

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 isotermal (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