

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes y motivación.....	1
1.2. Descripción del problema.....	2
1.3. Solución propuesta.....	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo General.....	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
1.5. Alcances.....	5
1.6. Metodologías y herramientas utilizadas.....	6
1.7. Resultados esperados.....	6
1.8. Organización del documento.....	7
CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1. Agua en la minería del cobre en Chile.....	8
2.2. Hidrometalurgia.....	9
2.2.1. Lixiviación de minerales oxidados de cobre.....	10
2.2.1.1. Aglomeración.....	11
2.2.1.2. Lixiviación.....	12
2.2.1.3. Extracción por solventes (SX).....	13
2.2.1.4. Electro-obtención.....	13
2.2.2. Efecto del agua de mar en óxidos de cobre.....	14
2.3. Lixiviación de minerales sulfurados de cobre.....	16
2.3.1. Calcopirita.....	17
2.3.1.1. Cinética de disolución lenta.....	17
2.3.1.2. Efecto del potencial de solución.....	18
2.3.1.3. Efecto del tamaño de partícula.....	19
2.3.1.4. Efecto de la concentración de cloruro.....	19
2.3.1.5. Efecto del uso de iones cúpricos en la lixiviación de calcopirita desde concentrados.....	20

2.3.1.6. Efecto del pH.....	21
2.3.1.7. Efecto de la temperatura.....	21
2.3.1.8. Efecto del agua de mar	22
2.3.1.9. Importancia del tiempo de curado de sulfuros en lixiviación por columnas.	23
2.3.1.10. Importancia del ion cloruro en la aglomeración de mineral sulfurado	24
2.3.2. Formación de capa pasivante en la superficie del mineral.....	24
2.4. Efecto de la mineralogía del mineral en el desempeño de la lixiviación.....	25
2.4.1. Efecto de la ganga reactiva.....	26
2.4.1.1. Presencia de minerales que contienen hierro	26
2.4.1.2. Presencia de minerales de arcilla	27
2.4.2. Parámetros afectados por la presencia de arcillas y gangas reactivas.....	28
2.4.2.1. Tasa de disolución.....	28
2.4.2.2. Tamaño de partícula.....	29
2.5. Procesos hidrometalúrgicos patentados para calcopirita y otros sulfuros	29
2.5.1. Clear Process	29
2.5.2. CuproChlor Process.....	31
2.5.3. Patente BHP Billiton 2006 – 2027: Chloride Heap Leaching.....	32
2.5.4. Patente Antofagasta Minerals, Michilla 2004: Non – biochemical method to heap leach copper concentrates	33
2.6. Comparación entre un proceso hidrometalúrgico v/s un proceso de concentración – fundición	35
2.6.1. Procesamiento de minerales sulfurados de cobre.....	35
2.6.2. Caracterización de costos según tipo de procesamiento	36
2.6.3. Consumo de agua por proceso minero	38
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	40
3.1. Reactivos químicos, equipos y materiales	40
3.1.1. Reactivos	40
3.1.2. Equipos.....	41
3.1.3. Materiales	45
3.2. Procedimiento experimental	49
3.2.1. Clasificación de tamaño del mineral	49

3.2.1.1. Mineral de sulfuros	49
3.2.1.2. Mineral de óxidos.....	51
3.2.2. Preparación de solución lixivante	53
3.2.3. Aglomeración y curado	55
3.2.4. Lixiviación en columnas	56
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
4.1. Agua convencional v/s agua de mar con 45 días de lixiviación en sulfuros y 7 días de lixiviación en óxidos	60
4.2. Variación de concentración de cloruro a 0,2 M de H ₂ SO ₄ y 0,5 [g/L] de Cu ⁺² empleando agua de mar	62
4.2.1. Análisis de pruebas de lixiviación duplicadas con 20 [g/L] de cloruro	65
4.3. Efecto del potencial de la solución en la extracción de cobre en pruebas de lixiviación a diferentes concentraciones de Cl ⁻	68
4.4. Efecto del pH en la extracción de cobre en pruebas de lixiviación a diferentes concentraciones de Cl ⁻	73
4.5. Discusión sobre la lixiviación clorurada para sulfuros y óxidos	78
4.6. Discusión sobre la Hidrometalurgia como alternativa al proceso de concentración	79
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	80
5.1. Recomendaciones	83
CAPÍTULO 6: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
CAPÍTULO 7: APÉNDICES	89
7.1. Apéndice A: Recuperación de Cu mediante técnica de espectrofotometría en mineral de sulfuros.....	89
7.2. Apéndice B: Recuperación de Cu mediante técnica de espectrofotometría en mineral de óxidos	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama de la concentración de minerales sulfurados de cobre.	3
Figura 1.2. Diagrama de la Hidrometalurgia de minerales oxidados de cobre.	3
Figura 2.1. Diagrama general de procesos de la minería de sulfuros de cobre.	9
Figura 2.2. Esquema de planta de procesos hidrometalúrgicos para el cobre.	10
Figura 2.3. Diferencia entre la percolabilidad de un material no aglomerado y aglomerado.	11
Figura 2.4. Procesos unitarios asociados a los principales métodos de lixiviación.....	12
Figura 2.5. Etapas en el proceso hidrometalúrgico.	14
Figura 2.6. Efecto de la fuente de cloruro añadida en el refinado sobre la velocidad de la columna de lixiviación del mineral de óxido a temperatura ambiente.	15
Figura 2.7. Variación de potencial en la solución de lixiviación del mineral de óxido a temperatura ambiente en diferentes soluciones de lixiviación.	15
Figura 2.8. Tratamiento de lixiviación de sulfuros y tipo de producción final para el azufre contenido.	16
Figura 2.9. Mineral rico en calcopirita de la mina de cobre Khetri, India.	17
Figura 2.10. Diagrama de Pourbaix para el sistema $\text{CuFeS}_2\text{-H}_2\text{O}$ a 25 °C.....	19
Figura 2.11. Efecto de la temperatura (■) 25 °C, (◆) 35 °C, (▲) 50 °C, (×) 65 °C y (●) 75 °C sobre la disolución de cobre en concentrados de calcopirita aplicados en lixiviación.....	21
Figura 2.12. Efectos de la temperatura en la extracción de Cu a partir de lixiviación de calcopirita.	22
Figura 2.13. Disolución de cobre a partir de concentrado de calcopirita a 50 °C. (A) agua destilada con Cl^- de sal de descarte; (B) Agua de mar; (C) Desecho de salmuera; (D) Agua de la llave; (E) Agua destilada.....	23
Figura 2.14. Esquema de lixiviación de CuFeS_2 en ausencia y presencia de NaCl.	25
Figura 2.15. Retención de cobre (% en peso) en gangas de las series malaquita, atacamita y crisocola.....	28
Figura 2.16. Flowsheet para CLEAR process.	30
Figura 2.17. Recuperación de CuT y tiempo de riego en el proceso CuproChlor a partir de la ley inicial de cobre.....	32

Figura 2.18. El efecto del oxígeno disuelto en la velocidad de disolución de la calcopirita en condiciones de potencial óptimas controladas.	33
Figura 2.19. Curva de recuperación final para un concentrado aglomerado mediante Non-biochemical method to heap leach.....	34
Figura 2.20. Evolución de los costos promedios según tipo de procesamiento de mineral en Chile para el período 2005-2014.	36
Figura 2.21. Participación por elemento de gasto en el costo operacional de las operaciones de procesamiento de óxidos (izquierda), sulfuros (derecha) y mixtas (inferior) en el período 2005 - 2014.....	37
Figura 2.22. Distribución porcentual de las aguas según proceso minero 2019.	39
Figura 3.1. Balanza analítica.	41
Figura 3.2. Balanza electrónica.	42
Figura 3.3. Báscula electrónica Jadever.	42
Figura 3.4. Serie de Tamices.	43
Figura 3.5. Bomba de vacío de membrana (filtración de partículas).	43
Figura 3.6. Bomba de dosificación magnética.	44
Figura 3.7. pH-metro y medidor de potencial óxido – reducción (ORP).....	44
Figura 3.8. Granulometría inicial del mineral de óxidos.....	45
Figura 3.9. Distribución de minerales en muestra de sulfuros a partir de análisis DRX.....	47
Figura 3.10. Distribución de minerales en muestra de óxidos a partir de análisis DRX.....	48
Figura 3.11. Disposición de columnas de lixiviación.....	48
Figura 3.12. Mineral de sulfuro de cobre con granulometría de ¾".....	49
Figura 3.13. Clasificación del mineral sulfurado en la serie de tamices.	49
Figura 3.14. Muestra representativa mediante la técnica de roleo y cuarteo.....	50
Figura 3.15. Curva de distribución granulométrica del mineral sulfurado.....	51
Figura 3.16. Tamaño inicial del mineral oxidado.....	51
Figura 3.17. Mineral de óxidos de cobre con granulometría de ¾" e inferior.....	52
Figura 3.18. Clasificación del mineral oxidado en la serie de tamices.	52
Figura 3.19. Curva de distribución granulométrica del mineral oxidado.	53
Figura 3.20. Preparación de soluciones lixiviantes, clasificándose en: (A) Solución base, (b) Solución con 20 [g/l] de Cl ⁻ , (c) Solución con 30 [g/l] de Cl ⁻	54

Figura 3.21. Disposición de soluciones lixiviantes en tambores.....	54
Figura 3.22. Mineral aglomerado de sulfuros que será dispuesto posteriormente en las columnas de lixiviación.....	55
Figura 3.23. Columnas de lixiviación con solución de refinó en (a) sulfuros y (b) óxidos..	57
Figura 3.24. Solución de PLS recolectada para (a) sulfuros y (b) óxidos.....	58
Figura 4.1. Recuperación de Cu en mineral de sulfuros variando el tipo de agua utilizada en columnas de lixiviación por 1080 horas y usando 0,2 M de H ₂ SO ₄ y 0,5 [g/L] de Cu ⁺²	61
Figura 4.2. Recuperación de Cu en mineral de óxidos variando el tipo de agua utilizada en columnas de lixiviación por 168 horas y usando 0,2 M de H ₂ SO ₄ y 0,5 [g/L] de Cu ⁺²	62
Figura 4.3. Recuperación de Cu en mineral de sulfuros variando la concentración de cloruro en 20 [g/L] y 30 [g/L] empleando columnas de lixiviación por 1080 horas y usando 0,2 M de H ₂ SO ₄ y 0,5 g/L de Cu ⁺²	63
Figura 4.4. Recuperación de Cu en mineral de óxidos variando la concentración de cloruro en 20 [g/L] y 30 [g/L] empleando columnas de lixiviación por 168 horas y usando 0,2 M de H ₂ SO ₄ y 0,5 g/L de Cu ⁺²	65
Figura 4.5. Recuperación de Cu en mineral de sulfuros duplicando la prueba experimental con 20 [g/L] de cloruro con agua de mar por 1080 horas y usando 0,2 M de H ₂ SO ₄ y 0,5 [g/L] de Cu ⁺²	66
Figura 4.6. Recuperación de Cu en mineral de óxidos duplicando la prueba experimental con 20 [g/L] de cloruro con agua de mar por 168 horas y usando 0,2 M de H ₂ SO ₄ y 0,5 [g/L] de Cu ⁺²	67
Figura 4.7. Efecto del potencial sobre la disolución de Cu en mineral de sulfuros en columnas de lixiviación por 1080 horas y usando 0,2 M de H ₂ SO ₄ y 0,5 [g/L] de Cu ⁺² , variando la concentración de cloruro y el tipo de agua utilizada.	69
Figura 4.8. Efecto del potencial sobre la disolución de Cu en mineral de sulfuros duplicando la prueba experimental con 20 [g/L] de cloruro con agua de mar por 1080 horas y usando 0,2 M de H ₂ SO ₄ y 0,5 [g/L] de Cu ⁺²	70
Figura 4.9. Efecto del potencial sobre la disolución de Cu en mineral de óxidos en columnas de lixiviación por 168 horas y usando 0,2 M de H ₂ SO ₄ y 0,5 [g/L] de Cu ⁺² , variando la concentración de cloruro y el tipo de agua utilizada.	71

Figura 4.10. Efecto del potencial sobre la disolución de Cu en mineral de óxidos duplicando la prueba experimental con 20 [g/L] de cloruro con agua de mar por 168 horas y usando 0,2 M de H ₂ SO ₄ y 0,5 [g/L] de Cu ⁺²	72
Figura 4.11. Efecto del pH sobre la disolución de Cu en mineral de sulfuros en columnas de lixiviación por 1080 horas y usando 0,2 M de H ₂ SO ₄ y 0,5 [g/L] de Cu ⁺² , variando la concentración de cloruro y el tipo de agua utilizada.	74
Figura 4.12. Efecto del pH sobre la disolución de Cu en mineral de sulfuros duplicando la prueba experimental con 20 [g/L] de cloruro con agua de mar por 1080 horas y usando 0,2 M de H ₂ SO ₄ y 0,5 [g/L] de Cu ⁺²	75
Figura 4.13. Efecto del pH sobre la disolución de Cu en mineral de óxidos en columnas de lixiviación por 168 horas y usando 0,2 M de H ₂ SO ₄ y 0,5 [g/L] de Cu ⁺² , variando la concentración de cloruro y el tipo de agua utilizada.	76
Figura 4.14. Efecto del pH sobre la disolución de Cu en mineral de óxidos duplicando la prueba experimental con 20 [g/L] de cloruro con agua de mar por 168 horas y usando 0,2 M de H ₂ SO ₄ y 0,5 [g/L] de Cu ⁺²	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Consumo de agua continental en la minería del cobre por proceso.	38
Tabla 2.2. Distribución porcentual del consumo de agua fresca en la minería del cobre. ...	38
Tabla 3.1. Iones presentes en el agua de mar.	40
Tabla 3.2. Composición química del material de sulfuros de cobre.....	46
Tabla 3.3. Composición química del material de óxidos de cobre.....	46
Tabla 3.4. Composición mineralógica del material de sulfuros de cobre.....	47
Tabla 3.5. Composición mineralógica del material de óxidos de cobre.....	47
Tabla 3.6. Matriz experimental de pruebas de lixiviación en columnas.	56
Tabla 7.1. Recuperación de Cu en COLUMNA 1 de mineral de sulfuros empleando agua convencional y sin presencia de cloruro.....	89
Tabla 7.2. Recuperación de Cu en COLUMNA 2 de mineral de sulfuros empleando agua de mar y 20 [g/L] de cloruro.	89
Tabla 7.3. Recuperación de Cu en COLUMNA 3 de mineral de sulfuros empleando agua de mar y 30 [g/L] de cloruro.	90
Tabla 7.4. Recuperación de Cu en COLUMNA 4 de mineral de sulfuros empleando agua de mar y 20 [g/L] de cloruro (Prueba de lixiviación realizada como duplicado de COLUMNA 2).....	90
Tabla 7.5. Recuperación de Cu en COLUMNA 1 de mineral de óxidos empleando agua convencional y sin presencia de cloruro.....	91
Tabla 7.6. Recuperación de Cu en COLUMNA 2 de mineral de óxidos empleando agua de mar y 20 [g/L] de cloruro.	91
Tabla 7.7. Recuperación de Cu en COLUMNA 3 de mineral de óxidos empleando agua de mar y 30 [g/L] de cloruro.	91
Tabla 7.8. Recuperación de Cu en COLUMNA 4 de mineral de óxidos empleando agua de mar y 20 [g/L] de cloruro (Prueba de lixiviación realizada como duplicado de COLUMNA 2).....	92