

## Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Formulación del estudio.....	1
1.2.	Objetivos .....	3
1.3.	Hipótesis de trabajo.....	3
1.4.	Metodología de trabajo.....	3
1.5.	Ubicación .....	9
2.	Marco teórico .....	11
2.1.	Introducción .....	11
2.2.	Alteración hidrotermal .....	11
2.2.1.	Tipos de alteraciones hidrotermales .....	12
2.3.	Minerales hidrotermales .....	14
2.4.	Factores que controlan la alteración hidrotermal .....	17
2.4.1.	Temperatura .....	17
2.4.2.	Presión .....	18
2.4.3.	Litología .....	19
2.4.4.	Permeabilidad.....	19
2.4.5.	Composición del fluido.....	20
2.4.6.	Tiempo .....	20
2.5.	Texturas del cuarzo y la calcita.....	20
2.5.1.	Cuarzo .....	21
2.5.2.	Calcita .....	22
3.	Marco geológico .....	24

3.1.	Introducción .....	24
3.2.	Antecedentes generales .....	24
3.3.	Unidades geológicas de la zona de estudio .....	25
3.4.	Geología estructural .....	28
4.	Resultados del sondaje PexAP-1 .....	32
4.1.	Introducción .....	32
4.2.	Descripción petrográfica .....	36
4.3.	Texturas en el cuarzo y la calcita .....	44
4.3.1.	Cuarzo .....	44
4.3.2.	Calcita .....	46
4.4.	Paragénesis .....	46
4.4.1.	Fenocristales .....	46
4.4.2.	Vetillas .....	47
4.4.3.	Amígdalas .....	49
4.5.	Difracción de rayos-X.....	50
4.5.1.	Resultados roca total .....	50
4.5.2.	Resultados fracción <2µm.....	53
4.6.	Microscopía electrónica de barrido (SEM) .....	57
5.	Discusiones.....	61
6.	Conclusiones .....	74
7.	Bibliografía .....	76
	Anexo A.....	85
	Anexo B.....	117

Anexo C.....	122
Anexo D .....	128
Anexo E.....	134

## Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de los pozos existentes y los proyectados. En color rojo, se destaca el pozo base de este trabajo: PexAP-1 (Fuente: modificado del EIA del proyecto Central Geotérmica Cerro Pabellón).....	4
Figura 2. A) Muestra con solución Morgan. B) Muestras en proceso de lavado. C) Centrífuga utilizada. D) Muestras listas para montar. E) Muestras montadas. F) Mufla utilizada.....	9
Figura 3. Ubicación de la II Región de Antofagasta, Chile, y detalle de la zona de estudio. Encerrada, se muestra la Concesión Geotérmica Apacheta (Fuente: EIA del proyecto Central Geotérmica Cerro Pabellón).....	10
Figura 4. Cuadro pH versus temperatura con las alteraciones hidrotermales (Fuente: modificado de Corbett and Leach, 1998). .....	14
Figura 5. Paragénesis zonal en los tres tipos de sistemas hidrotermales definidos por el valor de cationes/H <sup>+</sup> en soluciones (Fuente: modificado de Utada, 1980).....	17
Figura 6. Texturas de la sílice y la calcita (Fuente: modificado de Moncada et al., 2012). .....	23
Figura 7. Hoja geológica de Ollagüe modificada de la zona de estudio (Fuente: Ramírez y Huete, 1980). En azul oscuro van los estratovolcanes andesíticos (tanto intensa como moderadamente erosionados). En azul claro están los estratovolcanes andesíticos y dacíticos. En rosado claro los domos dacíticos y en amarillo los depósitos no consolidados.....	27
Figura 8. Mapa del área del CVAI. En los polígonos de color blanco se ve el cordón principal. El secundario con triángulos azules. Las fallas principales en amarillo (Fuente: Rivera et al., 2015). .....	28
Figura 9. Estructuras principales afectando el área de Cerro Pabellón en una imagen Landsat TM (Fuente: modificada de Tibaldi et al., 2009). (1) Urzua et al. 2002 (K-Ar). (2) Renzulli et al. 2006 (Ar-Ar). (3) Mercado et al. 2009 (K-Ar). .....	30
Figura 10. Reconstrucción esquemática y simplificada de la estratigrafía y estructuras del CVAI (Fuente: Rivera et al., 2015). .....	31
Figura 11. Correlación lito-estratigráfica entre los pozos profundos y el sondaje exploratorio (Fuente: Geotérmica del Norte). .....	33
Figura 12. Microfotografías. A) CP-37 vetilla de óxido de Fe. B) CP-35 textura traquítica.....	37
Figura 13. Microfotografías. A) CP-22 clorita reemplazando un mineral ferromagnesiano (posiblemente piroxeno). B) CP-10 vetilla con cuarzo y zeolitas. C) CP-20 hematita con ilmenita (cristal a la derecha) y pirita en el de la izquierda. ....	39
Figura 14. Fotografías del sondaje con vetillas con Qz, Cal y otros minerales. Arriba, muestra CL-CP-24. Abajo, muestra CL-CP-50. La escala está en centímetros. ....	40

Figura 15. Fotografías del sondaje con vetillas con Qz o Cal y otros minerales. Izquierda, muestra CL-CP-20. Derecha, muestra CL-CP-31 .La escala está en centímetros. ....	41
Figura 16. Microfotografías de distintas texturas de cuarzo. A) Corte CP-49 cuarzo con textura crustiforme. B) CP-50 cuarzo con textura en peine. C) CP-45 cuarzo con textura en peine. ....	45
Figura 17. Microfotografías de la textura rómbica de la calcita en el corte CP-07...	46
Figura 18. Relación paragenética en un fenocristal (corte CL-CP-06). ....	47
Figura 19. Relación paragenética en un fenocristal (corte CL-CP-37). ....	47
Figura 20. Relación paragenética en un tipo de vetilla (corte CL-CP-45). ....	48
Figura 21. Relación paragenética en un tipo de vetilla (corte CL-CP-37). ....	48
Figura 22. Relación paragenética en un tipo de vetilla (corte CL-CP-50). ....	49
Figura 23. Relación paragenética en un tipo de amígdala (corte CL-CP-14). ....	49
Figura 24. Relación paragenética en un tipo de amígdala (corte CL-CP-10). ....	50
Figura 25. Diagrama de DRX de la muestra CL-CP-01 de roca total con sus peaks característicos. ....	51
Figura 26. Diagrama de DRX de la muestra CL-CP-12 de roca total con sus peaks característicos. ....	52
Figura 27. Resumen de los minerales encontrados con DRX y su semicuantificación. ....	53
Figura 28. Diagramas de DRX de la muestra CL-CP-01, en rojo se observa la muestra secada al aire, en azul la que tiene etilenglicol y en verde la muestra calentada. ....	54
Figura 29. Diagramas de DRX de la muestra CL-CP-11. En rojo, se observa la muestra secada al aire; en azul, la que tiene etilenglicol; y en verde, la muestra calentada..	55
Figura 30. Diagramas de DRX de la muestra CL-CP-12, en rojo se observa la muestra secada al aire, en azul la que tiene etilenglicol y en verde la muestra calentada .....	55
Figura 31. Resumen de los minerales arcillosos encontrados con DRX y su semicuantificación. ....	57
Figura 32. Microfotografía textural de un grano en la muestra CL-CP-11 que muestra un cristal de clorita. ....	58
Figura 33. Diagrama de composición elemental del cristal de la figura 24. ....	58
Figura 34. Microfotografía textural de un grano en la muestra CL-CP-8 que muestra un cristal de plagioclasa siendo alterado por esmectita. ....	59
Figura 35. Microfotografía textural de un grano en la muestra CL-CP-05 que muestra un interestratificado I/S. ....	60
Figura 36. Diagrama de composición elemental del cristal de la figura 26. ....	60

Figura 37. Resumen de la mineralogía encontrada versus la profundidad del sondaje. ....	63
Figura 38. Porcentaje de illita y clorita versus la profundidad. ....	66
Figura 39. Fotografía de la muestra CL-CP-24. La vetilla presenta Qz, Cal y OxFe. La escala está en centímetros. ....	118
Figura 40. Fotografía de la muestra CL-CP-26. La vetilla está abierta y presenta Qz y Cal. La escala está en centímetros. ....	118
Figura 41. Fotografía de la muestra CL-CP-36. La vetilla presenta Qz y Cal. La escala está en centímetros. ....	119
Figura 42. Fotografía de la muestra CL-CP-45. La vetilla presenta Qz y Cal. La escala está en centímetros. ....	119
Figura 43. Fotografía de la muestra CL-CP-50. La vetilla presenta Qz, Cal, Chl y OxFe. La escala está en centímetros. ....	119
Figura 44. Fotografía de la muestra CL-CP-20. Presenta dos tipos de vetillas. La principal con Qz, Cal, Chl y OxFe, y una secundaria con Qz y Chl. La escala está en centímetros. ....	120
Figura 45. Fotografía de la muestra CL-CP-28. Presenta dos tipos de vetillas. La principal con Qz y Cal, y una secundaria con Qz. La escala está en centímetros. ....	120
Figura 46. Fotografía de la muestra CL-CP-31. Presenta dos tipos de vetillas. La principal con Qz, Cal y OxFe, y un set con Qz. La escala está en centímetros. ....	121
Figura 47. Diagramas de DRX de roca total de las muestras CL-CP-01, 02 y 03. ....	123
Figura 48. Diagramas de DRX de roca total de las muestras CL-CP-04, 05 y 08. ....	124
Figura 49. Diagramas de DRX de roca total de las muestras CL-CP-10, 11 y 12. ....	125
Figura 50. Diagramas de DRX de roca total de las muestras CL-CP-15, 18 y 20. ....	126
Figura 51. Diagramas de DRX de roca total de las muestras CL-CP-27, 39 y 51. ....	127
Figura 52. Diagramas de DRX de arcillas de las muestras CL-CP-01, 02 y 03. ....	129
Figura 53. Diagramas de DRX de arcillas de las muestras CL-CP-04, 05 y 08. ....	130
Figura 54. Diagramas de DRX de arcillas de las muestras CL-CP-10, 11 y 12. ....	131
Figura 55. Diagramas de DRX de arcillas de las muestras CL-CP-15, 18 y 20. ....	132
Figura 56. Diagramas de DRX de arcillas de las muestras CL-CP-27, 39 y 51. ....	133
Figura 57. Microfotografía textural de un grano de interestratificado I/S perteneciente a la muestra CL-CP-05. ....	135
Figura 58. Microfotografía textural de un grano de interestratificado I/S perteneciente a la muestra CL-CP-05. ....	136
Figura 59. Diagrama de composición elemental de la figura 58. ....	136

Figura 60. Microfotografía textural de un grano de plagioclasa alterado a esmectita perteneciente a la muestra CL-CP-08.....	137
Figura 61. Diagrama de composición elemental de la figura 61.....	137
Figura 62. Microfotografía textural de un grano en la muestra CL-CP-11 que muestra un cristal de clorita. ....	138
Figura 63. Diagrama de composición elemental del cristal de la figura 62. ....	138

## Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de los minerales hidrotermales con sus temperaturas de estabilidad (Fuente: modificada de Sigurdsson et al., 2015). .....	16
Tabla 2. Tipo de vetilla observada según el corte y la profundidad. ....	42
Tabla 3. Mineralogía de las vetillas con la profundidad. ....	43
Tabla 4. Paragénesis en los cortes.....	50
Tabla 5. Gradientes geotermales con los datos de temperatura de la EIA (Gutiérrez, 2012). ....	72
Tabla 6. Descripción corte CL-CP-06 .....	86
Tabla 7. Descripción corte CL-CP-07.....	88
Tabla 8. Descripción corte CL-CP-09 .....	89
Tabla 9. Descripción corte CL-CP-10 .....	91
Tabla 10. Descripción corte CL-CP-14 .....	93
Tabla 11. Descripción corte CL-CP-15 .....	95
Tabla 12. Descripción corte CL-CP-20 .....	96
Tabla 13. Descripción corte CL-CP-22 .....	98
Tabla 14. Descripción corte CL-CP-24 .....	99
Tabla 15. Descripción corte CL-CP-26 .....	100
Tabla 16. Descripción corte CL-CP-28 .....	101
Tabla 17. Descripción corte CL-CP-29 .....	102
Tabla 18. Descripción corte CL-CP-30.....	103
Tabla 19. Descripción corte CL-CP-31.....	104
Tabla 20. Descripción corte CL-CP-33 .....	105
Tabla 21. Descripción corte CL-CP-34 .....	106
Tabla 22. Descripción corte CL-CP-35.....	107
Tabla 23. Descripción corte CL-CP-36.....	108
Tabla 24. Descripción corte CL-CP-37.....	109
Tabla 25. Descripción corte CL-CP-39.....	110
Tabla 26. Descripción corte CL-CP-45.....	112
Tabla 27. Descripción corte CL-CP-49.....	114
Tabla 28. Descripción corte CL-CP-50 .....	115
Tabla 29. Descripción corte CL-CP-51 .....	116



## Tabla de abreviaturas<sup>1</sup>

<b>Mineral</b>	<b>Abreviación</b>	<b>Mineral</b>	<b>Abreviación</b>
Albita	Ab	Heulandita	Hul
Arcilla	Arc	Hornblenda	Hbl
Beidellita <sup>2 3</sup>	Bei	Illita 0.5/esmectita <sup>2</sup>	I/S Ro
Biotita	Bt	Illita 0.7/esmectita <sup>2</sup>	I/S R1
Clorita/esmectita <sup>2</sup>	C/S	Illita 0.9/esmectita <sup>2</sup>	I/S R3
Calcita	Cal	Illita <sup>2</sup>	Ilt
Calcopirita	Ccp	Ilmenita	Ilm
Clorita <sup>2</sup>	Chl	Magnetita	Mag
Clinopiroxeno	Cpx	Ortopiroxeno	Opx
Cuarzo	Qz	Óxidos de hierro	OxFe
Esmectita <sup>2</sup>	Sme	Plagioclasa	Pl
Feldespato	Fsp	Pirita	Py
Feldespato potásico	Kfs	Piroxeno	Px
Hematita	Hem	Saponita <sup>2 3</sup>	Sap

<sup>1</sup> Se tomó como base el trabajo de Whitney y Evans (2010).

<sup>2</sup> Pertenecientes a los minerales arcillosos: si no se puede determinar, se generaliza con Arc.

<sup>3</sup> Pertenecientes al grupo de las esmectitas (dentro de los minerales arcillosos): si no se puede determinar, se generaliza con Sme.