

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos Generales	1
1.3. Objetivos Específicos	2
1.4. Hipótesis de trabajo	2
1.5. Ubicación del área de estudio	2
1.6. Metodología de trabajo	3
1.6.1. Metodologías e instrumental de muestreo.....	3
1.6.2. Métodos analíticos.....	4
1.6.3. Trabajo de gabinete	7
Capítulo 2. Marco Geológico	8
2.1. Marco Tectónico y Geológico Regional	8
2.1.1. Características generales del complejo volcánico Copahue-Caviahue	8
2.1.2. Evolución paleotectónica y principales unidades morfoestructurales de la región.....	8
2.1.3. Volcanoestratigrafía del complejo volcánico Copahue-Caviahue.	10
2.1.4. Estructuras principales dentro del CVCC y su relación con las manifestaciones geotermales.....	13
2.1.5. Descripción y mineralogía de alteración de las áreas geotermales	16
Capítulo 3. Marco teórico.....	19
3.1. Sistemas geotermales: características generales	19
3.1.1. Modelo conceptual: sistemas geotermales ígneos jóvenes	19
3.1.2. Clasificación de aguas en sistemas geotermales	20
3.2. Antecedentes hidrogeoquímicos del área de estudio	22
3.3. Sistema geotermal del Copahue como vapor-dominado	22
3.4. Modelo de sistema vapor-dominados	23
3.5. Origen y evolución de los fluidos geotermales.....	24
3.5.1. Origen de los solutos en fluidos geotermales.....	24
3.5.2. Uso de isótopos de estroncio (Sr), plomo (Pb) y helio (He) para analizar interacciones agua-roca y mezcla de fluidos.	25
3.5.3. Origen de la fase acuosa mediante isótopos de deuterio y oxígeno-18.....	27
3.5.4. Tiempos de residencia de los fluidos: tritio y carbono-14.	28
Capítulo 4. Resultados.....	31

Capítulo 5. Discusiones	35
5.1. Hidrogeoquímica de las aguas superficiales.....	35
5.1.1. Clasificación hidroquímica de las aguas superficiales	35
5.1.2. Aguas sulfatadas ácidas.....	35
5.1.3. Aguas sulfato-bicarbonatadas neutras en Termas de Copahue.	36
5.1.4. COP-2 como condensado del vapor de origen profundo	37
5.1.5. Cationes mayoritarios y elementos traza.....	37
5.2. Origen de las aguas termales y su interacción con la roca-caja: evidencias con isótopos de deuterio, oxígeno-18, Sr, Pb y He.....	41
5.2.1. Origen de la fase acuosa con deuterio y oxígeno-18.....	41
5.2.2. Procesos interacción agua-roca con isótopos de Sr.....	44
5.2.3. Isótopos de He y su relación con la circulación de las aguas termales.	46
5.2.4. Tiempos de residencia con ^{14}C y ^3H	48
5.3. Modelo conceptual para el sistema geotermal del CVCC	51
Capítulo 6. Conclusiones.....	52
Capítulo 7. Bibliografía	55
ANEXO A. Análisis de elementos mayores, elementos traza e isotópico.	62
ANEXO B. Matriz de correlación entre los elementos mayores y traza analizados.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio y accesos a los pueblos de Copahue y Caviahue. Imágenes extraídas y modificadas de Google Earth y Google Maps.	3
Figura 2. Marco regional de la caldera del Agrio, en cual se muestran las principales unidades morfoestructurales. Extraído de Rojas Vera et al., 2009.	10
Figura 3 Mapa geológico de la Caldera del Agrio, donde se indican las áreas geotermales muestreadas. (Modificado de Melnick et al., 2006a)	15
Figura 4. Fotografías de las zonas geotermales de: a) Termas de Copahue; b) Cabañita. Extraída de Bravo Ojeda (2015).	17
Figura 5. a) Foto del área geotermal de Las Máquinas; b) área de Las Maquinitas. Modificada de Sánchez Bowen (2016).	17
Figura 6. Fotografía panorámica del área geotermal de Anfiteatro. Extraída de Bravo Ojeda (2015)	18
Figura 7. Modelo conceptual de un sistema ígneo joven alojado en un estratovolcán andesítico. Extraído de Goff & Janik (2000).	20
Figura 8. Estructura conceptual de un sistema geotermal del tipo vapor-dominado. Extraído de Nicholson, 1993, Geothermal fluid: chemistry and exploration techniques, p.17.	24
Figura 9. Concentración de ^3H en aguas meteóricas desde 1950, en cuatro estaciones IAEA: Ottawa, Canadá (hemisferio norte, continental); Valentia, Irlanda (hemisferio norte, marino); Harare, Zimbabwe (hemisferio sur, continental); Kaitoke, Nueva Zelanda (hemisferio sur, marino).	28
Figura 10. Imagen satelital de las áreas geotermales del sistema geotermal del Copahue.....	34
Figura 11. A la izquierda (1): diagrama ternario de Ca-Na+K-Mg para aguas de los campos geotermales del volcán Copahue. A la derecha (2): diagrama ternario de $\text{SO}_4\text{-Cl-HCO}_3\text{+CO}_3$	35
Figura 12. Diagramas binarios de Al vs SO_4 y Fe vs SO_4 en mg/L. Las líneas punteadas representan la regresión lineal de los datos, con su respectivo R^2	38

Figura 13. Diagrama multielementos de los elementos traza analizados, excluyendo los que se encuentran por debajo del límite de detección.	39
Figura 14. Diagrama multielementos de Ca, Na, Mg y K.	40
Figura 15. Diagramas binarios para los principales cationes (Ca, Mg, Na y K) versus SO ₄ . Las líneas color azul representan tendencias de enriquecimiento.	41
Figura 16. Composición isotópica de δ ² H y δ ¹⁸ O para aguas termales (círculos naranjos) y condensado de pozo geotermal (circulo abierto) del volcán Copahue	42
Figura 17. Razones ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr de las aguas termales asociadas al volcán Copahue y condensado del pozo COP-2, comparadas con las razones del Complejo Volcánico Copahue-Caviahue (Sánchez-Bowen, 2016; Varekamp et al. 2006).	45
Figura 18. Gráfico ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr versus Sr. Los rombos rellenos representan las aguas termales, mientras que el vacío el condensado de COP-2.	46
Figura 19. Rc/Ra versus ⁴ He/ ²⁰ Ne para el He disuelto en las aguas termales asociadas al volcán Copahue (azul); en rojo el condensado del pozo COP-2.	48
Figura 20. Mapa de las áreas geotermales, donde se destaca las edades obtenidas con carbono-14; la edad de 14470 años corresponde al condensado de COP-2.	50
Figura 21. Modelo conceptual del sistema geotermal del Copahue realizado en base a los datos de este estudio, más lo propuesto por Roulleau et al.(2016).	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros generales y fisicoquímicos de los campos geotermales estudiados.....	31
Tabla 2. Resultados de análisis de elementos mayores para las distintas áreas geotermales estudiadas; se presentan en mg/L.	32
Tabla 3. Resultados de análisis para algunos elementos traza de las áreas geotermales estudiadas; se presentan en $\mu\text{g/L}$	33
Tabla 4. Resultados de distintos análisis isotópicos realizados en las áreas geotermales estudiadas.	34
Tabla 5. Composición isotópica de He de fumarolas, bubbling gas y aguas termales asociados a la Zona Volcánica Sur (ZVS). Datos extraídos de Tardani et al. (2016).	47