

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido.....	iv
Índice de tablas.....	vii
Índice de figuras.....	viii
1. Introducción.....	2
1.1 Objetivos.....	5
1.1.1 Objetivo general.....	5
1.1.2 Objetivos específicos.....	5
1.2 Hipótesis de trabajo.....	5
1.3 Metodología.....	6
1.3.1 Recopilación de antecedentes.....	6
1.3.2 Análisis de muestras de aguas subterráneas.....	7
1.3.3 Procesamiento de datos.....	7
1.3.4 Desarrollo de modelos.....	8
2. Antecedentes generales.....	9
2.1 Ubicación y accesos.....	9
2.2 Antecedentes de trabajos previos.....	9
2.3 Clima.....	10
2.3.1 Clima desértico nuboso.....	10
2.3.2 Clima desértico normal.....	11
2.3.3 Clima desértico marginal de altura.....	11
2.3.4 Clima de estepa de altura.....	11
2.4 Geomorfología.....	12
2.5 Hidrografía.....	13
2.6 Hidrogeología Regional.....	14
2.7 Hidrogeología del sector Sierra Gorda.....	15

3 Marco Geológico	17
3.1 Geología Regional.....	17
3.2 Geología Local	19
3.2.1 Litología.....	19
3.2.2 Estructuras	22
3.2.3 Alteración.....	24
3.2.4 Mineralización	27
4. Marco Hidrogeológico.....	31
4.1 Hidrogeología General	31
4.2 Hidrogeología Local.....	32
4.2.1 Unidades de permeabilidad.....	33
4.3 Características Hidrológicas.....	36
4.3.1 Recarga	39
4.3.2 Almacenamiento	40
4.3.3 Descarga.....	40
4.3.4 Hidroquímica	42
5. Metodología de muestreo y procedimientos analíticos	44
5.1 Muestreo de aguas subterráneas	44
Metodología de muestreo.....	44
5.2 Procedimientos analíticos de laboratorio	45
6. Características de puntos de muestreo.....	47
6.1 Selección y ubicación de puntos de muestreo	47
6.2 Características geológicas de los puntos de muestreo.....	49
7. Control de calidad.....	54
7.1 Geoquímica de 60 elementos	55
7.1.1 Control de calidad analítico	55

7.1.2 Control de calidad de terreno.....	55
7.2 Geoquímica de elementos mayores.....	58
8. Hidrogeoquímica de aguas subterráneas en Sierra Gorda.....	60
8.1 Evolución temporal en los datos geoquímicos de los pozos de monitoreo.....	60
8.2 Parámetros físico-químicos.....	61
8.3 Geoquímica de elementos mayores.....	64
8.3.2 Concentraciones relativas de elementos.....	67
8.4 Geoquímica de elementos menores y traza.....	70
8.4.1 Concentraciones relativas de elementos menores y traza.....	70
8.5 Comparación de muestras de aguas filtradas versus no filtradas.....	73
9. Análisis estadístico.....	75
9.1 Estadística univariable.....	75
9.2 Dendrograma, análisis de conglomerados.....	78
9.3 Análisis de componentes principales.....	79
10 Equilibrio termodinámico.....	83
10.1 Índices de saturación mineral.....	84
10.2 Modelo inverso.....	92
11. Discusiones.....	98
12. Conclusiones.....	114
Bibliografía.....	117
Anexos.....	119
Anexo 1. Características de puntos de muestreo.....	120
Anexo 2. Análisis de laboratorio.....	121
Anexo 3. Control de calidad.....	123
Anexo 4. Evolución temporal de pozos.....	129
Anexo 5. Estadísticas.....	137

Índice de tablas

Tabla 1. Tasas de recarga estimadas.....	39
Tabla 2. Derechos de agua constituidos. Fuente: DGA.....	41
Tabla 3. Resumen pozos de monitoreo.....	49
Tabla 4. Características geológicas de puntos de monitoreo.....	50
Tabla 5. Diferencias relativas absolutas para muestras filtradas originales y sus duplicados (febrero 2011 a noviembre 2013). En rojo se destacan $DRA > 30\%$	57
Tabla 6. Error de balance iónico (%) de muestras de agua subterránea en Sierra Gorda.....	59
Tabla 7. Estadística básica de base de datos histórica, proyecto Sierra Gorda (2008 - 2013).	76
Tabla 8. Análisis de Componentes Principales Noviembre 2012.	80
Tabla 9. Pesos de los componentes.	81
Tabla 10. Minerales presentes en perfil A-A'.....	93

Índice de figuras

Figura 1. Zona de estudio. Modificado de atlas geográfico de Chile para la educación (IGM), 4 edición, 1994.	9
Figura 2. Tipos de clima en la región de Antofagasta. Modificada de guía climatológica práctica, dirección meteorológica de Chile.	12
Figura 3. Área del proyecto minero Sierra Gorda.	13
Figura 4. Mapa hidrológico regional. Modificado de división de subcuencas por regiones, DGA, 2000.	14
Figura 5. Hidrogeología regional. Modificado de Mapa Hidrogeológico de Chile, escala 1:2500000, 1986, Dirección General de Aguas.	16
Figura 6. Mapa geológico proyecto Sierra Gorda. Autor Jorge Maya, Escala 1:50.000, actualizado año 2010. Modificado.	18
Figura 7. Mapa en planta cota 1572 m.s.n.m., litología proyecto Sierra Gorda. Modificado de modelo del yacimiento, 2014 (información proporcionada por SGSCM).	20
Figura 8. Estructuras en área de estudio.	23
Figura 9. Mapa en planta cota 1572 m.s.n.m., alteración proyecto Sierra Gorda. Modificado de modelo del yacimiento, 2014 (información proporcionada por SGSCM).	25
Figura 10. Mapa en planta cota 1572 m.s.n.m., mineralización proyecto Sierra Gorda. Modificado de modelo del yacimiento, 2014 (información proporcionada por SGSCM).	28
Figura 11. Cuenca Sierra Gorda. Modificado de actualización hidrogeológica proyecto Sierra Gorda, VAIGS, 2014.	33
Figura 12. Ubicación de sondajes geotécnicos utilizados para redefinir permeabilidades.	34
Figura 13. Permeabilidad en zona de estudio. Colores indican el sector al cual corresponden los valores de permeabilidad (ver explicación en el texto).	37
Figura 14. Curvas de nivel agua subterránea. Modificado de actualización hidrogeológica, VAIGS, 2014.	38
Figura 15. Pozos con derechos de aguas concedidas. Fuente: DGA.	42
Figura 16. Mapa de pozos de monitoreo y perfil A-A'.	47
Figura 17. Sección A-A', perfil de Litología. Modificado de perfil inédito de SGSCM, 2013.	51
Figura 18. Sección A-A', perfil de alteración. Modificado de perfil inédito de SGSCM, 2013. ...	52

Figura 19. Sección A-A', perfil de mineralización. Modificado de perfil inédito de SGSCM, 2013.	52
Figura 20. pH de pozos de monitoreo históricos (izq.) y pozos CB (der.). Líneas punteadas indican límites establecidos por la norma de aguas para riego, NCh1333.....	61
Figura 21. Registro de temperatura, pozos históricos (izq.) y pozos CB (der.).....	62
Figura 22. Registro de ORP, pozos históricos (izq.) y pozos CB (der.).....	62
Figura 23. Diagrama Durov, monitoreo agosto 2013 y noviembre 2012 (pozos KP y SG-352). .	63
Figura 24. Registro de sólidos totales disueltos (TDS), resultados de laboratorio. Monitoreo de pozos históricos (izq.) y pozos CB (der.).....	64
Figura 25. Diagrama Piper, monitoreo agosto 2013.....	65
Figura 26. Diagrama de distribución Stiff, monitoreo mayo 2013. Datos de KP-DH10-33 y KP-DH10-40 son de noviembre 2012. Flechas rojas indican dirección de flujo de agua.	66
Figura 27. Concentraciones de iones mayores versus ion cloruro, campaña agosto 2013 y noviembre 2012.....	67
Figura 28. Evolución de la concentración de SO ₄ y Ca, a lo largo de la línea de flujo. En verde se destacan pozos ubicados en sector rajo Salvadora y Catabela.	68
Figura 29. Evolución de concentración de Cl y Na, a lo largo de la línea de flujo. En verde se destacan pozos ubicados en sector rajo Salvadora y Catabela.	69
Figura 30. Evolución de concentración de K y Mg, a lo largo de la línea de flujo. En verde se destacan pozos ubicados en sector rajo Salvadora y Catabela.	69
Figura 31. Concentraciones agrupadas de elementos mayores, menores y trazas versus ion cloruro. Campañas de agosto 2013 y noviembre de 2012 (SG-352 y pozos KP).	71
Figura 32. Evolución de elementos mayores, menores y traza a lo largo de la línea de flujo. Campaña agosto 2013 y noviembre 2012 (pozos KP y SG-352). En verde se destacan pozos ubicados en sector rajo Salvadora y Catabela.	72
Figura 33. Fracción de muestras filtradas divididas en muestras sin filtrar. Las barras de error corresponden a una vez desviación estándar (1σ).....	73
Figura 34. Promedio trimestral de 6 años, muestras filtradas, campañas 2008 a 2013. Barras de error corresponden a una desviación estándar.....	77
Figura 35. Dendogramas, campaña noviembre 2012 y mayo 2013, según observaciones (pozos) y variables.....	79
Figura 36. Grafica de pesos ACP noviembre 2012	81

Figura 37. Índice de saturación, pozo CB-3 (izq.) y CB-4 (der.)	87
Figura 38. Índice de saturación, pozo SG-352 (izq.) y SG-493 (der.).....	88
Figura 39. Índice de saturación, pozo KP-DH10-33 (izq.) y KP-DH10-40 (der.)	89
Figura 40. Nivel freático, pozo CB-7 (izq.) y pozo CB-6 (der.)	98
Figura 41. Superficie zona de estudio*, con proyección de nivel freático -NF- (exagerado).....	99
Figura 42. Evolución de concentraciones a lo largo del perfil, en el sentido del flujo: B, Li, K, Na y Cl.	102
Figura 43. Sulfato versus calcio, campaña agosto 2013.....	104
Figura 44. Evolución de concentraciones a lo largo del perfil, en el sentido del flujo: SO ₄ y Mg.	104
Figura 45. Concentración de Sr versus Ca y Cl, monitoreo agosto 2013 y noviembre 2012.....	106
Figura 46. Evolución de concentraciones a lo largo del perfil, en el sentido del flujo: Ca y Sr.	107