líquido tipo 3.	50
Figura 32: Espectro de LA-ICPMS de inclusiones ricas en líquido tipo 4.	50
Figura 33: Espectro de LA-ICPMS de inclusiones ricas en vapor tipo 7.	51
Figura 34: Gráfico de análisis químico de pegmatitas comparado con concentraciones de estos elementos en la corteza superior (Rudnick y Gao, 2003).	52
Figura 35: Gráfico de análisis químico de pegmatitas comparado con concentraciones de estos elementos en la corteza superior (Rudnick y Gao, 2003), con una línea que marca la razón 1:1. Se observa un enriquecimiento en Se, Th Rb y Ba, marcados con un recuadro naranja.	53
Figura 36 Diagrama de clases de London modificado, mostrando posible zona de formación de las pegmatitas de Puyuhuapi.....	56
Figura 37: Concentraciones de elementos que aparecían consistentemente en cuarzo pegmatítico (LA-ICPMS) comparado a los mismos en la corteza superior (Rudnick y Gao, 2003).	57
Figura 38: Isocoras de IF tipo 6 mostrando cálculo de P y T de posible atrapamiento según método de Kalyuzhnyi y Koltrun (1953). Se utilizó el promedio de la T_h de cada familia, por lo que es un valor aproximado.	60
Figura 39: Modificado de Laccazette, 1990. Diferencial de presión estimado para el tamaño promedio de las inclusiones del FIA tipo 2, del orden de $10^3 \mu m$, lo que corresponde a un diferencial de presión de 1500 bar.	62
Figura 40: Evolución de pegmatita en vista de inclusiones fluidas formadas en núcleo cuarcífero. (A): Cuarzo inicial. (B): Inicio de etapa 1. Formación de FIA's primarios tipo 1. (C): Decrepitación de algunos FIA's tipo 1, generándose las tipo 2. (D): Inicio de etapa 2. Formación de FIA's secundarios tipo 3 y 4, algunos cortando los anteriores. (E): Etapa 2'. Entrada de un fluido carbónico generando FIA's tipo 6. (F): Inicio de etapa 3. Formación de FIA's secundarios tipo 7 y 8 que cortan todos los anteriores además del cuarzo en sus límites cristalográficos.	63
Figura 41: Modelo de evolución del fluido en gráfico T_h vs T_m remarcando las 3 etapas principales encontradas.	64
Figura 42: Gráfico mostrando posible evolución del sistema con los datos de inclusiones fluidas obtenidas en microtermometría. Se escribe en número rojo el número de	

inclusiones medidas en cada FIA, además de los tipos de FIA's clasificados y las etapas propuestas para la evolución del sistema.	65
Figura 43: Evolución de sistema con respecto a ciertos elementos que aparecen enriquecidos en las inclusiones fluidas de distintos tipos de FIA's descritos. Resultados de datos de LA-ICPMS.....	67
Figura 44: Modelo de evolución final del sistema de pegmatitas de Puyuhuapi. SG: solidus haplogranito con agua Tuttle & Bowen (1958). CP: punto crítico del agua para una salinidad de 25% en peso de NaCl (Bodnar y Vityk, 1994); L: líquido. V: vapor.	70
Figura 45: Gráficos de las isócoras para FIA's tipo 1 y 2.	112
Figura 46: Gráfico de isócoras para FIA's de tipo 3-4 y 6.	113
Figura 47: Gráfico de isócoras para FIA's de tipo 8.	114

Índice de tablas

Tabla 1: Esquema de clasificación propuesto por Černý y Ercit (2005) modificado para mostrar correlación entre clases y familias (extraído de Černý et al., 2012).	8
Tabla 2: Resumen de promedios de cada FIA medido, con sus valores máximos y mínimos de T_m y T_h	42
Tabla 3: Resumen de microtermometría separa para cada tipo de FIA medido	43
Tabla 4.: T_m promedio, T_h promedio, densidad promedio y salinidad promedio para cada FIA medido en este estudio. La densidad fue calculada con ecuaciones de estado del sistema composicional al que las inclusiones pertenecen, que se puede consultar en el anexo F. La salinidad fue calculada con la fórmula de Bodnar (1993). Cabe destacar que los FIA's con CO_2 no tienen su salinidad pues no se vio el punto de fusión de clatrato.	44
Tabla 5: Resumen de densidades y presiones calculadas con fórmula de Lamadrid et al. (2017) para las inclusiones analizadas, de muestra "N3-3 FIA13".	47
Tabla 6: Concentraciones promedio de elementos relevantes para los FIA's medidos en LA-ICPMS, junto con el ratio de Na/Ca para mostrar el notable incremento de Ca en inclusiones secundarias tipo 3 y 4.	51
Tabla 7: Descripciones petrográficas de muestras de mano.	79
Tabla 8: Descripciones petrográficas de láminas delgadas y doble pulidas.	80
Tabla 9: Total de datos medidos mediante microtermometría en laboratorio.	84
Tabla 10: Resumen de datos medidos con Raman.	92
Tabla 11: Continuación tabla 10.	93
Tabla 12: Resumen de datos de LA-ICPMS medidos en muestras. Se adjunta promedio de FIA's medidos y el límite de detección en caso de no haber detectado concentraciones de ciertos elementos. Datos en ppm.	95
Tabla 13: Continuación de tabla 12.	96
Tabla 14: Continuación de tabla 13.	97
Tabla 15: Continuación de tabla 14.	98
Tabla 16: Continuación de tabla 15 (Estas medidas incluyen menos elementos que las demás)	99
Tabla 17: Resumen de datos obtenidos en pegmatita con normalización de 100% óxidos. En caso de no detectar concentraciones se señala el límite de detección.	100
Tabla 18: Continuación de tabla 17	101
Tabla 19: Continuación de tabla 18.	102
Tabla 20: Tiempos de lectura de los distintos elementos medidos mediante LA-ICPMS.	104

Tabla 21: Tabla resumen de datos de análisis químico de pegmatita de Puyuhuapi. Se señala el tipo de análisis, así como la unidad utilizada en cada elemento. En caso de no detectarse se señala límite de detección.....	106
Tabla 22: Resumen de composiciones de la corteza superior y el grado de error para cada elemento, empleado en la comparación composicional con la pegmatita. De Rudnick y Gao, 2003.....	107
Tabla 23: Tabla resumen con datos empleados para graficar las isócoras de los distintos FIA's medidos. Se señala en naranja la temperatura de homogenización de cada FIA, así como luego temperaturas mayores utilizadas para trazar las rectas correspondientes a las isócoras de cada arreglo. Resultados de Angus et al., 1976; Bischoff, 1991; Duai; Duan y Zhang, 2006; Duang et al., 2006; Mao y Duan, 2008; Hurai et al., 2015).	109

Introducción

El gran desarrollo y las actividades del ser humano y su creciente demanda por nuevas tecnologías han tenido como consecuencia un aumento de la necesidad de los principales elementos químicos utilizados para dichas labores, que incluyen tierras raras (REE) y otros metales como berilio (Be), tantalio (Ta), litio (Li) y estaño (Sn) (Price, 2013). Las aplicaciones de estos elementos incluyen la confección de teléfonos celulares, televisores de pantalla plana, discos duros, motores de aviones y diésel, además de usos en aleaciones y empleo de energías verdes, como autos eléctricos, baterías recargables, paneles solares y turbinas eólicas (Linnen et al., 2014).

De los elementos mencionados, Chile sólo destaca por sus reservas de Li (Mohr et al., 2012), pero no particularmente del resto. El principal exportador de REE es por lejos China (97% de la producción mundial), seguido de Rusia, Australia e India. En Sudamérica, en tanto, Brasil es por lejos el más importante (Humphries, 2012). La importancia de estos elementos radica, además de por sus exclusivas aplicaciones, en que están limitados a una baja cantidad de países, de los cuales el gigante asiático ha impuesto limitaciones en sus exportaciones y favorecido el consumo interno (Hidalgo, 2012), por lo que encontrar nuevas fuentes de ellos en nuestro país podría ser un importante paso en el desarrollo tecnológico de cara al futuro.

Dichos elementos se caracterizan por ser altamente incompatibles en ambientes ígneos y por ende tienden a concentrarse en la corteza continental por sobre el manto y estar presente en etapas tardías de cristalización (Linnen et al., 2014). Entender esto es clave para emprender el presente estudio, que corresponde al estudio de una veta en la Región de Aysén, en la localidad de Puyuhuapi, emplazado en la Tonalita Puyuhuapi (Mella y Duhart, 2011). La veta estudiada se compone de pegmatitas graníticas, que son rocas intrusivas caracterizadas por su grano grueso y particular textura.

Debido a los procesos que las originan, que corresponden a una cristalización tardía de un magma usualmente granítico y altamente fraccionado, suelen concentrar una serie de elementos incompatibles, por lo que este tipo de rocas tiene potencial enriquecimiento de elementos raros como los mencionados (Linnen et al., 2012). La textura pegmatítica se originaría por el rol de los agentes fundentes, correspondientes a H₂O, B, P y F, que provocarían una disminución de la temperatura de cristalización, de la viscosidad y de las tasas de nucleación, así como un aumento de las tasas de difusión, que permitirían el crecimiento de pocos, pero grandes cristales (London, 2008). El estudio de inclusiones fluidas en las rocas estudiadas permitirá caracterizar el origen y naturaleza de los fluidos formadores de estas rocas, así como también su posible enriquecimiento en elementos raros.

Objetivos

Objetivo general

Determinar el origen y naturaleza de los fluidos formadores de minerales presentes en pegmatitas. Determinar su composición y posible enriquecimiento en elementos raros. Evaluar potencial explotación de pegmatitas de Puyuhuapi.

Objetivos específicos

En tanto los objetivos específicos son tres:

Efectuar un análisis microscópico de minerales presentes y caracterización de asociaciones de inclusiones fluidas de origen primario o secundario.

Realizar una identificación de las condiciones termodinámicas PVTX de los fluidos participantes en la historia de las pegmatitas estudiadas.

Obtener la composición de inclusiones fluidas relevantes para el origen e historia de las rocas.

Hipótesis de trabajo

Dados los mecanismos de formación de las pegmatitas se postula que las rocas estudiadas son potenciales portadores de elementos raros de interés económico, con enriquecimiento particular en REE, Cs, Li, Sn y Ta, entre otros.

La mineralogía presente a nivel macroscópico carece de menas de dichos elementos, por lo que un análisis microscópico y estudio de inclusiones fluidas permitirá verificar dicho enriquecimiento además de caracterizar la naturaleza y origen de los fluidos formadores de estas rocas, que correspondería a un magma altamente fraccionado con presencia de agentes fundentes como H₂O, B, P y F en las pegmatitas.

Marco teórico

Pegmatitas

Introducción

El estudio de las pegmatitas nace debido a la naturaleza de este tipo de rocas, que se caracterizan por su usual enriquecimiento en elementos incompatibles que a veces pueden alcanzar cantidades suficientes para adquirir concentraciones de interés económico (Linnen et al., 2014).

Los elementos incompatibles que pueden aparecer enriquecidos en pegmatitas son diversos, pero algunos de los más importantes son el litio, niobio, yterbio, tantalio, tierras raras (REE), estaño y berilio (Černý, 1991; London, 2008). Estos elementos tienen diversas aplicaciones en distintos ámbitos, desde energéticos hasta su empleo en trabajos industriales y confección de implementos tecnológicos, por lo que encontrar una fuente de ellos en Chile puede ser un importante aporte para el país (Linnen et al., 2014).

Las pegmatitas son rocas ígneas conocidas por su particular grano grueso, pero este no es sino uno de las tantas características que las hace tan singulares. Se definen por atributos texturales más que por su composición, siendo el excepcional tamaño de cristales el atributo más destacado, el cual sin embargo es sólo una de las tantas texturas o fábricas posibles. Su importancia tiene relación directa con su génesis, ya que la teoría de origen más aceptada viene dada por cristalización fraccionada de un residuo tardío de un magma comúnmente granítico, que al ser tan diferenciado usualmente está enriquecido en una serie de elementos incompatibles que a veces pueden alcanzar concentraciones suficientes para precipitar minerales inusuales con potencial de explotación (London, 2008).

Composición

Aunque existen algunas pegmatitas derivadas de rocas máficas, alcalinas, y carbonatitas, la inmensa gran mayoría es de composición granítica (Jahns y Tuttle, 1963). En este campo caen siempre cerca de composición haplogranito con agua ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-KAlSi}_3\text{O}_8\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$), y su mineralogía mayor consiste principalmente en cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa. Como minerales menores se tienen biotita, muscovita, granate, turmalina, y finalmente como accesorios puede haber diversos minerales derivados de enriquecimientos inusuales de elementos raros, como por ejemplo espumodena, ambligonita (Li), casiterita (Sn), apatito (P), berilo (Be), fluorita (F), niobita (Nb), tantalita (Ta), y otros. (Ercit, 2005; London, 2008; London y Kontak, 2012; London, 2014).

Estos últimos minerales vienen de enriquecimientos de elementos raros que pueden aparecer enriquecidos a tamaños de porcentaje de peso que en conjunto pueden llevar a asociaciones minerales no graníticas. La presencia de minerales de estos elementos suele marcar la diferencia entre pegmatitas comunes y pegmatitas de elementos raros (Černý, 1991; London, 2008).

Textura

Además del grano grueso típico de este tipo de rocas, se distinguen otras características texturales importantes que pueden individualmente o en conjunto definir a una roca como pegmatita. Estas son un tamaño de grano muy grueso en relación a rocas ígneas normales o de composición similar, tamaño de grano muy variable que suele incrementar desde márgenes hacia el centro de un cuerpo dado, zonación abrupta de asociaciones minerales, hábitos cristalinos esqueléticos de intercrecimiento gráfico, y fábrica anisotrópica manifestada en alineamiento de minerales no equidimensionales con ejes largos perpendiculares a márgenes de cuerpo. Algunas de estas características se pueden dar también en vetas hidrotermales u otras rocas, pero la que es única en las pegmatitas es la textura gráfica, que corresponde a un intercrecimiento de cuarzo o plagioclasa con feldespato. (London, 2008; London y Morgan, 2012; London, 2014).

Zonación (anatomía)

Se puede hablar de la anatomía de cuerpos pegmatíticos de acuerdo a la zonación o falta de ella que se observa en dichas rocas. Así, a pesar de que en conjunto suelen ser graníticas, hay algunas zonadas, en las cuales se pueden distinguir áreas segregadas mono mineralógicas que individualmente pueden parecerse a vetas hidrotermales y segregaciones. Cameron (1949) propuso el modelo más aceptado en este aspecto.

Las no zonadas se caracterizan como tal por tener una textura y mineralogía homogénea. Suelen carecer de elementos raros. Se componen esencialmente de cuarzo y feldespato con cantidades subordinadas de mica y algunos accesorios como granate y turmalina. Tienden a ocurrir en rocas cajas de alto grados metamórficos, en campos de estabilidad de cianita y espumodena, con temperaturas menores a 700°C. (Cameron et al., 1949; London, 2008).

En tanto, en las pegmatitas zonadas, se distinguen espacialmente distintas zonas de acuerdo al tamaño de grano, asociaciones minerales, y fábrica o hábito cristalino (London, 2008; Bradley y McCauley, 2013), que son las siguientes y se observan de manera simplificada en el esquema de la figura 1:

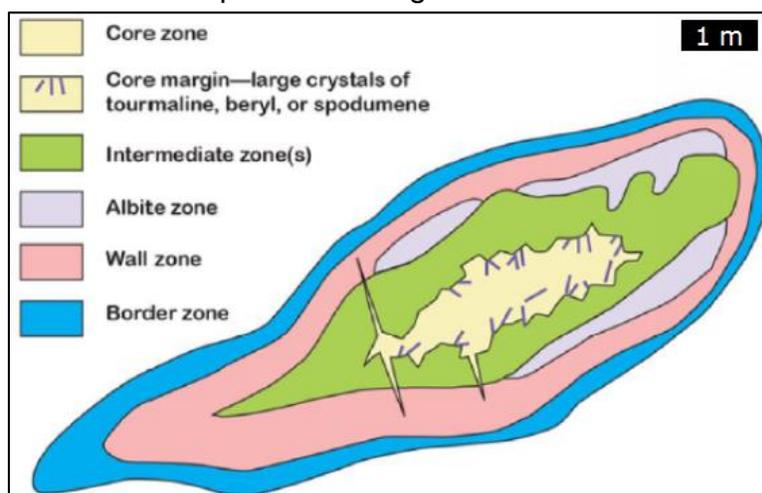


Figura 1: Patrones de zonación idealizada de una pegmatita (extraído de Bradley y McCauley, 2013).

Zona de borde: Suele ser delgada, de pocos centímetros, y rodea al cuerpo pegmatítico en contacto con su roca caja. Su tamaño de grano es fino (2-5 mm) y su textura es hipidiomórfica o bimodal. A veces se les trata como márgenes enfriados (Jolliff et al., 1992), pero no representan composición de roca total de pegmatitas que forman (Cameron et al., 1949; London, 2008).

Zona de muro (“Wall zone”): Cuando aparece, es grueso (hasta 1 m). De grano grueso (1-3 cm), y textura anisotrópica. Comúnmente compuesto de plagioclasa, pertita, cuarzo, muscovita y turmalina (Cameron et al., 1949; London, 2008).

Zona intermedia: Zona marcada por abrupto incremento de tamaño de cristales. Tiende a estar dominada por una sola fase mineral, como microclina pertítica, plagioclasa, cuarzo, espumodena, petalita, montebrasita. Pueden ser de textura simétrica o asimétrica y discontinua. Tienden a aparecer en partes más gruesas de cuerpo pegmatítico y desaparecer en porciones más delgadas (figura 1) (Cameron et al., 1949; London, 2008).

Núcleo: Representa la parte central y más interna del cuerpo pegmatítico. Suele ser monomineralógico, y lo más común es que sea de cuarzo, aunque también puede contener en proporciones menores pertita, albita, aluminosilicatos de Li y fosfatos como montebrasita. Su tamaño es variable dependiendo del tamaño total del cuerpo pegmatítico (Cameron et al., 1949; London, 2008).

Cabe decir que pocos cuerpos presentan todas estas zonas, pero siguen un patrón general de acuerdo a lo observado en cientos de pegmatitas de todo el mundo. Esta secuencia generalizada de zonación fue inicialmente propuesta por Cameron (1949) y luego mejorada por Norton (1983). Dice que las zonas externas están dominadas por plagioclasa y cuarzo, con muscovita subordinada y accesorios como granate, turmalina, apatito, columbita o berilo, en lo que sería la zona de borde y zona de muro. En partes más internas hay una abrupta transición a zona intermedia, con feldespato potásico dominando sobre plagioclasa en pegmatitas simples y aluminosilicatos de Li o sus equivalentes fosfatos en otras más evolucionadas. Finalmente se llega al núcleo de cuarzo monomineralógico (London 2008; London 2014).

Distribución

La mayoría de las pegmatitas ocurren en grupos o enjambres en cuerpos cogenéticos que ocupan un área que puede variar desde pocos a cientos de km². Se dan generalmente como segregaciones dentro de una roca caja de composición similar, o bien como diques y filones aprovechando estructuras preexistentes. Se cree que pueden estar asociados a una fuente plutónica granítica y que están distribuidas sistemáticamente alrededor de él, existiendo una zonación desde granitos menos fraccionados a pegmatitas comunes y finalmente pegmatitas de elementos raros, en mayor distancia, como se ve en el esquema de la figura 2 (Černý, 1991; London, 2008).

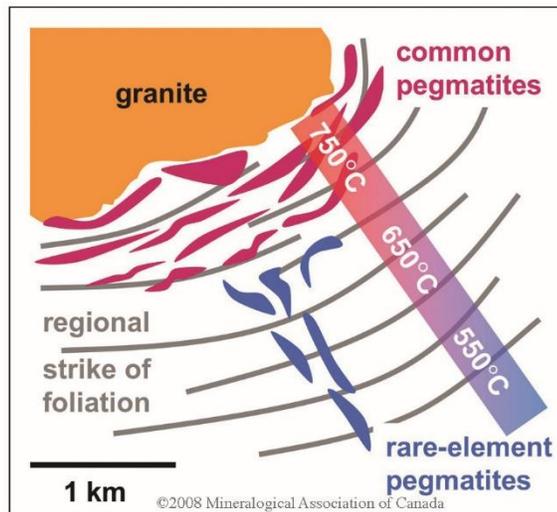


Figura 2: Distribución regional de pegmatitas desde fuente plutónica (extraído de London, 2008).

Clasificación

Existen clasificaciones de pegmatitas, propuestas por Černý (1991), que, si bien no se pueden aplicar a todas, han tenido buena aceptación. Las ideas de clasificar a estas rocas comenzaron con Landes (1933), y fueron desarrolladas por Cameron (1949), Gingsburg (1984) y finalmente Černý (1991). Este último propone una clasificación compleja de las pegmatitas, en que las subdivide en clases, subclases, tipos y subtipos, además de dos grandes familias.

Clases

Las clases de pegmatitas se clasifican dependiendo de la temperatura y profundidad de emplazamiento, de acuerdo a datos petrogenéticos como campo de estabilidad de polimorfos de aluminosilicatos, como se observa en la figura 3. Existen cinco clases: la clase abisal, muscovita, muscovita-elementos raros (RE), elementos raros (RE) y miarolítica (Černý, 1991; London, 2008; Černý et al., 2012).

La clase abisal se define originalmente por el alto grado metamórfico de sus rocas caja, en las facies anfibolita-granulita, más que por sus minerales o textura, las cuales pueden ser complejas como granito gráfico y aplitas (Černý, 1991; London, 2008; Černý et al., 2012).

La clase muscovita fue inicialmente presentada como pegmatitas simples. Se definen por la presencia del mineral que da su nombre, y por estar deformadas con su roca caja a alta presión en facie anfibolita caracterizada por cianita-silimanita. Suelen estar concordantes con su roca caja y se piensa que se generan por anatexia (Černý, 1991; London, 2008; Černý et al., 2012).

La clase muscovita-RE fue añadida posteriormente (Černý y Ercit, 2005), para pegmatitas de clase muscovita que, a diferencia de la anterior, formaría parte de una continuación de granito a pegmatita de elementos raros y por ende habría desarrollado un alto grado

de evolución química. Las que han intruido rocas caja ricas en mica pueden tener gran enriquecimiento de muscovita o biotita de grano muy grueso en sus márgenes (Černý, 1991; London, 2008; Černý et al., 2012).

Las pegmatitas de la clase RE suelen intruir rocas cajas que guardan condiciones de metamorfismo de baja presión de esquistos verdes a anfibolita. Es la más diversa en composición ya que las más fraccionadas acentúan varias firmas de elementos traza de sus fuentes (Černý, 1991; London, 2008; Černý et al., 2012).

Finalmente, la clase miarolítica se caracteriza por la abundancia de cavidades abiertas o rellenas de arcilla y cristales llamadas miárolas, que ocurren como pequeñas segregaciones. Son la fuente principal de gemas. Se cree que son de baja profundidad, reflejado por abundantes cavidades que fueron rellenas por vapor acuoso o carbónico que exsolvió de un magma silicatado y se atrapó como burbujas dentro de pegmatita cristalizante (Černý, 1991; London, 2008; Černý et al., 2012).

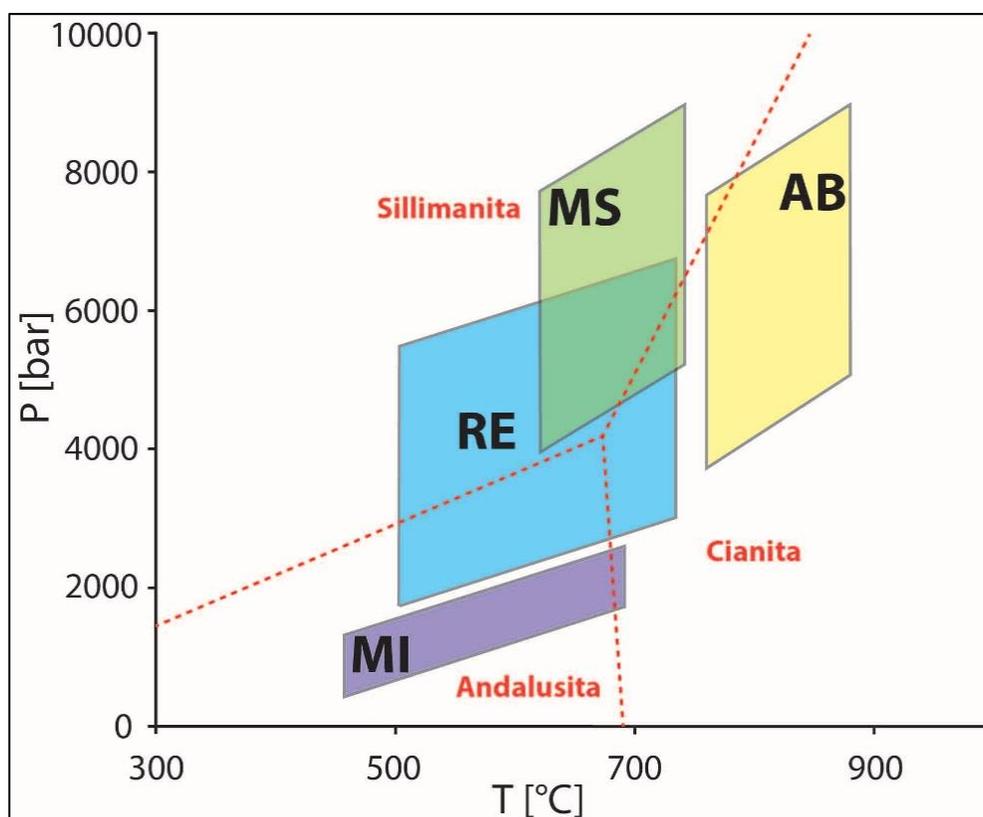


Figura 3 Esquema de clases pegmatíticas. Las clases MI es miarolítica, RE es de elementos raros, MS es muscovita, y AB es abisal. Se muestra línea roja correspondiente a polimorfos de aluminosilicatos (modificado de London 2008).

La clasificación de pegmatitas se puede complejizar, conteniendo adjetivos de acuerdo a la geoquímica de éstas, existiendo 5 clases, 10 subclases, 13 tipos, y 7 subtipos (distinguidas por mineralogía de elementos raros) (tabla 1) (Černý y Ercit, 2005; London, 2008; Černý et al., 2012). Esta clasificación es particularmente útil pues las firmas de RE revelan aspectos de su origen, como se explicará a continuación.

Clase	Subclase	Tipo	Subtipo	Familia
Abisal	HREE			NYF
	LREE			
	U			NYF
	BBe			LCT
Muscovita				
Muscovita- Elementos raros	REE			NYF
	Li			LCT
Elementos raros	REE	Allanita-Monazita Euxenita Gadolinita		NYF
	Li	Berilo Compleja	Berilo-Columbita Berilo-Columbita- Fosfato Espumodena Petalita Lepidolita Elbaita Ambligonita	LCT
		Albita-Espumodena Albita-Espumodena		
Miarolítica	REE	Topacio-Berilo Gaolinita- Fergusonita		NYF
	Li	Berilo-Topacio Espumodena Petalita Lepidolita		LCT

Tabla 1: Esquema de clasificación propuesto por Černý y Ercit (2005) modificado para mostrar correlación entre clases y familias (extraído de Černý et al., 2012).

Familias

Las dos familias principales descritas por Černý (1991) deben su nombre justamente a los principales elementos enriquecidos que contienen, siendo éstas la LCT (Li-Cs-Ta) y la NYF (Nb, Y, F). A pesar de que sólo cerca de un 2% de las pegmatitas son de elementos raros, se usan de todas maneras para su clasificación dependiendo de la signatura química que posean. Cabe decir que el concepto de familia no nació para ser aplicado a una pegmatita individual, sino a un gran grupo comagmático de pegmatitas, del cuales solo unas pocas evolucionan hasta desarrollar mineralogía diagnóstica de cada familia, subclases y tipos. En las pegmatitas comunes que carecen de mineralogía exótica, características de familias pueden obtenerse de los contenidos de elementos

trazas en minerales comunes como micas, óxidos, silicatos máficos, y otros (Černý et al., 2012).

LCT: Es la familia más abundante. Además de los 3 elementos que la definen, litio (Li), cesio (Cs) y tantalio (Ta), están enriquecidas en berilio (Be), boro (B), flúor (F), fósforo (P), manganeso (Mn), galio (Ga), rubidio (Rb), niobio (Nb), estaño (Sn) y hafnio (Hf). Se asocian a granitos tipo S, peraluminosos, reflejado en presencia de muscovita, turmalina, granate, topacio y andalucita. Algunos granitos tipo I pueden evolucionar desde fuentes máficas a intermedias a composiciones peraluminosas enriquecidas en estos elementos (menos Cs) y se consideran de esta familia. Se asocian a ambientes de subducción y colisión continental (Černý y Ercit, 2005; London, 2008; Černý et al., 2012).

Los orígenes de los principales elementos son los siguientes: el Li se origina de participación de micas en reacciones de fusión en la fuente, y debido a su incompatibilidad en otros minerales, permanece como “residuo no fusionado” en la fuente. El Cs es el más incompatible entre los alcalinos y tierras alcalinas. Tiende a enriquecerse en magmas graníticos, donde el principal reservorio son micas, muscovita y biotita, que se derriten en la fuente de los magmas. Luego se incorpora a berilio y micas y puede formar polucita. El Ta no tiene un origen conocido, aunque muestra correlación positiva con Be, F, Sn, Li, Pb. Se piensa que micas o algo de ilmenita podrían ser su fuente (London, 2008; Černý et al., 2012).

Otros elementos presentes como P distingue a las que se originan de rocas metasedimentarias de las derivadas de materiales ígneos, ya que las primeras se encuentran en pizarras marinas negras, importantes protolitos de rocas metamórficas que producen granitos tipo S, en que el P se va al magma granítico que producen por ser soluble en magmas peraluminosos, y porque la cristalización de plagioclasa temprana remueve el Ca que de otra forma consumiría el P en forma de apatito. Por ende, los LCT contienen minerales con P distintos de este fosfato, originados de fuentes metasedimentarias (London, 2008; Černý et al., 2012).

NYF: Además de niobio (Nb), yodo (Y) y flúor (F), están enriquecidas en tierras raras pesadas (HREE), titanio (Ti), escandio (Sc), circonio (Zr) y Be. Se asocian a granitos tipo A, alcalinos, manifestado en piroxeno sódico y anfíboles. Son pobres en P y ricas en HREE. Regionalmente se asocian a puntos calientes o zonas de rift intracontinental. El origen de la signatura de sus elementos es poco conocido. Las HREE se asocian con F, por lo que el F se cree que viene de reacciones de fusión que involucran anfíboles y micas a temperaturas apropiadas para la base de la corteza continental. Micas y anfíboles se vuelven ricas en Mg con aumento de temperatura, y su contenido de F aumenta con el Mg. A medida que minerales ricos en F se fusionan en profundidad, dan su alto contenido de F al magma (Černý y Ercit, 2005; London, 2008; Černý et al., 2012).

Puede haber pegmatitas que no encajen perfectamente en ninguna de las familias dadas, por lo que se ha añadido una categoría correspondiente a una mezcla de LCT y NYF, que son rocas de la familia NYF que presentan enriquecimiento característico de la familia LCT, que se da por una posible contaminación local por fluidos tardíos que causan reacciones hidrotermales en rocas sedimentarias locales, liberando así Li y B (Černý et al., 2012).

Modelos de origen

Desde que se empezó a estudiar este tipo de rocas, ha habido algunas teorías de su formación que han sido influyentes y prevalecido por varias décadas, siendo las más importantes la propuesta por Cameron (1949), que explica el origen como una cristalización fraccionada de un fundido granítico rico en fundentes, mientras que la otra, de Jahns y Burnham (1969), trata de una separación buoyante de un fluido acuoso desde fundido silicatado y sus efectos en redistribución de componentes.

El modelo de Cameron de cristalización fraccionada remarca que las pegmatitas forman capas sucesivas desde paredes de cámara hacia adentro con cristalización temprana de feldespatos, cuarzos y en menor medida micas, encerrando a un cuerpo de líquido granítico. Por ende, los cristales tempranos se forman en los márgenes y no se reequilibran con fundido residual, en el cual se concentran volátiles y fundentes como H₂O, CO₂, B, F, P, y otros elementos incompatibles, a medida que la cristalización avanza hacia el centro de este cuerpo pegmatítico, dando como resultado un cuerpo con creciente fraccionamiento químico desde márgenes hacia el centro (Cameron et al., 1949; London, 2008; London y Morgan, 2012).

El rol de estos agentes fundentes es clave. Estos elementos se concentran inicialmente debido a que son excluidos de la cristalización temprana de minerales formadores de roca como cuarzo, feldespato, plagioclasa, micas, siendo por lo tanto concentrados en un magma residual. Lo que provocan es una disminución la viscosidad del magma, de las tasas de nucleación y de la temperatura de cristalización (solidus), así como también un aumento de la difusión y de la solubilidad de componentes que de otra manera precipitarían como minerales accesorios. El producto de estos efectos es que se forman pocos núcleos que pueden crecer mucho, llegando así a los grandes cristales que se tienen presentes. Sumado a esto, el enfriamiento de estas rocas es rápida, no lenta como se podría llegar a pensar habiendo cristales tan grandes, y es también debido al rol de estos agentes. El subenfriamiento generado puede alcanzar los 150-200°C, y es clave para la formación de la textura gráfica, característica de las pegmatitas. El problema de estos agentes es que suelen ser de muy baja concentración en pegmatitas, siendo menor a 1% en algunas de elementos raros, y aún menor en las comunes (London, 2008; Černý et al., 2012, London y Morgan, 2012).

El modelo de Jahns y Burnham (1969) tiene como base la interacción de un fluido acuoso que extrae elementos incompatibles desde el fundido en la porción inferior del cuerpo y los redistribuye en porción superior para permitir formación de cristales gigantes y exóticos, por lo que el fundido silicatado funciona como una mera fuente de componentes para el fluido. Se propone un ascenso buoyante de este fluido, infiriendo particionamiento de K sobre Na para explicar fraccionamiento (Jahns y Burnham, 1969; London, 2008).

Recientemente se propuso una teoría que combina aspectos de ambos, llamada "*Constitutional Zone Refining*" (CZR), que habla de una capa de borde enriquecida en fundentes de un líquido silicatado que puede conciliar con la importancia de los agentes fundentes y su relativa baja abundancia en todo tipo de pegmatitas (London, 2008; London y Morgan, 2012; London, 2014).

London propone que zonas exteriores de cuerpos pegmatíticos, que contienen fábricas anisotrópicas, textura gráfica y grano fino, son dominadas por efectos de subenfriamiento en respuesta a líquido granítico. Las zonas interiores en tanto, que son las que tienen el grano grueso y texturas en bloque por las que las pegmatitas son conocidas, resultan de la construcción de fundentes en una capa de borde líquida que avanza junto con el frente de cristalización. Así, el grano incrementa dramáticamente debido a rápida difusión por baja viscosidad de una capa de borde líquida enriquecida en fundentes, y el intercrecimiento gráfico se segrega a monofases cristalinas (figura 4) (London, 2008; London y Morgan, 2012).

El método sugerido debe su nombre a un proceso metalúrgico en que una aleación metálica es refinada cuando su cristalización lleva a acumulación de fundentes en una zona estrecha de fundido que se forma en avance con frente de cristalización. La capa borde enriquecida en fundentes secuestra otras impurezas que de otra manera contaminarían el metal, y, por ende, su composición empieza a desviarse de composición total del metal. Por ende, esta capa se enriquece en componentes excluidos. CZR reconcilia así la baja abundancia de fundentes en pegmatitas con sus importantes efectos en propiedades del magma para el desarrollo de texturas pegmatíticas, que son evidentes cuando los fundentes están presentes a altas concentraciones en una estrecha capa borde adyacente a frente de cristalización (London, 2008; London y Morgan, 2012). En la figura 4 se puede ver un esquema que define el avance de esta capa de borde, la cual está enriquecida en estos fundentes, separando así al intercrecimiento de cuarzo y feldespato del magma enriquecido en incompatibles. Se puede ver como esta capa va acumulando estos elementos incompatibles sin incorporarlos al material cristalizado, el cual es cuarzo y feldespato aún, en el que solo se incorporan en este caso O, Al, Si, Na, K (figura 4A). Esto sigue hasta que ya casi el total del magma se ha consumido, cuando queda sólo la capa de borde enriquecida en elementos raros (figura 4B). Finalmente, puede que el enriquecimiento en incompatibles puede alcance condiciones de saturación suficientes para precipitar algún mineral que los contenga, como en la etapa final (figura 4C), en que hay muscovita-lepidolita y elbaíta-schorlita, que corresponde a una abrupta transición típica de asociaciones minerales comunes a exóticas en pegmatitas. (London, 2013; London, 2014).

Otra teoría reciente que abarca otros aspectos es la Thomas et al. (2012), que habla de una inmiscibilidad entre dos fundidos y un fluido. Ellos se basan en datos de inclusiones vítreas y fluidas en cuarzo pegmatítico para demostrar una inmiscibilidad entre estas fases como un importante proceso durante generación de pegmatitas graníticas. Infieren que formación de pegmatitas empezaría en etapa supercrítica de fluido/fundido, a altas temperaturas, en el rango de 750-850°C. Sugieren además que elementos como Li, Na, K, Rb y Cs presentes en inclusiones fluidas en adición a los ya reconocidos fundentes como agua, F, P, B, provocarían un efecto combinado responsable de diversidad de pegmatitas observadas en el mundo (Thomas et al., 2012; Thomas y Davidson, 2016).

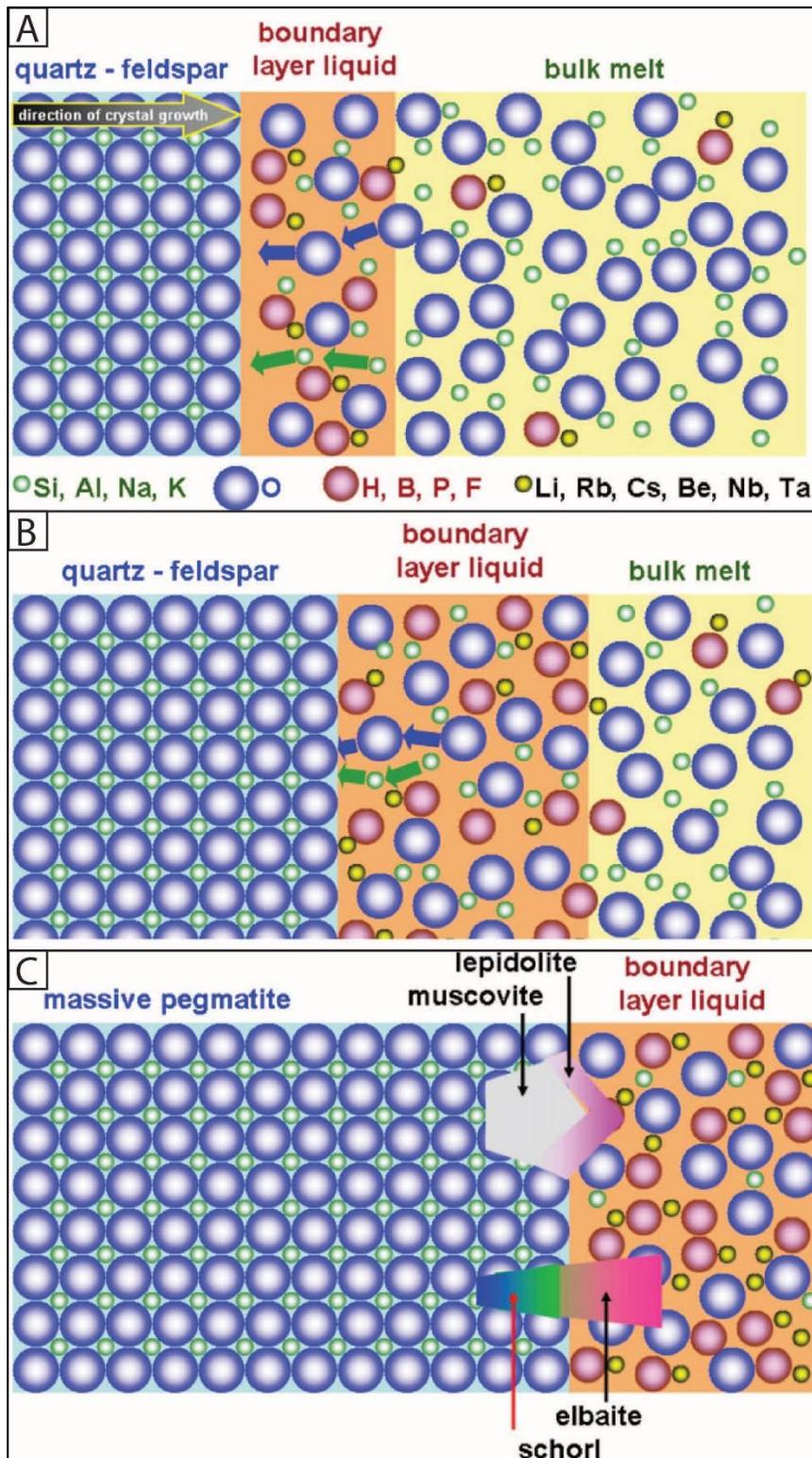


Figura 4: Evolución en formación de pegmatitas en base a CZR. (A): En un principio se forma una capa rica en fundentes que acumula elementos incompatibles. (B): Luego se observa cómo va avanzando esta capa y cristalizando minerales con elementos comunes. (C): Finalmente pueden cristalizar elementos acumulados en la capa si las condiciones son las adecuadas (extraído de London, 2013).

Inclusiones fluidas

Introducción

Las inclusiones fluidas (IF) son cavidades microscópicas rellenas de sustancias que se forman durante el crecimiento de los minerales o posterior a ellos en imperfecciones de la estructura cristalina (Roedder, 1984). El material atrapado puede incluir fases líquidas, sólidas y gaseosas, que son parte del medio acuoso mediante del cual se forman la mayoría de los minerales. Son, por lo tanto, una herramienta única en la geología para determinar condiciones físicas y químicas de la formación de los minerales que las contienen (Roedder, 1984; Goldstein y Reynolds, 1994).

Para estudiarlas y obtener información válida referente a condiciones originales de atrapamiento, se ha definido que se requieren establecer tres hipótesis fundamentales; “*Roedder’s rules*”, antes de emprender el estudio (Roedder, 1984):

Primero, se indica que la inclusión atrapa una fase homogénea. Luego, se asume que nada es añadido o removido de la inclusión posterior a su atrapamiento. Finalmente, se postula que el volumen de la inclusión permanece constante después del atrapamiento, por lo que representa un sistema isocórico.

Filosofía de inclusiones fluidas

Se requiere de cierta metodología científica para realizar un correcto estudio de IF, partiendo de la formulación de preguntas e hipótesis de sus posibles respuestas, debido a que las inclusiones necesarias para responder dichas preguntas pueden no estar presentes en las rocas. Por ello se sigue el siguiente procedimiento de pasos básicos (Roedder, 1984; Goldstein y Reynolds, 1994).

- 1) Lo primero es proponer una pregunta para la cual se realiza el estudio.
- 2) Luego se deben seleccionar muestras apropiadas para dar respuesta a la pregunta dada.
- 3) En caso de un estudio diagenético se requiere situar el estudio de IF en un contexto paragenético del mineral de interés.
- 4) Se requiere una petrografía detallada de las inclusiones fluidas, en que a mayor número de muestras es más probable encontrar inclusiones adecuadas para responder la pregunta propuesta, y más representatividad tendrán los resultados de estudios posteriores. Es clave en esta etapa encontrar arreglos de inclusiones fluidas (FIA's), que son grupos de estas cavidades que fueron atrapadas de manera contemporánea. De esta manera, se definen distintos FIA's de diferentes etapas de la evolución del sistema y se estudia su comportamiento en las siguientes fases del trabajo.
- 5) A continuación, se realiza un análisis de microtermometría para estimar densidad y composición en FIA's seleccionados.
- 6) Finalmente, si se tienen los recursos se realizarán técnicas analíticas más sofisticadas para estimar de manera más detallada composición de IF, lo que puede involucrar análisis de roca total o de inclusiones fluidas separadas (LA-ICMPS, Raman, etc.).

Clasificación

Hay distintos criterios para la clasificación de IF, siendo uno de los más usados el genético, que relaciona la temporalidad de atrapamiento de los distintos fluidos encontrados en el mineral hospedante. Se definen tres tipos principales (Roedder, 1984; Goldstein, 2003).

Arreglos de inclusiones primarias: Corresponden a inclusiones que se forman en el momento en que un determinado mineral está creciendo, de modo en que dicho proceso atrapa porciones del fluido participante en su formación, y por ende estas representan condiciones termodinámicas del fluido original. Pueden aparecer en planos de crecimiento, en pequeñas imperfecciones en el momento de formación, presentándose de manera aislada (figura 5). Estas inclusiones son intragranulares, pues no traspasan límites de granos, o también pueden ser intergranulares si se forman al borde de estos límites, observándose en planos de crecimiento (Roedder, 1984; Goldstein y Reynolds, 1994; Goldstein, 2003; Bodnar 2003a).

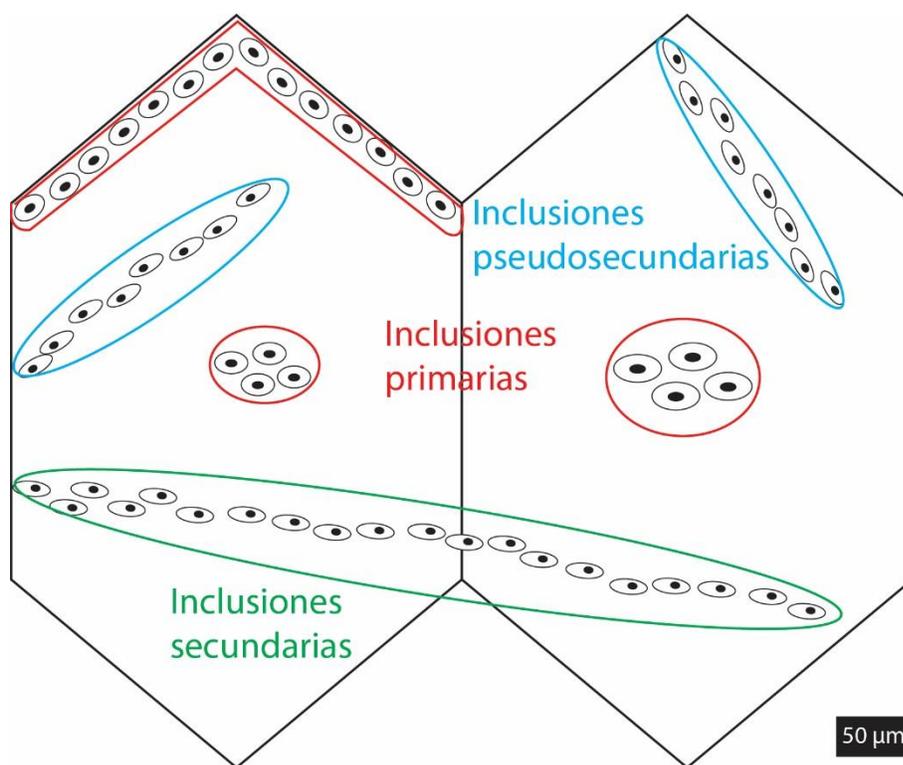


Figura 5: Esquema mostrando los distintos tipos de inclusiones en un cristal euédrico de cuarzo.

Arreglos de inclusiones secundarias: Corresponden a inclusiones formadas por procesos posteriores a la formación del mineral en que se encuentran. Normalmente se ven en fracturas en que un fluido estuvo presente y dejó estas irregularidades en el mineral, rellenándolas, en un proceso de solución y recristalización. Representan por lo tanto condiciones termodinámicas de fluidos posteriores a la formación del mineral. Suelen cortar límites de granos minerales (Roedder, 1984; Goldstein y Reynolds, 1994; Goldstein, 2003; Bodnar 2003a) (figura 5). Estas inclusiones son transgranulares pues traspasan límites de granos.

Arreglos de inclusiones pseudosecundarias: Corresponden a inclusiones de las cuales no es claro clasificarlas en primarias o secundarias, puesto que se encuentran en un estado intermedio entre ellas. Se dan cuando un cristal se fractura durante su crecimiento, atrapando fluido por medio de inclusiones, siendo sellado posteriormente. Por ende, son testigos de fluidos posteriores a los que formaron el mineral y dependiendo de la pregunta a responder pueden ser útiles. Estas inclusiones son intragranulares pues no suelen traspasar límites de granos (Roedder, 1984; Goldstein y Reynolds, 1994; Goldstein, 2003; Bodnar 2003a) (figura 5).

Cambios posteriores

Las inclusiones fluidas pueden a veces pasar por una serie de procesos posteriores a su atrapamiento que pueden causar cambios en el volumen, morfología e incluso pérdida del fluido original, modificando así su composición (Bodnar et al., 1985). Algunos de los posibles cambios son los siguientes:

El '*stretching*', o extensión, se da cuando las inclusiones y su mineral hospedante se sobrecalientan y traspasan su límite, lo cual puede derivar en cambios de volumen (Bodnar et al., 1985).

El '*leakage*', o fuga, en tanto, se da cuando el mineral sufre deformación, lo que deriva en una morfología especial en las inclusiones que han sufrido este proceso (Bodnar et al., 1985).

El '*necking down*' o estrangulamiento se da por redisoluciones y recristalizaciones que tienen lugar durante la confinación y enfriamiento del fluido. Esto es básicamente una inclusión grande que al enfriarse se va fragmentando en inclusiones cada vez más pequeñas (Bodnar et al., 1985).

Estos cambios pueden derivar en una decrepitación, debido a variaciones de las condiciones de presión y temperatura, lo que provoca la modificación de una IF en otras más pequeñas. Esto puede suceder por dos procesos: un enfriamiento isobárico, que provoca una implosión, por disminución de volumen, en que la presión de la IF se vuelve menor que la del ambiente (IBC en figura 6A). El otro es una descompresión isotermal, que puede provocar una explosión por expansión de volumen, debido a que la presión de la IF es mayor que la ambiental (ITD en figura 6A) (Van der Kerhof y Hein, 2001; Bodnar, 2003c).

Existe una relación entre el tamaño de las inclusiones y la decrepitación, en que existen fórmulas que calculan la diferencia de presión mínima requerida para decrepitar una inclusión de un volumen determinado (Bodnar et al., 1989; Laccazzete, 1990). A modo general las inclusiones con mayor tamaño requieren menor presión que las inclusiones más pequeñas, que resisten altas presiones sin sufrir estos cambios, tal como se ve en el gráfico de la figura 6B.

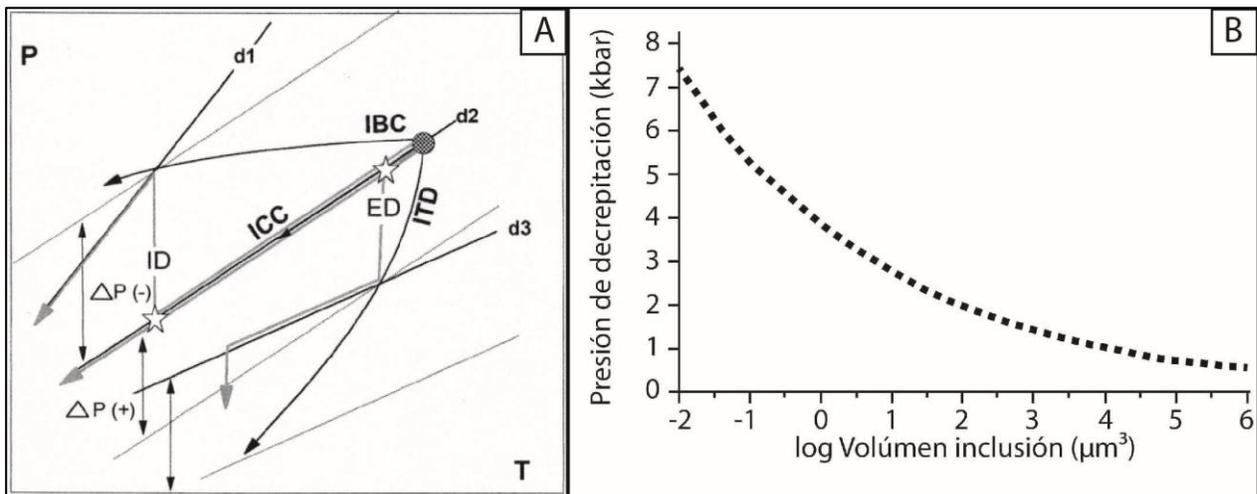


Figura 6: (A): Extraído de Van den Kerkhof y Hein (2001). Gráfico mostrando los distintos tipos de decrepitación que pueden sufrir las inclusiones por un enfriamiento isobárico (IBC) o descompresión isoterma (ITD). (B:) Modificado de Laccazete (1990). Diagrama experimental de Bodnar (1989) mostrando relación entre tamaño de inclusión y presión mínima para que suceda una decrepitación, con distintos parámetros.

Métodos de estudio

A continuación, se explican la teoría de los métodos utilizados en el estudio posteriores a la petrografía, que corresponden a microtermometría, espectrometría Raman y ablación laser con espectrometría de masas acoplado (LA-ICPMS).

Microtermometría

La microtermometría es un método que permite conocer las temperaturas en las que se producen cambios de fase al enfriar y calentar las inclusiones presentes. Así se puede obtener las temperaturas eutécticas (T_e), de ultimo fundido (T_m) y de homogenización (T_h) de las inclusiones seleccionadas previamente en sus FIA's (Goldstein y Reynolds, 1994).

La temperatura eutéctica corresponde al momento en que luego de haber congelado la inclusión y posteriormente comenzado el proceso de calentamiento, se observa el primer cambio de fase cuando los cristales sólidos se empiezan a fundir. Dicho valor permitirá en algunas ocasiones clasificar al fluido en alguno de los distintos sistemas existentes, que son principalmente H_2O , $H_2O-NaCl$, $H_2O-NaCl-CaCl_2$, $H_2O-NaCl-CO_2$, entre muchos otros, que dependen tanto de la naturaleza de las inclusiones como del contexto de las rocas hospedantes (Goldstein y Reynolds, 1994; Bodnar, 2003b).

El valor de T_m corresponde a la temperatura en que se funde el último cristal sólido formado al enfriarse las inclusiones, y cuyo valor tiene una directa relación con la salinidad del fluido. Dependiendo del sistema en que se encuentre existen distintas ecuaciones para calcular dicho valor. La mayoría de las veces se tiene un sistema $H_2O-NaCl$. En este caso se calcula la salinidad con la fórmula de Bodnar et al., 1985.

$$(1) \quad \text{Salinidad (\%)} = 1.78 * T_m - 0.0442 * T_m^2 + 0.000557 * T_m^3$$

Donde T_m corresponde a la temperatura a la que se derrite el último hielo.

La T_h corresponde al valor en que, al calentar las inclusiones, desaparece la burbuja presente en la mayoría de las IF, y, por ende, homogeniza a la fase líquida. Esta temperatura se asocia directamente con la densidad del fluido. Esto se puede entender mejor observando la figura 7. Se observa el proceso de calentamiento desde empieza a calentar la inclusión para obtener la T_h . Con ello se calcula la densidad y la isócara que siguió este fluido una vez que fue atrapado originalmente. Esta isócara seguiría entonces una recta, hasta llegar eventualmente a la presión y temperatura de posible atrapamiento (P_t y T_t en la figura 7). El cálculo de T_h entonces es una herramienta que junto con otras puede derivar en la obtención de las condiciones a las que este fluido fue atrapado (Bodnar et al., 1985; Goldstein y Reynolds, 1994).

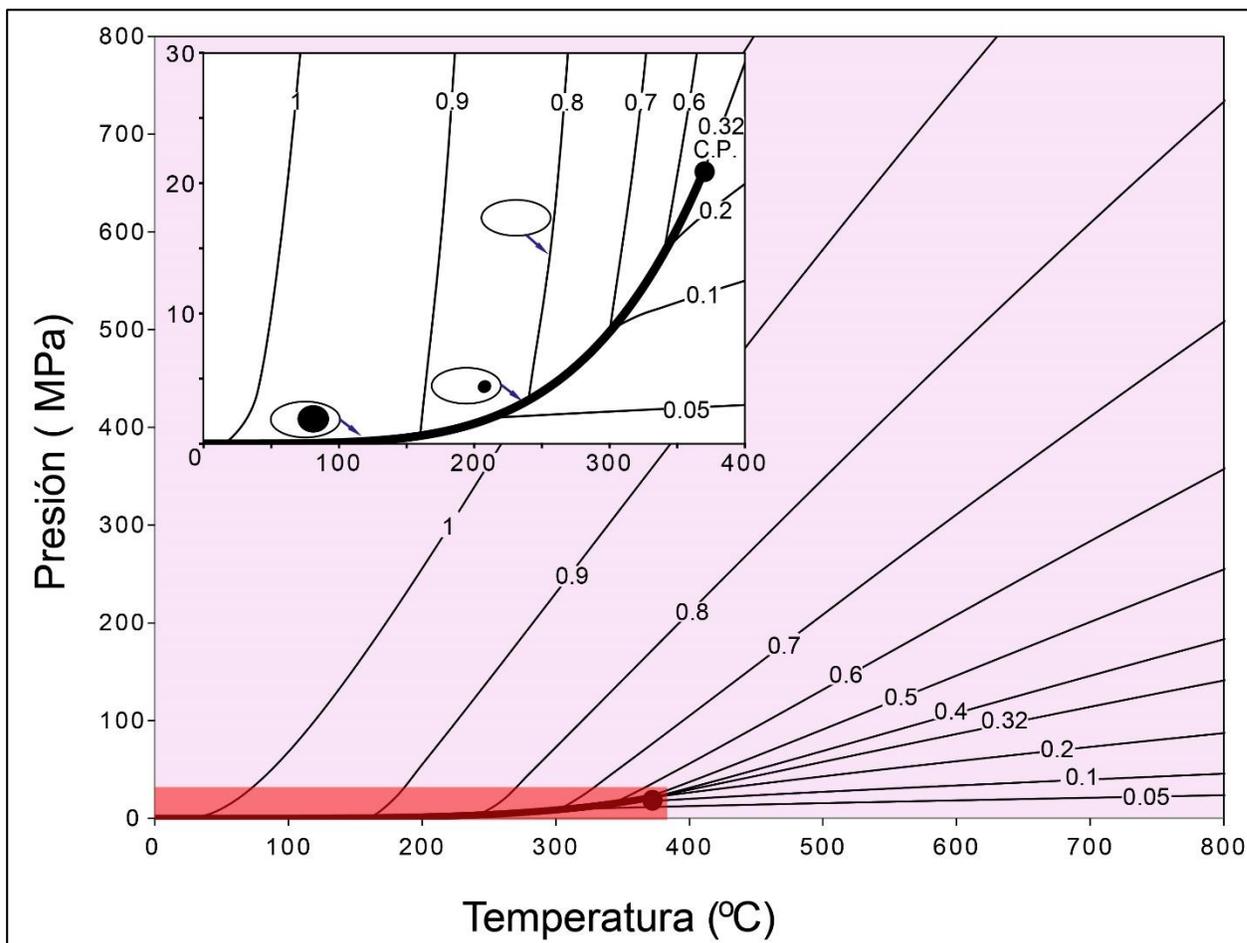


Figura 7: Diagrama de fases H_2O de presión vs temperatura con líneas de misma densidad. El recuadro rojo inferior está amplificado en la parte superior donde se muestra la línea de ebullición y gráficamente una inclusión en el estado líquido cuando se atrapa, conforme se enfría se puede apreciar la burbuja a temperatura ambiente (Modificado de Yardley y Bodnar 2015).

Diagramas de sistemas relevantes para el estudio se explican a continuación.

En el caso inicial de sistemas de un componente lo más relevantes son el del H_2O y CO_2 . En caso de tener un sistema con puro H_2O se utiliza el diagrama de la figura 8A, con un punto eutéctico en $0.015^\circ C$ y punto crítico en $374^\circ C$ y 221.1 bar. En caso de tener un

sistema con puro CO₂ el punto eutéctico está en -56.6°C y el punto crítico en 31.06°C y 73.8 bar (Diamond, 2003; Hurai et al., 2015).

En inclusiones fluidas es más probable tener fluidos que son una mezcla de más de un componente. Tal es el caso del sistema H₂O-NaCl, uno de los más comunes en inclusiones fluidas. En este caso se usa el diagrama de la figura 8B, y tiene un punto eutéctico en -21.2°C. El punto crítico varía dependiendo de las proporciones de los componentes. En la figura se puede ver cómo pueden variar los sólidos que aparecen en la IF con la salinidad de esta, con la presencia de hidrohalita (Hh), hielo (I) y vapor (G) durante el enfriamiento, además de que puede haber halita (H), para el caso de inclusiones con salinidades mayores a 23% en peso de NaCl. Se muestran el punto eutéctico (E) y peritético (P). Una vez congeladas las inclusiones aproximadamente a -190°C se comienza a calentar hasta llegar al punto eutéctico, en cuya temperatura puede darse la fusión final o bien de hielo o de hidrohalita. En caso de tener una T_m menor que este eutéctico, es razonable pensar que hay una componente añadida al sistema, que puede ser KCl o CaCl₂, entre otros. Dependiendo cual desaparezca se sigue el camino hacia la izquierda de la figura 8B. En el caso de que exista una concentración de salinidad mayor (que se puede observar a temperatura ambiente como halita) se utiliza la temperatura de disolución de la halita (Bodnar, 1993; Bodnar, 2003b; Hurai et al., 2015).

En caso de tener un sistema H₂O-CO₂ aparece un componente sólido llamado clatrato. El clatrato es un sólido que se forma en este tipo de sistemas, corresponde a un hidrato de CO₂. Es importante medir su fusión al hacer microtermometría pues está relacionado directamente con la salinidad y densidad del fluido. Esto se puede observar en la figura 8C. Se tiene que este clatrato (C) desaparece en el rango de -10 y 10°C. En esta figura se puede ver los campos en que coexisten distintas fases de este sistema. Los puntos de menor varianza de este sistema son Q₁ (-1.5 °C y 10 bar; coexisten CO₂ vapor, clatrato, líquido acuoso y hielo), Q₂ (10°C y 45 bar; coexisten CO₂ vapor, CO₂ líquido, clatrato y líquido acuoso) y Q₃ (-56.6°C y 5 bar; coexisten CO₂ sólido, CO₂ vapor, CO₂ líquido y clatrato) (Hedenquist y Henley, 1985; Hurai et al., 2015).

El caso del sistema ternario H₂O-NaCl-CO₂, tiene una visualización en tres dimensiones a priori bastante complicada. En la figura 8D se puede ver una esquematización de este sistema a 1 kbar, en que cada eje corresponde a las componentes de este sistema. Se marcan secciones isotermales en este prisma, subdivididas en los campos I (representa halita en coexistencia con líquido rico en CO₂), II (vapor de CO₂, líquido de H₂O y NaCl), III (representa sistema ternario con los tres componentes, con dependencia de la cantidad de NaCl en la expansión de la región de inmiscibilidad) y IV (miscibilidad entre todos los componentes, representa un fluido homogéneo). Cabe decir que los campos III y IV son los más representativos de fluidos existentes en la corteza terrestre (Duan et al., 1995; Hurai et al., 2015).

En caso de sistemas ternarios, se puede tener uno compuesto por más de una sal, como sería el caso de H₂O-NaCl-CaCl₂. Este sistema tiene un eutéctico a bajas temperaturas, alrededor de -51.6°C. Se calcula su composición dependiendo de la temperatura de fusión de los distintos sólidos formados al congelarse la inclusión, utilizando el diagrama ternario de la figura 8E (Hurai et al., 2015).

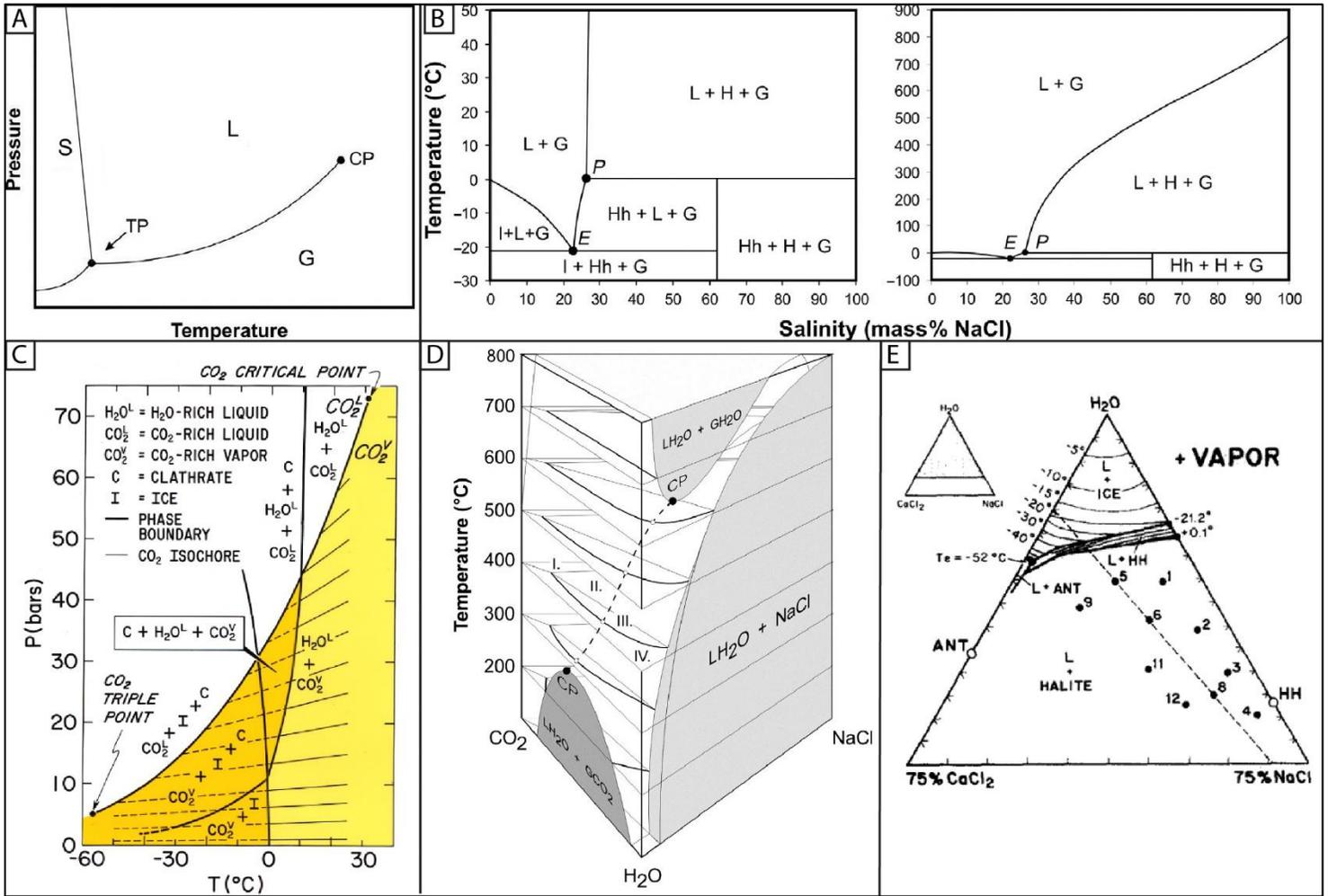


Figura 8: (A): Extraído de Hurai et al., 2015. Diagrama de fases del agua mostrando su punto triple (TP) y punto crítico (CP) (B): Extraído de Bodnar, 1993. Diagramas de fase de sistema H_2O -NaCl para bajas (izquierda) y altas (derecha) temperaturas. L, G y H, Hh, corresponden a líquido, vapor, halita e hidrohálita, respectivamente. Los puntos E y P son el eutéctico y peritéctico. (C): Extraído de Hedenquist y Henley, 1985. Diagrama de fases de sistema H_2O - CO_2 con énfasis en aparición de clatrato. C=clatrato; V=vapor; L=líquido; I=hielo. (D): Extraído de Duan et al., 1995. Diagrama ternario de sistema H_2O -NaCl- CO_2 a 1 kbar. Se marcan secciones isotermales I, II, III y IV que indican distintas fases coexistentes del sistema. (E): Extraído de Vanko et al., 1988. Diagrama ternario H_2O -NaCl- $CaCl_2$. Se muestra este sistema para notar las distintas fases que pueden aparecer durante ensayos microtermométricos cuando el fluido atrapado pertenece a este sistema. Dependiendo de la temperatura a la que se funde cada sólido se calcula la composición exacta entre estos 3 componentes.

Raman

Posterior a la microtermometría y el análisis de sus resultados se pueden efectuar experimentos como el usado en este estudio, que corresponde a la Microsonda Raman. Este instrumento es una herramienta no destructiva capaz de identificar composiciones moleculares de sólidos, líquidos y gases en inclusiones fluidas con alto grado de certeza. Se basa en la dispersión inelástica de la luz como respuesta a la iluminación por un rayo láser que corresponde a una radiación monocromática del espectro visible. Ante dicho rayo los fotones esparcidos de la dispersión inelástica obtienen una energía adicional por el intercambio energético entre fotones incidentes y los niveles cuantificados de energía de la estructura poliatómica. Así, se mide la diferencia de energía, que es única en minerales, fluidos y gases de distinta composición (Frezzotti et al., 2012). Dependiendo de los picos del espectro obtenido se pueden identificar ciertos sólidos desconocidos en las inclusiones, o bien verificar presencia de CO₂ u otros gases.

Existen estudios que utilizan Raman en inclusiones con CO₂ para obtener la densidad y presión de esta inclusión (Frezzotti et al., 2012; Lamadrid et al., 2017). Esto se hace midiendo los picos exactos del espectro de dicho componente, para luego calcular la diferencia entre ellos, llamada doblete de Fermi tal como se ve en la figura 9. Luego se utilizan fórmulas obtenidas experimentalmente que permiten obtener estos parámetros mencionados.

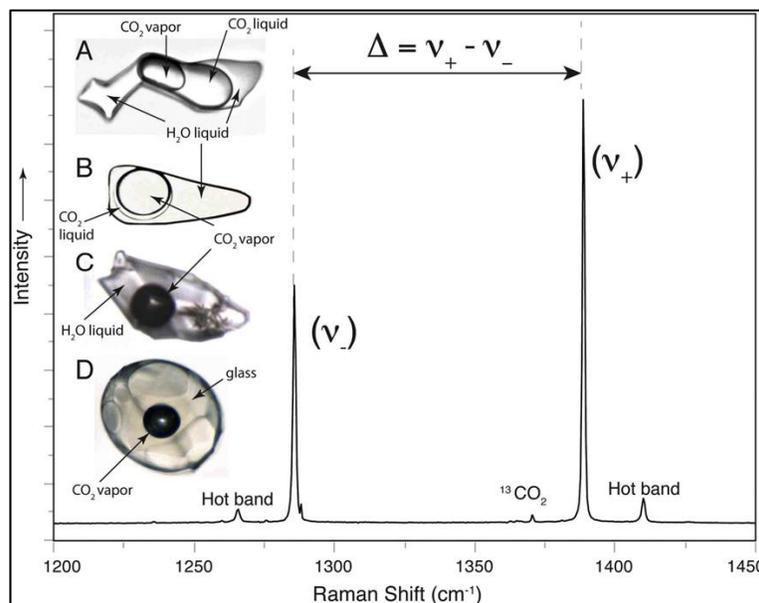


Figura 9 De Lamadrid et al., 2017. Gráfico mostrando los picos característicos de CO₂ y el cálculo del doblete de Fermi.

Las ecuaciones utilizadas de Lamadrid et al., 2017, son, para la presión (psi):

$$(2) \quad P \text{ (psi)} = -176807.6 + (1723.5547 * \Delta) - 1722.7765 * (\Delta - 102.866)^2$$

Y para la densidad (g/cm³):

$$(3) \quad \rho = -36.42055 + (0.354812 * \Delta)$$

Con Δ siendo el doblete de Fermi (cm^{-1}).

Finalmente se puede pasar la presión (psi) a bares con la siguiente ecuación:

$$(4) \quad P (\text{bar}) = P (\text{psi}) * 0.0689476$$

LA-ICPMS

Finalmente, se pueden utilizar análisis destructivos como Ablación Laser (LA-ICPMS). Esta herramienta es básicamente un análisis multielemental de la inclusión. Consiste en un rayo láser que se dispara y vaporiza la muestra, cuyo contenido es liberado en modo de fino aerosol y luego transportado al plasma acoplado inductivamente para una completa vaporización e ionización (Heinrich et al., 2003). Finalmente se usa un sistema de detección fino y sensitivo para una adquisición representativa de datos multielementales de las señales adquiridas del láser, con señales instrumentales mínimas para todos los elementos de interés (Mutchler et al., 2008).

Trabajos anteriores

En Chile no se ha trabajado ampliamente en pegmatitas con un enfoque específico a este tipo de rocas y su potencial enriquecimiento en elementos raros. Un ejemplo de un trabajo es en Chuquicamata, en el Yacimiento Tulipanes, en el que estudian la extracción de material silíceo de una pegmatita (Faunes, 1988).

Por otro lado, recientemente se encontró en la Región de Biobío, en la localidad de Poñen, una pegmatita rica en uranio. Este depósito fue estudiado por académicos y alumnos de la Universidad de Concepción desde el año 2007, y su explotación ya comenzó. Esta pegmatita pertenece a la clase de elementos raros de este tipo de roca, y es un buen parámetro de algo que se podría encontrar en otro lado en Chile en este tipo de rocas (Velásquez et al., 2012; Collao et al., 2012).

Ubicación y accesos

La zona estudiada corresponde a una veta ubicada en la Región de Aysén, al sur del pueblo de Puyuhuapi, específicamente en las coordenadas 44°27'5.62"S/72°35'23.28"W. El acceso a esta área es muy sencillo, pues desde el pueblo mencionado hay que ir en dirección sur por la ruta 7 a lo largo de una distancia de aproximadamente 17 kilómetros, en medio de la carretera austral, tras lo cual a pocos metros de este camino se encuentran las rocas estudiadas. En la figura 10 se puede apreciar esta ruta, con una estrella azul marcando el punto de ubicación de la veta trabajada, en la parte superior del mapa.

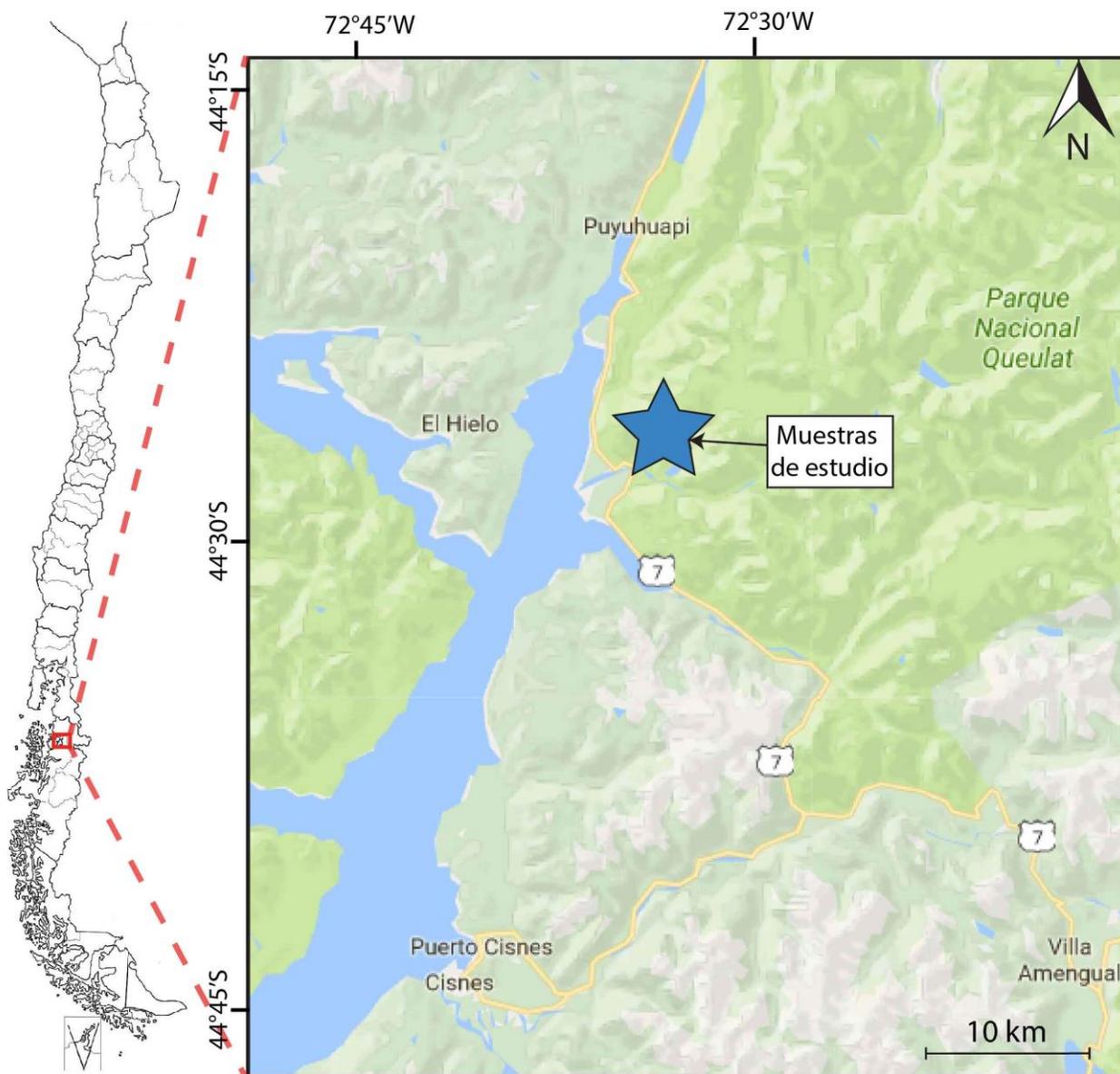


Figura 10: Ubicación de la zona estudiada. Se destaca el pueblo de Puyuhuapi en la parte superior del mapa, y el punto de estudio en una estrella azul al sur de dicha localidad. Modificado de Google Maps (2017).

Marco geológico

Introducción

A continuación, se presenta el marco geológico de las rocas y estructuras presentes en el área de la veta estudiada, las cuales han sido extraídas principalmente del “Mapa geología base área puerto Puyuhuapi, región de Aysén” (Mella y Duhart, 2011) y “Geología preliminar del área de Puyuhuapi” (Mella, 2014).

A grandes rasgos, se observa que han sido reconocidas tres unidades geológicas mayores. Por parte de las rocas estratificadas se tienen secuencias sedimentarias y rocas volcánicas del Cenozoico, agrupadas en la Formación Traiguén (Hervé et al., 1993; Hervé et al., 1994; Silva et al., 2003), así como el Grupo Volcánico Puyuhuapi, y depósitos sedimentarios no consolidados del Cuaternario (Sernageomin, 2003). Las rocas intrusivas, en tanto, son de edad Mioceno, asignadas al Batolito Nor-Patagónico, de composiciones intermedias a ácidas (Hervé et al., 1993; Hervé et al., 1994; Pankhurst et al., 1999). Estructuralmente la zona está dominada por el Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui (SFLO) (Cande y Leslie, 1986; Arancibia et al., 1999), cuya traza de orientación NNE-SSO pasa al oeste del área de estudio por el canal de Puyuhuapi. En la figura 11 se presenta el mapa geológico con una estrella azul en la ubicación de las muestras estudiadas.

Rocas estratificadas

Formación Traiguén (Eoceno-Mioceno):

Corresponde a una sucesión volcanosedimentaria que aflora en borde costero de cordillera principal (Hervé et al., 1995), cuyos afloramientos en se distribuyen en franjas discontinuas de orientación NNE a SSO, definiendo pliegues isoclinales de orientación similar al eje del canal Puyuhuapi ($137^{\circ}/50^{\circ}$). Su litología corresponde a lavas macizas, cuerpos gábricos y en menor medida, tobas de lapilli, brechas volcánicas y areniscas. Su edad en base a estudios geocronológicos Rb-Sr en roca total y U-Pb SHRIMP lo datan del Eoceno-Mioceno (46-20 Ma) (Hervé et al., 1994; Thompson, 2001). Esta formación se interpreta como producto de depositación y volcanismo en cuencas tipo “*pull-apart*” con desarrollo de volcanismo básico submarino, generado en el Oligoceno-Mioceno, en SFLO al sur de los 42° S (Pankhurst y Hervé, 1994).

Grupo Volcánico Puyuhuapi (Holoceno):

Corresponde a un campo volcánico de al menos ocho eruptivos menores aislados que son de conos de escoria, anillos de ceniza-lapilli y se asocian a campos de lava de basalto de olivino, con lavas tipo ‘pahoe-hoe’ y ‘a-a’ de textura porfídica. Se alinean en dirección NE-SO, lo que es consistente con la traza principal de SFLO, con dioritas y tonalitas emplazadas del Batolito Nor-Patagónico. Datos geocronológicos indican actividad desde el Holoceno temprano hasta el siglo XIX. Su morfología sugiere erupciones desde estrombolianas, freatomagmáticas, hasta fisurales. (Mella y Duhart, 2011; Mella, 2014).

Depósitos sedimentarios no consolidados (Pleistoceno-Holoceno):

Estos depósitos se observan de manera general en los entornos del canal Puyuhuapi, al sur del pueblo de igual denominación (figura 11). Corresponden a depósitos de playa, depósitos fluviales, depósitos de remociones en masa, depósitos glacioestuarinos, depósitos morrénicos, depósitos glaciofluviales y depósitos glaciolacustres, que datan del Pleistoceno al Holoceno (Mella, 2014).

Rocas intrusivas

Diorita Risopatrón (Mioceno-Plioceno):

Cuerpo ígneo elongado en dirección NNE a SSO que aflora en borde oriental de canal de Puyuhuapi, principalmente al norte del río Oscuro y en los alrededores del pueblo Puyuhuapi. Se compone principalmente de dioritas equigranulares de grano fino a medio, mesocráticas a melanocráticas, con plagioclasa sódica euhedral a subhedral zonada y maclada, hornblenda verde subhedral, y escasa biotita. Incluye escasos cuerpos de gabrodiorita de grano medio. En alrededores del pueblo se ve cortada por fallas normales (N65-80°E/70-85°S) y diques microdioríticos (N103E/45S), y se suele encontrar intruida por diques tonalíticos con inclusiones máficas (Mella y Duhart, 2011; Mella, 2014). Antecedentes geocronológicos permiten asignarla a franja plutónica del Mioceno (10-20 Ma) (Pankhurst et al., 1999) con un importante evento de deformación dúctil ocurrido en el Plioceno (Cembrano et al., 2002), Edades fueron calculadas por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en biotita (3.5 ± 0.2 Ma) y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en hornblenda (20.2 ± 2.0 Ma).

Tonalita Puyuhuapi (Mioceno):

Cuerpo ígneo elongado en dirección N-S limitado por traza principal de SFLO, que intruye a diorita Risopatrón y aflora al SE del Río Oscuro. Se compone principalmente de tonalitas y granodioritas equigranulares de grano grueso a medio, con plagioclasa subhedral, hornblenda con bordes corroídos, cuarzo con bordes corroídos y extinción ondulosa, y en menor medida biotita anhedral, con apatito, circón y esfeno como minerales accesorios. Incluye diques microdioríticos y enclaves máficos centimétricos a métricos de microdioritas y dioritas de grano fino (Mella y Duhart, 2011; Mella, 2014). Antecedentes geocronológicos permiten asignarla a franja plutónica del Mioceno (10-20 Ma) (Pankhurst et al., 1999), cuya edad es calculada en base a mediciones Rb-Sr en roca total-biotita-anfíbola, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en biotita y hornblenda, trazas de fisión en apatito y U-Th/He en apatito. Se asocia a evento de exhumación ocurrido en Plioceno y hasta posiblemente en el Pleistoceno superior (Pankhurst et al., 1999; Thomson, 2010), lo que indicaría que traza principal de SFLO sería más activa desde dicha edad, sin descartar que sea una falla activa actual (Mella, 2014).

Geología estructural:

El SFLO define la geología estructural del área de estudio, cuya traza de orientación NNE-SSO pasa por canal de Puyuhuapi, al oeste de la ubicación de la veta estudiada (figura 11), y condiciona el emplazamiento de los conos de escoria del Grupo Volcánico Puyuhuapi (Cembrano y Moreno, 1994; Arancibia et al., 1999).

Se ha reportado un tipo de deformación frágil (post Mioceno superior) caracterizada por fallas con diversos indicadores cinemáticos compatibles con régimen dextral transpresional y transtensional a lo largo de las trazas de fallas de dirección NNE-SSO y ENE-OSO (Cembrano y Moreno, 1994; Cembrano et al., 1996; Cembrano, 1998).

Edades de enfriamiento Ar/Ar en biotita en Tonalita Puyuhuapi sugieren un alzamiento comparable con su emplazamiento, a diferencia de la Diorita Risopatrón (poca deformación). Esto sugiere que el régimen transcurrente y alzamiento imperaría principalmente desde el Mioceno medio y que posiblemente el régimen transcurrente anterior al choque de la Dorsal de Chile estaría dominado por movimientos transcurrentes de cizalle simple (Arancibia et al., 1999; Thomson et al., 2010).

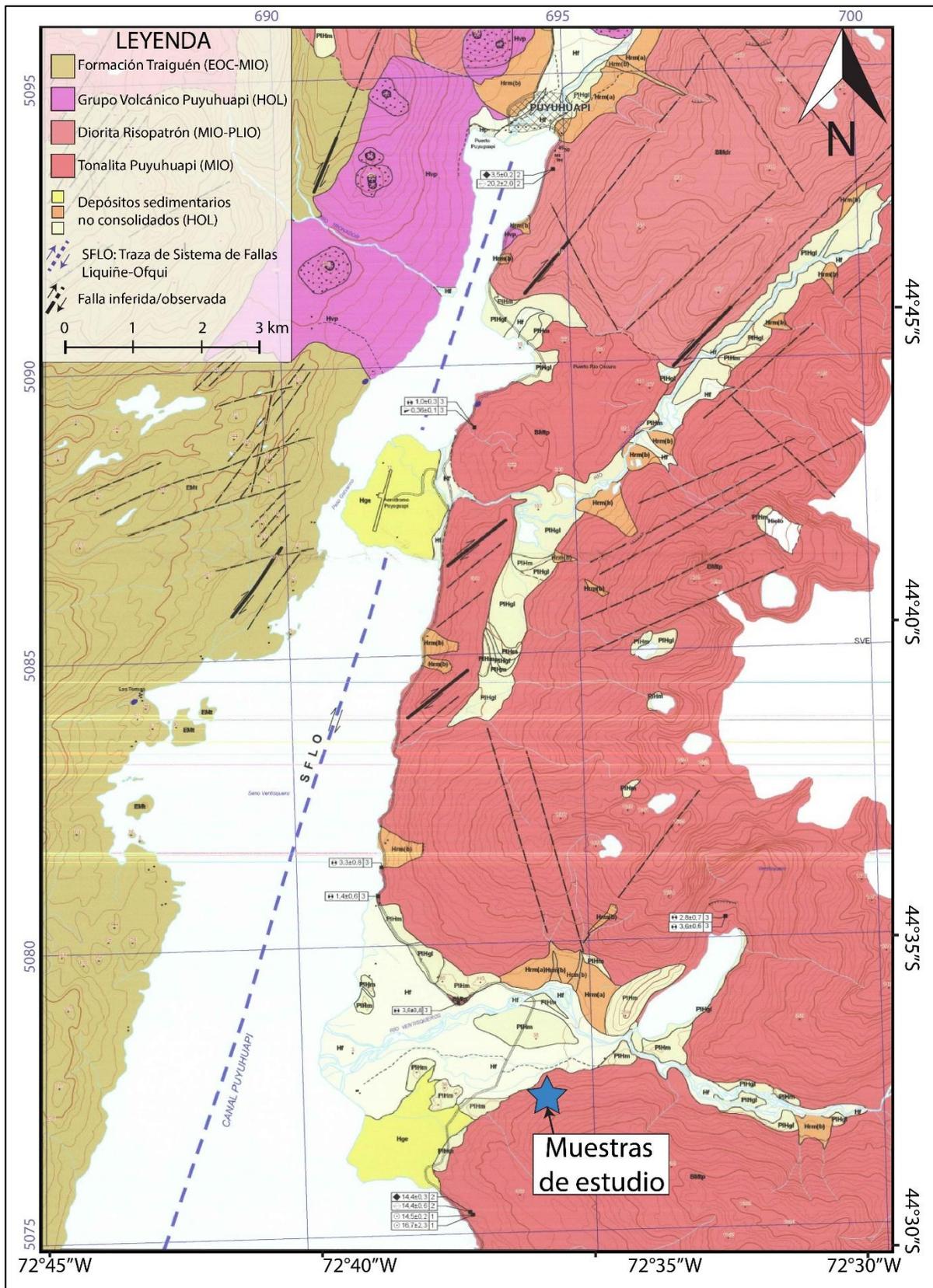


Figura 11: Modificado de “Mapa Geología Base Área Puerto Puyuhuapi, región de Aysén” (Mella y Duhart, 2011). En zona inferior se muestra en estrella azul la ubicación de las muestras de estudio.

Petrografía

Las muestras fueron recolectadas previamente por lo que no se realizó una visita a terreno. En dicha ocasión se adquirieron muestras de la veta en sí en distintos puntos, junto con el contacto con su roca caja.

Metodología

Inicialmente se describió la mineralogía y textura de las pegmatitas de Puyuhuapi a muestras de mano para poder catalogarlas y definir zonas de interés para estudios microscópicos. Se describieron cuatro muestras de distintas partes de la veta para definir sus características conjuntas y posibles variaciones. Se seleccionaron zonas para realizar láminas delgadas.

El estudio microscópico utilizó un microscopio Olympus BX53 acoplado a una cámara digital (figura 12). El microscopio cuenta con aumentos de 4X, 10X, 40X y 100X, y está conectado a un computador para la toma de fotografías mediante el software Linksys32.

Luego, se realizaron estudios microscópicos detallados para caracterizar las texturas y minerales presentes en las rocas, así como también ver la existencia y describir las familias de inclusiones fluidas presentes, para decidir en qué zonas era más recomendable generar láminas dobles pulidas para fases posteriores del estudio de dichas inclusiones. Las láminas estudiadas tienen un espesor de 30 μm .

Posteriormente se generaron láminas dobles pulidas, ideales para el estudio de inclusiones fluidas, pudiéndose observar de mejor manera los distintos arreglos presentes, para finalmente realizar experimentos cuantitativos posteriores en los FIA's seleccionados para dicha labor. Estas láminas corresponden a cortes que tienen un espesor mayor al usual, de unos 70 μm , y que como lo dice su nombre, están pulidas por ambos lados. Se suelen utilizar en minerales de exfoliación difícil o no exfoliables, como cuarzo, que es el caso de este estudio (Goldstein y Reynolds, 1994). Se estudiaron seis muestras de este tipo.



Figura 12: Microscopio Olympus BX53 utilizado conectado con LINKAM THN-600.

El estudio de estas muestras consistió primero en una observación general de todo el corte a 4X para ver donde estaban los FIA's de interés. Luego se procedía a hacer un barrido para abarcar todas las zonas a aumentos de 10X a 20X, dentro de las cuales se observaban con mayor aumento las zonas donde se encontraban FIA's de interés, para una posterior toma de fotografías y descripción detallada de dichas inclusiones. Esta

descripción incluía la realización de esquemas a mano para el mejor entendimiento de su temporalidad con respecto a otros FIA's, además de una caracterización de cada inclusión reportando su forma, tamaño, ubicación, clasificación primaria o secundaria, proporción de líquido con respecto a vapor, presencia o no de sólidos y morfologías especiales como cambios posteriores a su atrapamiento.

Datos y resultados

Las pegmatitas de Puyuhuapi se presentan como vetas de ancho de 1 a 2 metros, variando desde la base del afloramiento observado (figura 13A). Tiene una orientación de rumbo/manteo de N15°W/45°W. Destacan a simple vista su grano grueso, siendo visibles sus grandes cristales de cuarzo y feldespato en el afloramiento, en contacto con una roca caja de grano más fino y color gris (figura 13B).

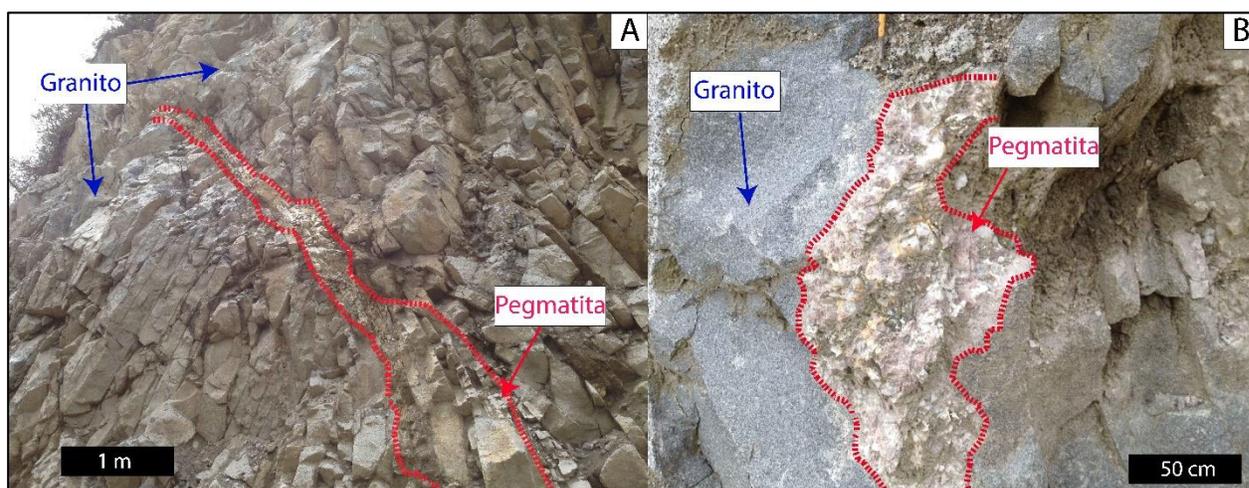


Figura 13: Imagen de la veta estudiada en terreno. (A): Vista desde lejos, observándose como el dique corta al granito caja. (B): Vista desde más cerca, siendo claro el contacto por un visible cambio de color, siendo más clara la pegmatita que el granito.

En la muestra JPT-1 se distingue este contacto, identificándose tres poblaciones de cristales (figura 14A). La roca caja corresponde a un granito fanerítico de grano fino de biotita, mesocrático y equigranular, de grano fino-medio con feldespatos de 1-2 mm y cuarzos de 1-3 mm, plagioclasas de 1-2 mm, con biotita y óxidos de Fe, con un fuerte magnetismo. Se observa una variación de esta roca que corresponde a un granito fanerítico de biotita de grano fino, de iguales características, pero de grano de menor tamaño y con algunos cristales de hornblenda.

En contacto con el granito de grano fino viene la pegmatita en sí, que tiene una composición heterogénea e inequigranular, con textura pegmatítica, holocristalina. Los cristales de feldespato tienen un tamaño de grano que va de 5 a 20 mm, y cubren cerca del 50% de la roca, mientras que los cuarzos tienen tamaños de 5 a 30 mm y abarcan el 40% de la pegmatita. Finalmente se tienen plagioclasas de menor tamaño, de 2 a 5 mm, que abarcan el restante 10%. Tiene algunas zonas aisladas con mica blanca de hasta 10 mm, biotitas de hasta 5 mm y óxidos de Fe representadas en moderados magnetismos

puntuales pero en cantidades marginales. En algunas partes de la pegmatita se observó fuerte alteración en zonas expuestas a la superficie, con presencia de jarosita, arcillas, óxidos de Mn y algo de clorita diseminada.

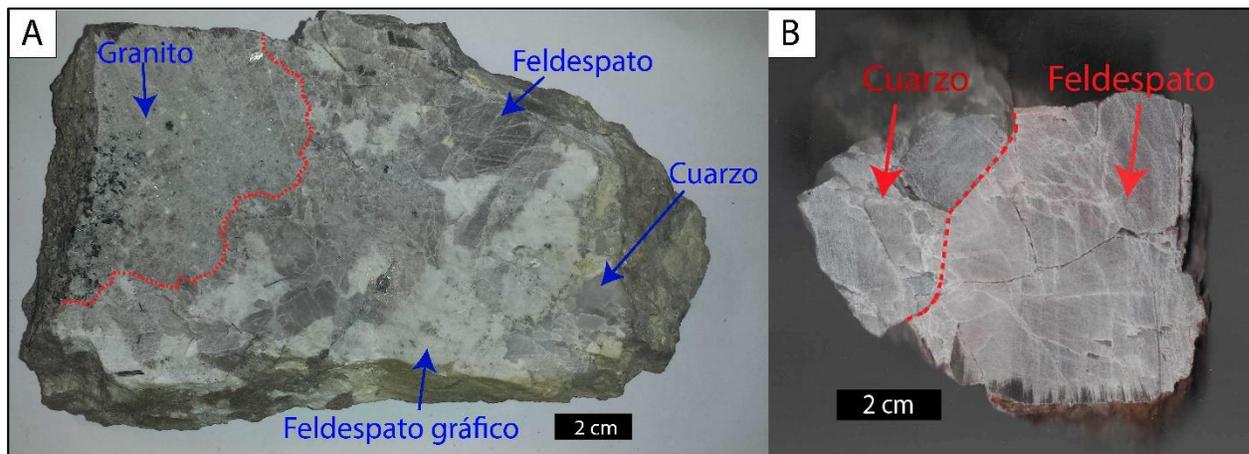


Figura 14: Muestra JPT-1. (A): Se observan marcas que distinguen límite de granito y pegmatita, observándose los principales minerales que componen a esta última. (B): Vista de pegmatita siendo visible cambio de feldespato a cuarzo.

Se puede observar una zonación desde el contacto con la roca caja hacia el centro de la roca (y de la veta), en que el feldespato potásico es lo primero que se presenta desde el borde del contacto, junto con algo de plagioclasa y cuarzo lechoso, y estando al final, y por ende al centro de la veta, el cuarzo vítreo (figura 14A).

El feldespato es rosado, subhedral, observándose en pocas zonas cristales en que se pueden identificar algunas caras cristalinas, pero en su mayoría es anhedral. No es muy clara su dirección de crecimiento, pero algunos cristales presentan una elongación perpendicular al contacto de la roca caja, como se puede observar en a grandes rasgos en zonas de crecimiento de este mineral en un corte de estas rocas (figura 14B).

El cuarzo como se mencionó se identifica en algunas partes como lechoso y otras como vítreo, de acuerdo al color observado macroscópicamente. Tiene textura subhedral, pudiéndose observar en ciertos cristales zonas de crecimiento y caras cristalinas claras, notándose además su dirección de crecimiento, que es, al igual que algunos cristales de feldespato, perpendicular al contacto con la roca caja y borde de la veta, creciendo por lo tanto hacia el centro de esta.

Otros minerales observados en menor proporción son micas, mayormente muscovita (4%), de tono verdoso y cristales de hasta 8 mm, y en menor medida biotita (1%), de color marrón y con cristales menores a 5 mm. Estas se ven inmersas en el feldespato.

En láminas delgadas se observa que el feldespato presenta una textura gráfica solo visible microscópicamente, siendo claro el intercrecimiento de este mineral con cuarzo en su mayoría, y a veces con plagioclasa, con tamaños de estos minerales de hasta 1 mm. Es mayormente subhedral, tal como lo observado en muestras de mano (figura 15).

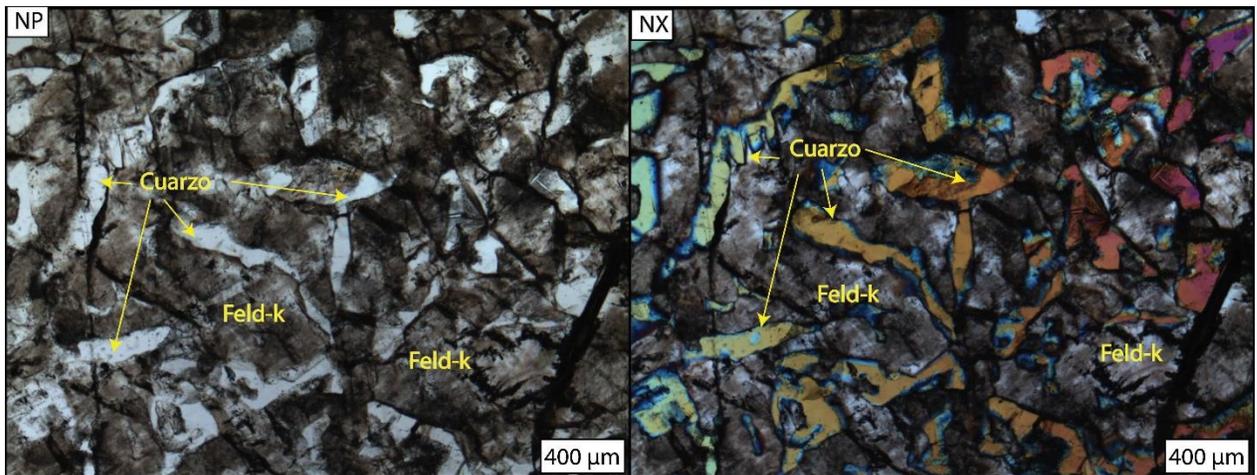


Figura 15: Textura gráfica de feldespato con cuarzo a nícoles paralelos (NP) y a nícoles cruzado (NX).

El cuarzo, en tanto, tiene zonas de color blanco lechoso y otras vítreas, con pocas caras cristalinas visibles en láminas delgadas. Sus cristales alcanzan hasta los 1.5 cm de diámetro. En la parte lechosa destaca la abundante presencia de inclusiones fluidas, tiñendo justamente a este mineral de dicho color, además de notorias fracturas, mientras que, en el cuarzo vítreo, igualmente hay gran cantidad de inclusiones, pero se presenta menos alterado, aunque igualmente con numerosas discontinuidades.

En el cuarzo se encontró de manera diseminada un mineral que posiblemente sea rutilo. Presenta su típica textura en forma de agujas, de largos variables, de hasta 50 µm, pero anchos muy finos, menores a 2 µm (figura 16).

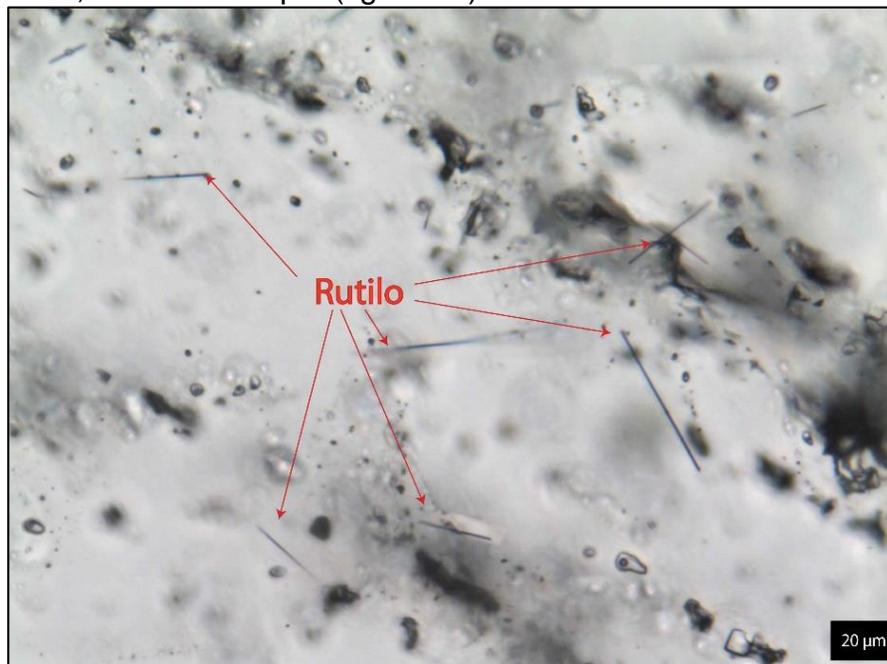


Figura 16: Rutilo diseminado en cuarzo con su textura de agujas.

Inclusiones fluidas

El estudio de inclusiones fluidas se realizó exclusivamente en cuarzo, ya que, según muchos estudios, es un excelente hospedante de inclusiones pues debido a su falta de clivaje y alta dureza tiende a conservarlas de buena forma, a diferencia de, por ejemplo, el feldespato, que se cree que suele tener una larga historia de recristalización, por lo que obtener información de inclusiones del estado inicial y la evolución del fluido se torna muy complejo (London, 2008). Adicionalmente, no se observaron FIA's claros en feldespato, a diferencia del cuarzo, en el que se presentan en abundancia.

Petrografía de inclusiones fluidas

A modo general se encontraron pocas inclusiones primarias, no siendo posible verlas en bordes de crecimiento de cristales claros como suelen aparecer, debido a las pocas caras cristalinas visibles de cuarzo microscópicamente, y cuando se encontraban cristales subhedrales no se veían FIA's claros con su crecimiento. Se encontraron más bien aisladas, en pequeños clústeres y de tamaños pequeños, mientras que otras son de gran tamaño y decrepitadas, que se asume que fueron primarias en el pasado debido a su posición respecto a otras. La mayor cantidad de FIA's observados fueron de tipo secundario, siendo visibles en claras rectas de antiguas fracturas rellenas por el fluido que pasó y dejó como evidencia estas cavidades.

A continuación, se presentan los distintos tipos de inclusiones fluidas encontradas en las muestras estudiadas. Se catalogaron ocho tipos de inclusiones:

Tipo 1: Inclusiones primarias ricas en líquido. Se presentan como clústeres aislados. Están compuestas por un 5% a 15% de líquido y tamaños de 10 a 20 μm (figura 17B). Tienen formas esféricas a ovaladas. A veces son cortados por FIA's secundarios tipo 3 u otros (figura 17A). Se presentan en partes centrales de cristales. Son escasas en las muestras estudiadas, siendo identificadas en dos.

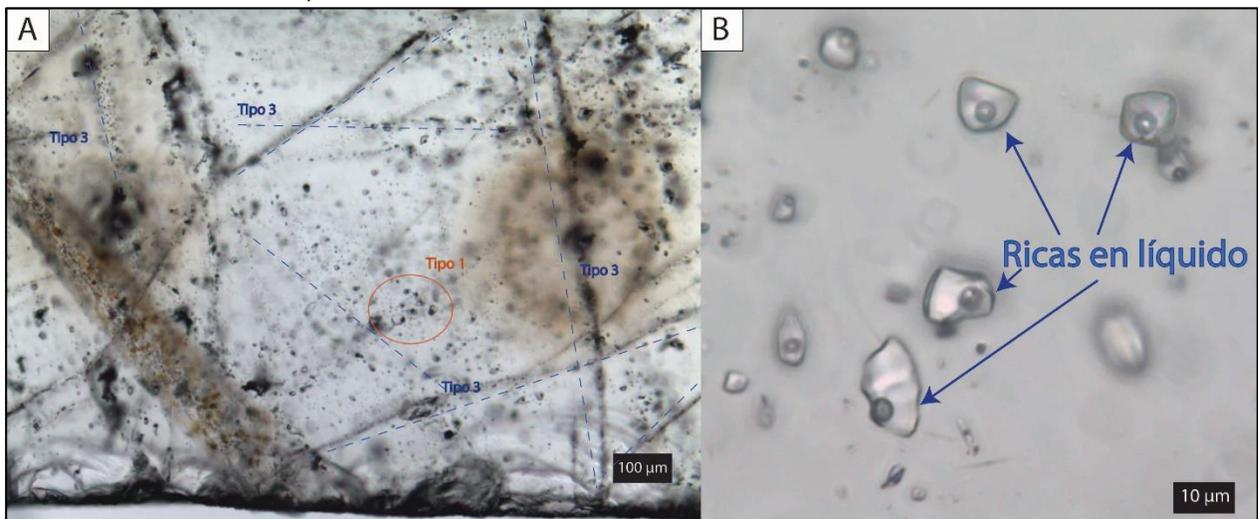


Figura 17: Inclusiones fluidas tipo 1. (A): Ubicación con respecto a otros tipos de inclusiones. (B): Forma detallada de su morfología con más acercamiento.

Tipo 2: Inclusiones primarias ricas en líquido, que a diferencia de las de tipo 1 se presentan visiblemente modificadas, con claros halos de decrepitación con fuga y estrangulamiento (figura 18A). Se presentan igualmente como clústeres aislados. Se componen de un 10 a 20% de líquido, con tamaños mayores, de 20 a 40 μm . A veces presentan algún sólido accidental, pero de proporción menor a la burbuja. Formas muy irregulares (figura 18B). En las muestras se ven varias inclusiones decrepitadas pero las que se presentan aisladas, en partes internas de los cristales de cuarzo y siendo a veces cortadas por FIA's secundarios se asume que son de este tipo.

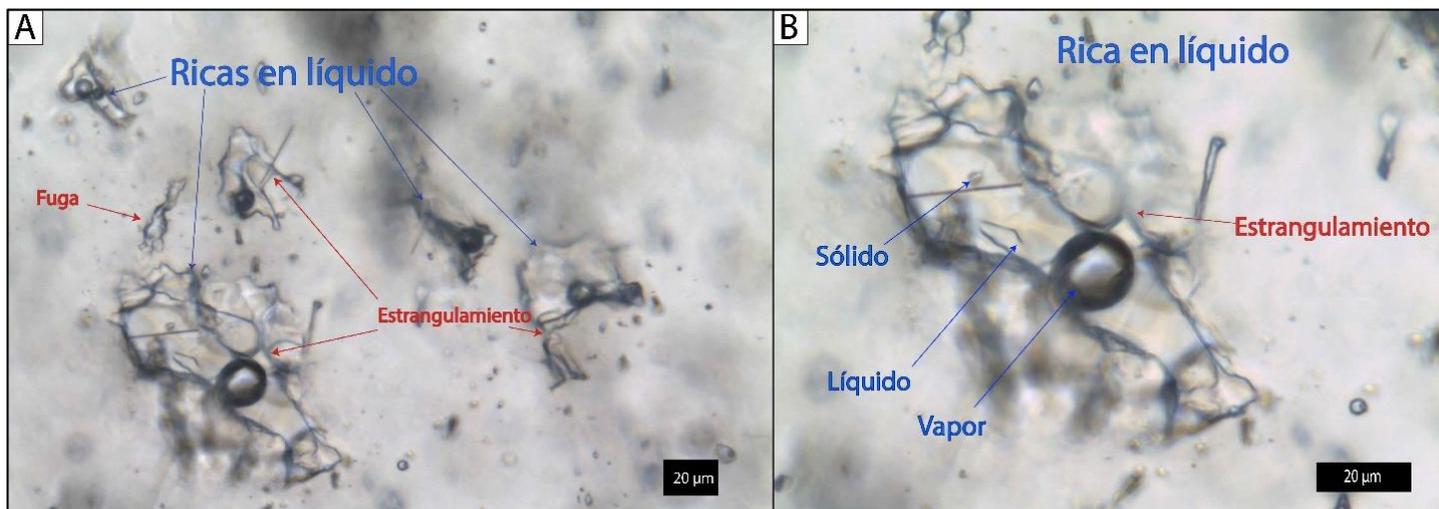


Figura 18: Inclusiones fluidas ricas en líquido tipo 2. (A): Pequeño clúster con inclusiones ricas en líquido con visibles modificaciones de fuga y estrangulamiento. (B): Vista desde más cerca de la inclusión, observándose su proporción mayor de líquido con respecto a vapor, y un pequeño sólido en su interior.

Tipo 3: Secundarias ricas en líquido intragranulares. Son las más abundantes en el cuarzo pegmatítico estudiado, siendo común encontrarlas de manera visible en cualquier parte de este mineral, en claras rectas que pasan por distintas partes de los cristales (figura 19A). En la mayoría de los casos son intragranulares, desapareciendo justo al llegar a bordes de cuarzo, aunque a veces desaparecían antes de llegar a los límites. Son ricas en líquido, con un porcentaje de líquido de 10 a 20%, con tamaños de 5 a 15 μm (figura 19B). En general no tenían sólidos, salvo casos aislados. Presentan forma ovalada a esférica.

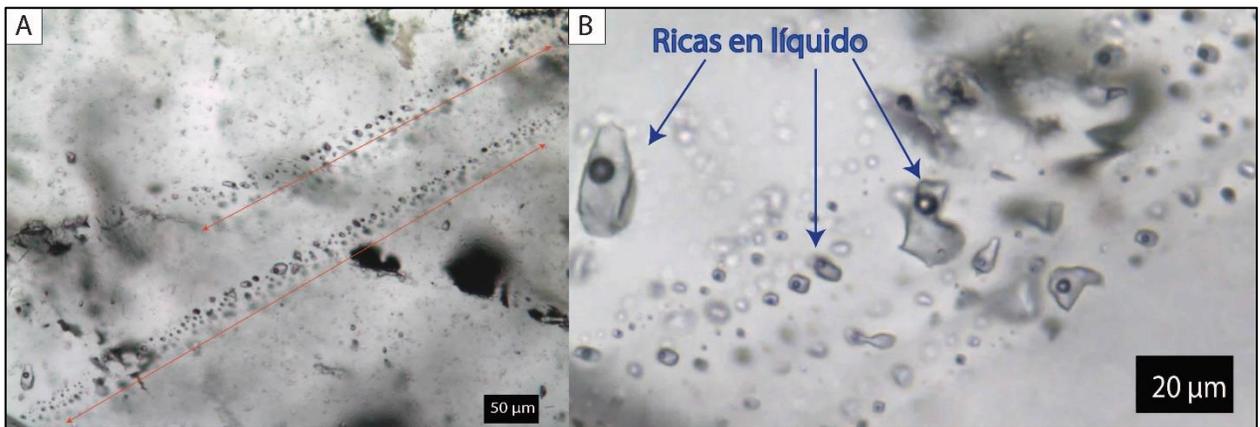


Figura 19: Inclusiones fluidas tipo 3 ricas en líquido en claros trails. (A): Vista general de este tipo de FIA, siendo claro las rectas que forman a lo largo del cuarzo. (B): Vista con de cerca, siendo clara su naturaleza rica en líquido.

Tipo 4: Secundarias ricas en líquido con sólidos. De morfología similar a las de tipo 2. Se presentan como claras rectas. No son tan abundantes en las muestras. Son intragranulares, no sobrepasando límites de cuarzo. Tienen 10 a 15 % de líquido y tamaños de 5 a 10 µm. Presentan forma ovalada a regular. A diferencia de las anteriores contienen sólidos del mismo tamaño de la burbuja, siendo esta proporción consistente en todas las inclusiones de los FIA's analizados (figura 20), por lo que se asume que se trata de minerales hijos (Roedder, 1984). El sólido es subredondeado, y no se pudo identificar con la petrografía, sin embargo, análisis con microsonda Raman indican que dichos minerales serían cuarzo, como se ve en la figura 29A, que son los espectros del cuarzo hospedante de la inclusión y del sólido.

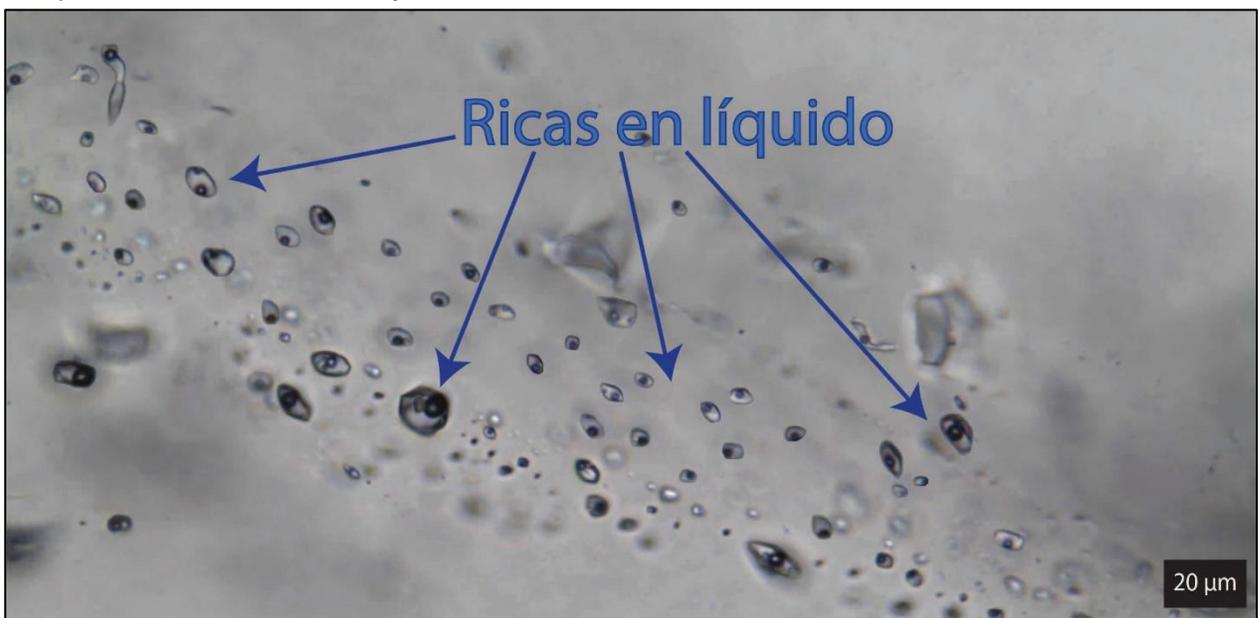


Figura 20: Inclusiones fluidas tipo 4 con visibles sólidos consistentes en las numerosas inclusiones del mismo FIA.

Tipo 5: De forma irregular y de tipo secundario, se presentan en ambos bordes de granos de cuarzo, a veces en claros caminos rectos, pero en su mayoría diseminados, cortando

FIA's tipo 2. Tienen una proporción de CO₂ variable entre ellas, algunas alcanzando cerca del 70% y otras de 25% (figura 21).

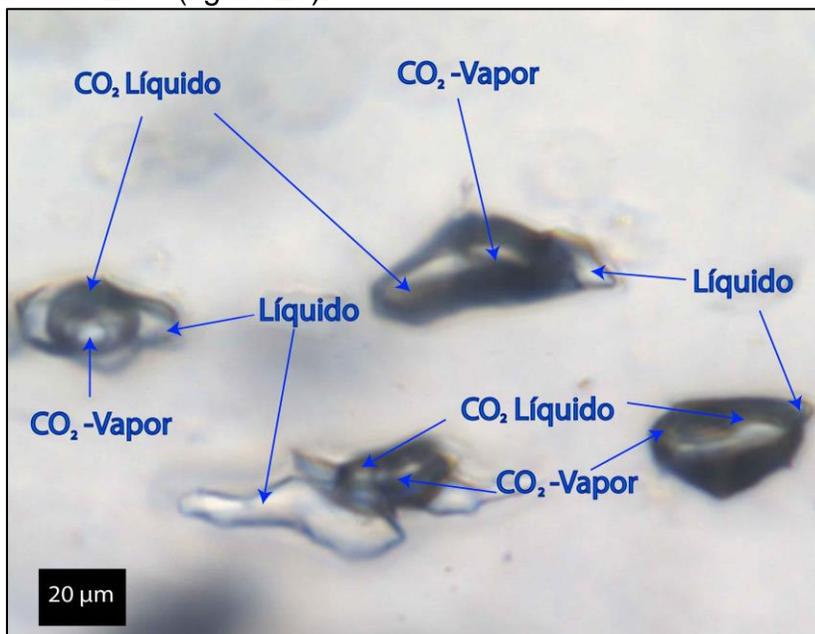


Figura 21: FIA tipo 5 con inclusiones trifásicas en que se ve porción de CO₂ vapor, CO₂ líquido y parte líquida.

Tipo 6: Secundarias con coexistencia de ricas en líquido y CO₂: Este FIA presenta ambas fases en coexistencia tal como se ve en la figura 22. En dicha imagen si bien las IF más oscuras parecen de vapor, al realizar microtermometría se verificó que era CO₂, al nuclear una burbuja bajo los 20°C. Las ricas en líquido, en tanto poseen morfología similar a tipo 2, con formas ovaladas y alargadas, y ratios de líquido de 10 a 15% de líquido.

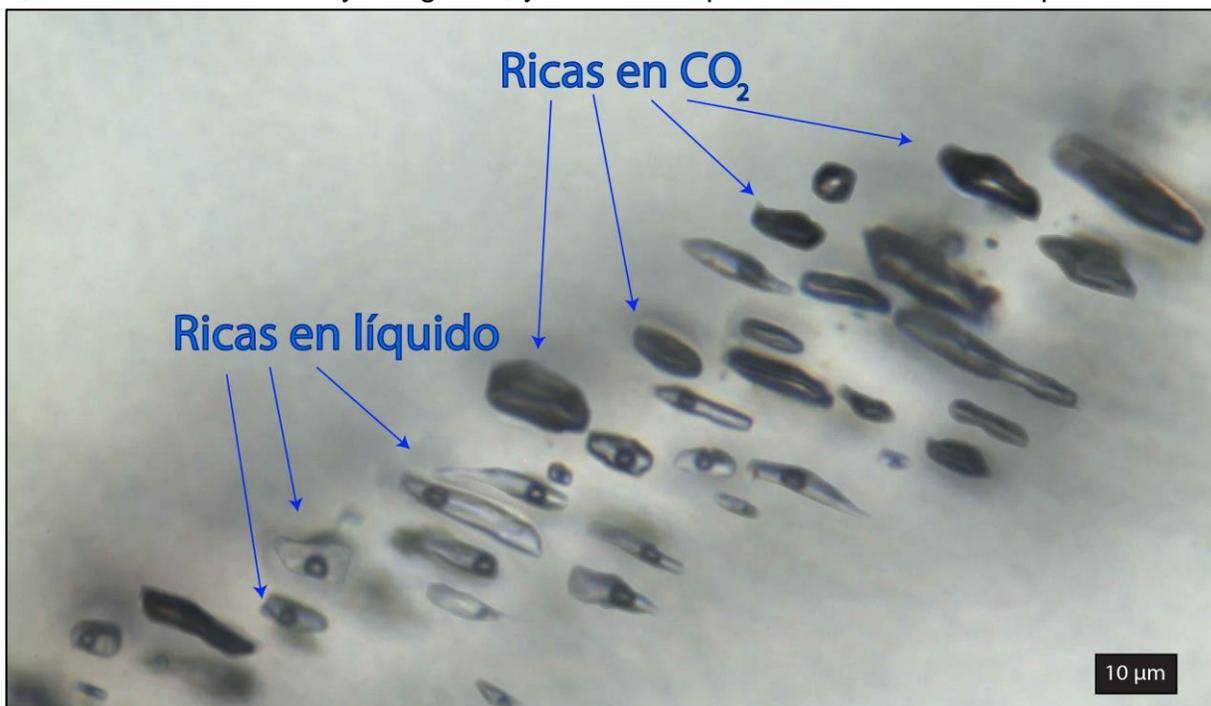


Figura 22: FIA tipo 6 con inclusiones ricas en CO₂ coexistiendo con inclusiones ricas en líquido.

Tipo 7: Secundarias ricas en vapor: Suele cortar otras inclusiones secundarias. Tienen formas ovaladas y tamaños de 5 a 10 μm aproximadamente. La proporción de vapor es muy alta, alcanzando de un 90 a 95%. En pocas inclusiones se alcanza a identificar porción líquida, y cuando se identifica es tan baja su proporción que no se alcanza a identificar cambios de fase en microtermometría (figura 23).

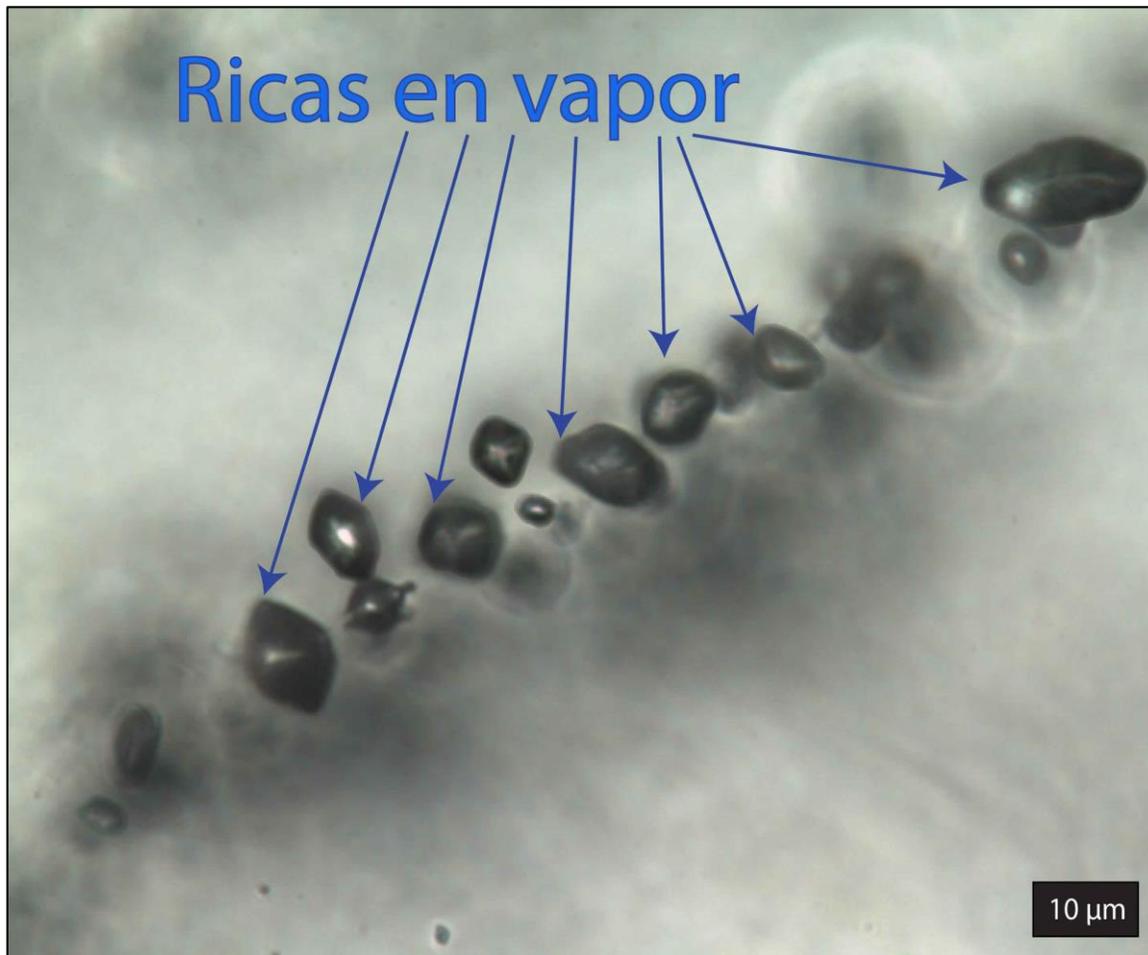


Figura 23: FIA tipo 7 con inclusiones ricas en vapor.

Tipo 8: Ricas en líquido transgranulares. atraviesan granos. Son de morfología similar a las de tipo 2, tanto en ratios de líquido como en forma. Sin embargo, se diferencian en que las de este tipo cortan claramente límites de granos, así como también otras inclusiones secundarias como las de tipo 2 (figura 24).

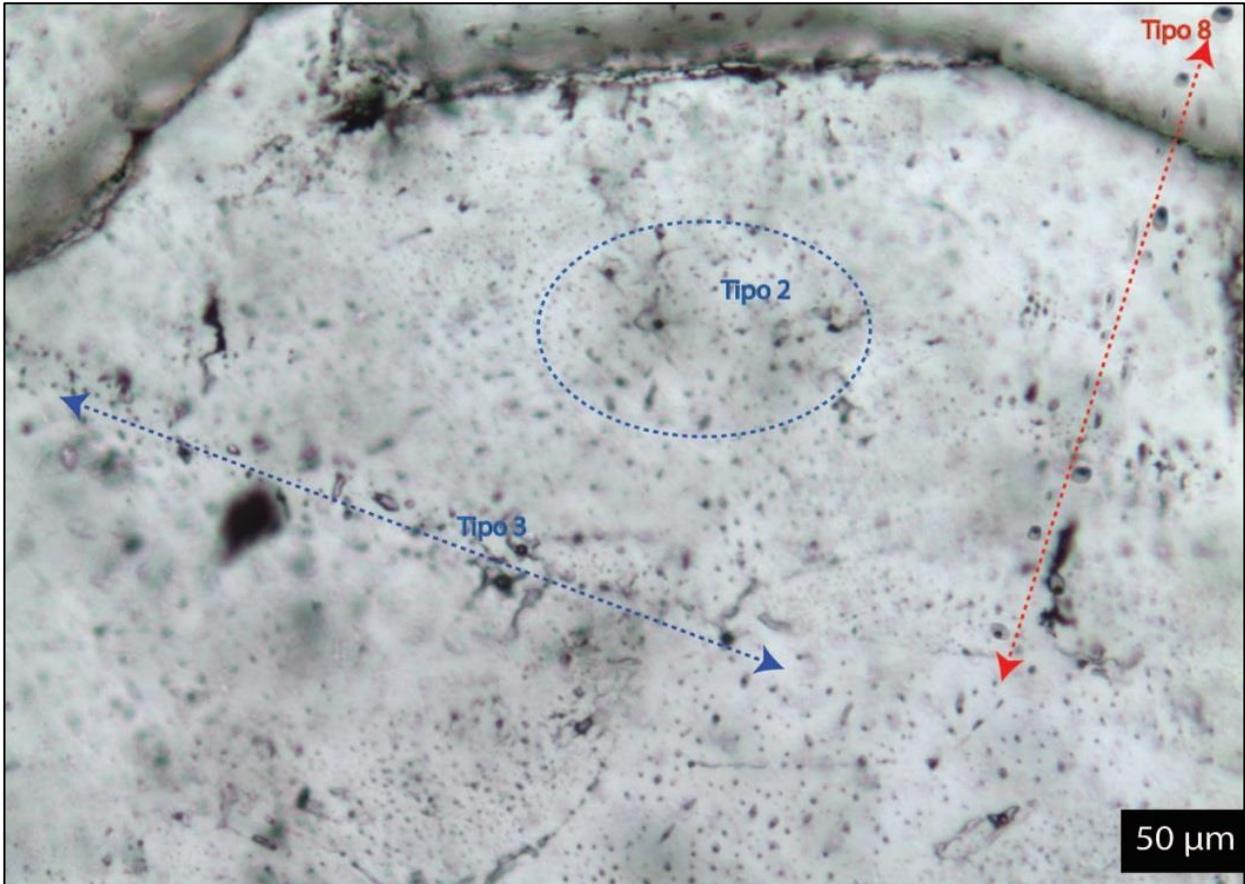


Figura 24: FIA tipo 8 con inclusiones ricas en líquido que cortan a los demás tipos ya descritos además de los límites de granos de cuarzo.

Microtermometría:

Metodología

Una vez seleccionados distintos FIA's de interés se procedió a la realización de microtermometría a fin de conocer datos cuantitativos de la naturaleza de los fluidos que las conforman. Para ello se dibujaron zonas de interés en cada muestra, en las cuales se tomaron fotografías a 4X y luego a 10X, 20X y 40X a fin de contar con suficiente respaldo para lo que viene a continuación. Se dibujó en cada muestra seleccionada zonas de interés de no más de 2 cm x 2 cm, las que fueron cortadas con una sierra de diamantes en el laboratorio de cortes. Una vez hecho esto se dejaron sumergidos en una solución en acetona durante una noche a fin de eliminar el pegamento de los minerales de interés. Posteriormente se pincelaban con mucho cuidado con etanol para eliminar cualquier impureza que pudiera persistir, y finalmente se etiquetaban cada una en su caja respectiva a la muestra y zona de interés catalogada.

Una vez realizado esto se procedió a utilizar la platina calentadora para microtermometría. Esto se realizó con una platina Linkam THM- 600 montado en el microscopio Olympus BX53 (figura 12), capaz de llegar desde los -190°C hasta los 600°C . El enfriamiento se realiza con nitrógeno líquido.

Al comienzo de cada sesión se medía un estándar de H_2O en cuarzo sintético para verificar que no hubiera grandes variaciones en las mediciones realizadas y corregir las mediciones posteriores. Esto permite estimar una exactitud de $\pm 0.9^{\circ}\text{C}$, mientras que la precisión es de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ en temperaturas de entre -10°C a 30°C , y $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en temperaturas mayores. Los enfriamientos se realizaron en una etapa inicial hasta los -160°C a una tasa de 30°C por minuto. Luego se procedía a calentar a la misma tasa hasta observar la temperatura aproximada de último fundido, momento en que anotaba el valor aproximado y se procedía a enfriar de nuevo, pero esta vez se disminuía la tasa al calentar, a 10°C por minuto, de manera de poder reportar de manera exacta el valor del cambio de fase de la inclusión (T_m). Esto se repetía hasta que se estuviera seguro de que las temperaturas reportadas fueran precisas. Cuando fue posible se reportó igualmente la temperatura eutéctica (T_e), momento en que comienza el fundido.

Al calentar, se hizo de manera similar. Se calentaba a una tasa de 50°C por minuto hasta 250°C , o hasta que se observara que la inclusión hubiera homogenizado, y se anotaba el valor aproximado de dicho momento. Luego se detenía el calentamiento y se reiniciaba una vez que hubiera nucleado la burbuja, pero a una tasa de 10°C por minuto una vez que se estuviera cerca del valor reportado anteriormente. De esta manera se calculó de manera exacta el cambio de fase final (T_h). En caso de que algunas inclusiones decrepitaran antes de homogenizar, se reportó la temperatura aproximada en donde esto ocurrió.

De esta manera, se midió la temperatura de último fundido (T_m), la de homogenización (T_h), y cuando fue posible, la temperatura del eutéctico (T_e). En caso de inclusiones con CO_2 se midió el eutéctico de dicho sistema y su homogenización. No fue posible observar en estas últimas la temperatura de fusión de los clatratos.

Durante el estudio se definieron en cinco de las ocho láminas doble pulidas 14 zonas de interés, de las cuales se trabajó en un total 24 arreglos de inclusiones fluidas, con un total de 231 inclusiones medidas. A cada FIA de una zona se le asignaba un número, y luego a cada inclusión de dicho FIA otro número, para poder organizar todos los datos tomados en laboratorio. Todo esto se registró en la tabla 9 (ver anexo B).

Procesamiento de datos

Los datos de estos experimentos fueron procesados de la siguiente manera. La T_m se utilizó para calcular la salinidad (% en peso de NaCl + otras sales si fuera el caso) con las ecuaciones 1 y 2. Luego esta salinidad se utilizó junto a la T_h para calcular las distintas isócoras de todos los tipos de inclusiones fluidas encontradas. Para ello se utilizaron modelos online basados en ecuaciones de estado de los distintos sistemas composicionales pertinentes a cada inclusión, que se pueden consultar en el anexo F (Duan y Zhang, 2006; Duan et al., 2006; Mao y Duan, 2008; Bodnar, 1993; Bodnar y Vityk, 1994). Los sistemas usados fueron básicamente $H_2O-NaCl$, H_2O-CO_2 y $H_2O-NaCl-CO_2$. De esta manera se calculó la densidad de cada inclusión fluida (en ρ_{NaCl} en g/cm^3).

Este cálculo entrega una presión mínima de homogenización para la inclusión fluida. Luego se calcula la presión para temperaturas mayores a la T_h , con lo que se obtienen más datos de P para estas temperaturas. Estos datos se grafican y se obtiene la isócora, que es una línea semi recta, y cuyos resultados se pueden consultar en el anexo F (figuras 45 a 47).

Datos y resultados

Las medidas de microtermometría permitieron la clasificación anteriormente explicada además de la obtención de datos cuantitativos para las inclusiones fluidas estudiadas. A continuación, se detallan los datos relevantes obtenidos para cada tipo medido, cuyos datos se resumen en la tabla 2 y 3, y la figura 26. Cabe decir que en muy pocas IF fue posible identificar el valor del eutéctico, por lo que en la inmensa mayoría se reportaron solo la temperatura de último fundido y la temperatura de homogenización.

Los datos de salinidades y densidades calculados posteriormente se presentan en la tabla 4 para cada FIA medido.

Tipo 1: Se midieron 2 FIA's de este tipo. Estas inclusiones al enfriarlas congelaban cercano a los $-60^\circ C$. Al calentarlas luego de este punto no se pudo observar un eutéctico claro. El T_m medido en tanto variaba entre $-15.3^\circ C$ y $-20.3^\circ C$, con un promedio de $-17.4^\circ C$, mientras que la T_h medida estaba entre $201^\circ C$ y $233^\circ C$, con un promedio de $217^\circ C$. Estos datos implican salinidades promedio de 19.8 a 20.7% en peso de NaCl y densidades de entre 1 a $1.02 g/cm^3$.

Tipo 2: Se midieron 4 FIA's de este tipo. Al enfriarlas tenían un comportamiento similar a las de tipo 1, con un congelamiento cercano a $-65^\circ C$. El punto de último fundido no era tan variable como se podría pensar de unas inclusiones decrepitadas, con un rango de $-9^\circ C$ a $-20.3^\circ C$, con un promedio de $-15.6^\circ C$, y una T_h de $150^\circ C$ a $252^\circ C$, con un promedio

de 201°C. Estos datos implican salinidades promedio de 14 a 21.3% en peso de NaCl y densidades de 0.98 a 1.03 g/cm³.

Tipo 3: Al ser las más abundantes son las que más datos microtermométricos tienen, debido a que en una etapa inicial del estudio se midieron en grandes cantidades. Se estudiaron 13 FIA's. El congelamiento era a una temperatura menor a los de tipo 1 y 2, cercano a los -80°C. En pocas inclusiones se pudo observar la T_e , que fue cercano a los -70°C. El rango de T_m y T_h medido es más variable que en los anteriores tipos, lo que es esperable debido a una mayor cantidad de datos medidos. La T_m medida varía entre -22°C y -33.9°C, con un promedio de -27.1°C, mientras que la T_h medida varía entre 188°C y 240°C, con un promedio de 207°C. Las salinidades promedio de cada FIA medido varían entre 25.4 a 30.4% en peso de NaCl y las densidades de 1.06 a 1.11 g/cm³.

Tipo 4: Este tipo de inclusiones tiene un comportamiento similar al anterior, al igual que en su morfología y ubicación, salvo por los sólidos que las identifican como un tipo distinto. Se midió 1 FIA de este tipo, el cual entregó un rango de T_m entre -30°C y -38.5°C, con un promedio de -35.3°C, y una T_h de 200°C y 230°C, con un promedio de 219°C. Los sólidos no homogenizaban sobre 400C y debido a su forma subredondeada se descartó que fuera halita. Se determinó su posible composición con Microsonda Raman, lo que se explicará en la siguiente sección. La salinidad de este tipo de FIA es de 31.5% en peso de NaCl y la densidad de 1.11 g/cm³.

Tipo 5: Estas inclusiones ricas en CO₂ con una parte líquida visible presentaron temperaturas de los cambios de fase de la parte carbónica y de la líquida. Por un lado, se tiene que el eutéctico de las primeras se observó en -60.2°C, mientras que la homogenización fue en 25.6°C. No se observó el cambio de fase de clatrato. En tanto, la parte líquida tuvo una T_m de -23.4°C. La T_h no se pudo medir ya que antes de que estas inclusiones hubieran homogenizado sufrieron una decrepitación, quedando totalmente negras, tal como se ve en la secuencia de la figura 25. En esta ocasión se pueden ver los distintos cambios de fase vistos a medida que se enfriaba y luego se calentaba, hasta el punto en que se vio este repentino cambio, alrededor de 300°C (figura 25G) en algunas y en otras cercano a 350°C. Al enfriarlas a temperatura ambiente, se quedaron de este color negro, no pudiendo medirse nuevamente (figura 25H). Dado el comportamiento de este tipo de FIA no se pudieron medir salinidades ni densidades ya que la falta del dato de fusión de clatratos no permite estimar la salinidad de la inclusión de buena manera (Hedenquist y Henley, 1985), y dado que tampoco se vio la T_h , tampoco se puede obtener la densidad.

Tipo 6: En este caso en que se tienen coexistencia de dos tipos de inclusiones fluidas, se midieron datos de ambos tipos. Se reportaron 2 FIA's de este tipo. Para las con CO₂, el punto de congelamiento estaba alrededor de -101°C, mientras que el eutéctico de este sistema se observa alrededor de -59.5°C a -60.5°C. La temperatura de homogenización de esta parte carbónica en tanto se observó entre 27.9°C y 28.5°C, con un promedio de 28.1°C. No ha sido posible medir temperaturas de fusión de clatratos ya que no se puede observar esta transición en el microscopio. Las inclusiones ricas en líquido en tanto tienen un rango de temperaturas similar a las de tipo 3, con un punto de congelamiento cercano a -70°C. La T_m está entre -23.3°C y -26°C, con un promedio de -24.6°C, mientras que la T_h va de 190°C a 230°C, con un promedio de 213°C. Las salinidades y densidades

promedio para la parte acuosa varían entre 25.7 a 26.1% en peso de NaCl y 1.066 a 1.068 g/cm³. En tanto, para las IF ricas en CO₂, su T_h implica una densidad de 0.648 a 0.652 g/cm³. Dado que no se pudo medir la temperatura de clatrato, este último valor es una cantidad aproximada, pero no el real, que podría ser mayor o menor dependiendo del resultado.

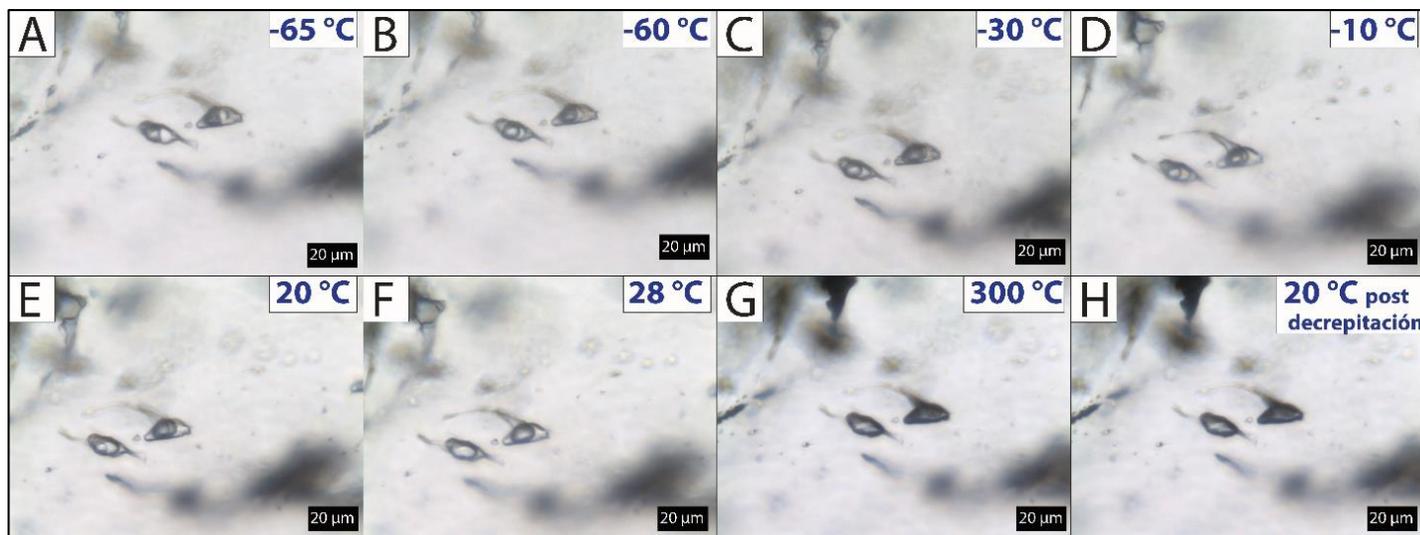


Figura 25: Secuencia de cambios de fase de inclusión fluida tipo 5 rica en CO₂ con porción líquida visible ante ensayos de microtermometría. (A): Al enfriar, se observa que a -65°C se tiene una inclusión congelada, con el CO₂ sólido visible. (B): Al empezar a calentar, se observa la T_e alrededor de -60.2°C por la fusión del CO₂ sólido. (C): Con el continuo aumento de temperatura, a -30°C se pueden aún ver cristales de hielo en la parte rica en líquido, que desaparecen alrededor de -23.4°C. (D): A los -10°C, una vez fundidos los sólidos congelados, se pueden ver las 3 fases típicas de las inclusiones con CO₂, que son CO₂ gaseoso, CO₂ líquido y porción líquida. (E): Al calentar a 20°C se sigue observando lo mismo, no pudiéndose observar el cambio de fase correspondiente al clatrato que debería estar entre -10 y 10°C (Hedenquist y Henley, 1985). (F) La T_h de la parte de CO₂ es a líquido, a los 25.6°C. (G): Una vez calentado hasta 300°C no se consiguió la homogenización, pero si sucedió una decrepitación, quedando totalmente negras estas inclusiones. (H): Finalmente, una vez enfriado a temperatura ambiente se observa que las inclusiones se mantuvieron en su estado decrepitado, no pudiendo por lo tanto iterar este proceso de microtermometría.

Tipo 7: En pocas inclusiones se alcanza a identificar porción líquida, y cuando se identifica es tan baja su proporción que no se alcanza a identificar cambios de fase en microtermometría, por lo que no se tienen datos microtermométricos de este tipo de inclusiones.

Tipo 8: Este tipo de inclusiones de morfología similar a las de tipo 2, fueron diferenciadas de estas por datos genéticos y microtermométricos. Tenían un punto de congelamiento menor, cercano a los -60°C. En tanto, la T_m observada varía entre -12.4°C y -16.9°C, con un promedio de -14.4°C, mientras que la T_h va de 165°C y 200°C, con un promedio de 179°C. Las salinidades promedio varían entre 17.5 a 18.6% en peso de NaCl, y las densidades van de 0.99 a 1.02 g/cm³.

Muestra	Zona	Temporalidad	Tipo	FIA	N° de medidas	T_m prom.	T_m máx.	T_m mín.	T_h prom.	T_h máx.	T_h mín.
N1	3	Primaria	1	N132	6	-17.9	-16.1	-20.3	225.3	233	215
N5	2	Primaria	1	N523	5	-16.9	-15.3	-18	207.6	215	201
N6	1	Primaria	2	N611	8	-11	-9	-12.2	194.7	230	167
N5	1	Primaria	2	N511	8	-15.2	-13.7	-16.2	176.6	205	150
N6	3	Primaria	2	N631	5	-17.6	-14.5	-19.5	205.2	235	180
N5	2	Primaria	2	N521	10	-18.5	-16.9	-20.3	226.2	252	214
N3	2	Secundaria	3	N321	12	-24.1	-22	-27.6	201	208	188
N3	2	Secundaria	3	N323	14	-23.9	-23.1	-24.7	198.4	210	186
N3	1	Secundaria	3	N311	9	-25.4	-23.1	-28.9	211.7	222	207
N3	1	Secundaria	3	N312	7	-23.9	-23.3	-24.9	205.6	208	201
N3	1	Secundaria	3	N314	13	-24.3	-24	-25.1	209.7	216	199
N2	1	Secundaria	3	N211	8	-27.5	-24.9	-28.4	237.4	240	234
N2	1	Secundaria	3	N212	9	-28.2	-27.4	-28.8	211.4	214	205
N2	2	Secundaria	3	N221	8	-28.6	-27.7	-29.5	208.2	212	203
N2	3	Secundaria	3	N231	10	-28.2	-26.7	-29.9	197.1	208	193
N2	3	Secundaria	3	N232	7	-28	-26.5	-30.1	199.5	202	197
N1	1	Secundaria	3	N111	8	-26.3	-24.4	-27.3	196.5	198	194
N1	1	Secundaria	3	N112	8	-30.7	-30.2	-31.3	209.7	216	206
N1	3	Secundaria	3	N131	13	-32.6	-31.8	-33.9	207.3	210	199
N1	2	Secundaria	4	N121	13	-35.3	-30	-38.5	219.2	230	200
N6	4	Secundaria	6	N641	7	-24.8	-23.5	-26	219.2	221	203
N3	3	Secundaria	6	N331	17	-24.3	-23.3	-25.4	206.5	230	190
N3	1	Secundaria	8	N313	8	-15	-14.1	-16.9	184.4	200	170
N3	2	Secundaria	8	N322	5	-13.7	-12.4	-14.4	173.3	184	165

Tabla 2: Resumen de promedios de cada FIA medido, con sus valores máximos y mínimos de T_m y T_h .

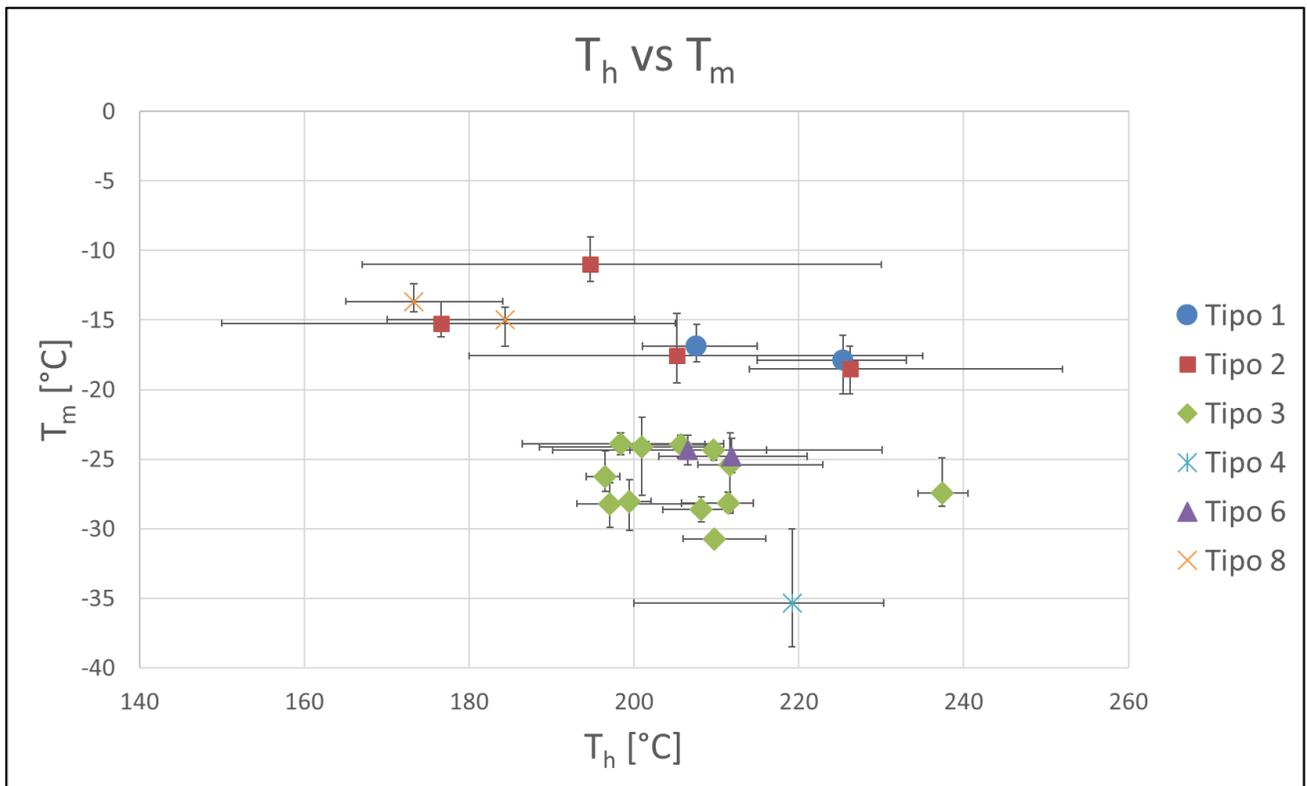


Figura 26: Gráfico mostrando T_h versus T_m de cada tipo de inclusión fluida catalogada.

Tipo	Temporalidad	T_m promedio	T_m máx.	T_m mín.	T_h promedio	T_h máx.	T_h mín.
1	Primaria	-17.4	-15.3	-20.3	217	233	201
2	Primaria	-15.6	-9	-20.3	201	252	150
3	Secundaria	-27.1	-22	-33.9	207	240	186
4	Secundaria	-35.3	-30	-38.5	219	230	200
6	Secundaria	-24.6	-23.3	-26	213	230	190
8	Secundaria	-14.4	-12.4	-16.9	179	200	165

Tabla 3: Resumen de microtermometría separa para cada tipo de FIA medido

FIA	Tipo	T _m (°C)	T _h (°C)	Densidad (g/cm ³)	Salinidad (% en peso de NaCl)
N132	1	-17.9	225	1.008	20.7
N523	1	-16.9	208	1.019	19.8
N611	2	-11	195	0.989	14
N511	2	-15.2	177	1.036	18.3
N631	2	-17.6	205	1.026	20.4
N521	2	-18.5	223	1.012	21.3
N321	3	-24.1	201	1.073	25.6
N323	3	-23.9	198	1.073	25.4
N311	3	-25.4	212	1.07	26.4
N312	3	-23.9	206	1.067	25.5
N314	3	-24.3	210	1.066	25.7
N211	3	-27.5	237	1.058	27.7
N212	3	-28.2	211	1.086	28.1
N221	3	-28.6	208	1.092	28.4
N231	3	-28.2	197	1.098	28.2
N232	3	-28	199	1.096	28.1
N111	3	-26.3	197	1.089	27
N112	3	-30.7	210	1.1	29.5
N131	3	-32.6	207	1.111	30.4
N121	4	-35.3	219	1.111	31.5
N641	6	-24.8	212	1.067	26
N641 CO ₂	6	-59.5	28,3	0.648	No medible
N331	6	-24.3	207	1.069	25.7
N331 CO ₂	6	-60.5	28,1	0.653	No medible
N313	8	-15	184	0.995	18.1
N322	8	-13.7	173	1.028	16.8

Tabla 4.: T_m promedio, T_h promedio, densidad promedio y salinidad promedio para cada FIA medido en este estudio. La densidad fue calculada con ecuaciones de estado del sistema composicional al que las inclusiones pertenecen, que se puede consultar en el anexo F. La salinidad fue calculada con la fórmula de Bodnar (1993). Cabe destacar que los FIA's con CO₂ no tienen su salinidad pues no se vio el punto de fusión de clatrato.

Raman

El instrumento utilizado se compone de un JY Horiba LabRam HR800 y un LaserPhysics Reliant 100S-514nm argon laser (figura 27A). La potencia utilizada en la fuente fue de 42 mW y en la muestra de 6.3 mW. El láser LabRam HR utiliza un ancho de rendija de 150 μm y una apertura confocal de 400 μm . La excitación se provee con ondas de 514 nm (verdes). El valor promedio de cada 3 colecciones de 45 segundos fue tomado para determinar picos de Raman a cada presión. El láser usado utiliza un objetivo de 100X. Se utilizó una luz de neon para calibrar con picos conocidos en 1031.4 y 1458.6 cm^{-1} , la cual se comparó con la medida para efectuar correcciones al valor real.

Los datos entregados por Raman corresponden a archivos .txt o labSpec que pueden ser procesados en Excel u otros softwares, y que al graficarlos entregan el espectro característico de este instrumento, como el de la figura 27B.

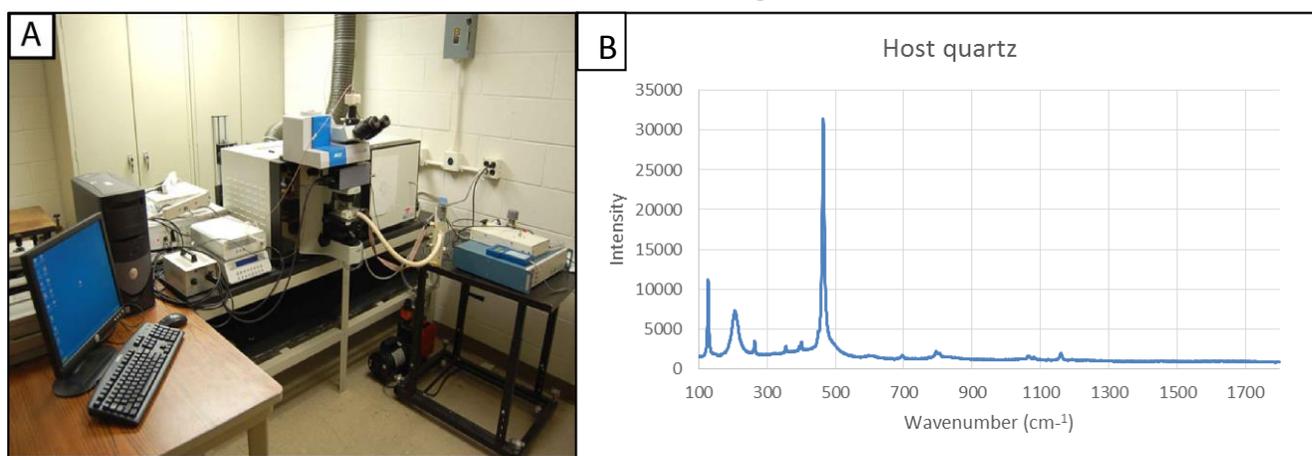


Figura 27: (A): Raman utilizado conectado a microscopio y Linkam, de Virginia Tech, USA (<http://www.geochem.geos.vt.edu/fluids/facilities.shtml>). (B): Ejemplo de espectro obtenido al procesar datos de Raman.

Datos y resultados

Esta herramienta fue utilizada para identificar los sólidos de las inclusiones fluidas tipo 4. Además, se midió el espectro de las inclusiones ricas en CO₂ de tipo 5 y 6, además de las de tipo 7 para identificar el componente gaseoso de estas inclusiones.

En las tipo 4 se disparó el láser al sólido de la inclusión fluida y al mineral en que estaban hospedadas. Ambos resultaron ser cuarzo ya que sus picos coinciden con los de la bibliografía (Frezzotti et al., 2012). Se hizo de esta manera para comparar los espectros de ambos y verificar que el primer disparo no haya sido al mineral huésped por alguna inclusión que no era lo suficientemente superficial (figura 28A).

En las inclusiones de tipo 5 y 6, con la microtermometría estaba claro que se tenía CO₂, y el espectro obtenido es justamente el característico de este compuesto. La ventaja es que ahora se pudo obtener el doblete de Fermi, que se relaciona directamente con la presión mínima de la inclusión fluida, por lo que en el anexo C se entregan estos valores obtenidos en todas las inclusiones ricas en CO₂. En las de tipo 7 ricas en vapor, en tanto,

se observa que el espectro obtenido corresponde al igual que los anteriores a CO_2 , por lo que este es el componente gaseoso de estas inclusiones (figura 28B).

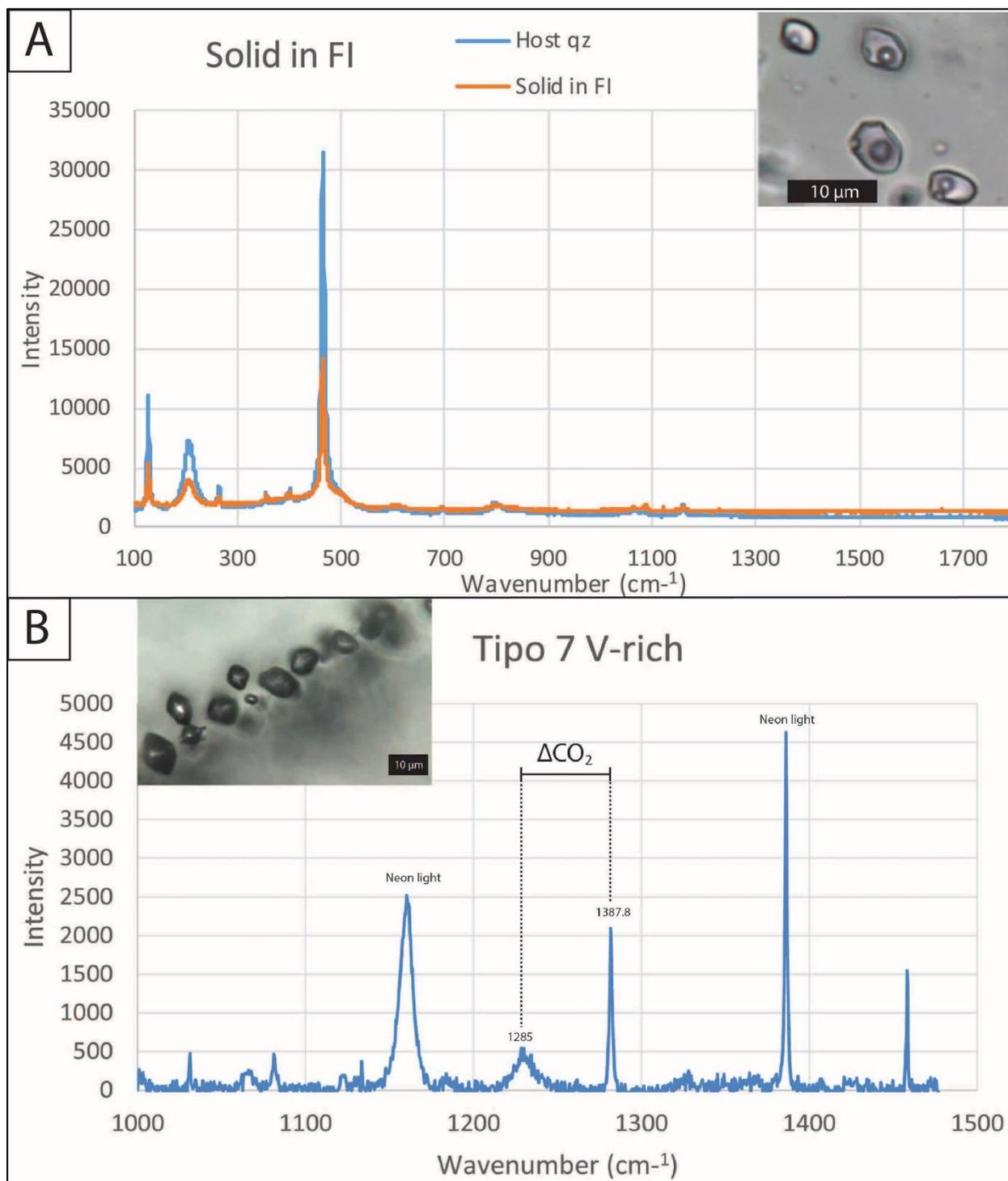


Figura 28: Espectros Raman. (A): Espectro de sólidos de inclusiones tipo 4 en comparación con cuarzo huésped. (B): Espectro de inclusiones ricas en vapor tipo 7, correspondientes claramente a CO_2 , marcándose también el espectro de las luces de Neón utilizadas en el experimento.

Una vez obtenidos estos espectros se midió el doblete de Fermi. Sin embargo, la fórmula utilizada de Lamadrid funciona para un rango muy acotado de dobletes de Fermi, que para el caso de las inclusiones tipo 5 y 6, se escapaban del rango. Por ende, sólo se pudo medir la presión mínima de manera confiable para las de tipo 7 ricas en vapor.

De esta manera, se utilizó la ecuación (2), (3) y (4) para dobletes de Fermi obtenidos en este tipo de FIA's, cuyos resultados se resumen en la tabla 5.

ΔCO_2	Presión (psi)	Densidad (g/cc)	Presión (bar)
102.8761	504.3415	0.10	34.8
102.9004	544.3458	0.11	37.5
102.9977	684.1566	0.14	47.2

Tabla 5: Resumen de densidades y presiones calculadas con fórmula de Lamadrid et al. (2017) para las inclusiones analizadas, de muestra "N3-3 FIA13".

Las densidades y presiones calculadas con este método para las inclusiones tipo 7 entregan valores de 0.1 a 0.14 g/cm³ y presiones mínimas de 34 a 47 bares.

LA-ICPMS

El LA-ICPMS utilizado consiste en un Agilent 7500ce IPMS acoplado con un sistema de ablación láser Geolas (figura 29A). Tiene una resolución espacial hasta de 5 μm y una celda de reacción octopole para análisis de Ca con límites de detección menores que los usuales. Se midió en “*counts per second*”. Cada medida fue realizada con un estándar externo NIST610 medido en cuatro ocasiones. Para el caso de inclusiones fluidas. Se utilizó como estándar interno el valor de la temperatura de último fundido (T_m) obtenida mediante la microtermometría. En cambio, para el caso de medición de concentraciones en el mineral huésped, se utilizó como estándar interno la forma de reducción a 100% óxidos. Para los límites de detección se utilizó σ_3 por presentar menor variación estadística en el total de datos analizados que σ_2 .

Se disparó a cuatro muestras con inclusiones representativas de distintas etapas relevantes del estudio, y en total se obtuvieron nueve espectros de intensidad versus tiempo con 42 elementos analizados. Los tiempos de lectura de cada elemento se pueden consultar en el anexo D, tabla 20.

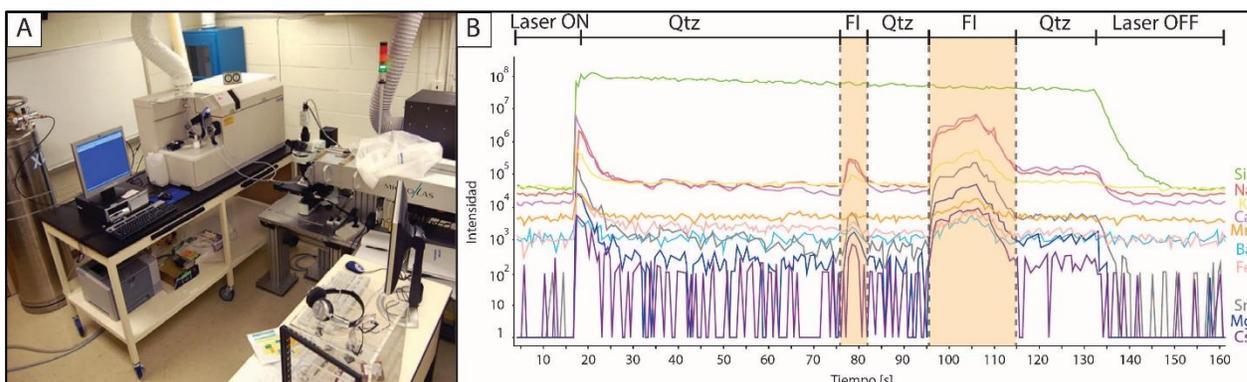


Figura 29: (A): LA-ICPMS utilizado. Ambos ubicados en Virginia Tech, USA. De <http://www.geochem.geos.vt.edu/fluids/facilities.shtml>. (B): Ejemplo de espectro obtenido al procesar datos de LA-ICPMS, con énfasis en intervalo donde se ubica la IF analizada.

Procesamiento de datos

Los archivos entregados por LA-ICPMS fueron procesados por el software AMS 1.1.1 (Mutchler et al., 2008) que importa espectros de intensidad vs tiempo que una vez analizados exporta tablas de datos con las concentraciones de elementos, límites de detección, y otros datos que se pueden consultar en cada muestra analizada en el anexo D.

Un ejemplo de el modo de analizar estos espectros se muestra en la figura 29B, en la que se puede ver un esquema básico de la obtención de los espectros de los elementos a analizar, siendo clave en un principio el momento en que el láser empieza a funcionar, donde la señal del elemento del mineral hospedante se dispara (“Laser On” en figura 29B). En este caso dado que se hizo en cuarzo, el Si (señal verde) se dispara por sobre otros elementos. Luego, se puede observar el momento en que se llega a la inclusión fluida, donde se dispara principalmente el Na (señal roja), junto con otros elementos

importantes que puedan estar en esta cavidad (“FI” en figura 29B). Finalmente, cuando se termina de ablasionar la inclusión y se apaga finalmente el láser (“Laser OFF” en figura 29B).

Cabe decir que para el ingreso de los distintos archivos al programa previo al procesamiento se dejó de lado el Si y Sc, elementos que estaban exclusivamente en el cuarzo huésped debido a que así se minimizaba el aporte de impurezas que podrían estar en él y no en las inclusiones fluidas estudiadas. Además, luego de obtener las tablas de datos con los valores de las concentraciones se realizó un análisis de los espectros para sólo tomar en cuenta en el estudio los elementos que se disparaban con las inclusiones, teniendo cuidado en que coincidieran con los picos de Na, de manera de que se ignoran los demás elementos que tienen concentraciones en las tablas pero que no tienen relación con el fluido.

Datos y resultados

Se ablasionaron IF en FIA's de tipo 2, 3, 4, 7, debido a que representan gran parte del fluido estudiado y debido también al avance del trabajo al momento de la realización de este experimento. Un resumen de los datos relevantes se presenta en la tabla 6, con los elementos encontrados en el fluido de interés, además de un ratio de los cationes importantes para el estudio.

Tipo 2: En este tipo de inclusiones permitieron ver que los principales cationes presentes en este fluido son, por orden de abundancia, Na, K, Ca, Mn, Fe. Además, se observa presencia de B (269 a 923 ppm), Sr (17 a 88 ppm), Cs (13 a 30 ppm), Ba (10 a 51 ppm). Un espectro de una inclusión característica se observa en la figura 30.

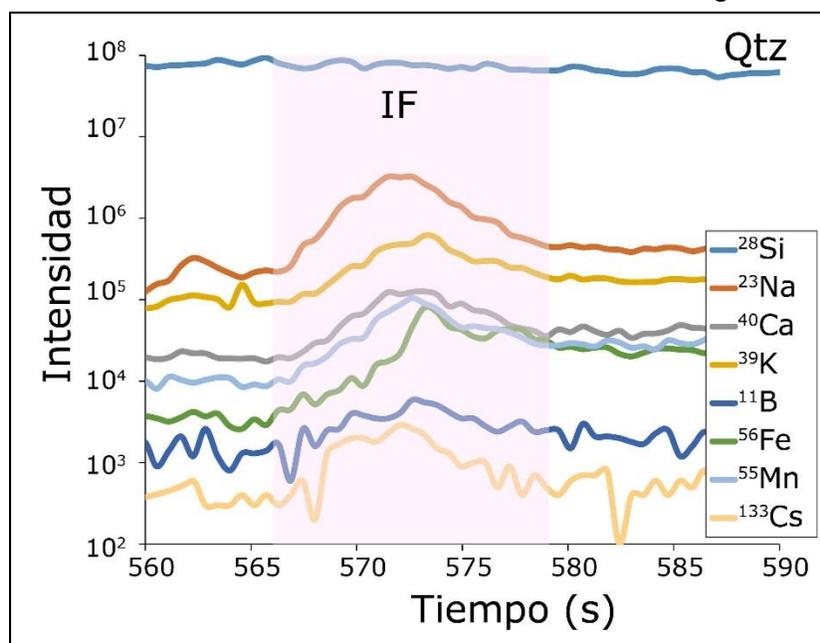


Figura 30. Espectro de LA-ICPMS de inclusiones ricas en líquido tipo 2.

Tipo 3: A diferencia de las de tipo 2, acá el Na y Ca dominan por sobre los demás cationes, siendo un ratio de variable en que a veces había más Na que Ca y otras inclusiones en que era al revés (ratios Na/Ca de 0.9 a 1.5). Les siguen en abundancia K, Mg, Fe, Mn. Además, también se tiene Ba (87 a 275 ppm), Sr (471 a 1109 ppm) y Cs (18 a 34 ppm) (figura 31).

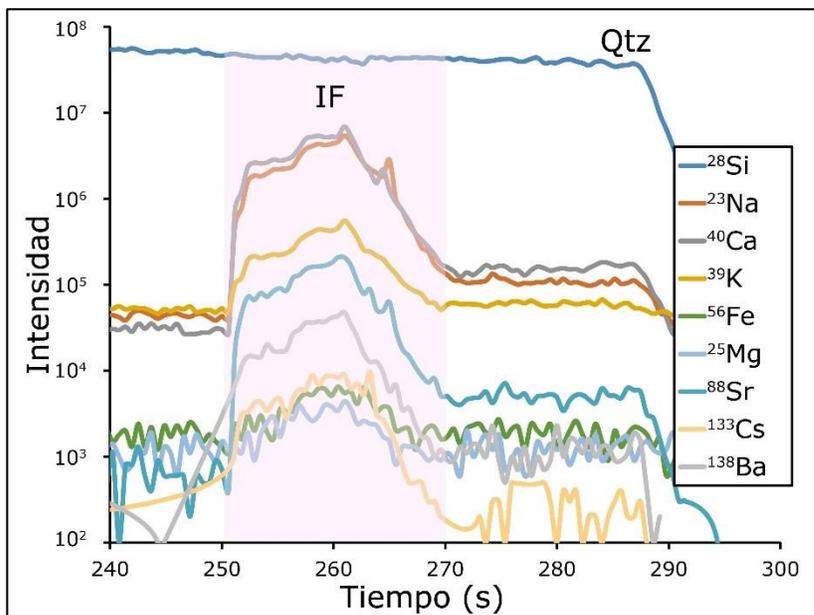


Figura 31: Espectro de LA-ICPMS de inclusiones ricas en líquido tipo 3.

Tipo 4: Similar al tipo anterior. Domina el Na y el Ca en similares proporciones (ratio promedio de 0.83), y luego le siguen K, Fe, además de Sr (476 a 1113 ppm) y Ba (81 a 130 ppm) (figura 32).

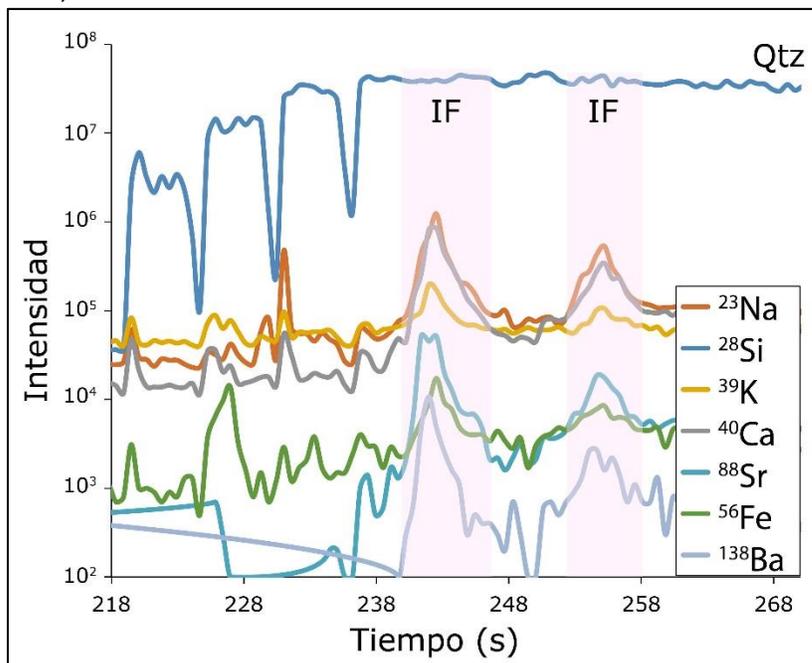


Figura 32: Espectro de LA-ICPMS de inclusiones ricas en líquido tipo 4.

Tipo 7: Análisis por La-ICPMS en algunas de estas inclusiones ricas en vapor indican que cationes principales son al igual que en las anteriores, por orden de abundancia, Na, K, Ca, Fe. Además, hay presencia de Sr, Cs y Ba (figura 33).

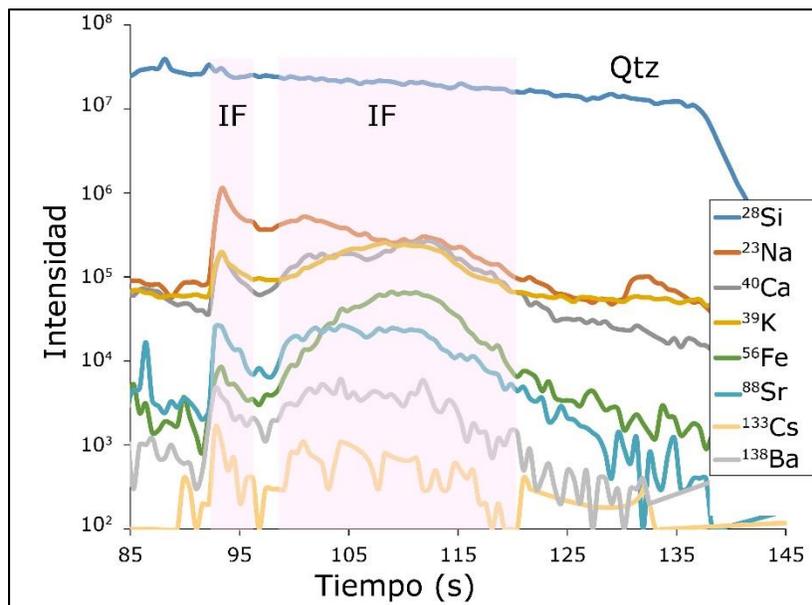


Figura 33: Espectro de LA-ICPMS de inclusiones ricas en vapor tipo 7.

FIA	Tipo	B	Cs	Ba	Sr	Ca/Na
N6-2	2	573.2	24.4	23	39.4	0.17
N5-2	2	334.1	24.4	18.6	28	0.12
N3-1-2	4	2.4	15.2	110.9	835.7	0.83
N3-1-2	3	1.6	25.7	211.8	979.3	1.16

Tabla 6: Concentraciones promedio de elementos relevantes para los FIA's medidos en LA-ICPMS, junto con el ratio de Na/Ca para mostrar el notable incremento de Ca en inclusiones secundarias tipo 3 y 4.

Para el caso del análisis de cuarzo pegmatítico con normalización a 100% óxidos se obtuvo que los elementos presentes en este mineral son principalmente Sc (con valores entre 105 y 118 ppm) y Cd (valores entre 0.3 y 0.6 ppm). Los resultados detallados de estos análisis serán analizados en la discusión y se presentan en la figura 37. Además, se pueden consultar en el anexo D, en las tablas 17, 18 y 19.

Análisis químico

En paralelo se envió una muestra de la pegmatita representativa de toda su extensión para un análisis químico de elementos trazas con métodos de análisis ME-GRA21 y ME-MS61L, que detecta las concentraciones de un total de 50 elementos, cuyos resultados se pueden consultar en el anexo E. Para efectos del análisis en este estudio se compararon con las concentraciones promedio de la corteza superior (Rudnick y Gao, 2003), lo cual se puede observar en las figuras 34 y 35. Se puede observar un claro enriquecimiento en Se, Th y Ba con respecto a la corteza superior.

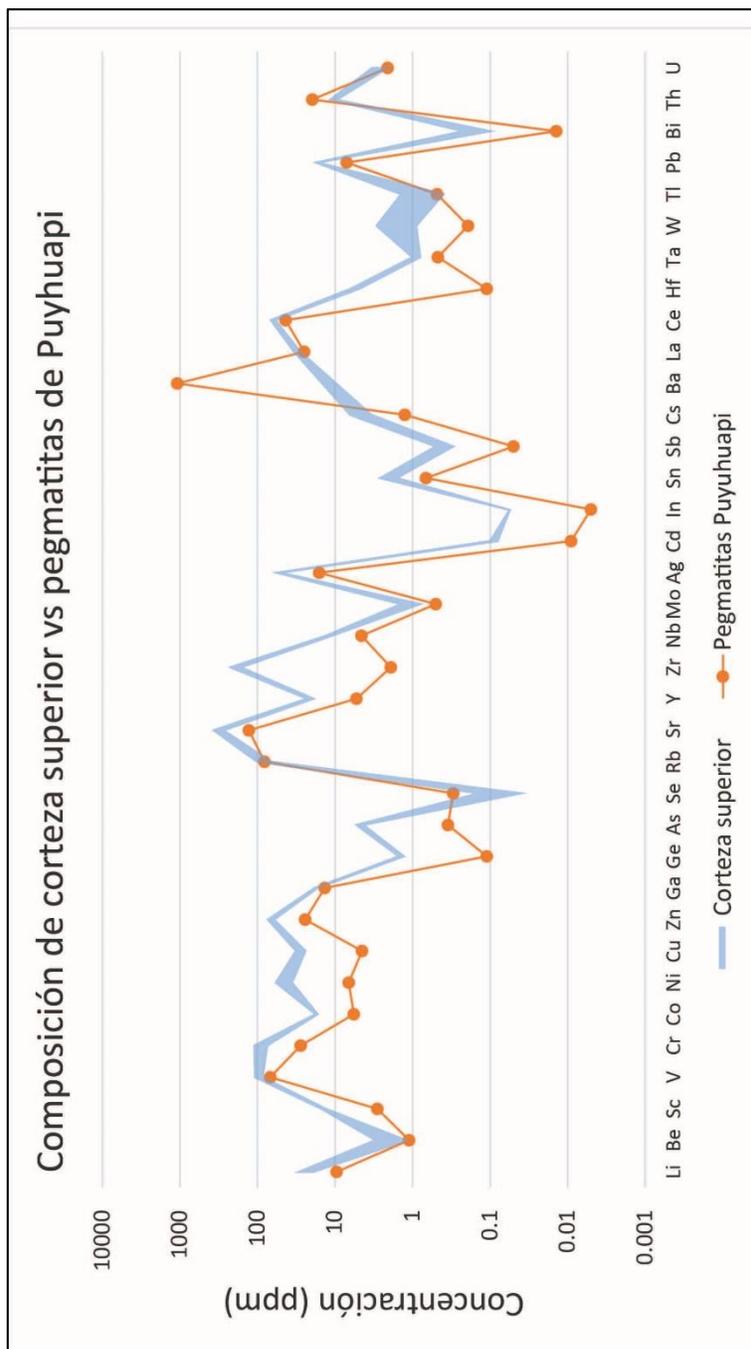


Figura 34: Gráfico de análisis químico de pegmatitas comparado con concentraciones de estos elementos en la corteza superior (Rudnick y Gao, 2003).

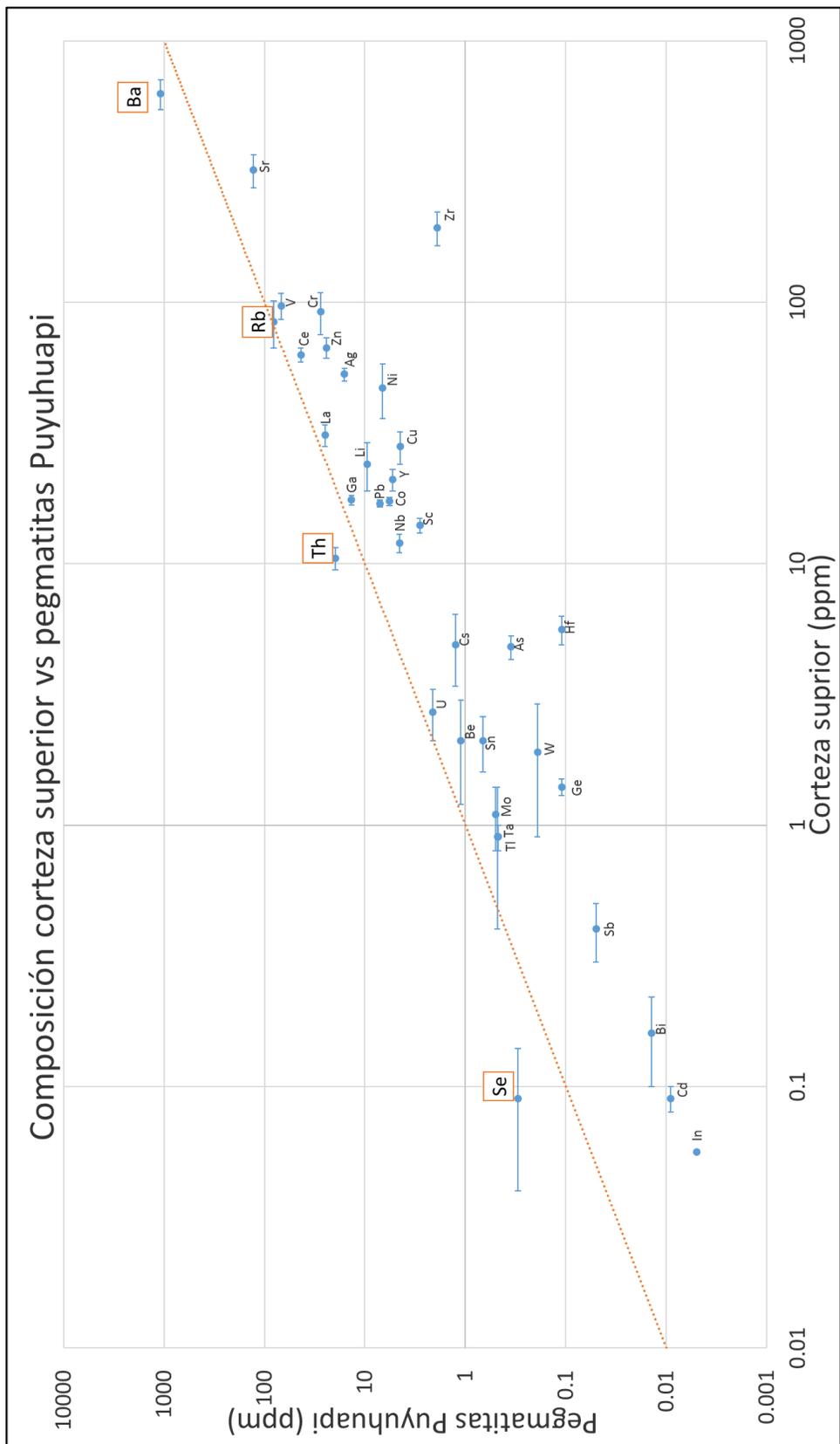


Figura 35: Gráfico de análisis químico de pegmatitas comparado con concentraciones de estos elementos en la corteza superior (Rudnick y Gao, 2003), con una línea que marca la razón 1:1. Se observa un enriquecimiento en Se, Th Rb y Ba, marcados con un recuadro naranja.

Discusiones

Clasificación de pegmatita

En base a las características de la pegmatita estudiada, incluyendo su textura, mineralogía, sumado al análisis químico, es posible posicionar dentro de un rango de presiones y temperaturas a las rocas estudiadas de acuerdo a los esquemas de clasificación propuestos por Černý (2005) y desarrollados por London (2008) de clases de pegmatitas.

El análisis químico revela un bajo enriquecimiento en casi todos los elementos analizados en estas rocas, como se ve en las figuras 34 y 35, en que se compararon las concentraciones de las pegmatitas con las de la corteza superior (Rudnick y Gao, 2003), para ver si había enriquecimiento en algún elemento raro típico de este tipo de rocas. Se observa un claro enriquecimiento en Se, Ba y Th, pero ningún otro elemento fuera de estos. Esto permite inferir que estas rocas no pertenecen a la clase de elementos raros de Černý (1991) y por ende se descartan bajas presiones y temperaturas para su formación.

Debido al ambiente en el que se generan, que corresponde a un margen de subducción activo, esto es según algunos autores lo esperable. Dill (2015) afirma que las pegmatitas que se generan en ambientes de tipo andino son estériles. Si bien esto es una afirmación en base a un ambiente tectónico regional, no es tan exacta, como es el caso de algunos ejemplos de pegmatitas enriquecidas en elementos raros en Chile (Velásquez et al., 2012a), por lo que no se descarta que no sea posible encontrar rocas de este tipo enriquecidas en estos ambientes convergentes.

Dado el bajo enriquecimiento de elementos raros es también complejo clasificar a estas pegmatitas en alguna de las dos grandes familias, ya que estas están pensadas para pegmatitas enriquecidas en elementos raros (Černý et al., 2012). Sin embargo, por la mineralogía observada se podría inferir que dentro del esquema de las clases de Černý (1991) estas rocas están descartadas de las clases de elementos raros y miarolítica, ya que carecen de las características de estos tipos, como mineralogía exótica de elementos raros en el primer caso, o miárolas en el segundo. Por ende, es razonable asumir que las condiciones de formación de estas rocas no corresponden a un ambiente muy somero.

Con respecto a las otras clases, es posible que sean tanto muscovita como abisal. Hay características de ambas clases que no encajan en las rocas estudiadas, como el hecho de que ambas suelen intruir a rocas metamórficas de alto grado, aspecto que no se observa acá, puesto que la veta estudiada intruye a un intrusivo como la Tonalita Puyuhuapi, y en particular se observa un granito de grano fino como roca caja. Sin embargo, esto es una característica de estas clases y también puede pasar que la roca hospedante sea un intrusivo (Ercit, 2005; London, 2008), tal como es el caso.

En base a la mineralogía y textura se pueden inferir algunas cosas. Por el lado de la clase muscovita, se tiene que en la veta estudiada si bien están presentes estas micas no son tan abundantes, ya que es en su mayoría se tiene feldespato y cuarzo, con menor plagioclasa y otros accesorios. A pesar de ello no se descarta que sean de este tipo. La

otra posibilidad es que sea de tipo abisal, sin enriquecimiento de elementos raros, lo cual es posible en base a la mineralogía que se tiene y dado que no hay grandes diferencias mineralógicas entre la clase muscovita y abisal (Černý y Ercit, 2005). Debido a que las pegmatitas de Puyuhuapi carecen de aluminosilicatos, no es posible utilizar estas curvas de fase para acotar condiciones P-T en la clasificación de estas rocas como se ve en la figura 36. Sin embargo, si se asume que se está en una de estas clases y relacionando la mineralogía y texturas con el análisis químico es posible inferir estas rocas se hayan formado en un amplio rango de presiones, de 4000 a 8000 bares, y entre 500 y 800 °C, aproximadamente.

Si bien se observa cierta zonación en estas pegmatitas, no se asegura que correspondan al tipo de estas rocas que están zonadas, puesto que no se observa una zona de muro, ni zona de borde, sólo algo que sería la zona intermedia (feldespato e intercrecimiento gráfico) y el núcleo de cuarzo, que, si bien se ve bien, no está zonado abruptamente como suele suceder en algunas de estas rocas. Esto es importante ya que las pegmatitas no zonadas se pueden acotar a una temperatura máxima, ya que suelen estar en campos de estabilidad de espumodena y cianita, que, si bien son minerales que no están presentes en Puyuhuapi, permiten acotar una temperatura a una de estas rocas con dichas características que sería menor a 700 °C y de clase muscovita probablemente (London, 2008).

El hecho de tener rutilo permite inferir ciertas condiciones de temperatura y presión adicionales a lo ya dicho. El rutilo en rocas ígneas graníticas puede tener varios orígenes, como puede ser primario o secundaria, que se forma debido a alguna alteración hidrotermal de biotita rica en Ti (Caruzzo et al., 2006) o por oxidación de ilmenita (Sakoma y Martin, 2002) o exsolución de fases con Ti como clinopiroxeno o granate (Zhang et al., 2003). Sin embargo, en vista que no se tienen piroxenos, granates y la biotita es más bien escasa en la pegmatita, se asume un origen primario de este mineral, que se encuentra diseminado en el cuarzo. En pegmatitas hay casos como el de South Mountain Batholith (Caruzzo et al., 2006), en que el rutilo suele tener alta concentración de Nb y Ta y bajo Nb/Ta, reflejando un particionamiento variable de Nb y Ta en fase fluida y esto representa una cristalización de un magma sobresaturado en H₂O. Por ende, la presencia de este mineral permite inferir una temperatura y presión mínimas de 450°C y 4000 bares (Meinhold, 2010).

Esto último coincide con las temperaturas y presiones planteadas en base a la mineralogía y clasificación de pegmatitas, por lo que es un buen parámetro para empezar a acotar las condiciones de formación de estas rocas, de acuerdo a la figura 36, en el círculo rojo dibujado, estimando por lo tanto temperaturas entre 500°C y 700°C y presiones entre 4000 y 7000 bares aproximadamente.

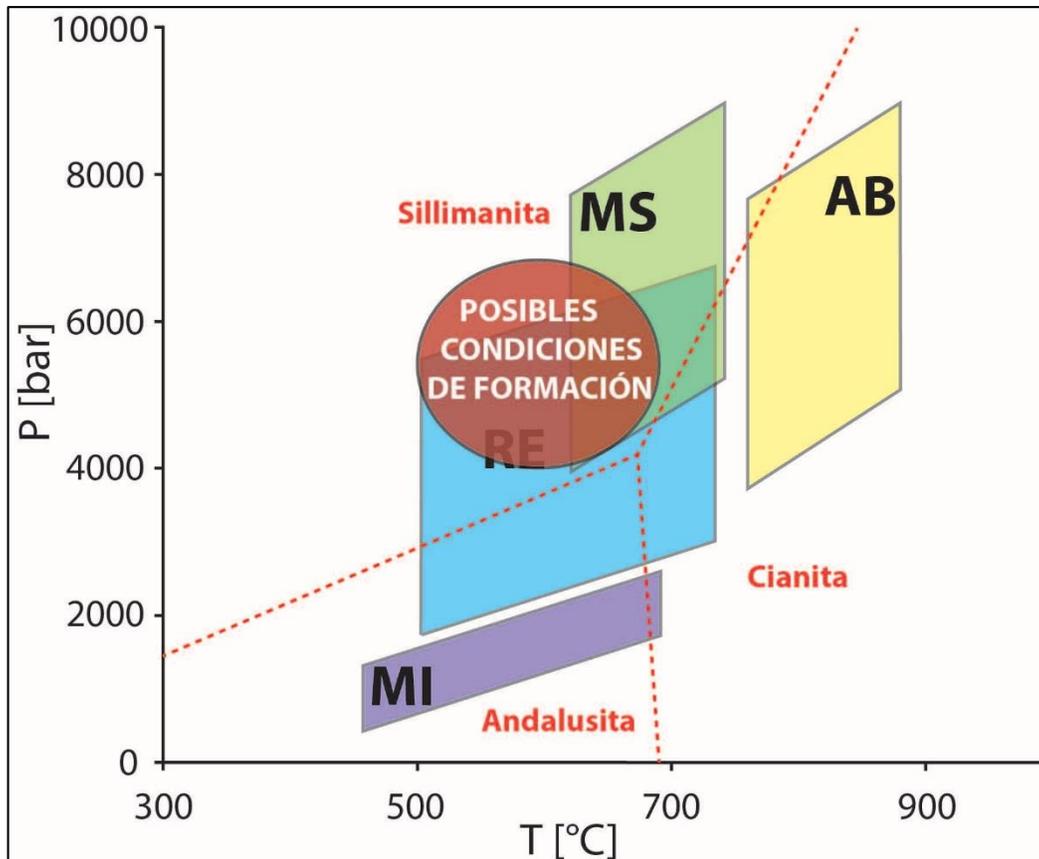


Figura 36 Diagrama de clases de London modificado, mostrando posible zona de formación de las pegmatitas de Puyuhuapi.

Enriquecimientos de elementos estratégicos de pegmatita

Del análisis químico realizado se obtuvo que los enriquecimientos en la pegmatita estudiada son más bien escasos, siendo solo destacados en Se, Th y Ba. Adicionalmente se procesaron los datos de LA-ICPMS efectuados en el cuarzo pegmatítico para estudiar que enriquecimientos se tenían en este mineral, que al ser el núcleo de la pegmatita es donde se suelen dar a veces enriquecimientos en pegmatitas de elementos raros (London, 2008). Para evaluar su potencial se comparó al igual que el análisis químico, con la composición de la corteza superior, lo cual se observa en la figura 37. Se graficaron los elementos que se presentaban consistentemente en la mayoría de las muestras ablasionadas. Se puede ver por lo tanto que la pegmatita, de color azul, tiene un bajo enriquecimiento en general de casi todos los elementos, salvo Sc, que está notablemente enriquecido, y Cd. Los demás están todos empobrecidos, incluyendo a los elementos que estaban enriquecidos en el análisis químico de roca total, como Ba y Se (en todas las muestras estaba bajo los límites de detección). Ni el Th ni el Rb fueron incluidos al momento de realizado el análisis de LA-ICPMS por lo que no se tienen sus concentraciones en el cuarzo.

En cuanto a los elementos estratégicos buscados como objetivo y planteamiento inicial de este estudio, estas rocas carecen de la gran mayoría de ellos. Se puede ver que el

Cs, Ce, Yb, Ta y U, que son elementos que suelen estar enriquecidos en pegmatitas, están todos empobrecidos en el cuarzo pegmatítico (figura 37), sumado a su ya conocida baja concentración en roca total.

Por otro lado, los elementos que aparecen enriquecidos en la roca total, no alcanzan concentraciones para ser económicamente extraíbles, como es el caso de Th; con 19.65 ppm en comparación al 0.1% de ley de corte (Thorium Report Committee, 2008), Se; con 0.3 ppm comparado a los 120 ppm de ley de corte (USGS, 2015), y Ba; que requiere aparición de mineral barita para su extracción económica (USGS, 2015), situación que no se da.

Los elementos que aparecen en el cuarzo pegmatítico en tanto son principalmente Sc; con valores de 105 a 118 ppm, pero que requiere un 1% para su extracción económica (USGS, 2015), y Cd; con concentraciones de 0.3 a 0.6 ppm, pero que requieren 300 ppm para su extracción (USGS, 2015).

Dadas estas características composicionales conjuntas, se puede afirmar que esta veta pegmatítica en particular no es recomendada para explotación económica, dada la baja concentración de elementos de interés, así como la falta de mineralogía exótica que suele estar presente en pegmatitas que sí han sido explotadas en el mundo (London, 2008; Černý et al., 2012; Dill, 2015).

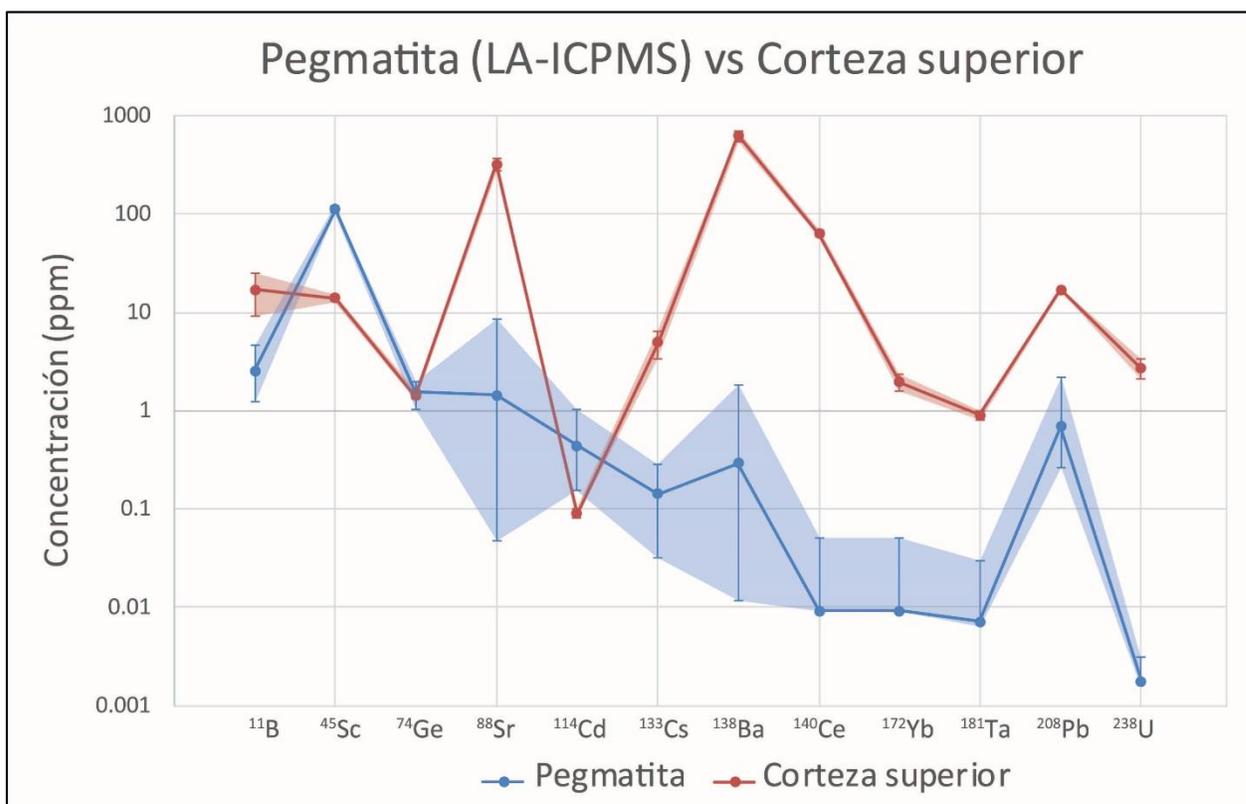


Figura 37: Concentraciones de elementos que aparecían consistentemente en cuarzo pegmatítico (LA-ICPMS) comparado a los mismos en la corteza superior (Rudnick y Gao, 2003).

Características de los fluidos presentes

Los fluidos presentes en la historia de la roca se han reportado como los distintos tipos de arreglos de inclusiones fluidas clasificadas.

Inclusiones primarias

Las de tipo primario, tipo 1 y tipo 2, en base a la petrografía y microtermometría se cree que serían del fluido primario mineralizador de las pegmatitas, que fue atrapado en el momento de la precipitación del núcleo cuarcífero.

A pesar de que un estudio de inclusiones fluidas debería evitar el uso de inclusiones decrepitadas como las de tipo 2 (Roedder, 1984), en este caso se utilizaron por la poca abundancia y dificultad de encontrar primarias de tipo 1. El mayor tamaño de las de tipo 2 es posiblemente la razón por la cual han decrepitado, caso opuesto a las de tipo 1. Esto es debido a que una inclusión de mayor tamaño requiere una diferencia de presión interna con externa mucho más baja que una de menor tamaño para sufrir estas modificaciones, como se observa en la figura 6 (B) (Laccazzete, 1990).

Otro aspecto que remarca el hecho de que estas inclusiones sean posiblemente contemporáneas es que la salinidad calculada en base a las T_m medidas entregó unos valores cercanos en ambos tipos. Una decrepitación como la sufrida por las inclusiones tipo 2 provoca una pérdida de material y en particular de H_2O , pero nunca una ganancia, ya que el proceso de deformación de cuarzo que causó la decrepitación consume H_2O , por lo que la salinidad obtenida podría ser mayor, pero nunca menor (Audétat y Gunther, 1999). Por ende, dado el contexto en que se encuentran ambos tipos en el cuarzo, y dada su salinidad similar, que es mucho menor a los demás tipos de inclusiones secundarias, se reafirma que sean coetáneas (figura 26).

El sistema composicional al que pertenecen estas inclusiones corresponde al de H_2O -NaCl. Los datos de LA-ICPMS reafirman esto, siendo el Na el catión de mayor concentración, y por mucho por sobre el K, Ca y demás mencionados previamente.

La densidad obtenida con las temperaturas de homogenización está en un amplio rango para las decrepitadas de tipo 2, lo cual es esperable debido a que pertenecen a sistemas abiertos que sufrieron ciertas modificaciones, por lo que las T_h obtenidas son muy variadas. Sin embargo, el promedio es cercano al promedio obtenido en las de tipo 1 (tabla 3), por lo que se utilizan los promedios de ambos tipos para graficar las isocoras y así estimar un posible camino del fluido desde sus comienzos. Estas isócoras se pueden ver en el anexo F, figuras 45 a 47.

Inclusiones secundarias

La gran mayoría de las inclusiones medidas pertenece a esta categoría. Estas a diferencia de las anteriores rara vez mostraron modificaciones muy destacables y tenían un comportamiento ante la microtermometría muy distinto.

Para empezar, las de tipo 3 y 4, ricas en líquido tienen un bajo T_m , menor al punto eutéctico del sistema $H_2O-NaCl$ (Bodnar, 1993), por lo que se puede afirmar en una primera instancia que existe alguna componente añadida al sistema al cual pertenece este fluido. Estas temperaturas de último fundido tan bajas implican una alta salinidad, pero debido a que no se pudieron observar muchas temperaturas eutécticas, es complejo definir un sistema de manera certera sólo con estos datos. Sin embargo, valor de T_m tan bajo como el de estos tipos, que fluctúan en un rango entre -23 a $-35^\circ C$, se suele asociar a la presencia de $CaCl_2$, $MgCl$ o $LiCl$, entre otros (Steele-MacInnis et al., 2011; Hurai et al., 2015).

Los datos de LA-ICPMS confirman la alta presencia de Ca, a veces incluso por sobre la cantidad de Na presente (tabla 6), por lo que es esperable que el $CaCl_2$ sea parte importante del sistema. Esta sal puede bajar la temperatura del eutéctico hasta $-52^\circ C$ e incluso a $-70^\circ C$ en caso de un equilibrio metaestable (Steele-MacInnis et al., 2011; Hurai et al., 2015).

La T_e medida en algunas de las inclusiones tipo 3 es incluso menor a este último valor, siendo cercana a $-78^\circ C$, por lo que es posible que haya algún componente añadido adicional que convierte al sistema al que pertenecen estos fluidos en uno muy complejo. Huizenga (2010) dice que una T_e de hasta $-91.8^\circ C$ es indicativo de cationes como Ca^{+2} , Fe^{+2} y Mg^{+2} coexistiendo, tal como es el caso según lo revelado por los análisis de LA-ICPMS, en que se ven concentraciones de K, Ba, Sr, Fe, Mg, entre otros.

Los sólidos en las inclusiones tipo 4 que resultaron ser cuarzo indican un fluido saturado en sílice, originado probablemente debido a alteración de algún mineral huésped de la pegmatita u otras rocas cercanas, lo que derivó en un enriquecimiento de sus componentes en el fluido y una no habitual precipitación de estos minerales hijos, en una etapa secundaria, ya que sólo se vieron en unos pocos FIA's y se midió en uno.

Los FIA's tipo 6, en que coexisten inclusiones fluidas ricas en líquido con otras ricas en CO_2 , se caracterizan en que las primeras son similares a las de tipo 3 y 4, tanto en T_m como en T_h , por lo que, al igual que ellas, se clasifican en un sistema complejo con principal presencia de $NaCl$ y $CaCl_2$ como sales principales, con aporte posible de otras como en dicho caso.

Por otro lado, el hecho de tener en coexistencia clara en un mismo FIA a inclusiones ricas en líquido con otras ricas en CO_2 implica que estos fluidos fueron contemporáneos en algún momento. El T_m de las inclusiones ricas en CO_2 , menor a su eutéctico de $-56.6^\circ C$, y cercano a $-60.5^\circ C$, implica que además de CO_2 hay presencia de otros componentes gaseosos en menor medida, como por ejemplo CH_4 , que, si bien serían menores, provocarían la disminución del eutéctico de este sistema (Roedder, 1984).

Lamentablemente no se pudo medir la temperatura de fusión de clatratos de la fase carbónica, pero dado que coexisten inclusiones fluidas ricas en líquida, se utiliza la salinidad y densidad de estas últimas como representativa del fluido que atrapa a este FIA tipo 6.

La coexistencia de estos dos tipos de inclusiones permite dibujar ambas isócoras en un mismo gráfico, lo que resulta en una estimación de posible presión y temperatura de atrapamiento de estas familias de inclusiones fluidas en donde se cortan dichas rectas, según el método de Kalyuzhnyi y Koltrun (1953). Estos valores obtenidos son aproximados, ya que cada inclusión fluida del FIA presenta una T_h distinta, que deriva en que las isócoras varíen levemente. Por ello, se utiliza la isócora de menor y de mayor T_h para obtener una estimación de los rangos de posible formación de este arreglo. Estos valores para los dos pares de isócoras trazadas en este tipo de tipo de FIA entregan valores de temperaturas y presiones de posible atrapamiento en el rango de 227°C a 278°C y 685 a 842 bar (figura 38).

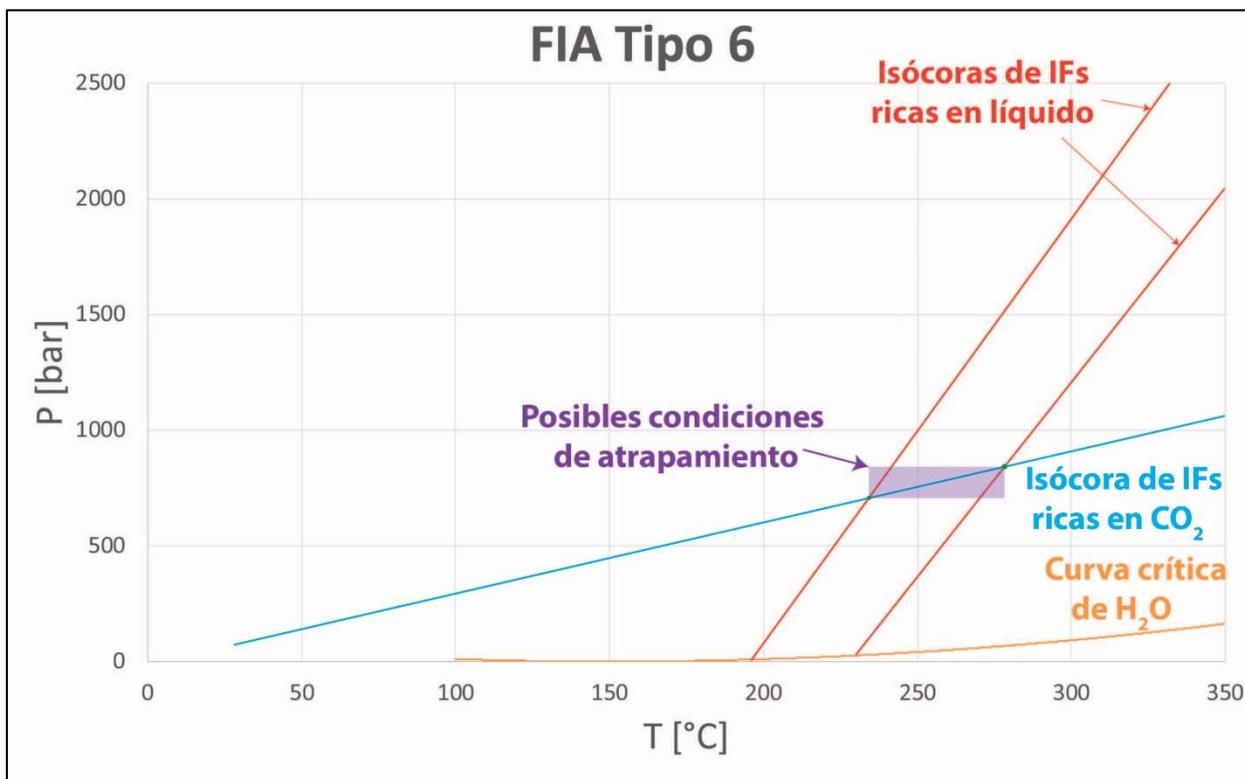


Figura 38: Isocoras de IF tipo 6 mostrando cálculo de P y T de posible atrapamiento según método de Kalyuzhnyi y Koltrun (1953). Se utilizó el promedio de la T_h de cada familia, por lo que es un valor aproximado.

Los FIA's tipo 5, igualmente con CO₂, no pudieron ser cuantificados de la misma manera que las anteriores, ya que, a diferencia de los FIA's tipo 6, corresponden a inclusiones trifásicas en que no todos los datos necesarios para cálculos de presión y temperatura de atrapamiento fueron medidos. Sólo se midió el eutéctico de la fase CO₂ y su homogenización, que entregó valores de -60.1°C (lo que indica al igual que en las tipo 6 algún componente adicional) y 25.6°C (implica una densidad de 0.7 g/cm³ para la fase CO₂). Sin embargo, igual que en el anterior, no se pudo medir la temperatura de fusión de clatratos, debido a que no se veía ningún cambio de fase claro en el rango que debería haber pasado, entre -10 y 10°C (Hedenquist y Henley, 1985). Además, tampoco se observó la T_h de la fase líquida ya que estas inclusiones decrepitaron antes de llegar a dicho punto, entre 300 y 350°C. Por ende, es complejo estimar un punto exacto de este

tipo de FIA's, pero es razonable pensar que se encuentran en algún punto cercano en la evolución del sistema con los FIA's tipo 6, también con CO₂.

Los FIA's ricos en vapor tipo 7 representan una etapa distinta de la evolución del fluido. El hecho de tener exclusivamente ricas en vapor permite inferir que ocurrió un fenómeno llamado "flashing". Esto suele suceder cuando cerca del total del fluido exsuelve como vapor debido a un proceso de descompresión (Moncada y Bodnar, 2012). En vista de que no se pudieron obtener datos de microtermometría es complejo estimar un sistema para este tipo de inclusiones, así como una presión y temperatura de formación. Sin embargo, los resultados de Raman junto a la fórmula de Lamadrid et al., 2017, permiten inicialmente confirmar que el vapor corresponde a CO₂, y por ende se puede calcular una mínima presión de 34 a 56 bares y una densidad de 0.06 a 0.1 g/cm³. En tanto, el LA-ICPMS en este tipo de FIA entrega resultados cualitativos (a falta de una T_m como estándar interno) que indican que los principales cationes de esta familia son en orden descendiente Na, Ca, K y Fe, por lo que es razonable pensar un sistema H₂O-NaCl-CO₂.

Finalmente, los FIA's tipo 8, dadas sus características petrográficas, estarían en una etapa posterior en relación a las demás familias ya mencionadas. Tanto la densidad y salinidad son menores que los anteriores tipos, siendo de valores cercanos a las primarias de tipo 1 y 2 (figura 26). A pesar de que no fueron ablacionadas se asume al igual que en las de tipo 1 y 2 un sistema H₂O-NaCl.

Etapas de evolución del sistema

A modo general, y en base a todo lo explicado de las características de los tipos de FIA's presentes se proponen tres etapas principales en la evolución del sistema según se puede observar en las figuras 40, 41 y 42.

En una etapa inicial (etapa 1), se generaron las inclusiones fluidas primarias tipo 1 (figura 40B), seguido de las de tipo 2, de mayor tamaño, que fueron decrepitadas a medida que este sistema se fue descomprimiendo (figura 40C). Dado el tamaño de estas últimas, se puede estimar la diferencia de presión mínima que fue necesaria para que experimentaran este evento, si se calcula un volumen promedio mínimo de algunas que fueron decrepitadas. Asumiendo una forma irregular aproximada a una esfera o elipsoide con radio de 6 a 15 μm, que sería razonable dado el gran tamaño de algunas IF de este tipo, se tiene un volumen del orden de 10³ μm³. Esto en el gráfico de la figura 6B entrega un diferencial de presión de alrededor de 1500 bar (figura 39) (Bodnar et al., 1989; Laccazette, 1990), por lo es posible que estas inclusiones hayan sufrido un ascenso isotérmico hasta que la diferencia de la presión exterior con la interior alcanzo esa cantidad y sufrieron dicha modificación. Esto se ve reflejado en el modelo final en la figura 43.

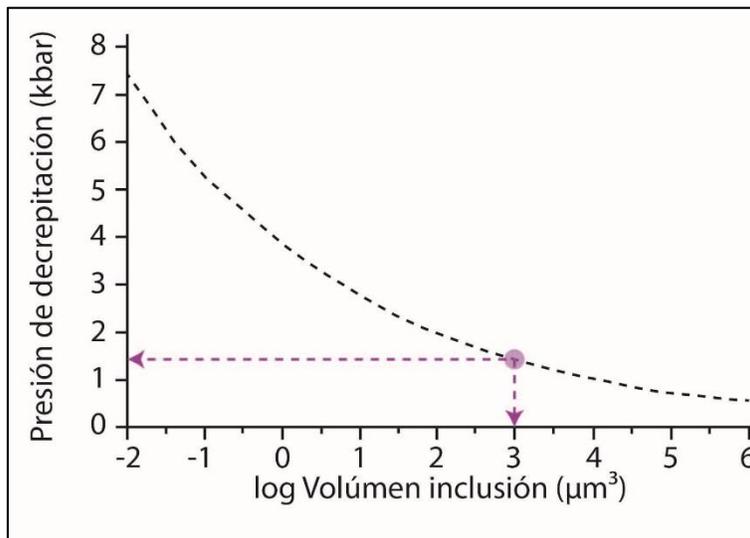


Figura 39: Modificado de Laccazette, 1990. Diferencial de presión estimado para el tamaño promedio de las inclusiones del FIA tipo 2, del orden de $10^3 \mu\text{m}$, lo que corresponde a un diferencial de presión de 1500 bar.

A continuación, en lo que sería la etapa 2, se generaron las numerosas inclusiones secundarias tipo 3 y 4 (figura 40D), remarcada por su petrografía y microtermometría.

Posteriormente, en la etapa 2', y de acuerdo con la petrografía de este tipo de FIA, sumado a la presión y temperatura calculada con las isócoras (figura 38), se estima que fue la entrada de un fluido con CO_2 , el cual se mezcló con este fluido secundaria de las de tipo 3 y 4, generándose inclusiones tipo 6 (figura 40E), posiblemente en una zona de inmiscibilidad del sistema $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}(-\text{CaCl}_2)$. Es posible que los FIA's tipo 5 estén en una etapa intermedia entre esta y la anterior. Se estima que este fluido carbónico entró en una etapa posterior a las inclusiones tipo 3 y 4 por ser estas últimas en la inmensa mayoría pseudosecundarias intragranulares, a diferencia de las tipo 6, que se encuentran siempre de manera secundaria transgranular en los granos de cuarzo.

Finalmente, en una etapa 3, y de acuerdo a la petrografía de inclusiones, se generaron los FIA's tipo 7 por flashing, y tipo 8, en un evento tardío, probablemente hidrotermal, que cortó numerosos granos de cuarzo y feldespato en las pegmatitas (figura 40F).

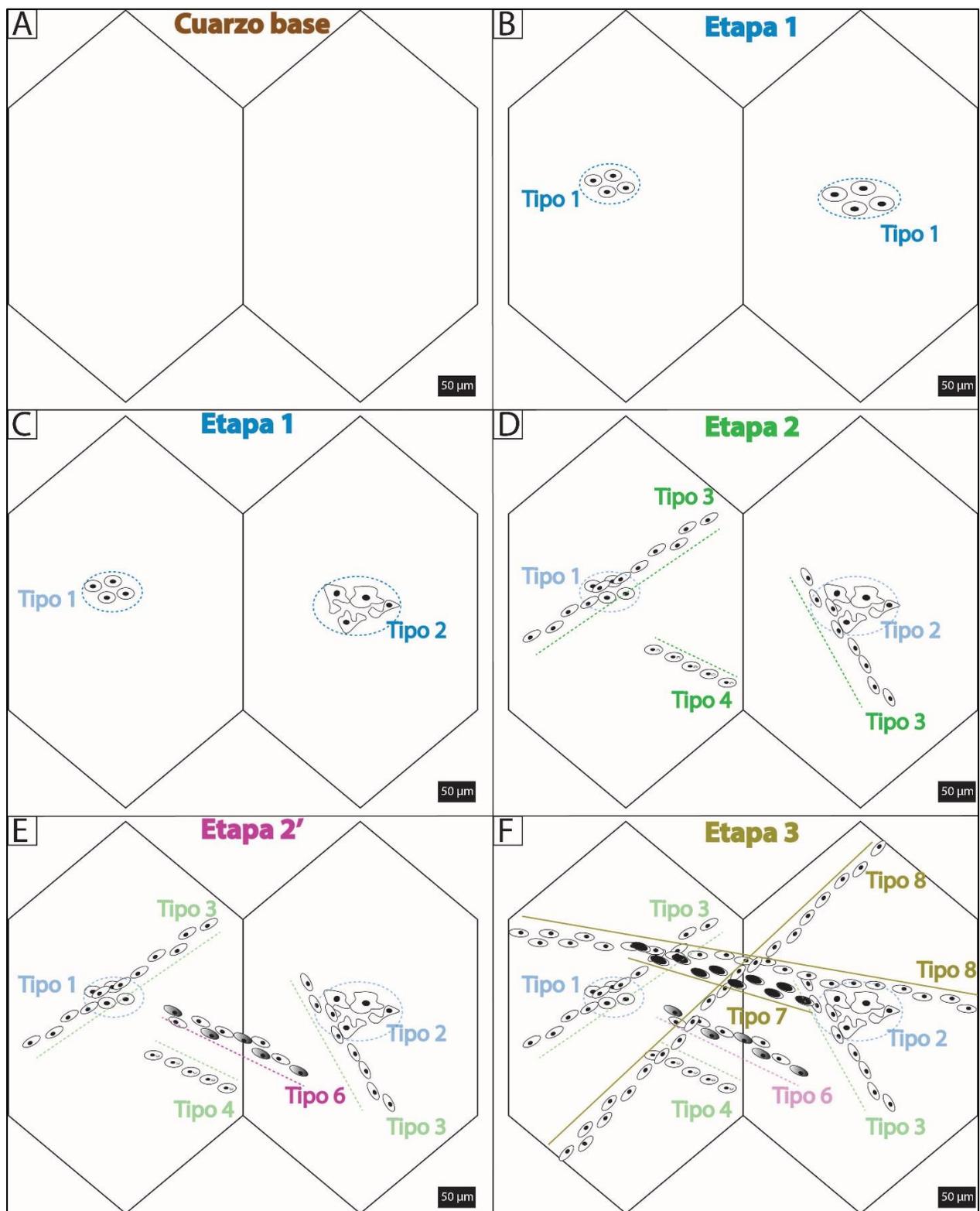


Figura 40: Evolución de pegmatita en vista de inclusiones fluidas formadas en núcleo cuarcífero. (A): Cuarzo inicial. (B): Inicio de etapa 1. Formación de FIA's primarios tipo 1. (C): Decrepitación de algunos FIA's tipo 1, generándose las tipo 2. (D): Inicio de etapa 2. Formación de FIA's secundarios tipo 3 y 4, algunos cortando los anteriores. (E): Etapa 2'. Entrada de un fluido carbónico generando FIA's tipo 6. (F): Inicio de etapa 3. Formación de FIA's secundarios tipo 7 y 8 que cortan todos los anteriores además del cuarzo en sus límites cristalográficos.

De acuerdo a lo observado en las figuras 41 y 42 se puede ver mejor la evolución de la densidad y salinidad del sistema pegmatítico. Inicialmente, en la etapa 1, se tiene un fluido de salinidad media, que con el tiempo se hace más salino, y en general más denso en lo que sería la etapa 2. Eso continúa hasta que entra un fluido carbónico en la etapa 2', que se mezcla con el fluido anterior, generando las inclusiones de tipo 5 y 6. Finalmente, en la etapa 3, se tiene un evento tardío de salinidad media y bajas densidades.

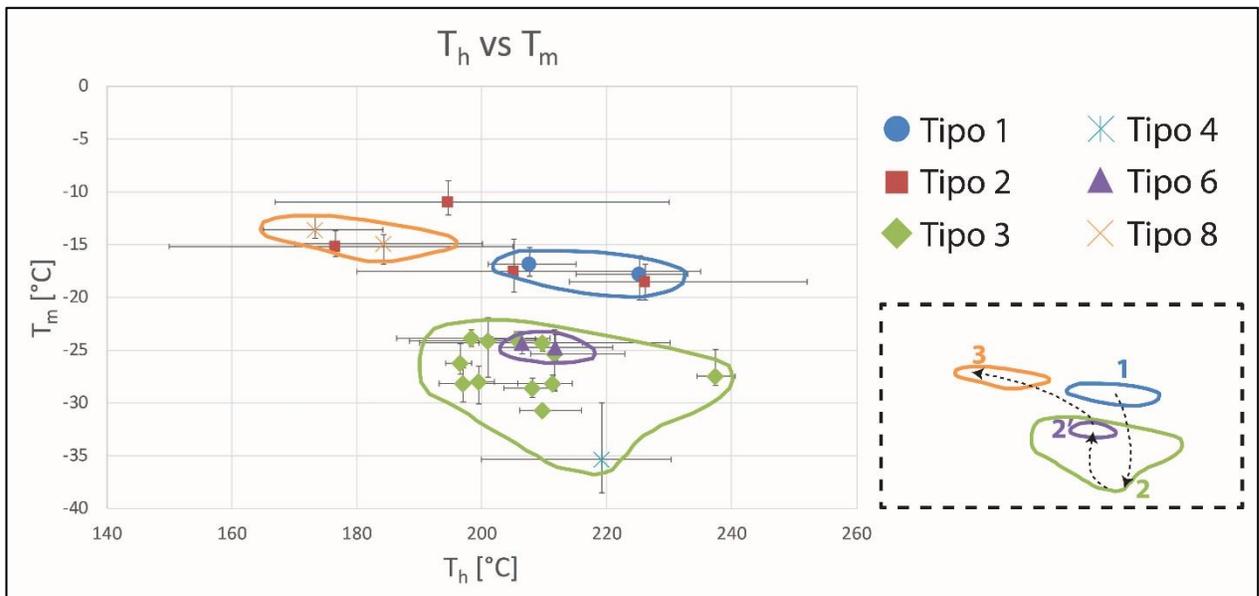


Figura 41: Modelo de evolución del fluido en gráfico T_h vs T_m remarcando las 3 etapas principales encontradas.

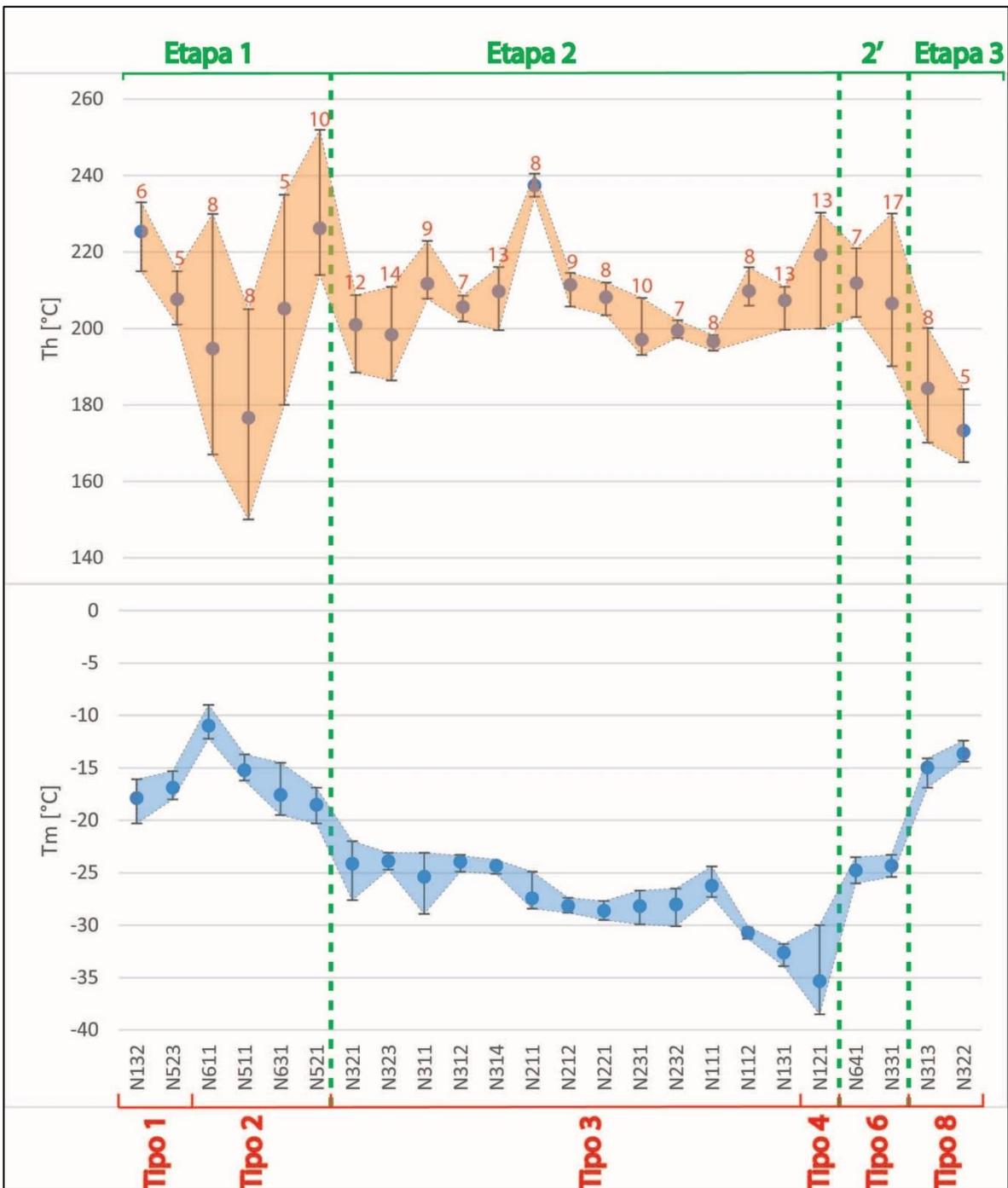


Figura 42: Gráfico mostrando posible evolución del sistema con los datos de inclusiones fluidas obtenidas en microtermometría. Se escribe en número rojo el número de inclusiones medidas en cada FIA, además de los tipos de FIA's clasificados y las etapas propuestas para la evolución del sistema.

Variación composicional

A continuación, se detallan las características de los fluidos de acuerdo a su composición y condiciones PTX al momento de su evolución.

En la etapa 1 se tiene este fluido primario del sistema $H_2O-NaCl$ con aporte de cationes de K, Ca, Fe, Mg, etc. El mayor contenido de K en relación a los demás cationes es algo esperable en pegmatitas. Una de las principales teorías de formación de este tipo de rocas, de Jahns y Burnham (1958), remarca el hecho de una separación buoyante de un fluido que secuestra elementos del magma y los redistribuye en las pegmatitas cristalizantes, con un particionamiento de Na y K, que se separan del magma a la fase acuosa.

Las concentraciones obtenidas de otros elementos de acuerdo a LA-ICPMS remarca que este sería el fluido inicial. Un ejemplo es el B, que no está presente en los demás tipos de FIA's en la misma magnitud. En pegmatitas, el fluido que acompaña su formación suele estar enriquecido en algunos incompatibles y agentes fundentes como es el B, que posiblemente ayudó a la solubilidad de otros elementos, además de inhibir la nucleación, provocar un subenfriamiento del magma formador, disminuyendo así su solidus, y permitiendo por ende el crecimiento de estos grandes cristales (London, 2008). El origen de este elemento es posiblemente por separación en micas, donde es compatible, siendo un mineral presente en varios cuerpos ígneos del Batolito Norpatagónico y en particular de la Tonalita Puyuhuapi, unidad en la que se emplaza la veta pegmatítica estudiada (Mella, 2014). No se tienen muchos otros elementos incompatibles en este tipo de FIA, salvo el Cs, que, si bien es común en las pegmatitas, no presenta gran variación en la evolución del sistema (figura 43), como para afirmar que tuvo un origen primario y estuvo relacionado directamente a la formación de estas rocas. Este elemento, al igual que el B, es compatible en micas, pero también en cordierita y feldespato potásico (London, 2008), por lo que parte de su enriquecimiento en esta y posteriores etapas puede ser por alteración de este último mineral y las micas en rocas cercanas, bien pudiendo ser en la Tonalita Puyuhuapi (Mella, 2014). Otros elementos medidos son el Ba y Sr, que se comparan con las demás etapas, observándose una tendencia claramente creciente con la evolución del sistema (figura 43).

En la etapa 2, posterior al emplazamiento de los FIA's primarios, se generaron las diversas inclusiones secundarias de tipo 3, 4, 5 y 6. Es notorio el aumento de Ca en relación a los demás cationes principales de estas inclusiones, definiendo así un sistema $H_2O-NaCl-CaCl_2$, que deriva en las muy bajas T_m medidas. El origen de estas grandes cantidades de Ca no queda del todo claro. Kontak et al. (2002) señala que fluidos ricos en Ca son inusuales en sistemas magmáticos por lo que reservorios no magmáticos son la fuente más probable. Esto se remarca en este estudio dado que son FIA's de tipo secundario. Es por ende posible que el origen provenga de una alteración de minerales de otras rocas en el camino de los fluidos a las pegmatitas, como pueden minerales cálcicos como hornblenda y plagioclasa cálcica, presentes en Tonalita Puyuhuapi, Diorita Risopatrón y Grupo Volcánico Puyuhuapi (Mella y Duhart, 2011; Mella, 2014), que fueron alterados en el camino del fluido desde su origen hasta ser hospedado en fracturas rellenadas del cuarzo pegmatítico. Otros autores afirman que su fuente puede ser metamórfica (Hardie, 1983; Xu, 2000), lo cual es posible también dado el sistema de falla en que estas rocas están hospedadas, pudiendo por lo tanto tener orígenes más regionales, no siendo clara la unidad que fue alterada y provocó estas altas concentraciones de Ca.

Además, se observa un aumento considerable en las cantidades de Ba y Sr (figura 43). Estos elementos pertenecen a la categoría de tierras raras alcalinas. El Sr es compatible en plagioclasa y el Ba es muy compatible en micas, mientras que ambos lo son en feldespato potásico (Icenhower y London 1996; Larsen, 2002). Es por lo tanto muy posible que el origen de estos elementos y su tendencia en un claro aumento provenga de feldespatos y algo de plagioclasa y micas de rocas por la cual pasaron estos fluidos antes de quedar atrapados en estas rocas, de modo que se enriquecieron y dejaron como testigo estas concentraciones en los FIA's secundarios tipo 3 y 4. El origen de los sólidos de los FIA's tipo 4 puede estar relacionado también con una alteración de estos silicatos que dejaron a las inclusiones enriquecidas en sílice que precipitó cuarzo al pasar estos fluidos. Dado que se trata de FIA's secundarias posteriores a la formación de la roca cabe la posibilidad de que el mismo feldespato pegmatítico sea fuente de parte de las concentraciones de estos elementos, en particular de Ba, siendo tan alta su concentración en la roca viéndose de los análisis químicos realizados (figura 34 y 35).

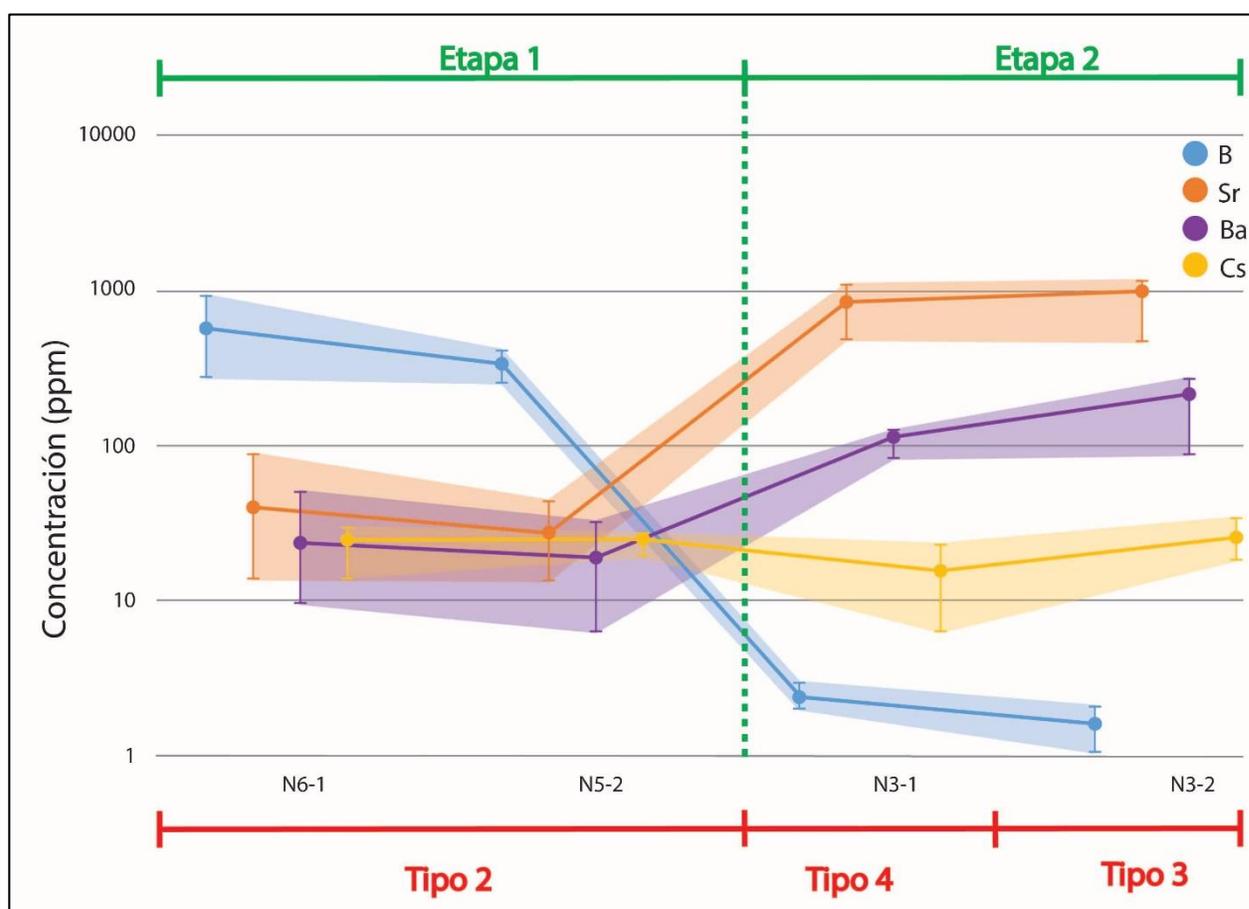


Figura 43: Evolución de sistema con respecto a ciertos elementos que aparecen enriquecidos en las inclusiones fluidas de distintos tipos de FIA's descritos. Resultados de datos de LA-ICPMS.

En la etapa 2' se tiene el ingreso de un fluido con CO₂ al sistema, el cual está probablemente mezclado con el mismo fluido de las inclusiones tipo 3 y 4. Estos fluidos carbónicos suelen tener orígenes metamórficos debido que el CO₂ es poco soluble en magmas graníticos diferenciados (Thiery et al., 1994). Hay otros trabajos en pegmatitas

en que grupos de inclusiones fluidas con CO₂ se asocian a la deformación a la cual estuvieron sometidas (Montenegro y Sosa, 2003; Velásquez et al., 2012). Esto es bastante posible en una zona como en la que se emplazan las pegmatitas de Puyuhuapi, cerca de la traza del SFLO, y tectónicamente activa (Cembrano, 1998). El hecho de que esta veta esté emplazada en la Tonalita Puyuhuapi reafirma esto, ya que en esta zona imperaría un alzamiento comparable con el emplazamiento de las unidades (Arancibia et al., 1999; Thomson et al., 2010).

La presencia de FIA's ricos en CO₂ e inclusiones acuosas en un sistema H₂O-NaCl(-CaCl₂) permite inferir que en realidad el sistema es H₂O-NaCl-CO₂(-CaCl₂). Se asume un sistema ternario para simplificar ya que si se tomaran en cuenta los cuatro componentes sería un sistema muy complejo de analizar, del cual no existen muchos datos experimentales. Este sistema tiene su posible origen en un fluido metamórfico. La salinidad en un sistema carbónico, aunque sea en pequeñas cantidades provoca un aumento considerable en la zona de inmiscibilidad (Diamond, 2001), por lo que a las altas salinidades que se tienen en esta parte de la evolución del sistema, cercanos a 25% en peso de NaCl, se tendrían un amplio rango de temperaturas en que ambas fases pueden coexistir en estado líquido. Esto se debe a que la solubilidad del CO₂ se reduce considerablemente con el incremento de NaCl, lo que viene de la mano con un considerable incremento en la presión de saturación llevando al punto crítico del sistema a condiciones más elevadas (Schmidt et al., 1995). Por ende, es posible que las condiciones calculadas en la sección anterior para el posible atrapamiento de los FIA's tipo 6 sean algo más elevadas. Sin embargo, para efectos prácticos del modelo final se utilizarán los números calculados.

Finalmente, en la etapa 3 se generarían los FIA's tipo 8, más someros y de menor salinidad y mayor salinidad que los de la etapa anterior. A pesar de que no se tienen composiciones de estos fluidos es probable que deban su origen a un fluido hidrotermal tardío de bajas temperaturas.

Modelo final

En base a lo expuesto se propone un modelo final de la evolución del fluido (figura 44) de acuerdo a las temperaturas y presiones estimadas de atrapamiento para las de tipo 1 y 2, y las calculadas por la intersección de isócoras en las de tipo 5 y 6. En dicha imagen se traza la curva de solidus del haplogranito con agua y la curva de calentamiento del agua para una salinidad de 25% en peso de NaCl (cercano a la máxima salinidad promedio que alcanzan los tipos de FIA's en este estudio, siendo los de tipo 3 y 4), razón por la que el punto crítico está a temperaturas tan elevadas (Bodnar y Vityk, 1994). Cabe decir que se tienen tantas isócoras que no se muestran todas para que sea claro en la figura, por lo que se utilizaron densidades promedio de cada tipo de FIA. El total de las isócoras se puede consultar en el anexo F (figuras 45 a 47).

En un comienzo se intersecta la isócora de los FIA's primarios tipo 1 con el rango de presiones y temperaturas estimadas de acuerdo a la petrografía y clasificación de la pegmatita Puyuhuapi. Esto entrega unas condiciones posibles de atrapamiento en el rango de entre 500 a 560°C y 4900 a 5800 bares,

Estas condiciones son factibles de acuerdo al conocimiento de la formación de pegmatitas de la clase muscovita, y en particular de las que carecen de elementos raros (Ercit, 2005; London, 2008; Černý, 2012). Por ende, se podría inferir que se está en esta clase de pegmatitas, lo que coincide con la mineralogía presente y falta de enriquecimiento en elementos raros, además de la geoquímica del fluido, enriquecido en un agente fundente como es el B con respecto a los eventos posteriores.

A continuación, vendría la decrepitación de algunas de estas inclusiones primarias, generándose los FIA's tipo 2. Esto sería por una descompresión debido al sistema estructural en que están hospedadas las pegmatitas, que sería por un alzamiento de las rocas, posiblemente debido a que la zona es tectónicamente activa y está dominada por el SFLO, lo que provoca grandes cambios de niveles a lo largo del tiempo (Mella, 2014). Esto sería el evento gatillante de la decrepitación, debido a una diferencia de presión interna y externa de al menos 1500 bar, siendo dibujada en la figura 44. Esto correspondería a un alzamiento cercano a los 5 km, y derivaría en la llegada del sistema a los 3300 bar aproximadamente.

En la etapa 2, en tanto, se produciría el atrapamiento de los FIA's tipo 3 y 4 secundarios en algún punto intermedio entre 278-360°C y 842-3300 bar (de acuerdo a isócora 3-4 en figura 44), de un fluido enriquecido en CaCl₂ y NaCl, junto con otras sales en menores cantidades. Esto vendría de la mano con el enriquecimiento de Sr y Ba explicado anteriormente. Estas IF se habrían atrapado a medida que el sistema fue ascendiendo y se generaron numerosas fracturas debido a la tectónica activa de la zona, las cuales fueron rellenadas por este fluido y atrapadas como inclusiones de tipo secundario.

En la etapa 2', se produciría la entrada de un fluido de probable origen metamórfico rico en CO₂, mezclándose con el anterior y generándose los FIA's tipo tipo 6, a condiciones calculadas anteriormente entre 227 a 278°C y 685 a 842 bar aproximadamente. Esto se habría producido en una zona de inmiscibilidad de un sistema H₂O-CO₂-NaCl. La ubicación de las inclusiones tipo 5 en la evolución del sistema es posiblemente anterior a estas últimas, pero no es posible cuantificar la presión y temperatura de dicho evento con los datos que se tienen.

Finalmente, en la etapa 3, se produciría un pulso hidrotermal tardío con un fluido que atrapó FIA's tipo 8 que traspasan a las pegmatitas, a unas condiciones de temperaturas y presiones menores a 227°C y 685 bar. La formación de las inclusiones ricas en vapor es posiblemente en una etapa cercana a este pulso hidrotermal, a medida que el sistema fue ascendiendo en una etapa final.

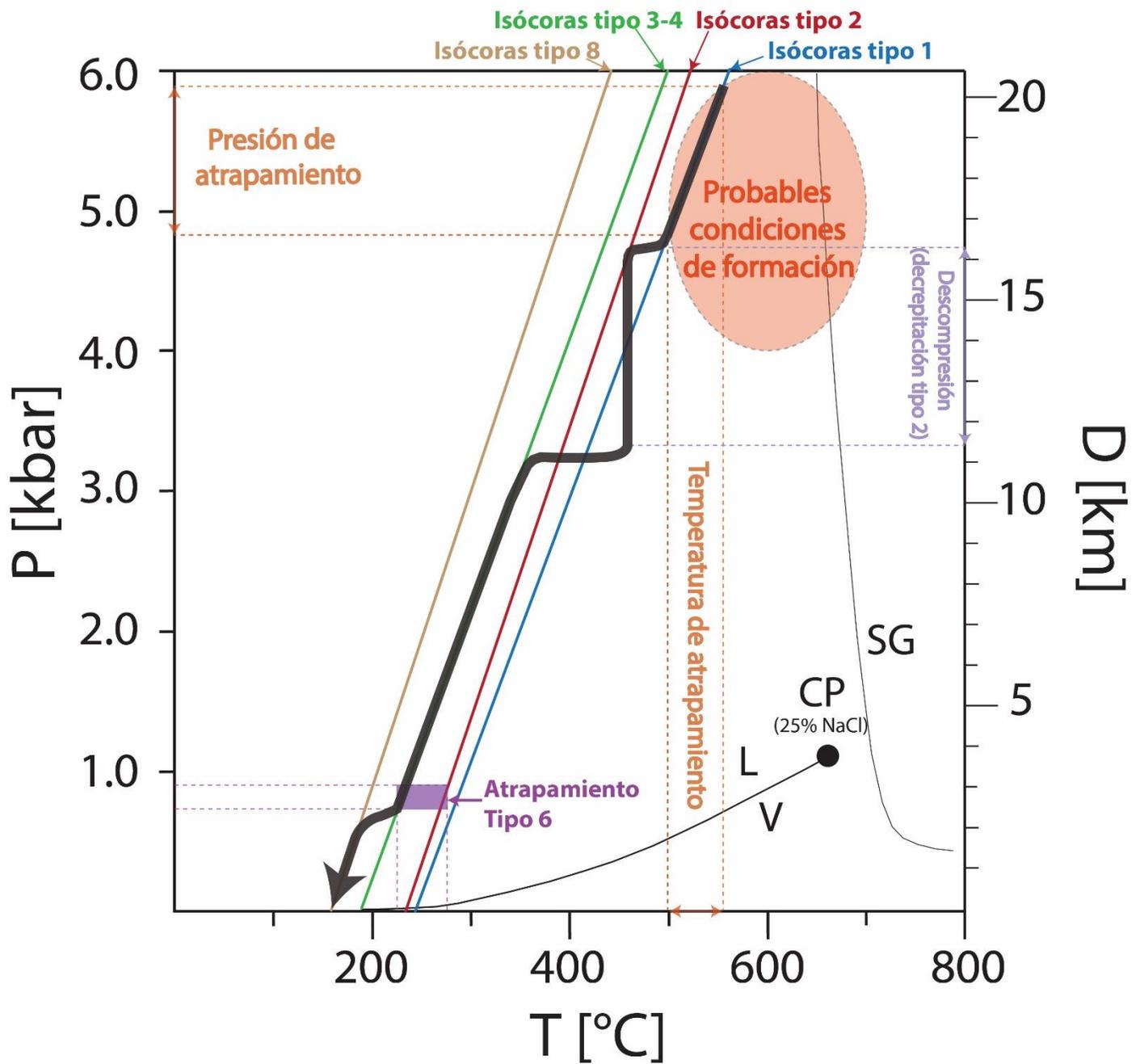


Figura 44: Modelo de evolución final del sistema de pegmatitas de Puyuhuapi. SG: solidus haplogranito con agua (Tuttle y Bowen, 1958). CP: punto crítico del agua para una salinidad de 25% en peso de NaCl (Bodnar y Vityk, 1994); L: líquido. V: vapor.

Conclusiones

El objetivo del estudio era determinar el origen y naturaleza de los fluidos formadores de las pegmatitas de Puyuhuapi y evaluar un posible enriquecimiento en elementos raros, dada la naturaleza de este tipo de rocas.

Luego de un estudio de inclusiones fluidas en varias muestras se encontraron ocho tipos principales de FIA's, que representan tanto a los fluidos mineralizadores de estas rocas como a eventos posteriores a su formación, en una evolución en la cual se proponen 3 etapas principales.

Los fluidos primarios, caracterizados por los FIA's tipo 1 y 2, representan al fluido formador de estas rocas en lo que sería la etapa 1. Se caracterizan por una salinidad media de alrededor de 20% en peso de NaCl, en un sistema de H₂O-NaCl con menor aporte de otras sales. En relación a los demás FIA's está enriquecida de B. Estas inclusiones se habrían inicialmente en condiciones de entre 500 a 560°C y 4900 a 5800 bar. La descompresión sufrida por el sistema dado el sistema estructural activo en el que está hospedada la pegmatita, correspondiente al SFLO, habría generado un alzamiento cercano a 5 km (1500 bar).

Los numerosos fluidos secundarios se dividieron en los FIA's de tipo 3 a 8 y representan eventos posteriores al emplazamiento de las pegmatitas. En la etapa 2, se habrían generado los FIA's de tipo 3 y 4, ricas en líquida y de alta salinidad, cercana al 25% en peso de NaCl, en un sistema H₂O-NaCl-CaCl₂, y enriquecida en Sr y Ba en comparación a la etapa anterior. Estas inclusiones se habrían generado a condiciones de entre 278 a 360°C, y 842 a 3300 bar.

A continuación, se habría producido la entrada de un fluido carbónico al sistema, generando inclusiones fluidas ricas en CO₂ en coexistencia con inclusiones ricas en líquido similares a las anteriores, que representan a la etapa 2'. Esto se habría producido en una zona de inmiscibilidad de dos fluidos, uno carbónico y otro de H₂O-NaCl-CaCl₂, cuya convivencia permitió trazar isócoras de ambos tipos y calcular su atrapamiento en condiciones de 227 a 278°C y 685 a 842 bar aproximadamente.

La evolución del sistema habría culminado con la etapa 3, en lo que sería un evento hidrotermal tardío con FIA's tipo 7 ricas en vapor y tipo 8 ricas en líquido, con salinidades medias menores a 20% en peso de NaCl, en un sistema H₂O-NaCl, que cortan varios cristales de cuarzo y feldespato, a temperaturas y presiones menores a 227°C y 685 bar.

Con respecto al potencial económico de estas pegmatitas se puede afirmar que debido a la falta de mineralogía exótica y al pobre enriquecimiento en elementos incompatibles que se observa tanto del análisis químico realizado en roca total, como en lo procesado por LA-ICPMS en cuarzo pegmatítico, no se recomiendan trabajos de minería.

Sin embargo, una recomendación para un trabajo a futuro en este tipo de rocas o bien en estas mismas sería realizar más análisis químicos, ya que parte de los análisis realizados en el presente estudio se han hecho en base a sólo un análisis químico, de roca total. Lo recomendable sería realizar varios y en distintas partes de la veta para tener una mejor

idea de las cantidades promedio de cada elemento, o bien realizar estudios monomineralógicos en cuarzo y feldespato, por separado, cuyas cantidades de elementos traza pueden dar información de la génesis y potencial de estas pegmatitas.

También se propone realizar un estudio a nivel regional de este tipo de rocas de modo de poder ver con certeza si es que existen más diques pegmatíticos, y determinar la posibilidad de que sean cogenéticos, de modo de que, si se encuentra cierta zonación desde donde estaría el plutón fuente, se podrían entonces encontrar pegmatitas enriquecidas en elementos incompatibles a mayores distancias.

Bibliografía

- Angus, S., Armstrong, B., de Reuck, M., Altunin, V., Gadetski, O., Chapela, G. & Rowlinson, J. (1976). *International Thermodynamic Tables of the Fluid State—Carbon Dioxide*. Pergamon, Oxford.
- Arancibia, G., Cembrano, J. & Lavenu, A. (1999). Transpresión dextral y partición de la deformación en la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui, Aysén, Chile (44-45°S). *Revista Geológica de Chile* 26: 3-22p.
- Audétat, A. & Gunther, D. (1999). Mobility and H₂O loss from fluid inclusions in natural quartz crystals. *Contrib Mineral Petrol* 137: 1-14p.
- Bischoff, J. (1991). Densities of liquids and vapors in boiling NaCl–H₂O solutions: A PVTX summary from 300° to 500 °C. *Am. J. Sci.* 291: 309–338p.
- Bodnar, R., Burnham, C. & Sterner, S. (1985). Synthetic fluid inclusions in natural quartz. - III. Determination of phase equilibrium properties in the system H₂O–NaCl to 1000°C and 1500 bars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 49: 1861-1873p.
- Bodnar, R., Binns, P. & Hall, D. (1989). Synthetic fluid inclusions: VI. Quantitative evaluation of the description behaviour of fluid inclusions in quartz at one atmosphere confining pressure. *Journal of Metamorphic Geology*, 7 (2): 229–242p.
- Bodnar, R. (1993). Revised equation and table for determining the freezing point. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 57: 683-684p.
- Bodnar, R. & Vityk, M. (1994). Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions. In *Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Applications*. Int. Mineral. Assoc., Short Course Notes: 117-130p.
- Bodnar R. (2003a). Introduction to fluid inclusions. In I. Samson, A. Anderson, & D. Marshall, eds. *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Mineralogical Association of Canada, Short Course 32: 1-8p.
- Bodnar R. (2003b). Introduction to aqueous fluid systems. In I. Samson, A. Anderson, & D. Marshall, eds. *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Mineralogical Association of Canada, Short Course 32: 81-99p.
- Bodnar R. (2003c). Reequilibration of fluid inclusions. In I. Samson, A. Anderson, & D. Marshall, eds. *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Mineralogical Association of Canada 32: 213-230p.
- Bradley, D. & McCauley, A. (2013). A preliminary deposit model for lithium-cesium-tantalum (LCT) pegmatites. U.S. Geological Survey Open-File Report 2013–1008: 7p.
- Cameron, E., Jahns, R., McNair, A. & Page, L. (1949). Internal structure of granitic pegmatites. *Economic Geology Monograph* 2: 115p.
- Cande, S. & Leslie, R. (1986). Late Cenozoic Tectonics of the Southern Chile Trench. *Journal Geophysical Research* 91 (B1): 471-496p.
- Carruzzo, S., Clarke, D., Pelrine, K. & MacDonald, M. (2006). Texture, composition, and origin of rutile in the South Mountain Batholith, Nova Scotia. *Canadian Mineralogist* 44: 715–729p.
- Cembrano, J. & Moreno, H. (1994). Geometría y naturaleza contrastante del volcanismo cuaternario entre los 38°S y 46°S. ¿Dominios compresionales y tensionales en un régimen transcurrente? 7° Congreso Geológico chileno. *Actas Vol.* 1: 240-244p.
- Cembrano, J., Hervé, F. & Lavenu, A. (1996). The Liquiñe Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics* 2591-3: 55-66p.
- Cembrano, J. (1998). Kinematics and timing of intra-arc deformation, southern Chilean Andes, Ph.D. Thesis (Unpublished), Dalhousie University, Canada: 231p.

- Cembrano, J., Lavenu, A., Reynolds, P., Arancibia, G., López, G. & Sanhueza, A. (2002). Late Cenozoic transpressional ductile deformation north of the Nazca-South America-Antarctica triple junction. *Tectonophysics* 354: 289-314p.
- Černý, P. (1991). Rare-element granitic pegmatites. Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. *Geosci. Can.* 18: 49-67p.
- Černý, P. & Ercit, T. (2005). The classification of granitic pegmatites revisited. *Canadian Mineralogist* 43: 2005-2026p.
- Černý, P., London, D. & Novak, M. (2012). Granitic Pegmatites as Reflections of their Sources. *Elements* 8: 289-293p.
- Collao, S., Correa, K., González, L. & Velásquez, R. (2012). Inclusiones Fluidas En Las Pegmatitas Uraníferas De Poñén, VIIIª Región Del Bio Bío, Chile. Congreso Geológico Chileno, 13, Antofagasta, Chile, 05-09 Agosto, 2012: 61-63p.
- Diamond, L. (2001). Review of the systematics of the CO₂-H₂O fluid inclusions. *Lithos* 55: 69-99p.
- Diamond, L. (2003). Introduction to Gas-Bearing Fluid Inclusions. In I. Samson, A. Anderson, & D. Marshall, eds. *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Mineralogical Association of Canada, Short Course 32: 101-158p.
- Dill, H. (2015). Pegmatites and aplites: Their genetic and applied ore geology. *Ore Geology Reviews* 69: 417-561p.
- Duan, Z., Møller, N. & Weare, J. (1995). Equation of state for NaCl-H₂O-CO₂ system: prediction of phase equilibria and volumetric properties. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 59: 2869-2882p.
- Duan, Z. & Zhang, Z. (2006). Equation of state of the H₂O-CO₂ system up to 10 GPa and 2573K: Molecular dynamics simulations with ab initio potential surface. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 70: 2311-2324p.
- Duan, Z., Sun, R., Zhu, C. & Chou, I. (2006) An improved model for the calculation of CO₂ solubility in aqueous solutions containing Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, and SO₄²⁻. *Marine Chem.* 98(2-4): 131-139p.
- Ercit, T. (2005). REE-Enriched Granitic Pegmatites. Rare-Element Geochemistry and Mineral Deposits. Geological Association of Canada Short Course notes, Vol 17: 175-199p.
- Faunes, A. (1988). Fundentes silíceos division Chuquicamata. Evaluación y génesis del yacimiento Tulipanes, II Región. Un caso de pegmatita zonal. V Congreso Geológico Chileno, Tomo I (B): 455-473p.
- Frezzotti, M., Tecce, F. & Casagli, A. (2012). Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration* 112: 1-20p.
- Gingsburg, A. (1984). The geological condition of the location and the formation of granitic pegmatites. International Geological Congress, 27th, Proceedings 15: 245-260p.
- Goldstein, R. & Reynolds, T. (1994). Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals. Society for Sedimentary Geology. Short Course 31: 199p.
- Goldstein, R. (2003). Petrographic analysis of fluid inclusions. Mineralogical Association of Canada, Short Course 32: 9-53p.
- Google Maps. (2017). Mapa de Puyuhuapi, Región de Aysén. <https://www.google.cl/maps/place/Puyuhuapi,+Cisnes,+XI+Regi%C3%B3n/@44.5352853,72.4905525,10.25z/data=!4m5!3m4!1s0xbdf4e37be24a6797:0xcc676d95013bc1f18m2!3d-44.3227968!4d-72.5600119>
- Hardie, L. (1983). Origin of CaCl₂ brines by basalt-seawater interaction: insights provided by some simple mass balance calculations. *Contrib. Mineral. Petrol.* 82: 205-213p.

- Hedenquist, J. & Henley, R. (1985). The importance of CO₂ on freezing point measurements of fluid inclusions; evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition. *Society of Economic Geologists*, Vol 80, N°5: 1379-1406p.
- Heinrich, C., Pettke, T., Halter, W., Aigner-Torres, M., Audétat, A., Gunther, D., Hattendorf, B., Bleiner, D., Guillong, M. & Horn, I. (2003). Quantitative multi-elemental analysis of minerals, fluids and melt inclusions by laser-ablation inductively-coupled-plasma mass-spectrometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 67: 3473–349p.
- Hervé, F., Pankhurst, R., Suárez, M. & de la Cruz, R. (1993). Basic magmatism in a mid-Tertiary transtensional basin, Isla Magdalena, Aysén, Chile. *Colloques et Séminaires-Institut de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération*: 367-369p.
- Hervé, F., Greene, F. & Pankhurst, R. (1994). Metamorphosed fragments of oceanic crust in the upper Paleozoic Chonos accretionary complex, southern Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 73-4: 263-270p.
- Hervé, F., Pankhurst, R., Drake, R. & Beck, M. (1995). Pillow metabasalts in a mid-Tertiary extensional basin adjacent to the Liquiñe-Ofqui fault zone: the Isla Magdalena area, Aysén, Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 81: 33-46p.
- Hidalgo, M. (2012) Los elementos críticos del sector energético: una cuestión geopolítica. Instituto Español de Estudios Estratégicos, documento informativo: 8p.
- Huizenga, J. (2010). Short course in fluid inclusions. Short course handbook: 1-46p.
- Humphries, M. (2012). Rare Earth Elements: The Global Supply Chain Marc Humphries. Congressional Research Service: 31p.
- Hurai, V., Huraiová, M., Slobodník, M. & Thomas, R. (2015). Geofluids: Developments in Microthermometry, Spectroscopy, Thermodynamics, and Stable Isotopes. A volume in Vapor-Liquid Equilibrium Data Bibliography: 489p.
- Icenhower, J. & London, D. (1996). Experimental partitioning of Rb, Cs, Sr and Ba between alkali feldspar and peraluminous melt. *Am. Mineral.* 81: 719-734p.
- Jahns, R. & Burnham, C. (1958). Melting and crystallization of granite and pegmatite. 2. Experimental studies of pegmatite genesis. *Geikigucak Siciuety if Anerucam Bulletin* 69: 1592-1593p
- Jahns, R. & Tuttle, O. (1963). Layered pegmatite–aplite intrusives. *Minera. Society of America. Special Paper* 1: 78-92p
- Jahns, R. & Burnham, C. (1969). Experimental studies of pegmatite genesis: I. A model for the derivation and crystallization of granitic pegmatites. *Economic Geology*, Vol. 64: 843–864p.
- Jolliff, B., Papike, J. & Shearer, C. (1992). Petrogenetic relationships between pegmatite and granite based on geochemistry of muscovite in pegmatite wall zones, Black Hills, South Dakota, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 56: 1915-1939p.
- Kalyuzhnyi, V. & Koltrun, L. (1953). Some data on pressure and temperatures during formation of minerals in Nagol'nyz Kryozh Donest Basin. *Mineralogicheskii Sbornik*, 7: 67-74p.
- Kontak, D., Dostal, J., Kyser, T. & Archibald, A. (2002). A petrological, geochemical, isotopic and fluid-inclusion study of 370 Ma pegmatite-aplite sheets, Peggys Cove, Nova Scotia, Canada. *The Canadian Mineralogist*. Vol. 40: 1249-1286p.
- Laccazette, A. (1990). Application of linear elastic fracture mechanics to the quantitative evaluation of fluid-inclusion decrepitation. *GEOLOGY*, Vol. 18: 782-785p.
- Lamadrid, H., Moore, L., Moncada, D., Rimstidt, J., Burruss, R. & Bodnar, R. (2017). Reassessment of the Raman CO₂ densimeter. *Chemical Geology* 450: 210–222p.
- Landes, K. (1933) Origin and classification of pegmatites. *American Mineralogist* 18: 33-56p.

- Larsen, R. (2002). The distribution of rare-earth elements in k-feldspar as an indicator of petrogenetic processes in granitic pegmatites: examples from two pegmatite fields in Southern Norway. *The Canadian Mineralogist* Vol. 40: 137-151p.
- Linnen, R., Van Lichtenvelde, M. & Černý, P. (2012). Granitic pegmatites as sources of strategic metals. *Elements* 8: 275-280p.
- Linnen, R., Samson, I., Williams-Jones, A. & Chakmouradian, A. (2014). *Geochemistry of the Rare-Earth Element, Nb, Ta, Hf, and Zr Deposits*: 26p.
- London, D. (2008). *Pegmatites*. Ottawa: The Canadian Mineralogist, Special Publication 10: 347p.
- London, D. & Kontak, D. (2012). *Granitic Pegmatites: Scientific Wonders and Economic Bonanzas*. *Elements*: 257-261p.
- London, D. & Morgan, G. (2012). The Pegmatite Puzzle. *Elements* 8: 263-268p.
- London, D. (2013). Crystal-filled cavities in granitic pegmatites: bursting the bubble. *Rocks and Minerals* 88: 527-534p.
- London, D. (2014) A petrologic Assessment of Internal Zonation in Granitic Pegmatites. *Lithos* 184–187: 74–104p.
- Mao, S. & Duan, Z. (2008). The P,V,T,x properties of binary aqueous chloride solutions up to T = 573 °K and 100 MPa. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol. 40: 1046-1063p.
- Meinhold, G. (2010). Rutile and its applications in earth sciences. *Earth-Science Reviews* 102: 1-28p.
- Mella M. & Duhart, P. (2011). Mapa geología base área puerto Puyuhuapi, región de Aysén, Sernageomin.
- Mella, M. (2014). Geología Preliminar del Área de Puyuhuapi. Sernageomin. *Jornadas Geológicas 2014: Sesiones temáticas*: 117-119p.
- Mohr, S., Mudd, G. & Giurco, D. (2012). *Lithium Resources and Production: Critical Assessment and Global Projections*: 20p.
- Moncada, D. & Bodnar, R. (2012). Gangue mineral textures and fluid inclusion characteristics of the Santa Margarita Vein in the Guanajuato Mining District, Mexico. *Centr. Eur. J. Geosci.*, 4(2): 300-309p.
- Montenegro, T. & Sosa, G. (2003). Inclusiones fluidas en pegmatitas portadoras de estaño de la Sierra de San Luis, Argentina. *Revista de Asociación Geológica Argentina*, 58 (3): 347-355p.
- Mutchler S., Fedele, L. & Bodnar R. (2008). Analysis Management System (AMS) for reduction of laser ablation ICPMS data. In *Laser-Ablation-ICPMS in the Earth Sciences: Current Practices and Outstanding Issues* (P. Sylvester, ed.) *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*. Vol. 40: 318-327p.
- Norton, J. (1983). Sequence of mineral assemblages in differentiated granitic pegmatites. *Economic Geology* 78: 854-874p.
- Pankhurst, R. & Hervé, F. (1994). Granitoid age distribution and emplacement control in the North Patagonian batholith in Aysén (44°-47°). 1994. *Congreso Geológico Chileno*, N° 7. Acta 2: 1409-1413p.
- Pankhurst, R., Weaver, S., Hervé, F. & Larrondo, P. (1999). Mesozoic-Cenozoic evolution of the North Patagonian Batholith in Aysén, southern Chile. *Journal of the Geological Society* 1564: 673-694p.
- Price, J. (2013). The challenges of mineral resources for society. *Geological Society of America Special Papers* 501: 19p.

- Roedder, E. (1984). Fluid Inclusions: Review in Mineralogy, vol. 12, Mineralogical Society of America: 644p.
- Rudnick, R. & Gao, S. (2003). Composition of the continental crust. Treatise On Geochemistry. Vol. 3: 1-64p.
- Sakoma, E. & Martin, R. (2002). Oxidation-induced postmagmatic modifications of primary ilmenite, NYG-related aplite dyke, Tibchi Complex, Kalato, Nigeria. Mineralogical Magazine 66: 591–604p.
- Schmidt C., Rosso K. & Bodnar R. (1995). Synthetic fluid inclusions. XIII: Experimental determination of the PVTX properties in the system (H₂O + 40 wt.% NaCl) - CO₂ at elevated temperatures and pressures. Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol. 59, N° 19: 3953-3959p.
- Sernageomin. (2003). Mapa Geológico de Chile. Publicación Geológica Digital N° 4 (CD-ROM. Versión 1.0).
- Silva, C., Herrera, C. & Hervé, F. (2003). Petrogénesis de lavas y diques básicos de la Formación Traiguén, Región de Aysén (43°30-45°S), Chile. In Congreso Geológico Chileno, N° 10.
- Steele-MacInnis, M., Bodnar, R. & Naden, J. (2011). Numerical model to determine the composition of H₂O–NaCl–CaCl₂ fluid inclusions based on microthermometric and microanalytical data. Geochimica Et Cosmochimica Acta. Vol. 75: 21-40p.
- Thiery, R., Vidal, J. & Dubessy, J. (1994). Phase equilibria modelling applied to fluid inclusions: liquid-vapour equilibria and calculation of the molar volume in the CO₂-CH₄-N₂ system. Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol. 58: 1073-1082p.
- Thomas, R., Davidson, P. & Beurlen, H. (2012). The competing models for the origin and internal evolution of granitic pegmatites in the light of melt and fluid inclusion research. Mineralogy and Petrology 106: 55 – 73p.
- Thomas, R. & Davidson, P. (2016). Revisiting complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids, and the extreme enrichment of some elements in the supercritical state - Consequences for the formation of pegmatites and ore deposits. Ore Geology Reviews 72: 1088–1101p.
- Thompson, S., Hervé, F. & Stickhert, B. (2001). Mesozoic-Cenozoic denudation history of the Patagonian Andes (southern Chile) and its correlation to different subduction processes. Tectonics 205: 693-711p.
- Thomson, S., Brandon, M., Tomkins, J., Reiners, P., Vásquez, C. & Wilson, N. (2010). Glaciation as destructive and constructive control on mountain building. Nature 467(7313): 313-317p.
- Thorium Report Committee. (2008). Thorium as an Energy Source, Opportunities for Norway. Geological Survey of Norway (NGU): 160p.
- Tuttle, O. Bowen, N. (1958). Origin of granite in light of experimental studies in the system NaAlSi₃O₈– KAlSi₃O₈–SiO₂–H₂O. Geol. Soc. Am., Mem. 74.
- USGS. (2015). Mineral commodity summaries 2015: U.S. Geological Survey: 196p.
- Van der Kerhof, A. & Hein, U. (2001). Fluid inclusion petrography. Lithos, 44: 27-47p.
- Vanko D., Bodnar R. & Sterner S. (1988). Synthetic fluid inclusions. VIII. Vapor-saturated halite solubility in part of the system NaCl-CaCl₂-H₂O, with application to fluid inclusions from oceanic hydrothermal systems. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 52: 2451-2456p.
- Velásquez, R., Collao, S. & Figueroa, O. (2012). Zonación mineralógica de la Pegmatita Poñén en el Batolito Costero del Sur, Región del Biobío, Chile. Congreso Geológico Chileno, 13, Antofagasta, Chile, 05-09 Agosto, 2012: 345-347p.

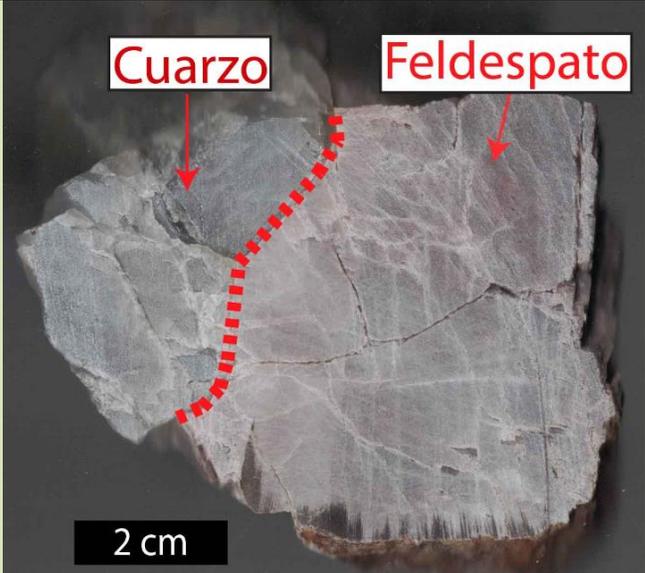
- Yardley, B. & Bodnar, R. (2014). Fluids in the continental crust. *Geochemical Perspectives*, 3 (1). 1 – 123p. ISSN 2223-7755.
- Xu, G. (2000). Fluid inclusions with NaCl-CaCl₂-H₂O composition from the Cloncurry hydrothermal system, NW Queensland, Australia. *Lithos* 53: 21-35p.
- Zhang, R., Zhai, S., Fei, Y. & Liou, J. (2003). Titanium solubility in coexisting garnet and clinopyroxene at very high pressure: the significance of exsolved rutile in garnet. *Earth and Planetary Science Letters* 216: 591–601p.

Anexos

Anexo A: Descripción petrográfica de muestras

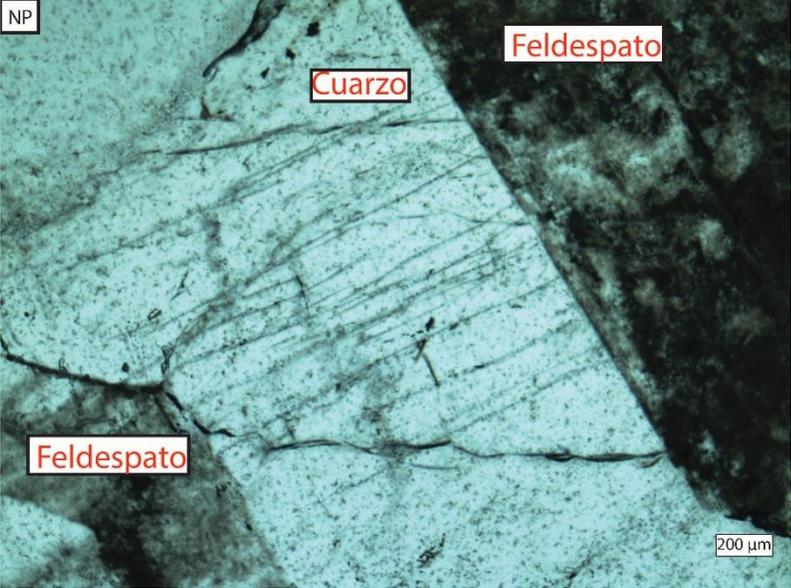
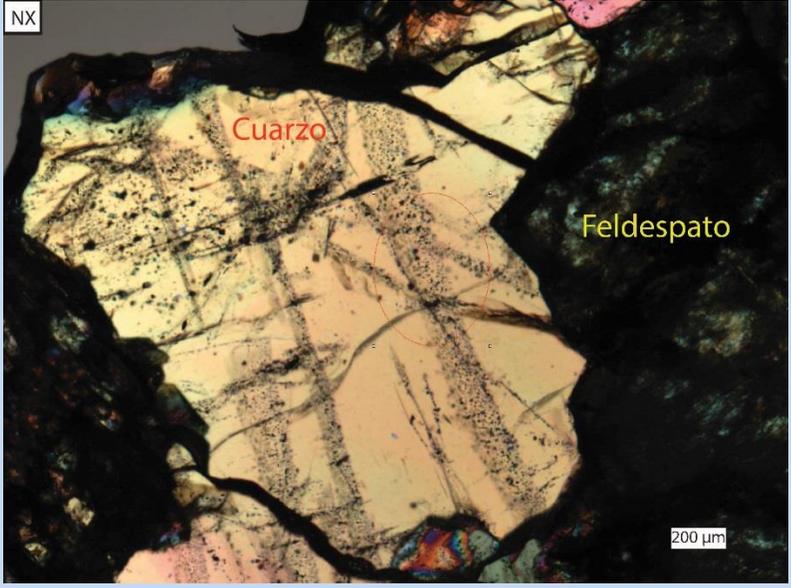
Muestras de mano:

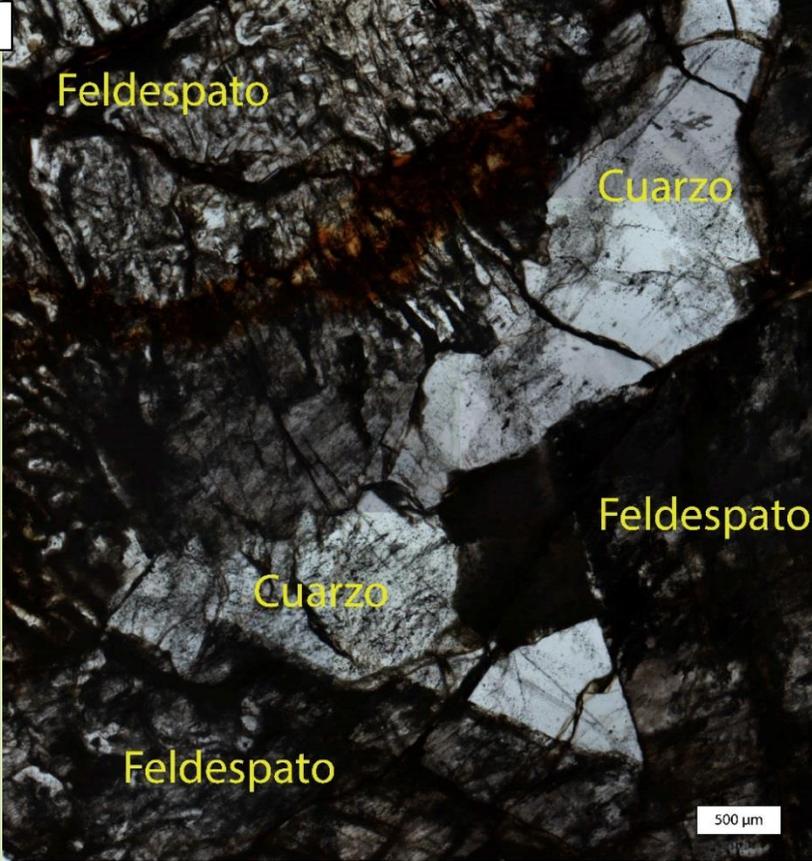
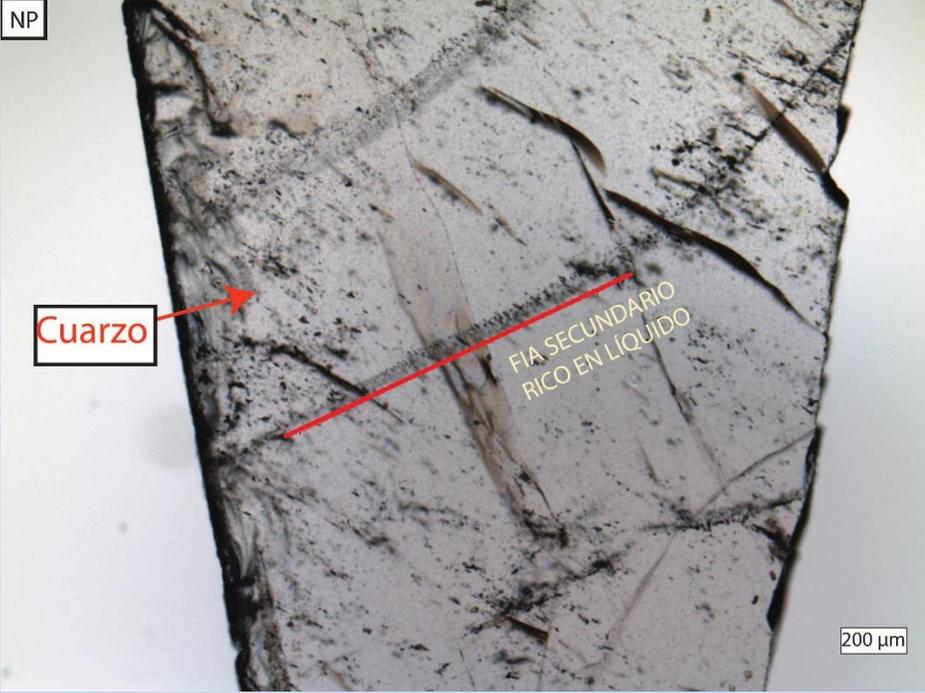
Tabla 7: Descripciones petrográficas de muestras de mano.

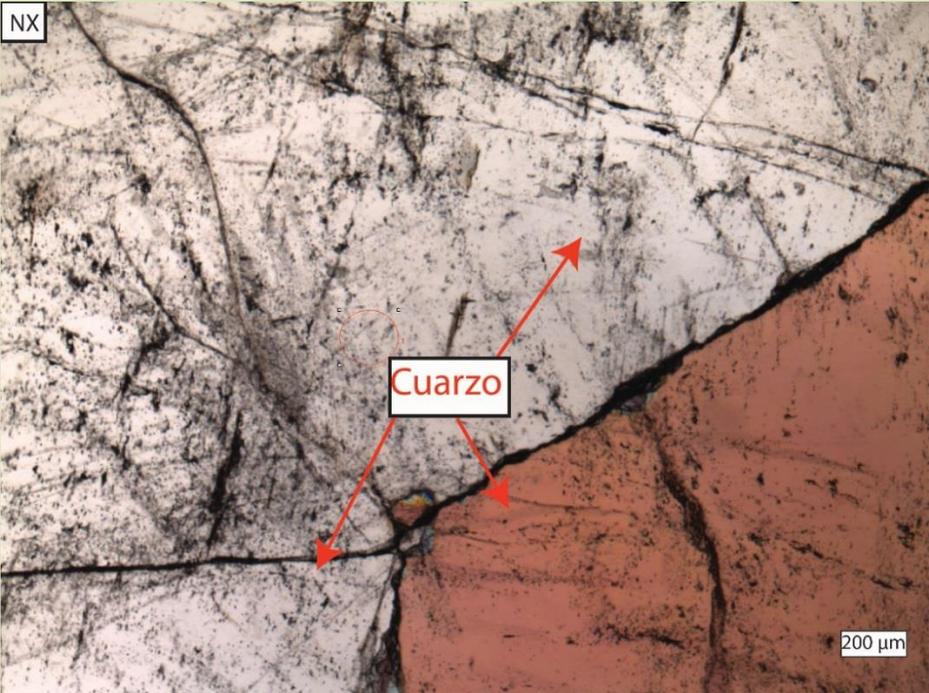
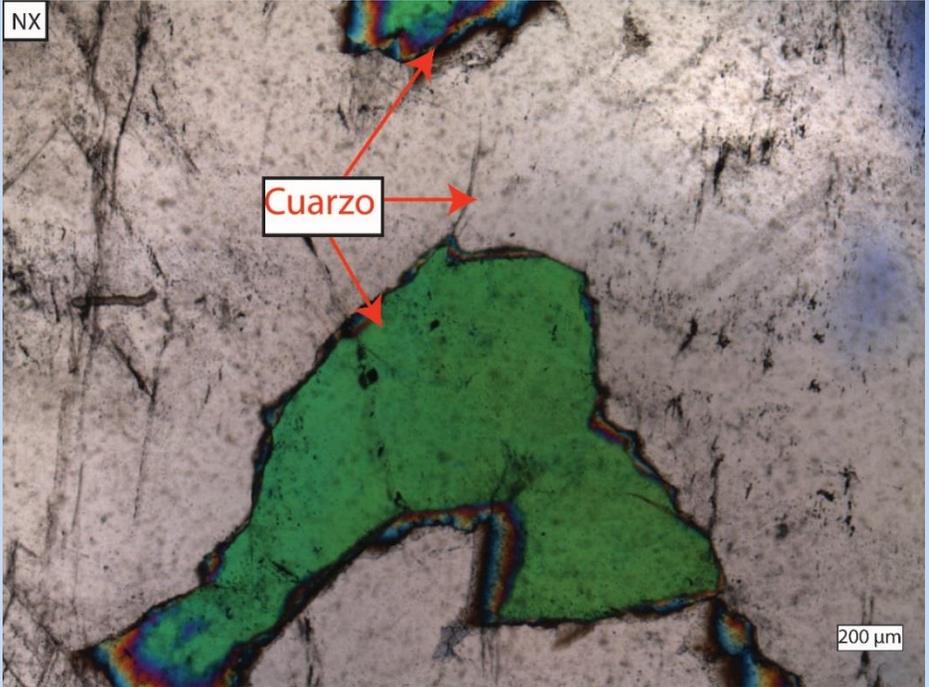
Muestra	Descripción	
Jpt	<p>En este corte se observa la roca total en la cual se distinguen 3 poblaciones de cristales. Por un lado, se tiene pegmatita, que es holocristalina, inequigranular con textura pegmatítica. Feld-k va de 5-20 mm y cubre 50%, cuarzo 5-30 mm con 40% y plg 5-10 mm y un 10%. Contiene fuerte magnetismo en algunos mx negros (Ox-Fe) y hornblendas de menor tamaño. En contacto con roca caja se distingue por un lado un granito fanerítico de biotita, mesocrático, equigranular de grano fino-medio, con feld 1-2 mm 30%, qz 1-3 mm 50% y plg 1-2 mm 20%, con biotita y ox-Fe (fuerte magnetismo). Por otro lado, se distingue granito fanerítico de biotita leucocrático, equigranular de grano fino, con feld 1-2 mm 20%, qz 1-2 mm 60% y plg 1 mm 20% con biotita, hornblenda y Ox-Fe (fuerte magnetismo). En pegmatitas se ve que hay roca caja -> feld-k -> cuarzo, como una especie de zonación.</p>	
Pegmatita 2	<p>Fotos escaneadas. Se ve cara con feldespato potásico en contacto con cuarzo, de grano grueso. Como la anterior, es holocristalina, inequigranular y de textura pegmatítica, con feldespato de 5-15 mm cubriendo un 60% y cuarzo 10-15 mm un 40% (0% plg). Fuera de la cara escaneada hay partes con mica blanca de color verde, un mineral amarillo en parte alterada (jarosita) en cara expuesta con feldespato, y algo de clorita diseminada. Además, en ciertas partes tiene fuerte magnetismo (ox-Fe), y óxidos de Mn menor (marca de pirolusita). Mx de alteración: Ox-Mn 1%, Clor 1%, Jaro 1%.</p>	

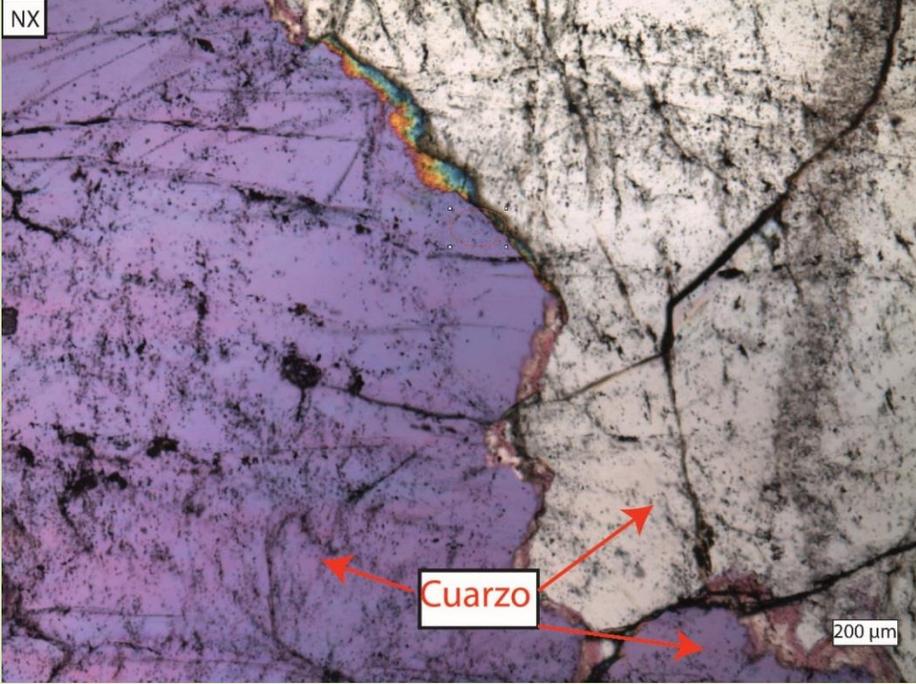
Láminas delgadas y doble pulidas:

Tabla 8: Descripciones petrográficas de láminas delgadas y doble pulidas.

Muestra	Descripción	Fotos
Jpt-1	<p>Lámina delgada. Se observó como descripción inicial de pegmatita. Mayormente compuesta de cuarzo (40%) y feldespato (30%), menor plagioclasa (5%) y micas (5%). Se observa contacto con roca caja correspondiente a granito de grano fino (10%). En cuanto a inclusiones fluidas se tienen muchos FIA's secundarios en cuarzo. El feldespato es gráfico y casi no posee inclusiones, al igual que la plagioclasa que es escasa. En cuarzo se ven distintos trails con proporciones de líquido/vapor de 20 a 30%. Tienen algunos sólidos, pero no parecen ser minerales hijos.</p>	 <p>Micrograph NP showing a thin lamina of pegmatite. The image displays a complex texture with quartz (Cuarzo) and feldspar (Feldespato). A scale bar indicates 200 μm.</p>
N1	<p>Corte doble pulido. Se tiene parte de la roca con mayoría de feldespato intercrecido con cuarzo, pero se observan algunos cristales notorios de cuarzo en varias zonas, mientras que en un borde es solo cuarzo, del núcleo de la pegmatita. En esta zona se observa rutilo diseminado. Se observan muchos FIA's correspondientes a trails secundarios en cuarzo. En feldespato gráfico no se logran identificar bien estos trails. Las IF vistas son mayormente L-V y algunas pocas tienen sólidos, identificándose dos FIA's en particular con sólidos en tamaños consistentes entre las inclusiones vistas, siendo por lo tanto minerales hijos. Se tienen también algunas decrepitadas en clústeres aislados que serán utilizadas para estudiar como posibles primarias.</p>	 <p>Micrograph NX showing a double-polished section of pegmatite. The image displays a complex texture with quartz (Cuarzo) and feldspar (Feldespato). A scale bar indicates 200 μm.</p>

Muestra	Descripción	Fotos
N2	<p>Corte doble pulido. Se observa mayormente feldespato potásico en casi todo el corte. Muy poco cuarzo salvo que el que está intercrecido gráficamente con el feldespato. Se observan inclusiones secundarias ricas en líquido en este cuarzo, del mismo tipo observado en muestras anteriores, siendo un FIA intragranular.</p>	<p>NX</p>  <p>Feldespato</p> <p>Cuarzo</p> <p>Feldespato</p> <p>Cuarzo</p> <p>Feldespato</p> <p>500 µm</p>
N3	<p>Corte doble pulido. Corresponde a parte del núcleo de pegmatita, siendo formado exclusivamente de cuarzo. Pulido deficiente y en su mayoría es cuarzo con trails secundarios. Se observan cristales de gran tamaño subhedrales a anhedrales. Rutilo diseminado en cuarzo. Hay FIA's ricos en líquido secundarios y también FIA's ricos en vapor secundarios. Posible ebullición en zona con inclusiones ricas en líquido y en vapor coexistentes en apariencia. Hay varios trails ricos en líquido de una orientación similar que pueden ser contemporáneos, siendo ambos secundarios intragranulares. En bordes de granos se observan FIA's secundarios ricos en líquido transgranulares, que pueden ser más tardías que las anteriores intragranulares.</p>	<p>NP</p>  <p>Cuarzo</p> <p>FIA SECUNDARIO RICO EN LIQUIDO</p> <p>200 µm</p>

Muestra	Descripción	Fotos
N4	<p>Corte doble pulido. Corresponde a parte del núcleo de pegmatita, siendo formado exclusivamente de cuarzo. No se tiene un buen pulido en general (se ven rayones café en varias partes del corte). Muy frágil. EN su mayoría hay cuarzo subhedral y muy poco feldespato potásico. Abundante rutilo diseminado de pequeño tamaño. En nícoles cruzado se ven ciertas zonaciones de cuarzo que sirven para diferenciar distintos cristales. No se observan inclusiones primarias en zonas de crecimiento, pero sí algunas decrepitadas en clústeres aislados. En tanto, las secundarias son similares a las anteriores, ricas en líquido.</p>	
N5	<p>Corte doble pulido. Corresponde a parte del núcleo de pegmatita, siendo formado exclusivamente de cuarzo. Se observan 2 cristales de cuarzo a vista macroscópica. Rutilo diseminado en gran parte del cuarzo. No se tienen FIA's primarios, pero si numerosos trails secundarios, por lo que se tienen mismas inclusiones observadas en cortes anteriores. Se observaron algunos FIA's ricos en vapor en medio de cristal derecho de cuarzo, además de numerosos ricos en líquido.</p>	

Muestra	Descripción	Fotos
<p data-bbox="120 533 164 569">N6</p>	<p data-bbox="233 485 669 621">Corte idéntico a N5 ya que fue mandado a hacer por duplicado con la esperanza de encontrar FIA's primarios claros.</p>	

Anexo B: Tablas de microtermometría

Tabla 9: Total de datos medidos mediante microtermometría en laboratorio.

Muestra	Zona	FIA	IF	T _m (°C)	T _h (°C)	Observaciones	Descripción FIA	Tipo	Salinidad (%en peso de NaCl)
N3	2	1	1	-24.7	205.1		Arreglo de inclusiones de forma ovalada, ricas en líquido y sin sólidos. Razón líquido-vapor de 10-20% consistente.	Secundaria intragranular	26
N3	2	1	2	-23.1	199.9				24.8
N3	2	1	3	-25.8	194.7				26.7
N3	2	1	4	-23.6	202.7				25.2
N3	2	1	5	-27.6	208.7				27.8
N3	2	1	6	-23.5	201.8				25.1
N3	2	1	7	-24.1	201.5				25.6
N3	2	1	8	-24.5	208.3				25.8
N3	2	1	9	-22	201.7				24
N3	2	1	10	-24.1	207.5				25.6
N3	2	1	11	-24.7	191.2				26
N3	2	1	12	-22	188.5				24
N3	2	2	1	-12.4	165	Presenta sólido	Arreglo de inclusiones de orientación distinta al anterior. No se cortan. Razón líquido-vapor de 15-50% consistente.	Secundaria transgranular	15.5
N3	2	2	2	-14.4	184.1	Presenta sólido			17.5
N3	2	2	3	-14	172	Presenta sólido			17.1
N3	2	2	4	-13.7	171.6	Presenta sólido			16.8
N3	2	2	5	-13.8	173.7	Presenta sólido			16.9
N3	2	3	1	-23.7	207		Arreglo subparalelo a FIA 1 de esta zona con forma y tamaño similar. Razón líquido-vapor de 10-20% consistente.	Secundaria intragranular	25.3
N3	2	3	2	-24.7	210.9				26
N3	2	3	3	-24.1	209.1				25.6
N3	2	3	4	-23.6	208.3				25.2
N3	2	3	5	-23.6	198.1				25.2
N3	2	3	6	-23.9	198.7				25.4
N3	2	3	7	-24.1	203.5				25.6
N3	2	3	8	-23.2	201.2				24.9
N3	2	3	9	-23.1	187				24.8
N3	2	3	10	-23.8	193.5				25.3
N3	2	3	11	-24.2	189.3				25.6
N3	2	3	12	-24.4	186.4				25.8
N3	2	3	13	-24.3	193.5				25.7
N3	2	3	14	-23.9	190.6				25.4
N3	3	1	1	-25.2	210		Arreglo de inclusiones que presenta coexistencia entre IF	Secundaria transgranular	26.3
N3	3	1	2	-24.9	219.7	Presenta sólido			26.1
N3	3	1	3	-25.3	230.1				26.4

Muestra	Zona	FIA	IF	T _m (°C)	T _h (°C)	Observaciones	Descripción FIA	Tipo	Salinidad (%en peso de NaCl)		
N3	3	1	4	-24.9	219.5		ricas en líquido (primeras 17 medidas) con otras oscuras ricas en CO ₂ (siguientes 16 medidas). Parte líquida de forma ovalada con razón líquido-vapor de 10-20% consistente entre ellas.		26.1		
N3	3	1	5	-25.4	227.3				26.4		
N3	3	1	6	-25.1	209.1	Presenta sólido			26.2		
N3	3	1	7	-23.3	201.2	Presenta sólido			25		
N3	3	1	8	-25.1	211.9	Presenta sólido			26.2		
N3	3	1	9	-25.1	205.5	Presenta sólido			26.2		
N3	3	1	10	-23.9	190.1	Presenta sólido			25.4		
N3	3	1	11	-23.8	195.9	Presenta sólido			25.3		
N3	3	1	12	-23.8	194.3				25.3		
N3	3	1	13	-23.5	191.3				25.1		
N3	3	1	14	-23.5	205				25.1		
N3	3	1	15	-23.8	203				25.3		
N3	3	1	16	-23.8	204.2				25.3		
N3	3	1	17	-23.3	193.1				25		
N3	3	1	1	-59.3	28.1	CO ₂			Parte carbónica del FIA recién descrito. No se pudo calcular su salinidad de esta fase ya que no se pudo medir temperatura de fusión de clatrato.	Secundaria transgranular	No medido
N3	3	1	2	-59.3	28.4	CO ₂					No medido
N3	3	1	3	-59.3	28	CO ₂					No medido
N3	3	1	4	-59.7	27.9	CO ₂	No medido				
N3	3	1	5	-59.7	28	CO ₂	No medido				
N3	3	1	6	-59.7	28.5	CO ₂	No medido				
N3	3	1	7	-59.7	28.2	CO ₂	No medido				
N3	3	1	8	-59.7	27.9	CO ₂	No medido				
N3	3	1	9	-59.7	28	CO ₂	No medido				
N3	3	1	10	-59.7	28.4	CO ₂	No medido				
N3	3	1	11	-59.7	28	CO ₂	No medido				
N3	3	1	12	-59.7	27.9	CO ₂	No medido				
N3	3	1	13	-59.7	27.8	CO ₂	No medido				
N3	3	1	14	-59.7	28	CO ₂	No medido				
N3	3	1	15	-59.7	28.4	CO ₂	No medido				
N3	3	1	16	-59.7	28.1	CO ₂	No medido				
N3	1	1	1	-24.1	208.1	Presenta sólido	Arreglo de inclusiones ricas en líquido, ovaladas. Razón líquido-vapor de 10-20% consistente entre ellas.	Secundaria intragranular	25.6		
N3	1	1	2	-23.1	215.2	Presenta sólido			24.8		
N3	1	1	3	-28.9	211.9				28.5		
N3	1	1	4	-25.7	210.7				26.6		
N3	1	1	5	-26.9	209.8				27.4		
N3	1	1	6	-27.4	210.2				27.7		
N3	1	1	7	-24.8	208.5				26		
N3	1	1	8	-24.1	222.9				25.6		

Muestra	Zona	FIA	IF	T _m (°C)	T _h (°C)	Observaciones	Descripción FIA	Tipo	Salinidad (%en peso de NaCl)
N3	1	1	9	-23.6	207.8	Presenta sólido			25.2
N3	1	2	1	-24.9	208.6		Arreglo de inclusiones ricas en líquido, ovaladas, intergranular, subparalelo al anterior. Razón líquido-vapor de 15-20% consistente.	Secundaria intragranular	26.1
N3	1	2	2	-24.2	201.8				25.6
N3	1	2	3	-24.1	205	Presenta sólido			25.6
N3	1	2	4	-24.1	207.9				25.6
N3	1	2	5	-23.5	202.7				25.1
N3	1	2	6	-23.3	206.1				25
N3	1	2	7	-23.5	207.4	Presenta sólido			25.1
N3	1	4	1	-14.2	175				Arreglo perpendicular a los anteriores, que es cortado por dichos trails. Presenta numerosos sólidos en su interior, que son de tamaño menor a la burbuja. Razón líquido-vapor de 20% consistente. Sólido ocupa menos del 10%,
N3	1	4	2	-14.1	178.1		17.2		
N3	1	4	3	-16.5	200.1		19.5		
N3	1	4	4	-14.6	186.4	Presenta sólido	17.7		
N3	1	4	5	-14.5	189.1	Presenta sólido	17.6		
N3	1	4	6	-14.9	180.7	Presenta sólido	18		
N3	1	4	7	-14.1	170.1	Presenta sólido	17.2		
N3	1	4	8	-16.9	195.3	Presenta sólido	19.8		
N3	1	3	1	-24.4	207.4		Arreglo de inclusiones ricas en líquido, ovaladas, subparalelo al FIA 1 y FIA2 de esta zona. Razón líquido-vapor de 10-20% consistente.	Secundaria intragranular	25.8
N3	1	3	2	-24.1	205.2				25.6
N3	1	3	3	-24.7	213.9				26
N3	1	3	4	-24.4	212.4				25.8
N3	1	3	5	-24.1	207.9	Presenta sólido			25.6
N3	1	3	6	-24	210.2				25.5
N3	1	3	7	-24.1	211.6				25.6
N3	1	3	8	-24.5	199.5	Presenta sólido			25.8
N3	1	3	9	-25.1	216.1				26.2
N3	1	3	10	-24.5	212.7				25.8
N3	1	3	11	-24.2	208.3				25.6
N3	1	3	12	-24.1	211.7				25.6
N3	1	3	13	-24.2	208.9	Presenta sólido			25.6
N2	A	1	1	-27.5	240.5		Arreglo de inclusiones en cuarzo subhedral intercrecido con feldespato en zona de textura gráfica. Son secundarias y ricas en líquida, razón	Secundaria intragranular	27.7
N2	A	1	2	-27.5	236.5				27.7
N2	A	1	3	-27.1	234.5				27.5
N2	A	1	4	-24.9	238.9				26.1
N2	A	1	5	-28.1	235.1				28.1
N2	A	1	6	-28.4	237.1				28.3
N2	A	1	7	-28.2	236.5				28.2

Muestra	Zona	FIA	IF	T _m (°C)	T _h (°C)	Observaciones	Descripción FIA	Tipo	Salinidad (%en peso de NaCl)
N2	A	1	8	-27.9	239.8		líquido-vapor de 15% consistente.		28
N2	A	2	1	-28.5	214.3		Características similares al anterior, pero es cortado por dicho trail. Razón líquido-vapor de 15% consistente.	Secundaria intragranular	28.3
N2	A	2	2	-28.4	214.5				28.3
N2	A	2	3	-28.2	213				28.2
N2	A	2	4	-28.5	214.5				28.3
N2	A	2	5	-28.2	212.7				28.2
N2	A	2	6	-27.4	208.2				27.7
N2	A	2	7	-28	209.6				28
N2	A	2	8	-27.5	205.8				27.7
N2	A	2	9	-28.8	210.1				28.5
N2	B	1	1	-28.3	209.3				Arreglo de inclusiones en cuarzo subhedral intercrecido con feldespato en zona de textura gráfica. Son secundarias y ricas en líquida, razón líquido-vapor de 15% consistente. Pocas presentan sólidos de tamaños menores a burbujas de vapor.
N2	B	1	2	-28.3	210.7		28.2		
N2	B	1	3	-29	205.5		28.6		
N2	B	1	4	-28.5	205		28.3		
N2	B	1	5	-27.7	203.5		27.9		
N2	B	1	6	-29.5	208	Presenta sólido	28.9		
N2	B	1	7	-29.3	211.3	Presenta sólido	28.8		
N2	B	1	8	-28.4	212		28.3		
N2	C	1	1	-28.8	198		Arreglo de inclusiones en cuarzo subhedral intercrecido con feldespato en zona de textura gráfica. Son secundarias y ricas en líquida, razón líquido-vapor de 15% consistente. Pocas presentan sólidos de tamaños menores a burbujas de vapor.	Secundaria intragranular	28.5
N2	C	1	2	-29.1	197.2	Presenta sólido			28.7
N2	C	1	3	-27.2	195.3				27.6
N2	C	1	4	-27.3	194.2				27.6
N2	C	1	5	-27.8	193.1	Presenta sólido			27.9
N2	C	1	6	-29.8	196.3				29
N2	C	1	7	-28.1	194.2				28.1
N2	C	1	8	-26.7	197	Presenta sólido			27.3
N2	C	1	9	-27.2	197.5	Presenta sólido			27.6
N2	C	1	10	-29.9	208				29.1
N2	C	2	1	-27.8	200		Características similares al anterior, pero es cortado por dicho trail. Razón líquido-vapor de 15% consistente.	Secundaria intragranular	27.9
N2	C	2	2	-30.1	200.5				29.2
N2	C	2	3	-26.5	197.5				27.1
N2	C	2	4	-28.1	199.8				28.1
N2	C	2	5	-29.7	202.1				29
N2	C	2	6	-27.1	198.6				27.5
N2	C	2	7	-26.9	197.7				27.4
N1	3	1	1	-32.1	210.9	Presenta sólido			30.2

Muestra	Zona	FIA	IF	T _m (°C)	T _h (°C)	Observaciones	Descripción FIA	Tipo	Salinidad (%en peso de NaCl)
N1	3	1	2	-32.5	205.8	Presenta sólido	Arreglo con inclusiones ricas en líquido y con un sólido en su mayoría, de igual proporción entre sólido y vapor. Razón líquido-vapor de 15% consistente. T _e medida en algunas da una temperatura cercana a -79 °C.	Secundaria intragranular	30.4
N1	3	1	3	-32.7	208.9	Presenta sólido			30.4
N1	3	1	4	-33.9	210.7				31
N1	3	1	5	-33.9	210.7	Presenta sólido			31
N1	3	1	6	-31.9	203.3	Presenta sólido			30.1
N1	3	1	7	-32.1	209.8	Presenta sólido			30.2
N1	3	1	8	-33	207.1				30.6
N1	3	1	9	-32.4	205.2	Presenta sólido			30.3
N1	3	1	10	-32.4	203.8	Presenta sólido			30.3
N1	3	1	11	-32.1	199.7	Presenta sólido			30.2
N1	3	1	12	-33.2	209.5	Presenta sólido			30.7
N1	3	1	13	-31.8	209.5	Presenta sólido			30
N1	2	1	1	-35	225.3	Presenta 2 sólidos	Arreglo con inclusiones ricas en líquido y con un sólido en su mayoría, a veces con 2, con misma proporción entre burbuja y el sólido, que se presenta de forma esférica. Razón líquido vapor es de 10 a 20%.	Secundaria intragranular	31.4
N1	2	1	2	-37.5	218.3	Presenta sólido			32.3
N1	2	1	3	-38.5	221.5	Presenta sólido			32.6
N1	2	1	4	-35.5	223.4	Presenta sólido			31.6
N1	2	1	5	-30	216	Presenta sólido			29.1
N1	2	1	6	-35.7	219.9	Presenta sólido			31.7
N1	2	1	7	-36.4	219.5	Presenta sólido			31.9
N1	2	1	8	-36.1	223.1	Presenta sólido			31.8
N1	2	1	9	-35.1	230.3	Presenta sólido			31.4
N1	2	1	10	-34.8	217	Presenta sólido			31.3
N1	2	1	11	-34.5	220.1	Presenta sólido			31.2
N1	2	1	12	-34.2	200	Presenta sólido			31.1
N1	2	1	13	-36.1	214.8	Presenta sólido	31.8		
N1	1	1	1	-27.3	197.5		Arreglo en cuarzo en zona de intercrecimiento gráfico. Son de forma ovaladas a irregulares ricas en líquido, sin sólidos presentes. Razón líquido vapor es de 5 a 15%.	Secundaria intragranular	27.6
N1	1	1	2	-27.1	198.3				27.5
N1	1	1	3	-26.9	197				27.4
N1	1	1	4	-26.5	196				27.1
N1	1	1	5	-27.2	198.1				27.6
N1	1	1	6	-25.8	196.1				26.7
N1	1	1	7	-24.4	194.2				25.8
N1	1	1	8	-24.9	195				26.1
N1	1	2	1	-30.2	216		FIA que corta al anterior, no se alcanza a ver continuación fuera de	Secundaria intragranular	29.2
N1	1	2	2	-30.9	206				29.6
N1	1	2	3	-31.3	209				29.8
N1	1	2	4	-30.4	207.9				29.3

Muestra	Zona	FIA	IF	T _m (°C)	T _h (°C)	Observaciones	Descripción FIA	Tipo	Salinidad (%en peso de NaCl)
N1	1	2	5	-30.8	209.8		cristal de cuarzo. Forma y razón líquido-vapor similar.		29.5
N5	1	1	1	-15.1	161.8		FIA con inclusiones ricas en líquida decrepitadas, ubicada en forma de clúster aislado. Unas pocas presentan sólidos de tamaños inconsistentes con burbuja. Pueden ser primarias.	Primaria	18.2
N5	1	1	2	-16	178				19
N5	1	1	3	-15	191				18.1
N5	1	1	4	-14.5	150	Presenta 2 sólidos			17.6
N5	1	1	5	-16.2	158	Presenta sólido			19.2
N5	1	1	6	-15.2	170.9				18.3
N5	1	1	7	-16.2	205				19.2
N5	1	1	8	-13.7	198				16.8
N5	2	1	1	-18.8	241		FIA con inclusiones ricas en líquida decrepitadas, ubicada en forma de clúster aislado. Unas pocas presentan sólidos de tamaños inconsistentes con burbuja. Pueden ser primarias. Razón líquido vapor es de 10 a 20%.	Primaria	21.5
N5	2	1	2	-19.2	215				21.8
N5	2	1	3	-20.3	222				22.7
N5	2	1	4	-18	240	Presenta 2 sólidos			20.8
N5	2	1	5	-19.3	252				21.9
N5	2	1	6	-18.2	217				21
N5	2	1	7	-18.4	219				21.1
N5	2	1	8	-18.4	214				21.1
N5	2	1	9	-16.9	221				19.8
N5	2	1	10	-17.8	221				20.6
N6	1	1	1	-12.2	167		FIA con inclusiones ricas en líquida decrepitadas, ubicada en forma de clúster aislado. Unas pocas presentan sólidos de tamaños inconsistentes con burbuja. Pueden ser primarias. Razón líquido vapor es de 10 a 20%.	Primaria	15.3
N6	1	1	2	-12.2	206				15.3
N6	1	1	3	-10.7	230				13.7
N6	1	1	4	-10.7	186.7				13.7
N6	1	1	5	-9	199	Presenta sólido			11.8
N6	1	1	6	-11.6	193				14.7
N6	1	1	7	-11.9	194				15
N6	1	1	8	-9.7	182	Presenta sólido			12.6
N6	3	1	1	-14.5	180	Presenta sólido	FIA con inclusiones ricas en líquida decrepitadas, ubicada en forma de clúster aislado. Unas pocas presentan sólidos de tamaños inconsistentes con burbuja. Pueden ser	Primaria	17.6
N6	3	1	2	-19.3	224				21.9
N6	3	1	3	-19.5	235				22.1
N6	3	1	4	-18.7	196				21.4
N6	3	1	5	-15.9	191				18.9

Muestra	Zona	FIA	IF	T _m (°C)	T _h (°C)	Observaciones	Descripción FIA	Tipo	Salinidad (%en peso de NaCl)
							primarias. Razón líquido vapor es de 15 a 20%.		
N1	3	2	1	-16.1	222		FIA con inclusiones ricas en líquida decrepitadas, ubicada en forma de clúster aislado. Unas pocas presentan sólidos de tamaños inconsistentes con burbuja. Pueden ser primarias. Razón líquido vapor es de 10 a 20%.	Primaria	19.1
N1	3	2	2	-18.2	225				21
N1	3	2	3	-20.3	233				22.7
N1	3	2	4	-19.2	215				21.8
N1	3	2	5	-16.5	231				19.5
N1	3	2	6	-17	226				19.9
N5	2	3	1	-17.1	208		Arreglo con inclusiones ricas en líquida decrepitadas, ubicada en forma de clúster aislado. Unas pocas presentan sólidos de tamaños inconsistentes con burbuja. Pueden ser primarias. Razón líquido vapor es de 15 a 25%.	Primaria	20
N5	2	3	2	-16.5	210				19.5
N5	2	3	3	-18	215				20.8
N5	2	3	4	-15.3	201				18.4
N5	2	3	5	-17.5	204				20.4
N6	4	1	1	-24.5	210		Arreglo con inclusiones ricas en CO ₂ en coexistencia con inclusiones ricas en líquido. Estas últimas presentan razón líquido vapor es de 5 a 15%.	Secundaria intragranular	25.8
N6	4	1	2	-23.8	220				25.3
N6	4	1	3	-26	216				26.8
N6	4	1	4	-25.5	208				26.5
N6	4	1	3	-26	221				26.8
N6	4	1	4	-24.2	203				25.6
N6	4	1	5	-23.5	205				25.1
N5	3	1	1	-21.4	>300	CO ₂	Arreglo con IF con CO ₂ en que se ve parte líquida. No alcanzan a homogenizar y se queman sobre los 300-350.	Secundaria intragranular	12.7
N5	3	1	2	-23.1	>300	CO ₂			13.1
N5	3	1	3	-19.5	>300	CO ₂			13.5
N5	3	1	4	-20.1	>300	CO ₂			6
N5	3	1	5	-21.9	>350	CO ₂			12.7
N5	3	1	6	-20.2	>300	CO ₂			13.2
N6	4	1	1	-60.2	28.5	CO ₂	Arreglo con inclusiones ricas en CO ₂ en coexistencia con inclusiones ricas en líquido. No se	Secundaria intragranular	No medido
N6	4	1	2	-60.1	28.3	CO ₂			No medido
N6	4	1	3	-59.9	28.3	CO ₂			No medido
N6	4	1	4	-60.2	28.1	CO ₂			No medido

Muestra	Zona	FIA	IF	T _m (°C)	T _h (°C)	Observaciones	Descripción FIA	Tipo	Salinidad (%en peso de NaCl)
							pudo calcular su salinidad de esta fase ya que no se pudo medir temperatura de fusión de clatrato.		

Anexo C: Datos de Raman

Tabla 10: Resumen de datos medidos con Raman

Muestra	Objetivo	Pico 1		Pico 2		Pico 3	
		Valor	Observación	Valor	Observación	Valor	Observación
N1-2	IF 1	1030.7903	Luz de Neón	1285.4907	CO ₂	1387.92	CO ₂
	IF 2	1030.7903	Luz de Neón	1285.0062	CO ₂	1387.92	CO ₂
	Host	127.76953	Cuarzo	206.0291	Cuarzo	354.97476	Cuarzo
	IF (solido)	127.76953	Cuarzo	206.0291	Cuarzo	354.97476	Cuarzo
	IF 2 (solido)	128.27443	Cuarzo	207.03891	Cuarzo	354.97476	Cuarzo
N3-1_FIAX	IF 1	1032.2887	Luz de Neón	1285.9611	CO ₂	1388.8582	CO ₂
N2-2_FIA3	IF 1	1031.2223	Luz de Neón	1285.4204	CO ₂	1387.8505	CO ₂
	IF 2	1032.4045	Luz de Neón	1286.5641	CO ₂	1388.9794	CO ₂
N3-3	IF 1	1031.2946	Luz de Neón	1281.6101	CO ₂	1386.0117	CO ₂
N3-3 FIA 11	IF 1	1031.2946	Luz de Neón	1282.5814	CO ₂	1386.0117	CO ₂
	IF 2	1030.7903	Luz de Neón	1281.6101	CO ₂	1386.0117	CO ₂
	IF 3	1030.7903	Luz de Neón	1281.6101	CO ₂	1386.0117	CO ₂
	IF 4	1030.7903	Luz de Neón	1281.6101	CO ₂	1386.0117	CO ₂
N3-3 FIA12	IF 1	1030.7903	Luz de Neón	1281.6101	CO ₂	1386.0117	CO ₂
	IF 2	1030.7903	Luz de Neón	1283.5507	CO ₂	1386.4888	CO ₂
	IF 3	1030.7903	Luz de Neón	1281.6101	CO ₂	1386.0117	CO ₂
	IF 4	1030.7903	Luz de Neón	1282.5814	CO ₂	1386.4888	CO ₂
N3-3 FIA1	IF 1 (solido)	129.28423	Cuarzo	206.53401	Cuarzo	356.48947	Cuarzo
	IF 2 (solido)	128.77933	Cuarzo	207.54381	Cuarzo	355.98456	Cuarzo
	IF 3 (solido)	129.28423	Cuarzo	204.5144	Cuarzo	356.48947	Cuarzo
	IF 4 (solido)	129.28423	Cuarzo	207.03891	Cuarzo	355.98456	Cuarzo
N3-3 FIA13	IF 1	1030.7903	Luz de Neón	1281.6101	CO ₂	1386.0117	CO ₂
	IF 2	1030.7903	Luz de Neón	1281.6101	CO ₂	1386.0117	CO ₂
	IF 3	1030.7903	Luz de Neón	1282.0948	CO ₂	1386.0117	CO ₂
	IF 4	1030.7903	Luz de Neón	1281.6101	CO ₂	1386.0117	CO ₂
N5-2 FIA2	IF 1	1031.2946	Luz de Neón	1285.0062	CO ₂	1387.92	CO ₂
	IF 2	1031.2946	Luz de Neón	1285.0062	CO ₂	1387.92	CO ₂
	IF 3	1031.2946	Luz de Neón	1285.0062	CO ₂	1387.92	CO ₂
	IF 4	1030.7903	Luz de Neón	1285.0062	CO ₂	1387.92	CO ₂
N6-1_FIA1	IF 1	1030.7903	Luz de Neón	1285.0062	CO ₂	1387.92	CO ₂
	IF 2	1030.7903	Luz de Neón	1285.0062	CO ₂	1387.92	CO ₂
	IF 3	1030.7903	Luz de Neón	1285.0062	CO ₂	1387.92	CO ₂

Muestra	Objetivo	Pico 1		Pico 2		Pico 3	
		Valor	Observación	Valor	Observación	Valor	Observación
	IF 4	1030.7903	Luz de Neón	1285.0062	CO ₂	1387.92	CO ₂

Tabla 11: Continuación tabla 10

Muestra	Objetivo	Pico 4		Resultado	Δ CO ₂
		Valor	Observación		
N1-2	IF 1	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	102.4293
	IF 2	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	102.9138
	Host	464.03326	Cuarzo	Cuarzo	
	IF (solido)	464.53818	Cuarzo	Cuarzo	
	IF 2 (solido)	464.53818	Cuarzo	Cuarzo	
N3-1_FIAX	IF 1	1459.0356	Luz de Neón	CO ₂	102.8971
N2-2_FIA3	IF 1	1458.0337	Luz de Neón	CO ₂	102.4301
	IF 2	1459.1539	Luz de Neón	CO ₂	102.4153
N3-3	IF 1	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	104.4016
N3-3 FIA 11	IF 1	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	103.4303
	IF 2	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	104.4016
	IF 3	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	104.4016
	IF 4	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	104.4016
N3-3 FIA12	IF 1	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	104.4016
	IF 2	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	102.9381
	IF 3	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	104.4016
	IF 4	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	103.9074
N3-3 FIA1	IF 1 (solido)	465.54797	Cuarzo	Cuarzo	
	IF 2 (solido)	465.54797	Cuarzo	Cuarzo	
	IF 3 (solido)	466.05286	Cuarzo	Cuarzo	
	IF 4 (solido)	465.54797	Cuarzo	Cuarzo	
N3-3 FIA13	IF 1	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	102.9138
	IF 2	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	102.8971
	IF 3	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	103.9169
	IF 4	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	102.9138
N5-2 FIA2	IF 1	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	102.9138
	IF 2	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	102.9138
	IF 3	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	102.9138
	IF 4	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	102.9138
N6-1_FIA1	IF 1	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	102.9138

Muestra	Objetivo	Pico 4		Resultado	Δ CO ₂
		Valor	Observación		
	IF 2	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	102.9138
	IF 3	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	102.9138
	IF 4	1458.1068	Luz de Neón	CO ₂	102.9138

Anexo D: Datos de LA-ICPMS

Tabla 12: Resumen de datos de LA-ICPMS medidos en muestras. Se adjunta promedio de FIA's medidos y el límite de detección en caso de no haber detectado concentraciones de ciertos elementos. Datos en ppm.

Elemento	N3-1-2				N3-1-4		
	1	2	3	4	1	2	3
B (11)	247.56	< LOD	< LOD	58.87	737.26	< LOD	< LOD
Na (23)	30589.61	25168.54	30820.81	40569.89	40743.04	27984.52	28611.91
Mg (25)	524.38	650.09	< LOD	309.92	2529.87	535.46	< LOD
Al (27)	10035.68	10610.44	13662.82	1175.4	1865.12	4481.46	5562.29
K (39)	5145.81	4596.93	2818.13	3742.3	10922.6	4603.83	4491.6
Ca (40)	33178.96	38261.08	25412.71	48766.61	5751.34	23906.81	21961.31
Ti (49)	4891.68	4366.9	8066.02	568.75	72.12	2272.73	1949.67
Cr (52)	< LOD						
Mn (55)	253.07	371.49	147.87	81.49	< LOD	455.28	801.69
Fe (56)	411.89	603.97	250.93	62.38	647.74	565.91	840.75
Cu (63)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	627.94	< LOD	< LOD
Zn (66)	313.63	339.6	476.13	90.35	7280.94	347.17	187.5
Ga (69)	< LOD	< LOD	< LOD	8.08	22.18	< LOD	< LOD
Ge (72)	148.22	76.48	116.38	16.76	35.46	25.57	68.58
Ge (74)	107.88	119.07	177.64	14.55	22.82	57.85	80.82
As (75)	68.68	< LOD	< LOD	< LOD	329.41	< LOD	< LOD
Se (82)	< LOD						
Sr (88)	1159.29	1176.89	471.44	1109.65	276.72	1113.44	916.98
Mo (98)	< LOD						
Ag (107)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	3.18	3.14	< LOD
Cd (114)	27.25	< LOD	< LOD	5.03	52.86	< LOD	< LOD
In (115)	< LOD						
Sn (120)	16.02	< LOD					
Sb (121)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	18.68	< LOD	< LOD
Te (125)	< LOD						
Cs (133)	23.3	27.09	18.07	34.49	6.27	23.2	16.16
Ba (138)	269.19	275.21	87.78	215.01	41.03	130.27	121.55
La (139)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	326.78	< LOD	3.15
Ce (140)	0	0	0	0.03	1.1	< LOD	< LOD
Yb (172)	0	0	0	0.24	2.09	2.87	< LOD
Hf (178)	0.51	0	0	0.09	2.02	< LOD	< LOD
Ta (181)	0	0	0.59	0.03	0.99	< LOD	< LOD
W (182)	0	1.96	0	0.31	9.25	< LOD	< LOD
Au (197)	< LOD						
Tl (205)	1.2	1.6	1.31	0.99	< LOD	< LOD	< LOD
Pb (208)	104.46	87.06	51.67	32.83	457.58	177.15	128.38
Bi (209)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	2.83	< LOD	< LOD
U (238)	0.22	0	0	0.03	1.4	< LOD	< LOD

Tabla 13: Continuación de tabla 12.

Elemento	N3-1-Vrich						
	1	2	3	4	5	6	7
B (11)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	176.58	< LOD
Na (23)	3996.84	26519.87	25935.49	11408.39	11190.01	13457.16	12382.05
Mg (25)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	878.67	< LOD
Al (27)	33007.95	17745.24	13891.06	22732.4	25581.37	17284.79	25530.75
K (39)	10027.41	6457.69	5683.92	7826.08	5156.55	6241.96	5721.89
Ca (40)	< LOD	13598.7	30450.26	24015.16	16195.31	32748.29	12198.4
Ti (49)	14595.21	10889.45	4631.1	6501.95	8550.05	6530.05	11446.34
Cr (52)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Mn (55)	407.03	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	159.26	< LOD
Fe (56)	1417.84	637.34	437.92	1021.29	556.67	809.89	440.63
Cu (63)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	77.5	< LOD
Zn (66)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	112.49	< LOD
Ga (69)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ge (72)	449.33	278.97	221.83	291.48	387.15	199.94	374.85
Ge (74)	307.96	301.03	169.16	216.22	397.92	200.36	335.71
As (75)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	220.47
Se (82)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Sr (88)	< LOD	348.11	757.98	475.72	523.1	509.94	406.93
Mo (98)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ag (107)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cd (114)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
In (115)	< LOD	< LOD	4.39	< LOD	< LOD	39.44	< LOD
Sn (120)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Sb (121)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Te (125)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cs (133)	< LOD	19.49	20.93	< LOD	< LOD	14.3	< LOD
Ba (138)	0	102.11	185.56	126.74	162.01	143.45	94.44
La (139)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ce (140)	0	0	0	1.05	1.93	0.16	3.25
Yb (172)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Hf (178)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ta (181)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
W (182)	28.37	< LOD					
Au (197)	15.74	< LOD	6.19	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Tl (205)	< LOD	4.93	< LOD	< LOD	< LOD	1.33	< LOD
Pb (208)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	37.65	< LOD
Bi (209)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	2.43	< LOD
U (238)	2.02	0	0	0	1.13	0.55	0

Tabla 14: Continuación de tabla 13

Elemento	N5-2-1		N5-2-2					
	1	2	1	2	3	4	5	6
B (11)	269.73	< LOD	491.08	< LOD	478.14	658.7	617.69	923.57
Na (23)	27627.05	9701.71	39127.13	7430.52	51196.18	26979.36	49790.28	55965.74
Mg (25)	5012.18	< LOD	10835.3	< LOD				
Al (27)	5162.7	11303.48	4077.52	24672.61	7388.32	10904.25	7945.5	4013.08
K (39)	6947.42	14014.09	14103.46	8007.33	6923.62	7259.22	10297.28	10226.59
Ca (40)	17514.49	2006.57	3308.69	1406.9	2992.26	2807.98	2050.19	3854.46
Ti (49)	2852.48	8018.61	458.63	10438.01	3271.42	10967.64	1394.23	1270.13
Cr (52)	46.18	< LOD						
Mn (55)	197.11	< LOD	100.01	445.9	1353.59	3205.91	1466.1	969.25
Fe (56)	1220.27	624.07	1240.96	902.35	296	2189.82	1435.53	327.45
Cu (63)	< LOD	< LOD	43.91	< LOD	< LOD	139.99	270.61	< LOD
Zn (66)	2142.31	1165.91	969.7	< LOD	317.38	1606.61	504.97	343.63
Ga (69)	16.05	< LOD	4.36	< LOD				
Ge (72)	77.08	< LOD	47.76	266.99	124.91	169.32	57.48	136.09
Ge (74)	82.68	516.3	31.68	199.12	70.08	148.9	41.32	86.48
As (75)	147.09	< LOD	117.35	< LOD	< LOD	179.69	25.92	< LOD
Se (82)	< LOD							
Sr (88)	876.92	88.98	31.61	< LOD	17.77	19.82	13.84	16.22
Mo (98)	< LOD	< LOD	7.01	< LOD				
Ag (107)	184.45	< LOD	3.81	< LOD	< LOD	4.84	2.88	< LOD
Cd (114)	80.92	978.24	20.68	< LOD	18.78	< LOD	9.47	< LOD
In (115)	< LOD	4.6						
Sn (120)	< LOD							
Sb (121)	< LOD							
Te (125)	35.2	< LOD	15.63	< LOD				
Cs (133)	28.18	< LOD	24.54	< LOD	30.31	13.77	20.83	28.84
Ba (138)	258.14	26.48	51.02	28.13	14.81	12.98	15.52	9.63
La (139)	3611.88	27436.78	270.23	0	1.08	0.48	0.06	0
Ce (140)	5.02	0	1.73	< LOD				
Yb (172)	0	0	< LOD					
Hf (178)	2.94	< LOD						
Ta (181)	1.14	0	0.59	0	0	0	0	0
W (182)	< LOD							
Au (197)	< LOD							
Tl (205)	1.99	< LOD	1.32	< LOD	2.76	1.25	1.98	< LOD
Pb (208)	1447.5	4540.3	232.24	49.79	136.58	185.66	178.61	202.53
Bi (209)	3.31	< LOD	3.94	< LOD	< LOD	3.05	< LOD	< LOD
U (238)	1.49	< LOD	0.38	1.22	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD

Tabla 15: Continuación de tabla 14

Elemento	N5-Vrich		N6-1-1						
	1	2	1	2	3	4	5	6	7
B (11)	< LOD	< LOD	408.85	252.04	412.1	< LOD	263.24	< LOD	< LOD
Na (23)	24939.5	35737.97	18440.39	41955.29	27371.97	18506.45	27739.17	24354.27	18933.08
Mg (25)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	802.4	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Al (27)	13757.63	7404.14	9834.84	2153.54	3603.35	7827.94	5973.67	9003.87	11542.95
K (39)	9172.67	7490.76	9112.01	8000.92	11158.45	6585.02	8996.75	7701.44	7411.83
Ca (40)	10868.17	4116.97	3948.1	3645.23	6346.16	1629.86	2250.7	1691.83	1716.19
Ti (49)	4907.61	11011.92	3976.37	545.55	1620.94	8093.18	4673.67	4309.44	5294.6
Cr (52)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	8.12	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Mn (55)	822.93	568.32	483.38	372.91	406.64	< LOD	929.56	< LOD	236.05
Fe (56)	2626.02	845.16	453.06	161.48	507.1	415.38	295.79	295.79	238.96
Cu (63)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	155.35	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Zn (66)	227.99	< LOD	1145.61	356.16	2928.94	< LOD	396.93	< LOD	473.06
Ga (69)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	4.9	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ge (72)	< LOD	< LOD	172.23	35.78	32.72	< LOD	76.36	151.08	205.8
Ge (74)	25.68	< LOD	172.45	21.8	38.54	< LOD	135.48	113.63	138.55
As (75)	< LOD	< LOD	97.11	< LOD	65.29	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Se (82)	< LOD	< LOD	246.39	< LOD	55.26	< LOD	260.65	< LOD	< LOD
Sr (88)	908.77	287.31	30.39	34.24	44.56	< LOD	17.49	13.29	< LOD
Mo (98)	< LOD								
Ag (107)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	13.57	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cd (114)	< LOD	< LOD	59.14	< LOD	29.11	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
In (115)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0.47	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Sn (120)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	3.07	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Sb (121)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	4.34	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Te (125)	< LOD	< LOD	34.76	0	2.31	0	16.27	68.31	0
Cs (133)	16.13	30.19	24.49	25.01	19.28	27.73	19.27	27.85	27.49
Ba (138)	151.54	71.28	18.97	26.25	33.02	< LOD	8.68	6.23	< LOD
La (139)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	731.04	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ce (140)	< LOD	< LOD	0.46	0.37	2.17	0	0	0	0
Yb (172)	< LOD	< LOD	0.78	0	0.09	0	0	0	0
Hf (178)	< LOD	< LOD	0.61	0	0.85	0	0	0	0
Ta (181)	0.28	0	0.1	0	0.22	6.78	0	0	0
W (182)	< LOD	< LOD	4.15	1.68	0.55	0	0	0	0
Au (197)	< LOD								
Tl (205)	1.13	< LOD	< LOD	< LOD	0.59	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Pb (208)	88.75	125.27	139.98	85.04	187.4	156.62	105.7	101.97	179.83
Bi (209)	< LOD	< LOD	1.68	< LOD	1	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
U (238)	< LOD	< LOD	0.22	0.21	1.08	0	0	0	0

Tabla 16: Continuación de tabla 15 (Estas medidas incluyen menos elementos que las demás)

Elemento	N3-3-1				N3-1	
	1	2	3	4	1	2
B (11)	< LOD	293	< LOD	< LOD	1464.11	< LOD
Na (23)	10386.54	32316.61	39332.46	31809.21	98737	177963.31
Mg (25)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	3537.62	< LOD
Al (27)	35274.04	21800.18	19339.59	20274	87736.51	157797.93
K (39)	15554.73	10825.2	10410.55	12628.4	39444.87	66799.46
Ca (40)	11439.51	21396.88	19294.35	21400.81	353782.79	167693.91
Ti (49)	7455.37	5106.5	6070.58	5800.74	59534.1	58127.3
Mn (55)	< LOD	299.4	231.44	561.31	5067.87	1817.6
Fe (56)	1706.48	2958.58	2351	4260.93	27598.85	15194.89
Cu (63)	< LOD	< LOD				
Zn (66)	< LOD	440.4	< LOD	483.35	849.08	2463.78
Ge (72)	194.23	108.4	128.33	81.78	755.41	1593.82
Ge (74)	< LOD	113.1	138.94	126.01	798.93	1720.62
As (75)	< LOD	< LOD				
Se (82)	< LOD	< LOD				
Mo (98)	< LOD	< LOD				
Ag (107)	< LOD	< LOD				
Cd (114)	< LOD	< LOD				
In (115)	< LOD	< LOD				
Sb (121)	< LOD	< LOD				
Te (125)	< LOD	< LOD				
Ba (138)	6.92	563.37	526.91	529.1	763.54	1066.57
Au (197)	< LOD	< LOD				
Pb (208)	< LOD	120.15	109.82	132.08	1082.99	1250.47

Tabla 17: Resumen de datos obtenidos en pegmatita con normalización de 100% óxidos. En caso de no detectar concentraciones se señala el límite de detección.

Elemento	N3-1 VRICH			N3-1 FIA1		N3-1 SOLIDS		
	1	2	3	1	2	1	2	3
B (11)	< LOD	< LOD	1.23	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Na (23)	8.19	5.99	15.11	103.39	36.38	195.24	7.08	191.04
Mg (25)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Al (27)	121.27	122.91	119.44	122.37	121.65	132.76	10.13	76.22
Si (28)	467184.38	467188.43	467171.88	466992.75	467145.9	466816.33	467338.02	466882.45
K (39)	25.2	21.41	21.74	33.1	18.01	43.73	< LOD	53.22
Ca (40)	3.94	3.89	17.21	189.59	41.04	340.07	< LOD	180.08
Sc (45)	108.53	109.31	109.22	108.06	108.32	111.34	109.67	106.52
Ti (49)	51.97	52.3	55.42	52.5	52.49	53.42	< LOD	140
V (51)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cr (52)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Mn (55)	< LOD	< LOD	0.42	1.91	0.96	1.55	< LOD	14.46
Fe (56)	3.09	2.45	2.25	4.17	2.71	2.92	< LOD	17.27
Cu (63)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Zn (66)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	4.26
Ga (69)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ge (72)	1.62	1.47	1.64	1.49	1.53	1.31	1.27	1.3
Ge (74)	1.42	1.57	1.55	1.49	1.45	1.8	1.72	1.03
As (75)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Se (82)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Sr (88)	0.06	0.07	0.5	5.95	1.07	8.49	< LOD	7.58
Mo (98)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ag (107)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cd (114)	< LOD	< LOD	0.16	0.27	0.24	0.57	< LOD	< LOD
In (115)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Sn (120)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0.19	< LOD	< LOD
Sb (121)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Te (125)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cs (133)	< LOD	< LOD	< LOD	0.15	0.03	0.27	< LOD	0.19
Ba (138)	< LOD	0.08	0.1	1.12	0.21	1.8	< LOD	0.92
La (139)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ce (140)	0	0	0	0	01.01	0	< LOD	< LOD
Yb (172)	< LOD	< LOD	< LOD	0	0.01	0.03	< LOD	< LOD
Hf (178)	< LOD	< LOD	0.01	0.01	0.01	0	< LOD	< LOD
Ta (181)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0.01	0.01

Elemento	N3-1 VRICH			N3-1 FIA1		N3-1 SOLIDS		
	1	2	3	1	2	1	2	3
W (182)	< LOD	< LOD	< LOD	0.01	0.01	0.04	< LOD	0.09
Au (197)	0.02	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Tl (205)	< LOD	< LOD	< LOD	0.01	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Pb (208)	< LOD	< LOD	0.27	0.62	0.33	0.51	< LOD	0.76
Bi (209)	< LOD	< LOD	0.01	0.02	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
U (238)	< LOD	< LOD	< LOD	0	0	0	< LOD	< LOD

Tabla 18: Continuación de tabla 17

Elemento	N5-2 FIA5			N5-2 FIA			N5-2 LAST VRICH		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
B (11)	< LOD	1.81	< LOD	< LOD					
Na (23)	14.24	4.35	17.8	11.33	7.55	8.98	3.29	< LOD	8.69
Mg (25)	< LOD	< LOD	< LOD						
Al (27)	113.32	123.57	86.61	91.72	85	62.68	93.05	137.6	129.52
Si (28)	467168.86	467182.21	467206.15	467200.05	467211.67	467229.93	467213.91	467162.07	467167.66
K (39)	24.81	24	24.6	13.45	11.97	< LOD	10.14	28	28.58
Ca (40)	3.56	< LOD	< LOD	< LOD	2.56	7.18	1.4	10.15	9.69
Sc (45)	116.26	112.76	113.14	118.65	116.28	116.37	117.3	113.84	113.8
Ti (49)	52.85	55.55	44.13	51.28	49.94	51.82	52.57	52.53	52.11
V (51)	< LOD	< LOD	< LOD						
Cr (52)	< LOD	< LOD	< LOD						
Mn (55)	< LOD	< LOD	1.1	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Fe (56)	2.97	2.65	9.07	1.17	1.37	2.27	1.13	2.37	1.78
Cu (63)	< LOD	< LOD	< LOD						
Zn (66)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	2.94	< LOD	< LOD	< LOD	1.36
Ga (69)	< LOD	< LOD	< LOD						
Ge (72)	1.51	1.67	2.19	< LOD	< LOD	< LOD	1.29	< LOD	1.48
Ge (74)	1.54	1.37	1.67	1.56	1.07	1.36	1.42	1.51	1.63
As (75)	< LOD	< LOD	< LOD						
Se (82)	< LOD	< LOD	< LOD						
Sr (88)	< LOD	< LOD	< LOD	0.06	< LOD	0.37	0.05	0.14	0.22
Mo (98)	< LOD	< LOD	< LOD						
Ag (107)	< LOD	< LOD	< LOD						
Cd (114)	< LOD	< LOD	< LOD	1.05	0.7	< LOD	0.22	< LOD	< LOD
In (115)	< LOD	< LOD	< LOD						

Elemento	N5-2 FIA5			N5-2 FIA			N5-2 LAST VRICH		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Sn (120)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Sb (121)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Te (125)	2.28	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cs (133)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0.05
Ba (138)	0.06	< LOD	0.03	0.05	0.05	< LOD	0.01	< LOD	0.06
La (139)	< LOD	< LOD	0.02	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ce (140)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0.01
Yb (172)	< LOD	< LOD	< LOD	0	0.01	0	0.01	< LOD	< LOD
Hf (178)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ta (181)	0.01	0	0	0	0.01	0	0	0.01	0
W (182)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Au (197)	< LOD	0.04	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Tl (205)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Pb (208)	< LOD	0.26	0.54	0.64	0.4	< LOD	0.78	< LOD	0.34
Bi (209)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
U (238)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD

Tabla 19: Continuación de tabla 18

Elemento	QZ N5-2	N6-2					
	1	1	2	3	4	5	6
B (11)	< LOD	< LOD	4.65	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Na (23)	6.16	< LOD	169.84	4.79	25.01	17.19	268.59
Mg (25)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Al (27)	141.28	109.79	90.08	74.86	88.89	69.81	131.67
Si (28)	467166.17	467195.5	467045.64	467235.62	467200.5	467221	466931.7
K (39)	30.32	29.65	85.53	13.72	21.09	22.37	113.79
Ca (40)	9.96	< LOD	39.03	2.34	13.07	< LOD	19
Sc (45)	105.23	105.23	109.53	112.72	110.13	115.03	106.92
Ti (49)	51.16	42.92	35.81	48.46	36.6	44.96	49.04
V (51)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cr (52)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	2.01
Mn (55)	< LOD	< LOD	5.15	< LOD	< LOD	< LOD	9.95
Fe (56)	2.37	< LOD	4.71	1.56	< LOD	1.55	3.23
Cu (63)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD

Elemento	QZ N5-2	N6-2					
	1	1	2	3	4	5	6
Zn (66)	0.76	6.76	13.54	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ga (69)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ge (72)	1.24	< LOD	1.59	1.68	< LOD	1.55	< LOD
Ge (74)	1.83	1.79	1.61	1.5	1.96	1.74	1.6
As (75)	< LOD	< LOD	0.89	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Se (82)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Sr (88)	0.05	0.12	0.29	0.05	0.64	< LOD	0.16
Mo (98)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ag (107)	0.19	< LOD					
Cd (114)	0.19	< LOD	0.58	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
In (115)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Sn (120)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Sb (121)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Te (125)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cs (133)	0.03	< LOD	0.25	0.04	0.14	< LOD	0.28
Ba (138)	0.03	< LOD	0.2	0.02	0.11	< LOD	0.09
La (139)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ce (140)	0.01	0.01	0	0	0.05	0.01	0.02
Yb (172)	0.01	0	0.01	0	0.05	0	0
Hf (178)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ta (181)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0.29
W (182)	< LOD	< LOD	0.04	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Au (197)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Tl (205)	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Pb (208)	0.55	< LOD	1.38	< LOD	< LOD	< LOD	2.21
Bi (209)	0.02	< LOD	0.02	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
U (238)	0	< LOD	0	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD

Tabla 20: Tiempos de lectura de los distintos elementos medidos mediante LA-ICPMS.

Elemento (masa)	Tiempo de Lectura (s)
Li (7)	0.01
B (11)	0.01
Na (23)	0.01
Mg (25)	0.01
Al (27)	0.01
Si (28)	0.01
K (39)	0.01
Ca (40)	0.01
Sc (45)	0.01
Ti (49)	0.01
V (51)	0.01
Cr (52)	0.01
Mn (55)	0.01
Fe (56)	0.01
Cu (63)	0.01
Zn (66)	0.01
Ga (69)	0.01
Ge (72)	0.01
Ge (74)	0.01
As (75)	0.01
Se (82)	0.01
Sr (88)	0.01
Mo (98)	0.01
Ag (107)	0.05
Cd (114)	0.01
In (115)	0.01
Sn (120)	0.01
Sb (121)	0.01
Te (125)	0.01
Cs (133)	0.01
Ba (138)	0.01
La (139)	0.01
Ce (140)	0.01
Yb (172)	0.01
Hf (178)	0.01
Ta (181)	0.01
W (182)	0.01

Elemento (masa)	Tiempo de Lectura (s)
Au (197)	0.05
Tl (205)	0.01
Pb (208)	0.01
Bi (209)	0.01
U (238)	0.01

Anexo E: Análisis químico

Tabla 21: Tabla resumen de datos de análisis químico de pegmatita de Puyuhuapi. Se señala el tipo de análisis, así como la unidad utilizada en cada elemento. En caso de no detectarse se señala límite de detección.

Tipo de análisis	Elemento	Unidad	Pegmatitas Puyuhuapi
ME-GRA21	Au	ppm	<0.05
ME-GRA21	Ag	ppm	<5
ME-MS61L	Ag	ppm	0.016
ME-MS61L	Al	%	6.74
ME-MS61L	As	ppm	0.35
ME-MS61L	Ba	ppm	1080
ME-MS61L	Be	ppm	1.11
ME-MS61L	Bi	ppm	0.014
ME-MS61L	Ca	%	0.75
ME-MS61L	Cd	ppm	0.009
ME-MS61L	Ce	ppm	43.4
ME-MS61L	Co	ppm	5.7
ME-MS61L	Cr	ppm	27.7
ME-MS61L	Cs	ppm	1.26
ME-MS61L	Cu	ppm	4.47
ME-MS61L	Fe	%	3.22
ME-MS61L	Ga	ppm	13.6
ME-MS61L	Ge	ppm	0.11
ME-MS61L	Hf	ppm	0.11
ME-MS61L	In	ppm	0.005
ME-MS61L	K	%	3.94
ME-MS61L	La	ppm	25
ME-MS61L	Li	ppm	9.5
ME-MS61L	Mg	%	0.41
ME-MS61L	Mn	ppm	343
ME-MS61L	Mo	ppm	0.5
ME-MS61L	Na	%	1.735
ME-MS61L	Nb	ppm	4.54
ME-MS61L	Ni	ppm	6.65
ME-MS61L	P	%	0.017
ME-MS61L	Pb	ppm	7.08
ME-MS61L	Rb	ppm	80.9
ME-MS61L	Re	ppm	<0.002
ME-MS61L	S	%	<0.01
ME-MS61L	Sb	ppm	0.05
ME-MS61L	Sc	ppm	2.85
ME-MS61L	Se	ppm	0.3
ME-MS61L	Sn	ppm	0.67
ME-MS61L	Sr	ppm	128.5
ME-MS61L	Ta	ppm	0.47
ME-MS61L	Te	ppm	<0.04
ME-MS61L	Th	ppm	19.65
ME-MS61L	Ti	%	0.176

Tipo de análisis	Elemento	Unidad	Pegmatitas Puyuhuapi
ME-MS61L	Tl	ppm	0.481
ME-MS61L	U	ppm	2.1
ME-MS61L	V	ppm	68.2
ME-MS61L	W	ppm	0.192
ME-MS61L	Y	ppm	5.3
ME-MS61L	Zn	ppm	24.2
ME-MS61L	Zr	ppm	1.9

Tabla 22: Resumen de composiciones de la corteza superior y el grado de error para cada elemento, empleado en la comparación composicional con la pegmatita. De Rudnick y Gao, 2003.

Corteza superior (Rudnick y Gao, 2003)	Concentración (ppm)	Sigma
Li	24	5
Be	2.1	0.9
Sc	14	0.9
V	97	11
Cr	92	17
Co	17.3	0.6
Ni	47	11
Cu	28	4
Zn	67	6
Ga	17.5	0.7
Ge	1.4	0.1
As	4.8	0.5
Se	0.09	0.05
Rb	84	17
Sr	320	46
Y	21	2
Zr	193	28
Nb	12	1
Mo	1.1	0.3
Ag	53	3
Cd	0.09	0.01
In	0.056	0
Sn	2.1	0.5
Sb	0.4	0.1
Cs	4.9	1.5
Ba	628	83

Corteza superior (Rudnick y Gao, 2003)	Concentración (ppm)	Sigma
La	31	3
Ce	63	4
Hf	5.6	0.7
Ta	0.9	0.1
W	1.9	1
Tl	0.9	0.5
Pb	17	0.5
Bi	0.16	0.06
Th	10.5	1
U	2.7	0.6

Anexo F: Ecuaciones de estado

Sistema H₂O-NaCl:

$$\text{Densidad (g/cm}^3\text{)} = 1.1027 + 0.0017752T - 1.5056 \cdot 10^{-5} T^2 + 4.0404 \cdot 10^{-8} T^3 - 4.1455 \cdot 10^{-11} T^4 + 1.5125 \cdot 10^{-14} T^5;$$

$$P \text{ (bar)} = 41.749 - 1.2125 \cdot T + 0.0136213 \cdot T^2 - 7.52333 \cdot 10^{-5} T^3 + 2.19664 \cdot 10^{-7} T^4 - 2.82583 \cdot 10^{-10} T^5 + 1.27231 \cdot 10^{-13} T^6$$

Ecuación válida entre 100 y 801°C, con T= temperatura de homogenización (Bischoff, 1991; Hurai et al., 2015).

Sistema CO₂:

$$\text{Densidad } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = 0.4660553 \left[C_0 \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^{0.347} + \sum_{i=1}^2 C_i \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^{(i+1)/3} + 1 \right]$$

Con C₀ = 1.9073793; C₁ = 0.38225012; C₂ = 0.42897885 para líquidos. C₀ = 1.7988929, C₁ = -0.71728276, C₂ = 1.7739244 para vapor; T_c = 304.21 °K (Angus et al., 1976; Hurai et al., 2015).

$$\text{Presión (bar)} = 73.825 \exp \left[C_0 \left(1 - \frac{T}{304.21} \right)^{1.935} + \sum_{i=1}^4 C_i \left(\frac{304.21}{T} - 1 \right)^i \right]$$

Con C₀ = 11.377371, C₁ = -6.8849249, C₂ = -9.5924263, C₃ = 13.679755, C₄ = -8.6056439 (Angus et al., 1976; Hurai et al., 2015).

Ecuaciones válidas para 100-700°C y 2000-8000 bar.

Cálculo de isócoras:

Tabla 23: Tabla resumen con datos empleados para graficar las isócoras de los distintos FIA's medidos. Se señala en naranja la temperatura de homogenización de cada FIA, así como luego temperaturas mayores utilizadas para trazar las rectas correspondientes a las isócoras de cada arreglo. Resultados de Angus et al., 1976; Bischoff, 1991; Duai; Duan y Zhang, 2006; Duang et al., 2006; Mao y Duan, 2008; Hurai et al., 2015).

FIA	T (°C)	P (bar)
N1-3	225	21.5
	250	429.8
	400	3017.9
N5-2	207	20.5
	250	731.1
	400	3498.2
N6-1	194.7	12.420302

FIA	T (°C)	P (bar)
	250	936
	400	3708.3
N5-1	176.6	7.970247
	250	1307.9
	400	4404.6
N6-3	176.6	14.6
	250	777.2
	400	3587.7
N5-2	226.2	21.7
	250	417.7
	400	3008.1
N321	200.9666667	12.5
	250	897.5
	400	3954
N323	198.3642857	11.9
	250	943.3
	400	4028.4
N331	206.5411765	14.1
	250	790.9
	400	3766.7
N311	211.6777778	15.5
	250	703.1
	400	3635.1
N312	205.6428571	13.9
	250	805
	400	3780.8
N314	209.6769231	15
	250	733.5
	400	3664.4
N211	237.3625	24.7
	250	257.9
	400	2898.1
N212	211.4111111	15
	250	722.3
	400	3735.9
N221	208.1625	14

FIA	T (°C)	P (bar)
	250	788.1
	400	3871.6
N231	197.08	11.2
	250	1000.4
	400	4259.8
N232	199.4571429	11.8
	250	952.8
	400	4168.9
N111	196.525	11.2
	250	996
	400	4195
N112	209.74	14.2
	250	769.5
	400	3887.7
N131	207.3	13.3
	250	827.2
	400	4047
N121	219.1692308	16.6
	250	613.9
	400	3686.7
N313	184.35	9.5
	250	1152.8
	400	4145.2
N322	173.28	7.5
	250	1362.1
	400	4444.8
N641	211.86	15.6
	250	695.7
	400	3608.5
N331 CO ₂	28.1	69
	150	452.9
	200	612.4
	250	770.2
	400	1231.6
N5 CO ₂	28.3	69.4
	150	446.8

FIA	T (°C)	P (bar)
	200	603.9
	250	759.5
	400	1214.2

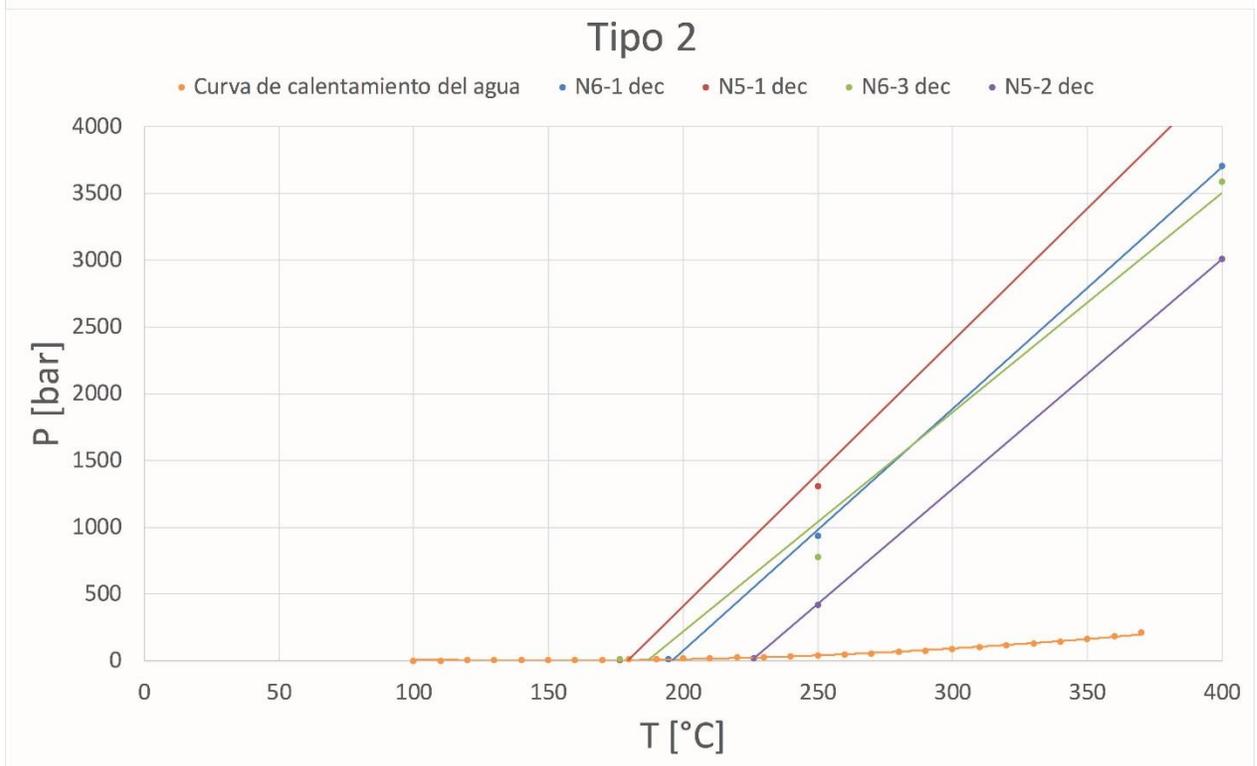
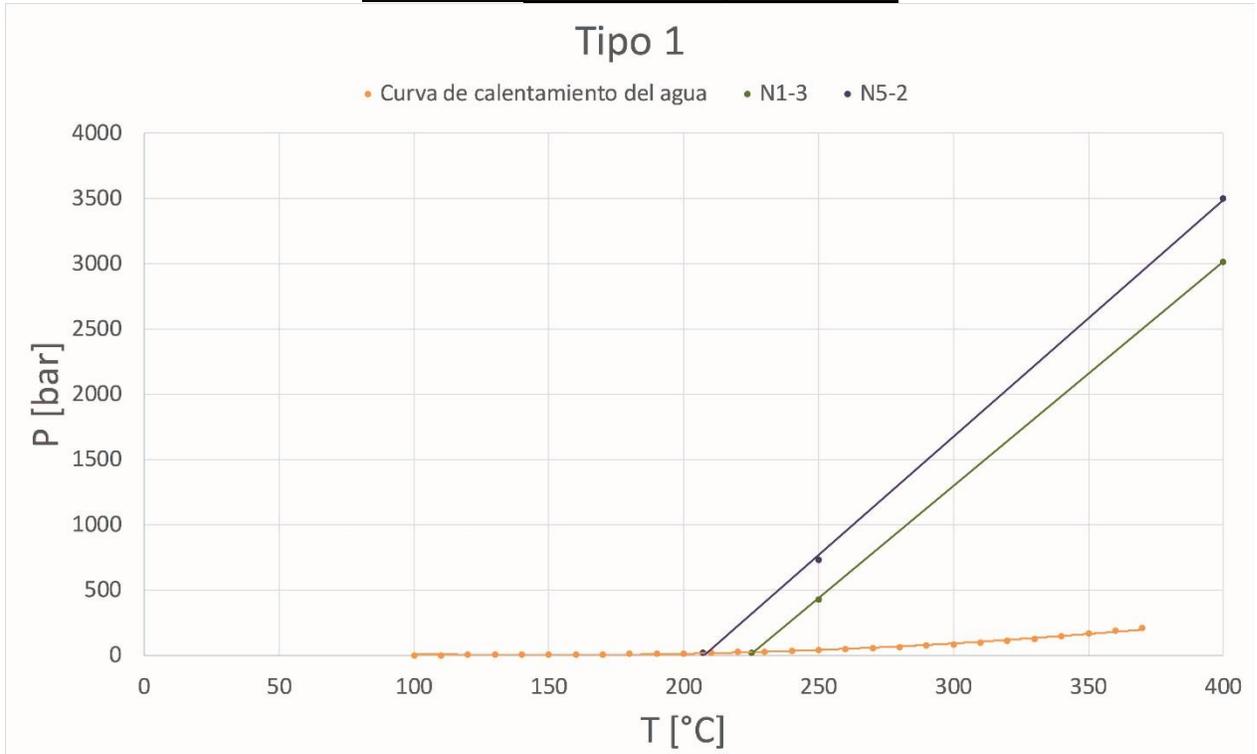


Figura 45: Gráficos de las isócoras para FIA's tipo 1 y 2.

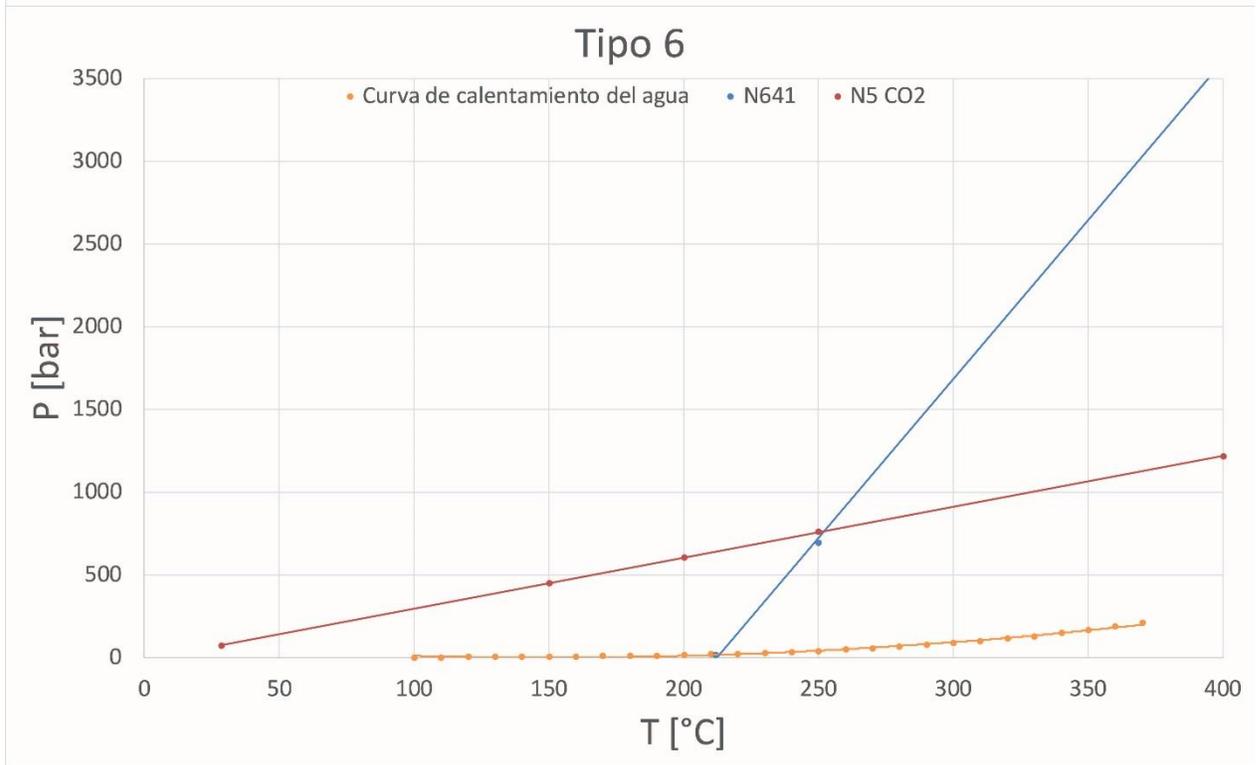
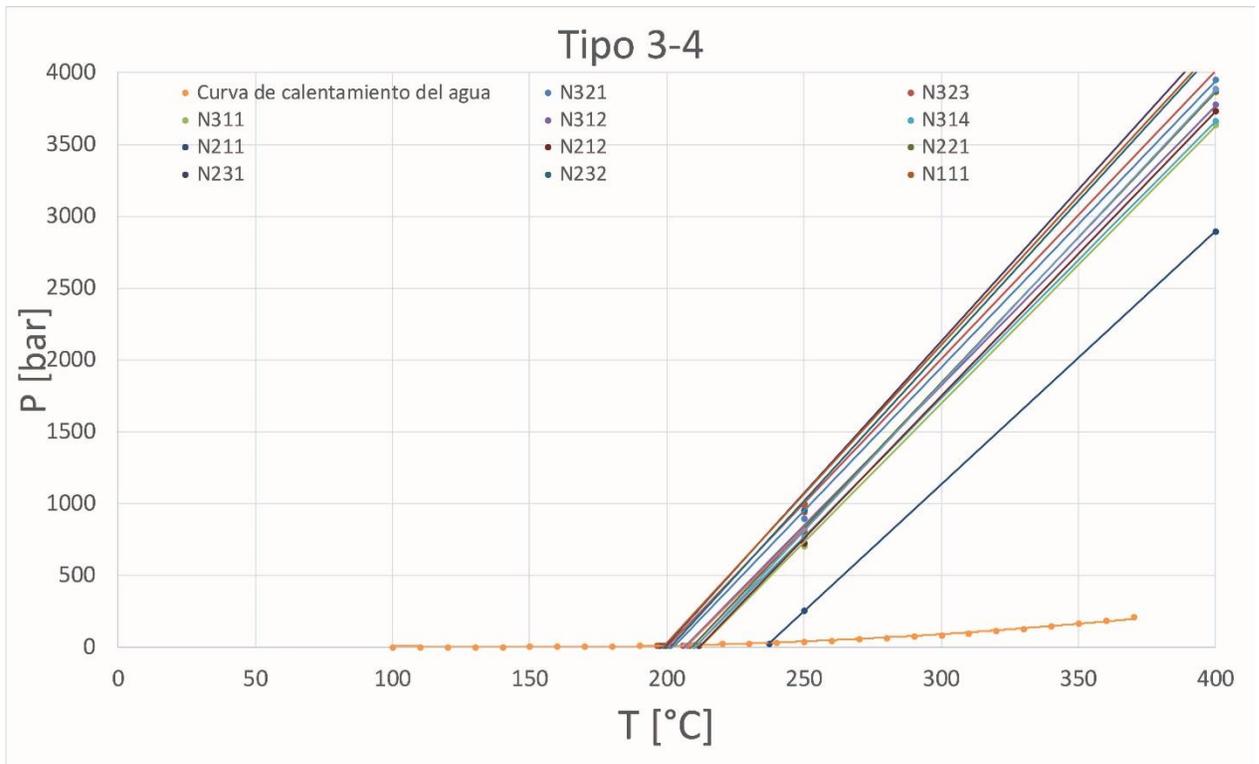


Figura 46: Gráfico de isócoras para FIA's de tipo 3-4 y 6.

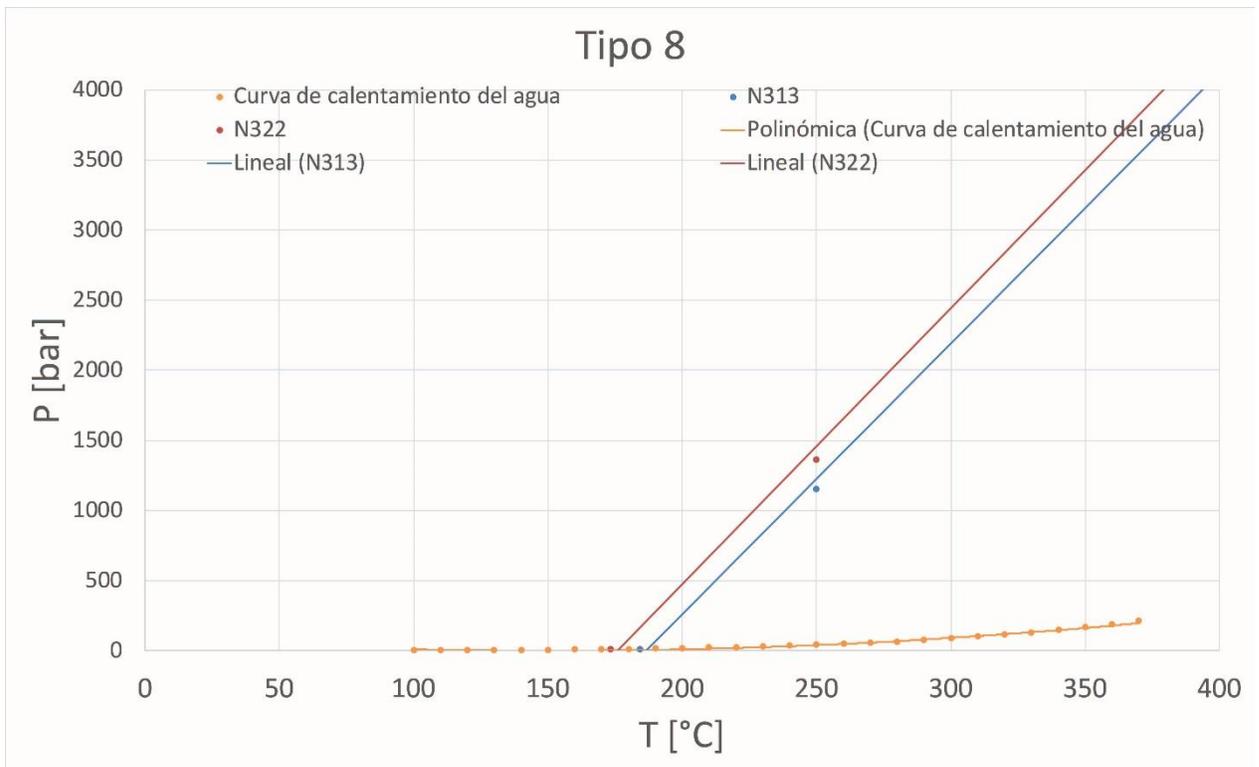


Figura 47: Gráfico de isócoras para FIA's de tipo 8.