

# TABLA DE CONTENIDO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b><i>Introducción y objetivos</i></b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivación  | 1         |
| 1.2      | Objetivo General  | 2         |
| 1.3      | Objetivos Específicos   | 2         |
| <b>2</b> | <b><i>Estudio de la huella hídrica como indicador de sustentabilidad y revisión de antecedentes</i></b> | <b>3</b>  |
| 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        |
| <b>3</b> | <b><i>Conceptualización de la Huella Hídrica en la minería de cobre Chilena</i></b>                     | <b>21</b> |
| 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        |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| <b>3.7</b>  | <b>Fuentes de incertidumbre/Dispersión y generación de variables estocásticas</b>  | <b>33</b> |
| 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        |
| <b>4</b>  | <b>Metodología Análisis Riesgo Huella Hídrica</b>  | <b>36</b> |
| <b>4.1</b>  | <b>Análisis Sensibilidad Modelo Huella Hídrica</b>   | <b>36</b> |
| <b>4.2</b>  | <b>Evaluación de Impacto de Variables Sensibles</b>  | <b>37</b> |
| 4.2.1   | Dominancia estocástica de primer orden (DEP)   | 38        |
| 4.2.2   | Dominancia estocástica de segundo orden (DES)  | 39        |
| <b>4.3</b>  | <b>Escenarios y Esquemas de Operación</b>  | <b>40</b> |
| 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        |
| <b>5</b>  | <b>Resultados y Análisis</b>   | <b>46</b> |
| <b>5.1</b>  | <b>Análisis de sensibilidad</b>  | <b>46</b> |
| <b>5.2</b>  | <b>Evaluación de Impacto de Variables Sensibles</b>  | <b>50</b> |
| <b>5.3</b>  | <b>Escenarios y Esquemas de Operación</b>  | <b>53</b> |
| 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        |
| <b>5.4</b>  | <b>Comparación de resultados de escenarios/esquemas de operación y análisis crítico</b>                                    | <b>68</b> |
| <b>6</b>  | <b>Conclusiones</b>  | <b>73</b> |
| <b>7</b>  | <b>Bibliografía</b>  | <b>76</b> |
| <b>Anexo A: Datos Climáticos</b>  |  | <b>79</b> |
| <b>Anexo B: Procesamiento de datos de evaporación</b>                                       |  | <b>80</b> |
| <b>Anexo C: Gráficos análisis de sensibilidad para 8 variables/parámetros más sensibles</b> |  | <b>81</b> |

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

## **Índice de Tablas**

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