

## Tabla de contenido

1. Introducción .....	1
2. Antecedentes .....	2
2.1 ¿Qué es un AMD? ¿Cómo se genera?.....	2
2.2 Oxidación de pirita.....	3
2.3 Otros sulfuros relevantes.....	4
2.4 Comportamiento de metales en un AMD.....	4
2.5 Tratamientos de AMD.....	5
2.5.1 Tratamientos activos de AMD .....	5
2.5.2 Tratamientos pasivos de AMD.....	7
2.6 Problemáticas actuales .....	10
2.7 Método DAS .....	11
2.6.1 Columnas de Laboratorio para el método DAS .....	12
2.8 Diferencias con la realidad chilena .....	15
3. Hipótesis de trabajo.....	17
4. Objetivos .....	18
4.1 Objetivo general .....	18
4.2 Objetivos específicos.....	18
5. Metodología .....	19
5.1 Experimentos preliminares de neutralización .....	19
5.2 Experimentos ABA .....	20
5.3 Granulometría .....	21
5.4 Difracción de rayos X .....	21
5.5 Diseño de muestreo y toma de datos.....	21
5.5.1 Parámetros fisicoquímicos .....	22
5.5.2 Espectrofotometría .....	22
5.5.3 Muestras ICP-MS .....	25
5.5.4 Conductividad hidráulica .....	25
6. Resultados y discusiones.....	27
6.1 Selección de posibles materiales a utilizar .....	27
6.1.1 Calcita .....	27
6.1.2 Cal .....	27

6.1.3 Escoria.....	28
6.1.4 Cáscara de huevo.....	28
6.1.5 Huesos de pollo.....	29
6.1.6 Cáscara de arroz.....	29
6.1.7 Conchillas marinas.....	29
6.1.8 Residuos de papeleras.....	30
6.1.9 Oxido de magnesio (periclasa).....	30
6.1.10 Material Inerte.....	30
6.1.11 Otros materiales reactivos considerados.....	31
6.1.12 Distribución y disponibilidad de materiales.....	31
6.2 Fases previas de laboratorio.....	32
6.2.1 Experimentos preliminares de neutralización.....	32
6.2.2 Experimentos ABA.....	39
6.2.3 Difracción de rayos X a materiales reactivos.....	39
6.3 Preparación columnas de laboratorio.....	40
6.3.1 Granulometría.....	40
6.3.2 Diseño y construcción de columnas de laboratorio.....	42
6.3.3 Porosidad inicial.....	45
6.4 Generación de AMD sintético.....	46
6.4.1 Uso de Phreeqc para modelar la formación de precipitados en AMD inicial.....	46
6.5 Monitoreo de columnas de laboratorio.....	48
6.5.1 Calendario de actividades semanal.....	48
6.5.2 Conductividad hidráulica.....	49
6.5.3 Espectrofotometría.....	50
6.5.4 Funcionamiento general de columnas de laboratorio.....	52
6.5.5 Funcionamiento interno de las columnas.....	60
6.5.6 Balance de masas y estimaciones de comportamiento futuro.....	73
7. Conclusiones.....	76
8. Bibliografía.....	78
Anexo A: AMD sintético.....	81
Anexo B: Datos de fisicoquímica.....	83
Anexo C: Espectrofotometría.....	103
Anexo D: Muestras de agua.....	104
Anexo E: Difracción de rayos X.....	120

## Índice de Figuras

Figura 1: Solubilidad de hidróxidos de metales pesados en función del pH. Fuente: Taylor et al (2005).....	5
Figura 2: Planta HDS, utilizando maquinaria y un input de energía importante Fuente: Taylor et al, 2005. 7	
Figura 3: Humedal aeróbico. Fuente: Taylor et al, 2005.....	9
Figura 4: Esquema del método PRB interceptando y tratando aguas subterráneas in-situ. Fuente: Taylor et al (2005) .....	10
Figura 5: Comparación de acidez neta (percentiles 25%, 75% y promedio) de aguas tratadas con métodos pasivos convencionales (80 muestras) y la acidez de la cuenca Odiel (ubicada en la península ibérica, 245 muestras). AnW anaerobic wetlands, VFW vertical flow wetlands (RAPS), ALD Anoxic limestone drains, OLC oxic limestone channels, LSB limestone leach beds. Fuente: Ayora et al (2013).....	11
Figura 6: Ejemplo de columna de laboratorio para DAS de caliza. En 1 se tiene el sustrato, en 2 el frente de precipitación de hidrobasauminita, en 3 la precipitación de schwertmannita y en 4 se muestra el input de AMD. Fuente: Ayora et al (2013) .....	13
Figura 7: a) Evolución del pH en función de la distancia en la columna. b) Concentración de metales en solución. c) Precipitación de minerales. d) Porosidad. Las líneas punteadas indican otro experimento en el cual la razón de flujo/disolución era 10 veces mayor. Fuente: Ayora et al (2013) .....	14
Figura 8: Columna DAS de óxido de magnesio. En 1 se ve el sustrato y en 2 los precipitados de Zn (blanco) y de Mn (negro). Fuente: Ayora et al (2013) .....	15
Figura 9: Patrones a utilizar en el método de la fenantrolina para medir concentraciones de hierro.....	23
Figura 10: Espectrofotómetro midiendo el punto cero, con el método Aluminon 8012. ....	24
Figura 11: Medidor de conductividad hidráulica. ....	26
Figura 12: Mapa geográfico de parte de Chile, en la cual se muestran la ubicación de los materiales de interés. ....	31
Figura 13: Gráfico de resultados de experimento preliminar de neutralización con calcita. ....	33
Figura 14: Gráfico de resultados de experimento preliminar de neutralización con escoria.....	34
Figura 15: Gráfico de resultados experimento preliminar de neutralización con cáscara de huevo. ....	35
Figura 16: Gráfico de resultados experimento preliminar de neutralización con conchillas de choritos.....	36
Figura 17: Gráfico de resultados experimento preliminar conchillas de almejas.....	37
Figura 18: Gráfico de resultados experimento preliminar de neutralización con cáscara de arroz.....	38
Figura 19: Granulometría de materiales reactivos. ....	39
Figura 20: Esquema básico del experimento.....	43
Figura 21: Imagen de las columnas en el laboratorio. Flechas rojas indican la dirección del flujo de agua. ....	44
Figura 22: Números de los puertos para las columnas. ....	44
Figura 23: Medición de permeabilidad para columna de calcita.....	49
Figura 24: Evolución temporal del pH en distintas etapas del experimento 1, junto con los cambios en concentraciones de hierro y aluminio obtenidos de las muestras de agua según la metodología del apartado 5.5.3.....	52
Figura 25: Evolución temporal del pH en distintas etapas del experimento 2, junto con los cambios en concentraciones de hierro y aluminio obtenidos de las muestras de agua según la metodología del apartado 5.5.3.....	54
Figura 26: Evolución temporal del pH en distintas etapas del experimento 3, junto con los cambios en concentraciones de hierro y aluminio obtenidos de las muestras de agua según la metodología del apartado 5.5.3.....	56

Figura 27: Evolución temporal del pH en distintas etapas del experimento 4, junto con los cambios en concentraciones de hierro y aluminio obtenidos de las muestras de agua según la metodología del apartado 5.5.3.....	58
Figura 28: Precipitados en columna carbonatada. Según las referencias, el precipitado naranja sería schwertmannita y el precipitado blanco sería hidrobasaluminita.....	60
Figura 29: Evolución del pH y pE, junto con concentraciones de Al, Fe y Cu, en columna de calcita. ....	61
Figura 30: Evolución del pH, pE y conductividad, junto con concentraciones de Ca, S y Mn, en columna de MgO del experimento 1.....	41
Figura 31: Evolución del pH y pE, junto con concentraciones de Al, Fe y Cu en columna de conchillas de almejas.....	64
Figura 32: Evolución del pH, pE y conductividad, junto con concentraciones de Mn, Ca y S, en columna de MgO.....	62
Figura 33: Evolución del pH y pE, junto con concentraciones de Al, Fe y Cu, en columna de cáscara de huevo. ....	67
Figura 34: Evolución del pH, pE y conductividad, junto con concentraciones de Mn, Ca y S, en columna de MgO.....	65
Figura 35: Evolución del pH y pE, junto con concentraciones de Al, Fe y Cu, en columna de conchillas de choritos.....	70
Figura 36: Evolución del pH, pE y conductividad, junto con concentraciones de Mn, Ca y S, en columna de MgO.....	69

## Índice de Tablas

Tabla 1: Rangos aproximados que son capaces de tratar los métodos activos y pasivos. Modificado de Taylor et al. (2005).....	6
Tabla 2: Tabla resumen de diferentes métodos de tratamiento pasivo y los AMD que son capaces de tratar. Fuente: Modificado de Taylor et al (2005). .....	8
Tabla 3: Tabla de HCl a agregar al experimento, en base a su grado de efervescencia. Modificada de Usher et al, 2003. ....	20
Tabla 4: Condiciones y resultados de experimento preliminar de neutralización con calcita.....	32
Tabla 5: Condiciones y resultados de experimento preliminar de neutralización con escoria.....	33
Tabla 6: Condiciones y resultados experimento preliminar de neutralización con cáscara de huevo.....	35
Tabla 7: Condiciones y resultados de experimento preliminar de neutralización con conchillas de choritos. ....	36
Tabla 8: Condiciones y resultados experimento preliminar de neutralización con conchillas de almejas...37	
Tabla 9: Condiciones y resultados experimento preliminar de neutralización con cáscara de arroz. ....	38
Tabla 10: Resultados experimento ABA.....	39
Tabla 11: Cantidad de agua aceptada y porosidad inicial de columnas carbonatadas. ....	45
Tabla 12: Concentraciones promedio de metales en AMD chilenos y reactivos utilizados para generar el AMD sintético. Datos obtenidos de alumno memorista J.C. Dreyfus 2017, Universidad de Chile.....	46
Tabla 13: Minerales que teóricamente precipitan en AMD inicial. Índices de saturación calculados con software “Phreeqc”.....	47
Tabla 14: Calendario de actividades. ....	48
Tabla 15: Resultados de absorbancia y concentración de hierro en columnas carbonatadas y AMD sintético. ....	50
Tabla 16: Resultados de concentración de aluminio en columnas carbonatadas y AMD sintético. ....	51
Tabla 17: Cantidad de material reactivo por columna, potencial de neutralización y cantidad efectiva de carbonato de calcio.....	73
Tabla 18: Datos y estimaciones utilizando el método de iones disueltos de calcio. Más información respecto a los iones disueltos en Anexo D. ....	74
Tabla 19: Datos y estimaciones utilizando “Phreeqc”. ....	74