

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Exposición del problema	1
1.2	Hipótesis de trabajo	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Objetivo general	3
1.3.2	Objetivos específicos.....	3
1.4	Ubicación y vías de acceso.....	3
1.5	Estructura del trabajo.....	4
1.6	Conceptos generales de geotermia	6
1.6.1	Sistemas magmáticos de zonas volcánicas (CV1).....	6
1.6.2	Sistemas geotermales no magmáticos – extensionales (CV3).....	8
2	Marco geológico.....	9
2.1	Marco geológico regional.....	9
2.2	Marco tectónico	13
2.3	Sistema estructural.....	15
2.4	Fuentes termales estudiadas.....	17
2.4.1	Copiupulli (5.635.881 m N, 280.993 m E, 402 m.s.n.m.)	17
2.4.2	Recuerdo de Ancamil (5.641.878 m N, 277.338 m E, 389 m.s.n.m.)	18
2.4.3	Panqui (5.652.050 m N, 281.637 m E, 902 m.s.n.m.)	19
2.4.4	San Luis (5.642.052 m N, 268.056 m E, 416 m.s.n.m.)	20
2.4.5	Trancura (5.642.026 m N, 267.724 m E, 383 m.s.n.m.).....	21
2.4.6	Palguín (5.632.671 m N, 260.195 m E, 771 m.s.n.m.).....	22
2.4.7	Peumayén (5.655.620 m N, 267.115 m E, 452 m.s.n.m.)	25
2.4.8	Coñaripe (5.608.696 m N, 249.053 m E, 243 m.s.n.m.)	26
2.4.9	Pellaifa (5.608.906 m N, 248.710 m E, 233 m.s.n.m.)	27
2.4.10	Geométricas (5.623.797 m N, 252.960 m E, 902 m.s.n.m.)	27
2.4.11	Llancahue (5.614.052 m N, 248.720 m E, 339 m.s.n.m.)	29

2.4.12	Río Liquiñe (5.597.294 m N, 255.377 m E, 236 m.s.n.m.)	29
2.4.13	Manquecura (5.597.312 m N, 256.215 m E, 318 m.s.n.m.)	30
2.4.14	Hípólito Muñoz (5.594.597 m N, 260.889 m E, 423 m.s.n.m.)	31
2.4.15	Punulaf (5.597.014 m N, 256.376 m E, 313 m.s.n.m.)	32
2.4.16	Trafipán (5.597.606 m N, 254.842 m E, 313 m.s.n.m.)	33
3	Geoquímica de aguas termales	34
3.1	Introducción	34
3.2	Antecedentes teóricos	34
3.2.1	Fluidos primarios	35
3.2.2	Fluidos secundarios	36
3.2.3	Relación entre tectónica y geoquímica de sistemas geotermales en la ZVS	37
3.3	Metodología	39
3.3.1	Trabajo de campo	39
3.3.2	Muestreo y análisis de parámetros fisicoquímicos in-situ	39
3.3.3	Métodos analíticos	40
3.3.4	Métodos estadísticos	40
3.3.5	Geotermometría	42
4	Resultados	44
4.1	Balance iónico y corrección de datos	44
4.2	Análisis estadístico multivariable	47
4.2.1	Agrupamiento jerárquico	47
4.2.2	Análisis de componentes principales	51
4.3	Clasificación química de las aguas termales	55
4.3.1	Parámetros fisicoquímicos	55
4.3.2	Elementos mayores	55
4.3.3	Elementos traza	59
4.4	Procesos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos	64
4.5	Composición isotópica	72

4.5.1	Oxígeno-Deuterio	73
4.5.2	Carbono 13 y DIC	74
4.6	Geotermometría	77
4.6.1	Geotermómetros de sílice	78
4.6.2	Geotermómetros de cationes	84
4.6.1	Geotermometría multicomponente integrada	89
5	DISCUSIONES	95
6	CONCLUSIONES.....	111
7	BIBLIOGRAFÍA.....	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Mapa rutero de las regiones IX y XIV	5
Figura 1-2: Modelo conceptual de un sistema geotermal relacionado a un campo volcánico activo típico de una configuración de arco magmático sobre una zona de subducción	7
Figura 1-3: Modelo conceptual del campo geotermal de Yangbajing, Tíbet	8
Figura 2-1: Mapa geológico simplificado del área de estudio.....	12
Figura 2-2: Configuración tectónica de los Andes del Sur.....	15
Figura 2-3: Piscina donde el agua aflora de manera natural en área termal Copiupulli.....	18
Figura 2-4: Caseta en la cual se encontró y muestreó el agua de mayor temperatura en el área termal Recuerdo de Ancamil.	19
Figura 2-5: Piscina en la cual se tomó la muestra del área termal Panqui.	20
Figura 2-6: Caseta que contiene el pozo en el cual se realizó el muestreo del área termal San Luis. Esta se encuentra en una quebrada ubicada al costado del recinto turístico.	21
Figura 2-7: Punto de muestreo del área termal Trancura	22
Figura 2-8: Surgencia natural de agua ubicada en una ladera escarbada al costado de una caseta con el nombre ‘Litio’	23
Figura 2-9: Sector en el cual se encuentra la surgencia de agua conocida como ‘El Mote’	24
Figura 2-10: Piscina artificial la cual se rellena naturalmente de agua en una caseta denominada ‘Azufre’	25
Figura 2-11: Piscina artificial que colecta el agua que naturalmente aflora a través de rocas intrusivas ubicadas al costado del río Liucura.....	26
Figura 2-12: Casetas que recolectan la surgencia de agua natural en el área termal Pellaifa. Existen tres casetas ubicadas en la base del cerro colindante al área termal.....	27

Figura 2-13: Vertiente de mayor temperatura en el área termal Geométricas y que fue utilizada para el muestreo	28
Figura 2-14: Piscinas que colectan el agua termal del área Llancahue, cuya surgencia es a través del suelo.	29
Figura 2-15: Estanque al cual llega el agua utilizada en el complejo turístico Río Liquiñe.	30
Figura 2-16: Punto de muestreo del área termal Manquecura.....	31
Figura 2-17: Surgencia natural de la cual se sacó la muestra de Hipólito Muñoz.	32
Figura 2-18: Piscina que colecta el agua que aflora de manera natural a través de fracturas en granitoides, que se ubican al lado derecho de la imagen.....	32
Figura 2-19: Pozo artificial (cubierto) en el cual aflora agua termal de forma natural, la cual es canalizada por tuberías hasta las instalaciones turísticas.	33
Figura 3-1:Procesos físicos y químicos que gobiernan los dos dominios magmáticos-tectónicos-geotermales en la ZVS	38
Figura 4-1: Dendograma generado a partir del análisis jerárquico para las muestras del área de estudio.....	49
Figura 4-2: Score plot de entre los distintos componentes seleccionados del análisis de componentes principales.....	54
Figura 4-3: Diagrama de Piper.	57
Figura 4-4: Diagrama ternario Na-K-Mg de Giggenbach (1988).....	58
Figura 4-5: a) Gráfico de Cl vs Li. b) Gráfico de Cl vs As.	62
Figura 4-6: Valores de los índices CAI 1 y 2 para las aguas termales estudiadas.....	65
Figura 4-7: a) Gráfico Na/Cl vs Cl. b) Diagrama binario Na + K - Cl vs. Ca + Mg – HCO ₃ – SO ₄ . c) Diagrama Ca + Mg vs HCO ₃ + SO ₄ . d) Gráfico Na + K vs Ca + Mg.....	66
Figura 4-8: Diagrama ternario de aniones Cl-SO ₄ -HCO ₃	68
Figura 4-9: Diagrama ternario de Li-Rb-Cs.	69

Figura 4-10: Diagrama ternario Cl-B-Li.	70
Figura 4-11: Diagrama ternario Cl-F-B.....	71
Figura 4-12: Composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y δD	74
Figura 4-13:Diagrama TDIC vs $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$	75
Figura 4-14: Temperaturas estimadas a partir de los geotermómetros de sílice y sus correcciones.....	83
Figura 4-15: Diagrama ternario Na-K-Mg de Giggenbach (1988).	86
Figura 4-16: Temperaturas estimadas a partir de los geotermómetros de cationes.....	88
Figura 4-17: Temperaturas estimadas a partir de todos los métodos de geotermometría utilizados en este trabajo.....	93
Figura 5-1: Escenarios al considerar distinta mineralogía de equilibrio para el agua termal de Hipólito Muñoz para el uso de la geotermometría multicomponente	107
Figura 5-2: Temperaturas estimadas a partir de modificaciones en la cantidad de vapor perdido y la composición de este vapor.	108
Figura 5-3: Análisis de sensibilidad en torno al factor de concentración.....	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetro fisicoquímicos, ubicación, elementos mayores y balance iónica para las distintas áreas termales estudiadas.	45
Tabla 2: Elementos traza para las distintas manifestaciones termales estudiadas.....	46
Tabla 3: Geoquímica de los distintos grupos generados a partir del análisis jerárquico.....	51
Tabla 4: Resultados del análisis de componentes principales con rotación Varimax.	52
Tabla 5: Matriz de correlación de Pearson para los distintos parámetros fisicoquímicos y especies presentes en las aguas termales.	63
Tabla 6: Valores isotópicos de H, O y C para las manifestaciones termales estudiadas.....	76
Tabla 7: Temperaturas de reservorio estimadas a partir de los geotermómetros basados en cuarzo.....	81
Tabla 8: Temperaturas de reservorio estimadas a partir de los geotermómetros basados cationes según diversos autores.....	90
Tabla 9: Parámetros utilizados para el software GeoT y temperatura obtenida.	92
Tabla 10: Asociaciones de mineralogía utilizadas en el análisis de sensibilidad.	105