

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Planteamiento del problema.....	4
1.3	Hipótesis de trabajo.....	6
1.4	Objetivos.....	6
1.4.1	Objetivo general	6
1.4.2	Objetivos específicos	6
2.	Metodología	7
2.1	Recopilación bibliográfica.....	8
2.2	Selección puntos muestreo	8
2.3	Campaña de muestreo	9
2.3.1	Ubicación y accesos.....	9
2.3.2	Muestreo.....	10
2.4	Caracterización e identificación de procesos hidrogeoquímicos	14
2.5	Caracterización isotópica	15
3.	Antecedentes y consideraciones generales de la zona de estudio	16
3.1	Características principales y operación de Minera Los Pelambres	16
3.2	Marco Geológico	21
3.2.1	Geología Regional	21
3.3	Marco Hidrológico.....	26
3.3.1	Valle del Choapa	26
3.3.2	Cuenca del río Cuncumén.....	27
3.4	Marco Hidrogeológico	29
3.4.1	Unidades Hidrogeológicas.....	29
3.4.2	Geometría del Acuífero	31
3.5	Geomorfología	32
3.6	Clima	33
3.7	Antecedentes de trabajos previos en la zona.....	34
4.	Marco Teórico.....	40
4.1	Caracterización hidrogeoquímica	40

4.1.1	Balance iónico	43
4.1.2	Diagrama Piper	43
4.1.3	Diagrama Stiff	44
4.1.4	Mapas distribución de datos.....	44
4.1.5	Diagramas binarios	45
4.1.6	Diagrama Schoeller-Berkaloff.	45
4.1.7	Razones iónicas	46
4.2	Isótopos estables	47
4.2.1	Composición isotópica de la molécula del agua	48
4.2.2	Composición isotópica de los compuestos de azufre, sulfuros y sulfatos, disueltos.....	50
5.	Resultados y discusiones	54
5.1	Datos campo y comparación con datos laboratorio.....	54
5.2	Caracterización de los relaves mineros.....	60
5.3	Hidroquímica	62
5.3.1	Balance iónico	62
5.3.2	Clasificación de las aguas	62
5.3.3	Diagramas binarios	65
5.3.4	Distribución sulfato disuelto en el agua en la zona de estudio	69
5.3.5	Relaciones iónicas	74
5.4	Isótopos.....	75
5.4.1	Composición isotópica del agua ($^2\text{H}\%$ y $^{18}\text{O}\%$).....	75
5.4.2	Composición isotópica del sulfato disuelto ($^{34}\text{S}\%$ y $^{18}\text{O}\%$). ...	84
6.	Conclusiones	90
7.	Bibliografía	94
ANEXO A:	102
ANEXO B:	106
ANEXO C :	111
ANEXO D:	142

Índice de Figuras

Figura 1: Ubicación zona de estudio; Cuenca río Cuncumén, Comuna de Salamanca, Región de Coquimbo, Chile. Fuente: Modificado a partir de INE (2016), DGA (2017), Gestión Ambiental Consultores(2003).....	5
Figura 2: Esquema metodología empleada para la elaboración del trabajo de memoria.	7
Figura 3: a) Guía para la elaboración de la propuesta de muestreo de la zona de estudio. b) Sectorización zona de estudio y los posibles efectos sobre cada uno de ellos. c) Propuesta de muestreo para la zona de estudio, donde la cantidad de muestras para el análisis isotópico se señalan con asterisco porque dependen de los resultados químicos. Fuente: Elaboración propia.....	9
Figura 4: Ubicación y vías de acceso a la zona de estudio. Fuente: Imagen satelital obtenida de SAS. Planet y modificada a través del uso de herramientas SIG y a partir de MOP (2017), INE (2016), Rulamahue (2015).....	10
Figura 5: Puntos de muestreo campaña noviembre 2016 Cuenca río Cuncumén.	12
Figura 6: Profundidad de los pozos muestreados en orden según la dirección principal de flujo. Fuente: Modificado de AMEC (2014).	13
Figura 7: Ubicación de las instalaciones de Minera Los Pelambres. Fuente: (Minera los Pelambres, 2017).....	17
Figura 8: Esquema de los procesos de MLP. Fuente: Modificado de Gestión Ambiental Consultores (2003).....	18
Figura 9: Mapa sector tranque de relaves con sus componentes y distribución. Fuente: Modificado de SWS (2012)	20
Figura 10: Mapa geológico regional de la zona de estudio escala 1:250.000. Fuente: Modificado de Rivano (1991).....	21
Figura 11: Sectorización valle del Choapa indicando sus respectivas subcuencas. Fuente: Modificado de (DGA, 2007)	26
Figura 12: Recorrido ríos y estero cuenca río Cuncumén. Fuente: Modificado de (AMEC, 2014)	29

Figura 13: Mapa Unidades geomorfológicas de la zona de estudio. Fuente: Modificado de (Rulamahue, 2015).	33
Figura 14: Precipitación mensual estaciones Cuncumén y Chacay periodo 2013-2016. Fuente: (DGA, 2016)	34
Figura 15: Diagrama piper y clasificación de agua según cuadrante. Fuente: (Bragado, 2016)	44
Figura 16: Diagrama Stiff. Fuente: (Ecured, s.f.)	44
Figura 17: Diagrama de Schoeller-Berkaloff. Fuente: (Redhaounia, 2015)	46
Figura 18: Relación isotópica precipitación a nivel mundial y sus procesos asociados. Fuente: (Valenzuela, Ramírez-Hernández, & Palomares, 2013)	49
Figura 19: Variaciones $\delta^{34}\text{S}$ del azufre y los compuestos de azufre en diferentes materiales naturales y compuestos antrópicos. Fuente: (Vitória, Otero, Soler, & Canalias, 2004)	51
Figura 20: Variaciones en la $\delta^{34}\text{S}$ Y $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato disuelto en el mar a lo largo de los tiempos geológicos. Fuente: (Claypool, Holser, Kaplan, Sakai, & Zak, 1980)	52
Figura 21: Variaciones en la $\delta^{34}\text{S}$ y la $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato en diferentes materiales naturales y compuestos antrópicos. Fuente: (Vitória, Otero, Soler, & Canalias, 2004)	53
Figura 22: Distribución del pH medido en terreno en la zona de estudio.	55
Figura 23: Correlación entre datos de pH de terreno y datos de pH de laboratorio.	56
Figura 24: Distribución de la conductividad medida en terreno en la zona de estudio.	57
Figura 25: Correlación entre datos de Conductividad eléctrica medida en terreno y datos de conductividad eléctrica medida en laboratorio.	58
Figura 26: Distribución de la temperatura medida en terreno en la zona de estudio.	59
Figura 27: Correlación datos de alcalinidad medida en laboratorio y datos de alcalinidad medida en terreno.	60

Figura 28: Quantificación semicuantitativa de las fases minerales presentes en la muestra de relave suministrada, cálculos realizados mediante el software PANalytical X'Pert HighScore v.2.0. Fuente: (IAEA, 2016).....	61
Figura 29: Diagrama piper para las muestras de agua de la zona de estudio, donde se incluyen todas las muestras incluso las que fueron eliminadas por balances iónicos deficientes..	63
Figura 30: Distribución espacial de los diagramas de Stiff.	64
Figura 31: Diagramas binarios. a) Diagrama de correlación de sulfatos y cloruro. b) Diagrama de correlación de sodio y cloruro. c) Diagrama de correlación de calcio y cloruro. d) Diagrama de correlación de magnesio y cloruro	67
Figura 32: Gráfico de correlación calcio y sulfato, con recta 1:1.	68
Figura 33: Distribución sulfato disuelto [mg/L] en las muestras de agua a lo largo de la cuenca del río Cuncumén.	70
Figura 34: Distribución razón iónica SO_4/Cl	75
Figura 35: Relación desviación isotópicas ^{18}O y 2H de las muestras.	77
Figura 36: Esquema circulación aguas superficiales, indicando las confluencias de los ríos (A, B y C).....	79
Figura 37: Cálculo de la fracción molar teórica que debiese presentar la muestra 17 a partir de las muestras 15 y 16.	80
Figura 38: Relación desviaciones isotópicas $^{34}S\text{‰}$ y $^{18}O\text{‰}$ muestras de agua y sedimento cuenca Cuncumén. Fuente: Modificado de (Minoru Kusakabe, 1984) y (Vitória, 2004).....	87

Índice de Tablas

Tabla 1: Descripción de los puntos de agua muestreados. Fuente: Modificado de AMEC (2014).	13
Tabla 2: Precisión porcentual (CV%) por analito de cada procedimiento empleado en el análisis de laboratorio. Fuente: (Escudero, 2017)	14
Tabla 3: Patrones utilizados para el análisis de oxígeno 18 y deuterio del agua. Fuente: (IAEA, 2016)	15
Tabla 4: Patrones utilizados para el análisis de oxígeno 18 de la molécula de sulfato. Fuente: (IAEA, 2016)	16
Tabla 5: Patrones utilizados para el análisis de azufre 34 de la molécula de sulfato. Fuente: (IAEA, 2016)	16
Tabla 6: Pozos ubicados en la Cuenca del río Cuncumén propiedad de MLP; PB: pozo de bombeo, PM: pozo de monitoreo. Fuente: (AMEC, 2014)	19
Tabla 7: Demanda agua subterránea según tipo de uso en la cuenca Choapa Alto. Fuente: (DGA, 2007)	27
Tabla 8: Oferta de aguas subterráneas en la cuenca Choapa Alto. Fuente: (DGA, 2007)	27
Tabla 9: Valores de permeabilidad y coeficiente almacenamiento para todas las unidades hidrogeológicas. Fuente: Modificado de (AMEC, 2014; SWS, 2012)	31
Tabla 10: Datos climáticos promedio zona estudio, indicando Precipitación anual (Pp anual) y Temperatura media (Tmedia) para cada tipo de clima. Fuente: (U.Chile, 2017)	34
Tabla 11: Factores o procesos que afectan el quimismo de un agua. Fuente: Modificado de Pulida (2007)	40
Tabla 12: Resultados de la caracterización mineralógica de la muestra de relave suministrada. Fuente: (IAEA, 2016)	61
Tabla 13: Índices de saturación de las muestras de aguas de procesos y aguas subterráneas ubicadas por debajo del muro del tranque. Obtenido a partir de simulaciones realizadas en el software PHREEQC.	69
Tabla 14: Datos de estaciones de aforo en m ³ /s en los meses de noviembre. Fuente: (SGS, 2014)	79
Tabla 15: Valores de ORP medidos en terreno por hidromensores consultora SRK.	88