

# Tabla de contenido

<b>Capítulo 1</b>	<b>Introducción</b> .....	1
<b>Capítulo 2</b>	<b>Antecedentes geológicos, climáticos, hidrogeológicos y geotérmicos</b> .....	4
2.1.	Antecedentes geológicos .....	6
2.1.1.	Zona Polloquere.....	10
2.1.2.	Zona Tuyajto .....	12
2.2.	Antecedentes climáticos .....	13
2.3.	Antecedentes hidrológicos .....	20
2.3.1.	Zona Polloquere.....	21
2.3.2.	Zona Tuyajto .....	23
2.4.	Depósitos salinos de los Andes Altos .....	23
2.4.1.	Zona Polloquere.....	28
2.5.	Antecedentes geotérmicos.....	29
2.5.1.	Zona Polloquere.....	30
2.5.2.	Zona Tuyajto .....	31
2.6.	Fuentes de Li, B y Sr y mecanismos de generación de aguas termales salinas.....	32
<b>Capítulo 3</b>	<b>Metodología y obtención de datos</b> .....	35
3.1.	Mineralogía, fisicoquímica e hidrogeoquímica .....	36
3.2.	Isotopos estables .....	37
3.2.1.	Isotopos estables de H y O en aguas.....	37

## TABLA DE CONTENIDO

3.2.2.	Isotopos de Sr en aguas y roca .....	38
3.2.3.	Isotopos estables de B en aguas.....	39
3.2.4.	Isotopos estables de Li en agua y roca.....	42
3.3.	Experimento de disolución de sales .....	45
3.4.	Modelación de evaporación .....	46
3.5.	Factor de enriquecimiento: Katz.....	46
3.6.	Fracción salina-Proporciones de mezcla .....	47
3.7.	Análisis de conglomerados.....	47
3.8.	Faure: líneas de mezcla, 2 y 3 componentes .....	48
3.9.	Corrección de geotermometría.....	48
<b>Capítulo 4</b>	<b>Presentación de resultados .....</b>	<b>49</b>
4.1.	Mineralogía .....	50
	Salar de Surire–Zona Polloquere .....	50
	Zona Tuyajto.....	51
4.2.	Parámetros fisicoquímicos .....	52
	Salar de Surire–Zona Polloquere .....	53
	Zona Tuyajto.....	54
4.3.	Hidrogeoquímica .....	56
	Salar de Surire–Zona Polloquere .....	56
	Zona Tuyajto.....	66
4.4.	Isotopos .....	92
4.4.1.	Isotopos estables de oxígeno y deuterio en agua .....	92
4.4.2.	Estroncio.....	96
4.4.3.	Litio.....	101
4.4.4.	Boro .....	106
<b>Capítulo 5</b>	<b>Discusiones.....</b>	<b>113</b>
5.1.	Procesos hidrogeoquímicos .....	113

## TABLA DE CONTENIDO

Salar de Surire–Zona Polloquere .....	114
SIC-Zona Tuyajto .....	133
5.2. Impronta química.....	142
Salar de Surire–Zona Polloquere .....	142
SIC-Zona Tuyajto .....	148
5.3. Impronta isotópica.....	155
Salar de Surire-Zona Polloquere.....	155
SIC-Zona Tuyajto .....	163
5.4. Fuentes.....	170
5.5. Alcances: Implicancias en la exploración geotérmica en el Altiplano .....	175
Salar de Surire–Zona Polloquere .....	175
SIC-Zona Tuyajto .....	179
<b>Capítulo 6 Conclusiones .....</b>	<b>184</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>188</b>
<b>Apéndices .....</b>	<b>199</b>
<b>Apéndice A Tablas de resultados.....</b>	<b>200</b>
<b>Apéndice B Metodologías .....</b>	<b>257</b>
B.1. Hidrogeoquímica de elementos mayores, menores y traza .....	257
B.1.1. Isotopos estables de H y O en aguas.....	272
B.1.2. Isotopos de Sr en aguas y roca .....	272
B.1.3. Isotopos estables de B en aguas.....	273
B.1.4. Isotopos estables de Li en agua y roca.....	280
<b>Apéndice C Modelación en PHREEQC.....</b>	<b>284</b>
C.1. Evaporación.....	285

## Índice de figuras

2. 1 Ubicación de los volcanes activos de la Zona Volcánica Central de Chile .....	6
2.2 Mapa de la Zona Polloquere.....	11
2. 3 Geología de la Zona Tuyajto .....	13
2. 4 Zonas climáticas y subdivisiones morfotectónicas de los Andes Centrales.....	14
2. 5 Información satelital de promedio de precipitaciones (1979-1998) de Sudamérica.....	16
2. 6 Cronología del enriquecimiento supérgeno en yacimientos de cobre del Desierto de Atacama y su relación con la transición climática árida a hiperárida.....	19
2.7 Mapa de ubicación de puntos de extracción de muestras de agua Zona Polloquere .....	22
2. 8 Esquema resumen de la hidrología de la Zona Tuyajto.....	23
2. 9 Principales áreas geotermales en Chile.....	30
2.10 Mapa de ubicación de puntos de extracción de muestras de agua Zona Tuyajto .....	32
2.11 Esquema resumen de los principales procesos y fuentes que ocurren en zonas áridas y en los Andes Centrales.....	34
3.1 Variaciones isotópicas de boro en fluidos y materiales sólidos.....	41
3.2 Peso atómico de litio y composición isotópica de materiales litio-soportados.....	43
4. 1 Nombre de los sectores en donde fueron extraídas las muestras de este estudio.....	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

4. 2 Diferencia entre pH y temperatura para aguas termales y de lago salino para los sectores estudiados.....	52
4.3 Boxplots de pH y temperatura para lagos salinos y manantiales termales en la Zona de Polloquere y Tuyajto .....	53
4.4 Diagrama piper para muestras de agua obtenidas en Polloquere .....	57
4.5 Razones anión ( $\text{SO}_4$ , $\text{HCO}_3$ , F, Br) versus cloruro en aguas de Polloquere.....	59
4.6 Razones catión (Na, K, Mg, Ca) versus cloruro en aguas de Polloquere .....	61
4.7 Razones iones traza (Li, Cs, Rb, Sr) versus cloruro en aguas de Polloquere.....	63
4.8 Razones especies neutras (Si, As, B $\text{NH}_3$ ) versus cloruro en aguas de Polloquere.....	65
4.9 Diagrama piper para muestras de agua obtenidas en Zona Tuyajto. ....	67
4. 10 Correlación $\text{SO}_4$ -Cl para aguas de Zona Tuyajto.....	69
4. 11 Correlación $\text{HCO}_3$ -Cl para aguas de Zona Tuyajto .....	71
4.12 Correlación F-Cl para aguas de Zona Tuyajto .....	72
4.9 Correlación Br-Cl para aguas de Zona Tuyajto.....	73
4.14 Correlación I-Cl para aguas de Zona Tuyajto.....	74
4.15 Correlación Na-Cl para aguas de Zona Tuyajto .....	76
4.16 Correlación K-Cl para aguas de Zona Tuyajto .....	77
4.17 Correlación Mg-Cl para aguas de Zona Tuyajto.....	78
4.18 Correlación Ca-Cl para aguas de Zona Tuyajto.....	79
4.10 Correlación Li-Cl para aguas de Zona Tuyajto .....	81
4.20 Correlación Cs-Cl para aguas de Zona Tuyajto .....	83
4.21 Correlación Rb-Cl para aguas de Zona Tuyajto .....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

4.22 Correlación Sr–Cl para aguas de Zona Tuyajto.....	85
4.23 Correlación Si–Cl para aguas de Zona Tuyajto. ....	87
4.24 Correlación As–Cl para aguas de Zona Tuyajto. ....	89
4.25 Correlación B–Cl para aguas de Zona Tuyajto .....	90
4.26 Correlación NH <sub>3</sub> –Cl para aguas de Zona Tuyajto. ....	91
4.27 Razón $\delta^2\text{H}$ versus cloruro y $\delta^{18}\text{O}$ versus cloruro en Zona Polloquere. ....	93
4.28 $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ en Zona Polloquere.....	94
4.29 Razón $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ en Zona Tuyajto.....	95
4.30. Razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para sectores de estudio y comparación con otros reservorios terrestres.....	97
4.31 Isótopos de estroncio versus cloruro para muestras fluidas y sólidas de la Zona Polloquere.....	98
4.32 Isótopos de estroncio versus cloruro en muestras fluidas y sólidas de la Zona Tuyajto	100
4.33 Valores $\delta^7\text{Li}$ de aguas en las zonas de estudio y comparación con otros reservorios terrestres.....	102
4.34 Sección esquemática a través de la zona de subducción con los rangos de concentraciones de litio y valores $\delta^7\text{Li}$ típicos para reservorios naturales.....	103
4.35 Isótopos de litio versus cloruro en muestras fluidas y sólidas de la Zona Polloquere ....	104
4.36 Isótopos de litio versus cloruro en muestras fluidas y sólidas de la Zona Tuyajto .....	106
4.37 Rangos de valores $\delta^{11}\text{B}$ en fluidos y materiales sólidos en las zonas de estudio y comparación con otros reservorios terrestres. ....	108
4.38 Isótopos de boro en muestras fluidas y sólidas de la Zona Polloquere.....	110
4.39 Isótopos de boro en muestras fluidas y solidas de la Zona Tuyajto .....	111

## ÍNDICE DE FIGURAS

4.40 Correlación entre valores isotópicos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , $\delta^7\text{Li}$ y $\delta^{11}\text{B}$ .....	112
5.1 Diagramas $\text{SO}_4$ , $\text{HCO}_3$ y F versus cloruro en Zona Polloquere .....	115
5.2 Gráfico Br versus Cl, Zona Polloquere .....	116
5.3 Gráficos Cl/Br versus Na/Br y Cl versus Br/Cl para aguas de la Zona Polloquere .....	117
5.4 Na versus Cl en aguas de la Zona Polloquere.....	118
5.5 Diagramas K, Mg y Ca versus cloruro en aguas de la Zona Polloquere .....	120
5.6 Diagramas Rb y Sr versus cloruro en aguas de la Zona Polloquere.....	122
5.7 Diagramas Li y Cs versus cloruro en aguas de la Zona Polloquere.....	123
5.8 Diagramas As, B, $\text{NH}_3$ y Si versus cloruro en aguas de la Zona Polloquere .....	125
5.9 Isótopos de oxígeno versus cloruro y versus deuterio en aguas de la Zona Polloquere ...	127
5.10 Bromuro versus cloruro en soluciones experimentales de la Zona Polloquere .....	128
5.11 Correlación Br/Cl versus Cl en soluciones experimentales de la Zona Polloquere .....	129
5.12 Sistemática Na-Cl-Br en soluciones experimentales de Zona Polloquere.....	130
5.13 Diagramas de correlación entre cationes (meq/L) en aguas de Zona Polloquere.....	132
5.14 Dendrograma aguas de Zona Tuyajto .....	133
5.15 Grupos resultantes del dendrograma Zona Tuyajto proyectados en el mapa.....	135
5.16 Composición isotópica de oxígeno y deuterio (en ‰ SMOW) en las aguas de la Zona Tuyajto .....	136
5.17 Correlación Cl-Br en soluciones experimentales de la Zona Tuyajto.....	137
5.18 Razones Br/Cl versus Cl que evidencian evaporación y disolución de halita .....	138
5.19 Sistemática Na-Br-Cl en soluciones experimentales de la Zona Tuyajto.....	139

## ÍNDICE DE FIGURAS

5.20 Diagramas correlación entre cationes para aguas de la Zona Tuyajto .....	141
5.21 Diagramas de identificación de miembros representativos, según las razones Na/Mg versus SO <sub>4</sub> /Mg y versus Ca/Mg, para aguas de la Zona Polloquere.....	142
5.22 Líneas de mezcla a partir de correlación entre Na/Mg y Sr/Mg.....	143
5.23 Líneas de mezcla a partir de correlación entre Na/Mg y Li/Mg.....	144
5.24 Líneas de mezcla a partir de correlación entre Na/Mg y B/Mg .....	144
5.25 Desviación iónica calculada en aguas termales de la Zona Polloquere .....	147
5.26 Diagramas de identificación de miembros representativos, según razones Na/Mg-Ca/Mg-SO <sub>4</sub> /Mg, para las aguas de la Zona Tuyajto .....	149
5.27 Identificación de miembros extremos según razones Na/Mg-Sr/Mg en la Zona Tuyajto .....	150
5.28 Identificación de miembros extremos según razones Na/Mg-Li/Mg en la Zona Tuyajto .....	150
5.29 Identificación de miembros representativos según razones Na/Mg-B/Mg en la Zona Tuyajto .....	151
5.30 Desviación iónica calculada en aguas termales de la Zona Tuyajto.....	154
5.31 Líneas de mezcla isotópica de estroncio versus Sr/Mg, para aguas de la Zona Polloquere .....	156
5.32 Líneas de mezcla isotópica de litio versus Li/Mg, para aguas de la Zona Polloquere.....	157
5.33 Líneas de mezcla isotópica de boro versus B/Mg, para aguas de la Zona Polloquere .....	158
5.34 Sistemática Na/Mg-ion/Mg para aguas obtenidas en terreno, soluciones experimentales, depósitos superficiales y líneas de mezcla de la Zona Polloquere .....	160
5.35 Correlación entre <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr, δ <sup>7</sup> Li y δ <sup>11</sup> B para aguas de la cuenca de Surire, soluciones experimentales y depósitos superficiales.....	162



## ÍNDICE DE FIGURAS

5.36 Isótopos de estroncio versus Sr/Mg y línea de mezcla para aguas de la Zona Tuyajto...	164
5.37 Isótopos de litio versus Li/Mg y línea de mezcla para aguas de la Zona Tuyajto .....	165
5.38 Isótopos de boro versus B/Mg y línea de mezcla para aguas de la Zona Tuyajto.....	166
5.39 Sistemática Na/Mg-ion/Mg, para aguas obtenidas en terreno, soluciones experimentales y depósitos/rocas superficiales de la Zona Tuyajto .....	167
5.40 Correlación entre $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , $\delta^7\text{Li}$ y $\delta^{11}\text{B}$ para aguas de la Zona Tuyajto, soluciones experimentales y depósitos superficiales.....	169
5.41 Rangos isotópicos de estroncio y contenido de estroncio en diferentes reservorios terrestres.....	171
5.42 Razones utilizadas para estimar la temperatura de un reservorio termal en diferentes categorías de agua de la Zona Polloquere .....	177
5.43 Razones utilizadas para estimar la temperatura de un reservorio termal en diferentes categorías de agua en la Zona Tuyajto .....	180