

Tabla de Contenido

Agradecimientos	iii
Tabla de Contenido	iv
Índice de Figuras	vii
Índice de Tablas	xi
1 Introducción	12
1.1 ESTRUCTURA DE LA TESIS	12
1.2 CONSIDERACIONES GENERALES Y MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO.....	12
1.3 CONCEPTOS GENERALES	15
1.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.5 OBJETIVOS	18
1.6 HIPÓTESIS DE TRABAJO	19
2 Metodologías	20
2.1 MUESTREO Y PROCEDIMIENTOS ANALÍTICOS	20
2.2 HERRAMIENTAS Y CÁLCULOS GEOQUÍMICOS	21
2.3 CONTRIBUCIÓN DE AGUA DE FIORDO	21
2.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS MULTIVARIABLE.....	22
2.5 MUESTREO DE EMISIONES GASEOSAS	23
2.5.1 Limpieza del equipo de muestreo	24
2.5.2 Preparación de las ampollas tipo Giggenbach.....	24
2.5.3 Muestreo de gases en fuentes termales burbujeantes	25
2.5.4 Análisis de gases	26
2.6 ANÁLISIS DE ISOTOPOS DE ESTRONCIO ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)	26
2.6.1 Materiales y reactivos	26
2.6.2 Limpieza del material de trabajo.....	27
2.6.3 Procedimiento de separación química.....	28
2.6.4 Análisis y reducción de datos	29

3 Manifestaciones termales en Aysén	33
3.1 RÍO RODRÍGUEZ (5144136 N/ 683911 E/ 18 M)	34
3.2 PUERTO BONITO (5130766 N/ 681919 E/ 37 M).....	35
3.3 EL SAUCE (5121942 N/ 697678 E/ 38 M).....	36
3.4 GAÑOTE (5084758 N/ 691509 E/ 3 M).....	38
3.5 EL VENTISQUERO (5084056 N/ 693183 E/ 12 M).....	39
3.6 PUYUHUAPI (5079598 N/ 687575 E/ 16 M).....	40
3.7 QUEULAT (5068330 N/ 694291 E/ 5 M)	41
3.8 ISLA MAGDALENA (5062132 N/ 681070 E/ 5M).....	42
3.9 LOS POBRES (5037646 N/ 673198 E/ 12 M)	43
3.10 PUERTO PÉREZ (4988243 N/ 641401 E/ 7 M).....	45
3.11 CHILCONAL (4979824 N/ 649828 E/ 51 M)	46
3.12 HUIÑA (4868685 N/ 667620 E/ 276 M)	48
3.13 EL ENGAÑO (4854415 N/ 669647 E/ 383 M)	49
3.14 PUERTO CRISTAL (4835765 N/ 697255 E/ 212 M)	50
4 Decoding fjord water contribution and geochemical processes in the Aysen thermal springs (Southern Patagonia, Chile)	52
ABSTRACT.....	52
4.1 INTRODUCTION.....	53
4.2 GEOLOGICAL AND HYDRO-GEOLOGICAL SETTING	56
4.3 METHODS.....	57
4.3.1 <i>Sampling and analytical procedures</i>	57
4.3.2 <i>Geostatistical Methods</i>	58
4.3.3 <i>Sea water contribution</i>	59
4.4 RESULTS AND DISCUSSION.....	62
4.4.1 <i>Hydro-geochemical features and geochemical processes</i>	62
4.4.2 <i>Saline factor</i>	66
4.4.3 <i>Water-rock interactions</i>	66
4.4.4 <i>Multivariate statistical analysis</i>	67
4.4.5 <i>Isotope composition</i>	70
4.4.6 <i>Geothermometers</i>	71

4.5 CONCLUSIONS	73
4.6 ACKNOWLEDGEMENTS	74
5 Composición química e isotópica de las fuentes termales en Aysén: Influencia de fluidos magmáticos.	75
5.1 INTRODUCCIÓN	75
5.2 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS ELEMENTOS TRAZAS	76
5.2.1 Anomalías de elementos o especies químicas en el fiordo de Aysén	82
5.2.2 Geoquímica del cloruro, vanadio y selenio	83
5.2.2.1 Factor salino	84
5.2.3 Geoquímica del litio, rubidio y cesio	85
5.2.4 Geoquímica del cobalto, germanio y arsénico	87
5.3 ÍNDICES DE SATURACIÓN Y ESPECIES QUÍMICAS DOMINANTES	88
5.4 ISÓTOPOS DE CARBONO Y ESTRONCIO	91
5.5 GASES EN FUENTES TERMALES BURBUJEANTES	96
5.5.1 Geotermómetros de gases	97
6 Modelo conceptual esquemático	99
7 Conclusiones	102
8 Bibliografía	103

Índice de Figuras

Figura 1.1 Comparación promedios mensuales y número total de episodios MP 2.5 (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).....	14
Figura 1.2 Sistema geotermal dominado por convección con diferentes tipos de reservorios (1, 2a y 2b) (Moeck, 2014).	15
Figura 1.3 Sección esquemática de una cuenca sedimentaria intracratónica. Varios reservorios geotermales (A, B y C) se distinguen a diferentes rangos de profundidades y temperaturas (Moeck, 2014).	16
Figura 2.1 Configuración del equipo de muestreo de fuentes termales burbujeantes.....	23
Figura 2.2 Configuración y procedimiento de purga del sistema de muestreo. Conexiones 1, 2 y 3 de la llave de tres vías en azul.	25
Figura 2.3 Disposición de las columnas y tubos de centrifuga con sus respectivos racks.	29
Figura 3.1 Fuentes termales catastradas y analizadas en este estudio.	33
Figura 3.2 Fuente termal Río Rodríguez	34
Figura 3.3 Fuente termal Puerto Bonito.....	35
Figura 3.4 Fuente termal El Sauce.....	36
Figura 3.5 Imagen satelital del área del río Palena donde se identifican las principales unidades volcánicas (Gonzales-Ferran, 1995) y estructurales (Arancibia et al. 1999; Cembrano & Lara 2009; Mella & Páez 2011) asociados a las termas. Se indica la ubicación de muestras de fuentes termales, agua de lluvia y fiordo.	37
Figura 3.6 Fuente termal Gañote.	38
Figura 3.7 Surgencia de agua de las termas El Ventisquero.	39
Figura 3.8 Fuente termal Puyuhuapi.....	40
Figura 3.9 Fuente termal Queulat.	41
Figura 3.10 Fuente termal Isla Magdalena.	42
Figura 3.11 Fuente termal Los Pobres.	43

Figura 3.12 Imagen satelital con exageración vertical de 1.5 del segmento norte del fiordo de Puyuhuapi. Se identifican las principales unidades volcánicas (Lahsen et al., 1994) y estructurales (Arancibia et al., 1999; Cembrano et al., 2002; Mella and Páez, 2011) asociadas a las termas. Se indica la ubicación de muestras de fuentes termales, agua meteórica y agua de fiordo.	44
Figura 3.13 Fuente termal Puerto Pérez.....	45
Figura 3.14 Fuente termal Chilconal.	46
Figura 3.15 Imagen satelital del fiordo de Aysén. Se identifican las principales unidades volcánicas (D’Orazio et al., 2003; Lahsen et al., 1997; Vargas et al., 2013) y estructurales (Arancibia et al., 1999; Cembrano et al., 2002; Niemeyer, 1975; Niemeyer et al., 1984) asociadas a las termas. Se indica la ubicación de muestras de fuentes termales, agua meteórica y agua de fiordo.....	47
Figura 3.16 Fuente termal Huiña.	48
Figura 3.17 Fuente termal El Engaño.	49
Figura 3.18 Imagen satelital del área de Bahía Murta y El Lago General Carrera. Se identifican las principales unidades volcánicas (Guivel et al., 2006) y estructurales (de la Cruz and Suárez, 2006; Lagabrielle et al., 2004) asociadas a las termas. Se indica la ubicación de muestras de fuentes termales, agua meteórica y agua de fiordo.	51
Figure 4.1 Geological map of the Aysen region, southern Chile. The location of the thermal springs, superficial manifestations of volcanic activity, main traces of LOFZ and secondary lineaments are shown. Modified of (Sernageomin, 2010).	55
Figure 4.2 Piper diagram of fjord, meteoric and thermal water samples.....	62
Figure 4.3 Different dissolved ions [mg/l] vs. surface temperatures [°C] of thermal water samples. Different colors in coastal thermal springs is to better display final results.	63
Figure 4.4 rBr/rCl , rNa/rCl , rB/rCl , rLi/rCl , rSO_4/rCl , $rHCO_3/rCl$ ratios vs. Cl^- [meq/l] in thermal and fjord water samples (r means that concentration is in meq/L).	64
Figure 4.5 rB/rCl vs. rBr/rCl binary diagram (Vengosh, 2003) in thermal and fjord water samples. It is observed two domains linked to hydrothermal and marine sources (r means that concentration is in meq/L).....	65

Figure 4.6 Ca+Mg-HCO ₃ -SO ₄ vs. Na+K-Cl and Ca+Mg vs. HCO ₃ +SO ₄ binary diagrams showing different water-rock interaction processes.	67
Figure 4.7 Dendrogram from the HCA for water samples. Segmented line defines “phenon line” at a linkage distance of five.	68
Figure 4.8 Plot of factorial scores. The HCA groups are shown.	70
Figure 4.9 Binary graph δ ² H vs. δ ¹⁸ O for water samples taken. GMWL: global meteoric water line (Craig, 1963); LMWL: local meteoric water line.	71
Figure 4.10 Ternary diagram of Aysen thermal springs based on Na/1000-K/100-Mg ^{0.5} (Giggenbach, 1988).	73
Figura 5.1 Modelos alternativos para el origen del calor y los constituyentes químicos disueltos en los fluidos termales (Sharma and Srivastava, 2014).	76
Figura 5.2 Diagrama de caja de las concentraciones de elementos trazas de cada una de las fuentes termales.	77
Figura 5.3 Concentración de elementos trazas en función de la temperatura superficial.	80
Figura 5.4 Gráficos binarios entre cloruro, vanadio y selenio. La línea en el diagrama representa la línea de dilución de agua de fiordo.	84
Figura 5.5 Gráficos binarios Li, Rb y Cs vs Cl ⁻ . La línea en el diagrama representa la línea de dilución de agua de fiordo.	86
Figura 5.6 Diagrama ternario Li, Rb y Cs. Basado en (Giggenbach, 1991).	86
Figura 5.7 Gráficos binarios Ge, Co y As vs Cl ⁻ . La línea en el diagrama representa la línea de dilución de agua de fiordo.	88
Figura 5.8 Gráfico binario TDIC vs δ ¹³ C _{TDIC} . Modificado de (Froncini et al., 2009).	93
Figura 5.9 Razones isotópicas de ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr en rocas del BNP en las distintas zonas de surgencia de los fluidos termales (Pankhurst et al., 1999), de los volcanes Maca y Cay (D’Orazio et al., 2003; Lopez-Escobar et al., 1993) y de las aguas termales y de fiordo en la región de Aysén. Entre paréntesis está el número de muestras de rocas consideradas en los diagramas de caja y en rectángulo en plomo el rango de valores de ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr del agua de lluvia (0.709-0.7106) (Négre et al., 2001).	95

Figura 5.10 Diagrama $\delta^{18}\text{O}$ vs $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	95
Figura 5.11 Diagrama ternario N_2 , He y Ar.....	97
Figura 6.1 Modelo esquemático sistemas geotermales de Aysén.....	101

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Parámetros de ejecución del MC-ICP-MS	30
Tabla 2.2. Configuración de las copas de Faraday.....	30
Table 4.1 Chemical and isotopic analyses of meteoric, thermal and fjord water samples from Aysen region.	60
Table 4.2 Average values and standard deviation for G1, G2 and G3 water groups distinguished in the HCA.	69
Table 4.3 Factorial analysis with Varimax rotation. Bold value corresponds to significant variables in each factor.....	69
Table 4.4 Estimated reservoir temperature by silica and cations geothermometers.	72
Tabla 5.1 Análisis de elementos trazas en ppb. Muestras de Fuentes termales (TS), Fiordo (SW), Lluvia (MW) y Río (FW). Símbolos (<) menor al límite de cuantificación y (-) no medido. ...	78
Tabla 5.2 Matriz de correlación entre seleccionados elementos trazas más el cloruro. Texto en rojo correlaciones mayores a 0.9, en amarillo entre 0.8 y 0.89, y en verde entre 0.7 y 0.79.	81
Tabla 5.3 Concentración química del fiordo (muestra n°21) respecto a la química promedio de un océano abierto. En fondo azul cuando las concentraciones en el fiordo son mayores que en el océano.	82
Tabla 5.4 Comparación del factor salino calculado mediante las concentraciones de Cl ⁻ , Br ⁻ , Se y V.	85
Tabla 5.5 Especies químicas dominantes de seleccionados elementos trazas en cada fuente termal incluido la muestra de fiordo más salina.	90
Tabla 5.6 Índices de saturación de minerales comunes en sistemas geotermales. En rojo índices de saturación mayores que cero.....	90
Tabla 5.7 Concentración de TDIC, firmas isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ y razones isotópicas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en las muestras de aguas de Aysén. El símbolo (-) significa análisis no realizado.	92
Tabla 5.8 Composición química de las muestras de gases.....	96
Tabla 5.9 Temperaturas de equilibrio mediante geotermómetros de gases	98