

TABLA DE CONTENIDO

1	<i>Introducción y objetivos</i>	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivo General	2
1.3	Objetivos Específicos	2
2	<i>Estudio de la huella hídrica como indicador de sustentabilidad y revisión de antecedentes</i>	3
2.1	Preámbulo acerca de las iniciativas de sustentabilidad hídrica	3
2.2	Sobre la Huella Hídrica	4
2.3	Definición y componentes de la Huella Hídrica	4
2.3.1	Agua real y virtual, consumos directos e indirectos	5
2.3.2	Unidades de la Huella Hídrica	5
2.3.3	Consideraciones espaciales y temporales	6
2.3.4	Huella Hídrica Azul (HHA)	6
2.3.5	Huella Hídrica Verde (HHV)	7
2.3.6	Huella Hídrica Gris (HHG)	7
2.3.7	Normativas de descarga a cuerpos de agua en Chile	8
2.4	Comparación de iniciativas de sustentabilidad hídrica	8
2.4.1	CDP Water	8
2.4.2	Water Accounting Framework (WAF)	9
2.4.3	ISO Water Footprint Standard (14046)	9
2.4.4	WBCSD Global Water Tool	9
2.4.5	CEO Water Mandate	10
2.4.6	Alliance for Water Stewardship	10
2.5	Minería Chilena y la problemática del agua	10
2.6	Huella Hídrica en minería	13
2.7	Huella Hídrica de la minería del cobre en Chile	15
2.8	Water recovery model	16
2.9	Goldsim	18
3	<i>Conceptualización de la Huella Hídrica en la minería de cobre Chilena</i>	21
3.1	Definición del producto a estudiar	21
3.2	Límite temporal	22
3.3	Límite Espacial y Definición de la faena minera tipo	22
3.4	Conceptualización del plan minero tipo	23
3.5	Descripción de consumos de agua a considerar	23
3.5.1	Mina y Chancado/Molienda	23
3.5.1.1	Consumos Directos	24
3.5.1.2	Consumos Indirectos	24
3.5.2	Concentración	25
3.5.2.1	Consumos Directos	25
3.5.2.2	Adaptación y Parámetros Water Recovery Model (WRM)	28
3.5.2.3	Consumos Indirectos	30
3.6	Estructuración del modelo	31

3.7	Fuentes de incertidumbre/Dispersión y generación de variables estocásticas	33
3.7.1	Variabilidad Consumos Directos mina/chancado	33
3.7.2	Variabilidad Consumos Indirectos mina/chancado	33
3.7.3	Variabilidad Consumos Directos concentración	33
3.7.4	Variabilidad Consumos Indirectos concentración	34
4	Metodología Análisis Riesgo Huella Hídrica	36
4.1	Análisis Sensibilidad Modelo Huella Hídrica	36
4.2	Evaluación de Impacto de Variables Sensibles	37
4.2.1	Dominancia estocástica de primer orden (DEP)	38
4.2.2	Dominancia estocástica de segundo orden (DES)	39
4.3	Escenarios y Esquemas de Operación	40
4.3.1	Esquema de operación base	40
4.3.2	Esquema de operación 1: Relave en pasta	41
4.3.3	Esquema de operación 2: Incorporación de agua salada-desalinizada	42
4.3.4	Esquema de operación 3: Reserva (stockpile) de mineral	43
4.3.5	Escenario 1: Aumento evaporación y disminución de la precipitación	44
4.3.6	Escenario conjunto: Nueva fuente de agua salada en respuesta a un aumento de evaporación y disminución de la precipitación	44
5	Resultados y Análisis	46
5.1	Análisis de sensibilidad	46
5.2	Evaluación de Impacto de Variables Sensibles	50
5.3	Escenarios y Esquemas de Operación	53
5.3.1	Esquema de operación base	54
5.3.2	Esquema de operación 1: Relave en pasta	56
5.3.3	Esquema de operación 2: Incorporación de agua salada-desalinizada	59
5.3.4	Esquema de operación 3: Reserva (stockpile) de mineral	61
5.3.5	Escenario 1: Aumento evaporación y disminución de la precipitación	63
5.3.6	Escenario conjunto: Nueva fuente de agua salada en respuesta a un aumento de evaporación y disminución de la precipitación	65
5.4	Comparación de resultados de escenarios/esquemas de operación y análisis crítico	68
6	Conclusiones	73
7	Bibliografía	76
Anexo A: Datos Climáticos		79
Anexo B: Procesamiento de datos de evaporación		80
Anexo C: Gráficos análisis de sensibilidad para 8 variables/parámetros más sensibles		81

Índice de Figuras

Figura 1: Procesamiento de Minerales Sulfurados por Flotación (Cochilco, 2010)	11
Figura 2: Procesamiento Hidrometalúrgico de producción de cobre (Cochilco, 2010)	12
Figura 3: Conceptualización espacial de Huella Hídrica en una faena minera (Younger, 2006).	13
Figura 4: Modelo conceptual pérdidas water recovery model (Wels & Robertson, 2003).	17
Figura 5: Esquema de simulación de Monte Carlo	19
Figura 6: Esquema de procesos que generan Huella Hídrica	22
Figura 7: Limite espacial para el cálculo de la Huella Hídrica	25
Figura 8: Esquema de pérdidas proceso concentración.	26
Figura 9: Proceso de formación de una playa activa (gris) (Cifuentes & Pinto, 2014)	30
Figura 10: Esquema para la metodología del análisis de riesgo	36
Figura 11: Clasificación relaves según contenido de sólidos (Cacciuttolo, et al., 2015)	41

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Ejemplo dominancia estocástica de primer orden donde "j" domina a "i" en el sentido de DEP para una disminución de la HHA.	39
Gráfico 2: Ejemplo dominancia estocástica de segundo orden donde "j" domina a "i" en el sentido de DES para una disminución de la HHA.	40
Gráfico 3: Evolución Cp relave en Escenario Operación 1 previo al muestreo	41
Gráfico 4: Implementación de fuentes de agua alternativas para esquema de operación 2 previo al muestreo.	42
Gráfico 5: Valores de producción en esquema de operación 3 previo al muestreo.	43
Gráfico 6: Parámetros climáticos en escenario 1 previo al muestreo.	44
Gráfico 7: Fuentes de agua en escenario conjunto previo al muestreo	45
Gráfico 8: Parámetros climáticos en escenario conjunto previo al muestreo.	45
Gráfico 9: Resultados análisis de sensibilidad HHA concentrado de cobre (20 mayores)	46
Gráfico 10: Resultado análisis sensibilidad HHA concentrado de cobre (10 inferiores)	47
Gráfico 11: Valores normalizados de los 8 parámetros más sensibles de la HHA del concentrado de cobre.	48
Gráfico 12: Distribución probabilidad precipitación media anual truncada en 0 para valores negativos	50
Gráfico 13: Densidad probabilidad HHA 8 parámetros/variables sensibles + caso base	51
Gráfico 14: Distribución de probabilidad acumulada HHA 8 parámetros/variables sensibles + caso base	51
Gráfico 15: Plan minero tipo muestreado con 10000 realizaciones	53
Gráfico 16: Huella Hídrica total caso base	54
Gráfico 17: Huella Hídrica directa caso base	55
Gráfico 18: Huella Hídrica indirecta caso base	55
Gráfico 19: Comparación media HHA por proceso caso base	55
Gráfico 20: Pérdidas WRM caso base	56
Gráfico 21: Huella Hídrica total esquema de operación relave en pasta	57
Gráfico 22: Huella Hídrica directa esquema de operación relave en pasta	57
Gráfico 23: Huella Hídrica indirecta esquema de operación relave en pasta	57
Gráfico 24: Comparación media HHA por proceso relave en pasta	58
Gráfico 25: Pérdidas WRM relave en pasta	58
Gráfico 26: Huella Hídrica total esquema de operación con nuevas fuentes de agua	59
Gráfico 27: Huella Hídrica directa esquema de operación con nuevas fuentes de agua	59
Gráfico 28: Huella Hídrica indirecta esquema de operación con nuevas fuentes de agua	60
Gráfico 29: Comparación media HHA por proceso con nuevas fuentes de agua	60
Gráfico 30: Pérdidas WRM con nuevas fuentes de agua	61
Gráfico 31: Huella Hídrica total esquema de operación con reserva mineral	61
Gráfico 32: Huella Hídrica directa esquema de operación con reserva mineral	62
Gráfico 33: Huella Hídrica indirecta esquema de operación con reserva mineral	62
Gráfico 34: Comparación media HHA por proceso con reserva mineral	62

Gráfico 35: <i>Perdidas WRM con reserva mineral</i>	63
Gráfico 36: <i>Huella Hídrica total escenario clima desfavorable</i>	64
Gráfico 37: <i>Huella Hídrica directa escenario clima desfavorable</i>	64
Gráfico 38: <i>Huella Hídrica indirecta escenario clima desfavorable</i>	64
Gráfico 39: <i>Comparación media HHA por proceso con clima desfavorable</i>	65
Gráfico 40: <i>Consumos WRM con clima desfavorable</i>	65
Gráfico 41: <i>Huella Hídrica total escenario conjunto</i>	66
Gráfico 42: <i>Huella Hídrica directa escenario conjunto</i>	66
Gráfico 43: <i>Huella Hídrica indirecta escenario conjunto</i>	67
Gráfico 44: <i>Comparación media HHA por proceso en escenario conjunto</i>	67
Gráfico 45: <i>Perdidas WRM en escenario conjunto</i>	67
Gráfico 46: <i>Comparación media HHA total para los escenarios/esquemas de operación</i>	68
Gráfico 47: <i>Comparación media HHA directa para los escenarios/esquemas de operación</i>	69
Gráfico 48: <i>Comparación media HHA indirecta para los escenarios/esquemas de operación</i>	69
Gráfico 49: <i>Comparación percentil 15% HHA total para los escenarios/esquemas de operación</i>	70
Gráfico 50: <i>Comparación percentil 85% HHA total para los escenarios/esquemas de operación</i>	70

Índice de Tablas

Tabla 1: <i>Parámetros tranque Talabre para utilización del WRM</i>	28
Tabla 2: <i>Parámetros WRM referentes a dimensiones del tranque</i>	29
Tabla 3: <i>Parámetros climáticos WRM referentes a ubicación del tranque</i>	30
Tabla 4: <i>Ubicación geográfica estaciones meteorológicas utilizadas (WGS 84)</i>	30
Tabla 5: <i>Dispersiones parámetros del relave WRM</i>	34
Tabla 6: <i>Dispersión parámetros de área para tranque en WRM</i>	34
Tabla 7: <i>Dispersión parámetros climáticos WRM</i>	34
Tabla 8: <i>Tasas de variación de la HHA con respecto a un aumento de la variable/parámetro (signo negativo indica disminución).</i>	49
Tabla 9: <i>Tasas de variación de la HHA con respecto a una disminución de la variable/parámetro (signo negativo indica aumento).</i>	49
Tabla 10: <i>Resumen dominancia estocástica (estrictamente analítico) donde "PO" indica dominancia de primer orden y "SO" indica dominancia de segundo orden.</i>	52
Tabla 11: <i>Variaciones HHA total, directa e indirecta en los distintos percentiles c/r a la media</i>	54
Tabla 12: <i>Contribución por proceso a la HHA total con reserva mineral</i>	63

Índice de Ecuaciones

(1)	7
(2)	16
(3)	16
(4)	17
(5)	17
(6)	17
(7)	17
(8)	17
(9)	28
(10)	28
(11)	28
(12)	37
(13)	37