

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO	3
1.3 METODOLOGÍA	3
1.3.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y GENERACIÓN DE BASE DE DATOS	3
1.3.2 CONTEXTO GENERAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	4
1.3.3 PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN FAENA SIERRA GORDA	4
1.3.4 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	4
2 ANTECEDENTES GENERALES	5
2.1 UBICACIÓN Y ACCESOS	5
2.2 ANTECEDENTES DE TRABAJOS PREVIOS	6
2.3 CLIMA	8
2.3.1 DESÉRTICO NUBOSO	8
2.3.2 DESÉRTICO NORMAL	8
2.3.3 DESÉRTICO FRÍO	8
2.4 GEOMORFOLOGÍA	9
2.5 PRECIPITACIONES	10
2.6 HIDROGRAFÍA	10
3 MARCO GEOLÓGICO	12
3.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	12
3.2 MARCO GEOLÓGICO LOCAL	12
3.2.1 LITOLOGÍA	13
3.2.2 ESTRUCTURAS	16
3.2.3 MINERALIZACIÓN Y ALTERACIÓN	19
4 MARCO HIDROGEOLÓGICO	21
4.1 FAENA SIERRA GORDA	21
4.1.1 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	21
4.1.2 PIEZOMETRÍA Y DIRECCIONES DE FLUJO	23
4.1.3 BALANCE HÍDRICO	27
4.2 FAENA SPENCE	29
4.2.1 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	29

4.2.2	PIEZOMETRÍA Y DIRECCIONES DE FLUJO.....	31
4.2.3	BALANCE HÍDRICO.....	34
4.3	FAENA CENTINELA.....	35
4.3.1	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS.....	35
4.3.2	PIEZOMETRÍA Y DIRECCIONES DE FLUJO.....	37
4.3.3	BALANCE HÍDRICO.....	38
5	PUNTOS DE MUESTREO.....	40
5.1	UBICACIÓN, CARACTERÍSTICAS Y MEDICIONES.....	40
5.1.1	MINERA SIERRA GORDA.....	40
5.1.2	MINERA SPENCE.....	43
5.1.3	MINERA CENTINELA.....	47
5.2	GEOLOGÍA SUBTERRÁNEA DE PUNTOS DE MONITOREO EN FAENA SIERRA GORDA.....	49
6	QA/QC DE LOS DATOS.....	52
7	CONTEXTO GENERAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	55
7.1	NIVELES FREÁTICOS.....	55
7.1.1	FAENA SIERRA GORDA.....	55
7.1.2	FAENA SPENCE.....	59
7.1.3	FAENA CENTINELA.....	62
7.2	HIDROGEOQUÍMICA GENERAL.....	64
7.2.1	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS.....	65
7.2.2	ELEMENTOS MAYORES.....	69
7.3	ANÁLISIS ESTADÍSTICO UNIVARIABLE.....	73
8	PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE FAENA SIERRA GORDA.....	78
8.1	CONTEXTO HIDROQUÍMICO ALREDEDOR DEL DEPÓSITO DE RELAVES.....	78
8.1.1	ANÁLISIS DE DENDOGRAMAS.....	78
8.1.2	COMPARACIÓN DE VARIABLES QUÍMICAS ENTRE SECTORES ESTE Y OESTE DEL DEPÓSITO DE RELAVES.....	80
8.2	EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS DATOS GEOQUÍMICOS.....	82
8.2.1	NIVELES FREÁTICOS EN EL TIEMPO.....	82
8.2.2	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN EL TIEMPO.....	86
8.2.3	EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE ELEMENTOS MAYORES.....	90
8.2.4	EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE ELEMENTOS MINORITARIOS Y TRAZA.....	94
8.3	ÍNDICES DE SATURACIÓN MINERAL.....	96
9	DISCUSIONES.....	103
9.1	CONTEXTO GENERAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	103

9.2 PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN FAENA SIERRA GORDA	109
10 CONCLUSIONES	119
11 RECOMENDACIONES	121
BIBLIOGRAFÍA	122
ANEXOS	125
ANEXO 1. HIDROGEOQUÍMICA GENERAL	125
ANEXO 2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO UNIVARIABLE	136
ANEXO 3. ANÁLISIS DE DENDOGRAMAS	144
ANEXO 4. COMPARACIÓN DE VARIABLES QUÍMICAS ENTRE SECTORES ESTE Y OESTE DEL DEPÓSITO DE RELAVES.....	147
ANEXO 5. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS EN EL TIEMPO	150
ANEXO 6 ELEMENTOS MAYORES EN EL TIEMPO	154
ANEXO 7 ELEMENTOS MENORES Y TRAZA EN EL TIEMPO	158
ANEXO 8 PERFILES GEOFÍSICOS NANOTEM	167

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Ubicación y accesos.....	5
Figura 2.2: Tipos de clima de la región de Antofagasta. Modificado de Vergara (2014).....	9
Figura 2.3: Mapa hidrográfico de la zona de estudio. Elaborado en base a delimitación de cuencas de la DGA (2000).....	11
Figura 3.1: Mapa geológico de faenas Spence y Sierra Gorda a escala 1:100.000. Modificado de Duhart et al. (2018).	15
Figura 3.2: Mapa geológico de faena Centinela a escala 1:100.000. Modificado de Marinovic y García (1999) y GAC (2012).	16
Figura 3.3: Estructuras en el área de faenas Spence y Sierra Gorda. Extraídas de Arcadis (2015 y 2016) y Duhart et al (2018).	18
Figura 4.1: Cuenca de Sierra Gorda. Modificado de VAIGS (2014).	21
Figura 4.2: Piezometría preoperacional de faena Sierra Gorda. Extraída y modificada de VAIGS (2014)...	24
Figura 4.3: Piezometría del año 2019 de faena Sierra Gorda. Elaboración propia.....	25
Figura 4.4: Balance hídrico. Modificado de Itasca (2019).	28
Figura 4.5: Piezometría preoperacional (año 2004) de faena Spence. Extraída y modificada de Arcadis (2015).	32
Figura 4.6: Piezometría del año 2016 de Faena Spence. Tomada de Golder (2017).	33
Figura 4.7 Recarga y descarga del acuífero de faena Spence. A la izquierda se muestran las condiciones preoperacionales y la derecha el período de explotación. Tomada de Arcadis (2015).	35

Figura 4.8: Piezometría y distribución de unidades hidrogeológicas de faena Centinela sector POE. Tomada de GAC (2012).	38
Figura 5.1: Ubicación de puntos de monitoreo e instalaciones de minera Sierra Gorda	41
Figura 5.2: Ubicación de puntos de monitoreo minera Spence.....	43
Figura 5.3: Ubicación de puntos de monitoreo minera Centinela.....	47
Figura 7.1: Evolución de niveles freáticos y distribución de los pozos de faena Sierra Gorda y Pampa Lina y piezometría preoperacional.	57
Figura 7.2: Niveles freáticos en el tiempo minera Sierra Gorda.	58
Figura 7.3: Niveles freáticos en el tiempo zona de Pampa Lina.....	58
Figura 7.4: Niveles freáticos en el tiempo minera Spence.....	60
Figura 7.5: Evolución de niveles freáticos y distribución de los pozos de faena Spence y piezometría preoperacional.	61
Figura 7.6: Niveles freáticos en el tiempo minera Centinela.	62
Figura 7.7: Evolución de niveles freáticos y distribución de los pozos de faena Centinela y piezometría preoperacional.	63
Figura 7.8: Diagrama Durov de minera Sierra Gorda y Pampa Lina.....	66
Figura 7.9: Distribución de TDS en el distrito Sierra Gorda. Concentraciones clasificadas en base a Reif y Alhalabi (2015).	68
Figura 7.10: Diagrama Piper minera Sierra Gorda	70
Figura 7.11: Diagramas Stiff minera Sierra Gorda.....	70
Figura 7.12: Distribución de la composición química de las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda.	72
Figura 7.13: Gráficos del promedio por pozo de solidos disueltos totales (TDS) versus aniones de Sierra Gorda, Pampa Lina, Spence instalaciones, Spence sector relaves y Centinela.....	75
Figura 7.14: Gráficos de solidos disueltos totales (TDS) versus cationes de Sierra Gorda, Pampa Lina, Spence instalaciones, Spence sector relaves y Centinela.	77
Figura 8.1: Dendogramas representativos en las cercanías del depósito de relaves y sector de piscinas..	80
Figura 8.2: Evolución en el tiempo de los niveles freáticos de pozos CB-5, CB-6, CB-9, CB-7R, CB-8R, CB-11R y sondaje abierto CON-15.	84
Figura 8.3: Distribución espacial de pozos MCB	85
Figura 8.4: Evolución temporal de niveles freáticos de pozos MCB.	85
Figura 8.5: índices de saturación mineral pozos CB-5 y CB-6.	99
Figura 8.6: Índices de saturación mineral pozos CB-9 y CB-7R.	100
Figura 8.7: índices de saturación mineral de pozos CB-8R y CB-11R.	101
Figura 8.8: índices de saturación mineral de sondaje abierto CON-15.....	102
Figura 9.1: Distribución de las composiciones químicas predominantes de las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda y medio hospedante asociado.....	104

Figura 9.2 Distribución de las concentraciones de TDS de las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda y medio hospedante asociado.	105
Figura 9.3: Ubicación de perfiles geofísicos nanoTEM. y falla propuesta. Diferencia lateral de resistividades se interpreta como la presencia de una falla.	111
Figura 9.4: Relaciones sodio-nitrato y potasio-nitrato.....	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Permeabilidades (K) y espesores estimados de las unidades hidrogeológicas de faena Sierra Gorda.....	23
Tabla 4.2. Puntos de medición y niveles utilizados para elaborar piezometría con fecha julio del año 2019.	26
Tabla 4.3. Caudales máximos, mínimos y promedios estimados para cada salida natural de faena Sierra Gorda (Itasca, 2019).....	29
Tabla 4.4. Permeabilidades (K) y espesores estimados de las unidades hidrogeológicas de faena Spence.....	31
Tabla 5.1. Características de los puntos de monitoreo de faena Sierra Gorda y sector Pampa Lina.	42
Tabla 5.2. Características de los puntos de monitoreo instalaciones minera Spence.	44
Tabla 5.3. Características de los puntos de monitoreo asociados al depósito de relaves minera Spence.....	46
Tabla 5.4. Características de los puntos de monitoreo asociados a minera Centinela.	48
Tabla 5.5. Características geológicas de los puntos de monitoreo del sector depósito de relaves	50
Tabla 5.6. Minerales mapeados e interpretados de pozos alrededor del depósito de relaves.....	51
Tabla 6.1. Balance iónico de las muestras de aguas subterráneas descartadas en el distrito minero Sierra Gorda.....	53
Tabla 7.1. Resumen de medidas de pH y concentración de TDS.....	67
Tabla 7.2. Clasificación de aguas salinas. Modificado de Reif y Alhalabi (2015).	67
Tabla 7.3. Resumen de clasificación de las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda.	71
Tabla 7.4. Promedio de parámetros de muestreo de minera Sierra Gorda, Pampa Lina, minera Spence instalaciones y sector de relave y minera Centinela	74
Tabla 8.1. Resumen de variables químicas presentes en los sectores este y oeste del depósito de relaves.....	81
Tabla 9.1. Elementos contenidos en fases minerales mapeadas e interpretadas.	116