



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS
ICS1113 – OPTIMIZACIÓN

Informe 2

Minimización del impacto ambiental causado por
relaves mineros en Chile

Grupo 77

Josefa Labarca 21641641 Sección 1

Matías Pérez Ortiz 24201723 Sección 1

Matías Santos Muñoz 23644575 Sección 3

Diego Staforelli Kahn 23642564 Sección 3

Juan José Meruane 23642505 Sección 3

Leonardo Suárez Toledo 23642297 sección 3

Sofía Ubilla Yáñez 23643242 sección 4

Fecha de entrega: 7 de octubre de 2025

Índice

1. Introducción	3
1.1 Contexto	3
1.2 Objetivo del tomador de decisiones	4
1.3 Elección del tema y posibilidad de ser resuelto	5
2. Modelación del Problema	6
2.1 Conjuntos	6
2.2 Parámetros	7
2.3 Variables	7
2.4 Función Objetivo	8
2.5 Restricciones	8
2.6 Naturaleza de las variables	10
4. Anexo	11
Referencias	11

1. Introducción

1.1 Contexto

La minería es uno de los motores principales de la economía chilena, siendo el cobre su mayor producto de exportación. Sin embargo, esta actividad conlleva importantes desafíos ambientales y sociales, especialmente donde la crisis hídrica se agudiza año a año. Actualmente, la minería representa en torno al 4% del consumo de agua a nivel nacional, pero en regiones del norte como Antofagasta y Tarapacá supera el 50% (Ministerio de Minería, 2022). Estas regiones son unas de las más áridas del mundo, por lo que hay una preocupación central en el manejo de los recursos hídricos. Actualmente, el suministro hídrico del sector proviene en un 28% de aguas superficiales, 33% de subterráneas, 30% del mar y 9% de terceros (Martínez, 2023). Destaca el creciente uso de agua desalada, obtenida mediante plantas que procesan grandes volúmenes de agua marina para reducir el impacto sobre fuentes continentales (Mussa, 2025).

Otro desafío crítico es la gestión de los depósitos de relaves mineros, estructuras diseñadas para contener los desechos de plantas. Chile cuenta con más de 700 depósitos, muchos abandonados o sin monitoreo, lo que genera riesgos ambientales y sociales como filtraciones, derrumbes o drenaje ácido. Estos relaves pueden liberar compuestos tóxicos como arsénico, plomo o mercurio, capaces de contaminar el agua y afectar la salud humana con enfermedades graves (iAgua, 2023).

En este contexto, la presión por reducir el uso de agua continental, junto con los altos costos del agua desalada (0,6–0,7 USD/m³ a nivel de planta, y con un incremento aproximado de 0,15 USD/m³ por cada 100 metros de altura sobre el nivel del mar) (Ministerio de Minería, 2022), obliga a la industria a buscar estrategias más eficientes y sostenibles para gestionar sus recursos. Así, surge la necesidad de explorar, mediante técnicas de optimización, cómo intervenir los relaves priorizando la reducción de su impacto ambiental y el uso eficiente del agua, a fin de contribuir no solo a la productividad de la minería, sino también al

bienestar ambiental del país. En este informe, consideraremos un horizonte de planificación de 1 año.

1.2 Objetivo del tomador de decisiones

En el siguiente informe, se busca desarrollar un modelo de optimización que minimice el impacto ambiental y los costos asociados al manejo de relaves mineros y al uso de agua en los procesos de extracción y procesamiento de minerales en Chile. El tomador de decisiones principal es la autoridad o el área responsable de la gestión minera dentro de la empresa, encargada de coordinar la asignación de agua, la disposición de relaves y el mantenimiento de los depósitos, considerando tanto la productividad de la operación como la sostenibilidad ambiental.

Todas las decisiones deben ser tomadas considerando las restricciones existentes, como los límites permitidos de capacidad de peso y volumen de cada depósito, la obligación de realizar una inspección anual a cada depósito, la cantidad mínima de agua para los procesos mineros, la disponibilidad máxima de agua por mina, el cumplimiento de la demanda de minerales, la incapacidad de depositar material en depósitos inactivos, que la cantidad de relave se mantenga constante considerando su traslado, el presupuesto destinado a transporte, operación e inspecciones, y la obligación de mantener el uso de agua continental por debajo de un porcentaje máximo.

Por otro lado, hay variables que no se busca minimizar en el problema. En primer lugar, la cantidad a procesar del mineral l en el periodo t dentro de la mina i en el proceso k , no se considera dentro de la función objetivo, ya que no incide en el impacto ambiental de forma directa. Tampoco se considera en la función objetivo los desechos que posee la mina i que aún no son enviados a algún relave en el tiempo t , ya que estos son desechos que son propios de los procesos de extracción minero y se busca evaluar el impacto ambiental a través de otros ámbitos.

Para el modelo planteado, existe una gran cantidad de parámetros que se deben tomar en cuenta para la toma de decisiones. Estos incluyen P_j , v_j , A_i , d_{lt} , α_{kl} , b , r_j , Δ_{jt} , f_k , ρ_{ikl} , e_j , c , g_{ij} y h . Dentro de estos parámetros, r_j representa el índice de exposición de un depósito de relave minero a alta pluviometría, el cual se determina como las toneladas autorizadas por Sernageomin para cada depósito de relaves, luego este valor se normaliza como el logaritmo natural de las toneladas aprobadas dividido por el logaritmo natural del mayor número de toneladas aprobadas (Ministerio del Medio Ambiente, s. f.). Por otro lado, ρ_{ikl} indica la proporción de relave que se genera en la mina i por procesar el mineral l en el proceso k , y α_{kl} indica el multiplicador de agua utilizado por el mineral l en el proceso k (m^3/kg). Los demás parámetros se encuentran explicados en el modelo.

En conjunto, el modelo propuesto busca proporcionar una herramienta de apoyo para que el tomador de decisiones pueda implementar una gestión eficiente y mitigar el impacto ambiental, que permita satisfacer la demanda minera, reducir riesgos ambientales y optimizar el uso de los recursos disponibles.

1.3 Elección del tema y posibilidad de ser resuelto

El problema planteado en este informe es realista, ya que considera una gran cantidad de parámetros y variables, y 10 restricciones relacionadas a la gestión de los relaves mineros en Chile, que aumentan la precisión del problema. Se debe considerar que en el modelo, se consideran parámetros de costo de transporte, costo de utilización de agua y costo de inspección de los relaves. Además, se tienen en consideración restricciones reales de normativas ambientales, la restricción de demanda, y la restricción de presupuesto, entre otras.

Sin embargo, para que el modelo sea factible, es necesario considerar algunos supuestos. En primer lugar, se asume que el costo de transportar el relave minero es independiente del tipo de mineral asociado. Además, se considera que se realiza una inspección anual por cada relave. Se asume que llevar a cabo esta

inspección implica un costo para la empresa, ya que durante dicho proceso el depósito queda temporalmente inhabilitado para su uso. Por lo tanto, resulta necesario determinar en qué mes del año realizarla, de manera que se minimice su impacto en la operación y en los costos totales de gestión. Finalmente, se supone que el costo de utilización de un litro de agua es independiente del lugar y del depósito, ya que se utilizará un valor promedio a nivel nacional según las compañías.

Además, el problema es sumamente valioso de resolver, ya que causa un gran impacto en la población. La minería es una de las principales industrias en Chile, y requiere de un gran consumo de agua. Además, la cantidad de relaves mineros en el país es muy alta, por lo que una correcta gestión de ellos generaría un efecto sustancial en el medioambiente nacional, considerando que se podría llegar a optimizar más de 700 de ellos. Según proyecciones recientes, una gestión integrada y optimizada podría reducir entre un 25% y un 50% las liberaciones no controladas de contaminantes y disminuir en torno a un 30% el uso de agua continental en operaciones mineras, contribuyendo así a una reducción significativa del riesgo ambiental y del consumo hídrico del sector (Comisión Chilena del Cobre, 2024).

2. Modelación del Problema

2.1 Conjuntos

- $i \in \{1, \dots, I\}$: Mina o lugar de extracción i .
- $j \in \{1, \dots, J\}$: Depósito de relave j .
- $k \in \{1, \dots, K\}$: Proceso minero k .
- $t \in \{1, \dots, T\}$: Tiempo t en meses a considerar en la modelación. Horizonte total de un año.
- $l \in \{1, \dots, L\}$: Tipo de mineral l a procesar.

2.2 Parámetros

- P_j : Peso máximo que admite el depósito de relave j . (kg)
- v_j : Volumen máximo que admite el depósito de relave j . (m^3)
- A_i : Disponibilidad máxima de agua asignada a la mina i . (m^3)
- d_{lt} : Demanda por el mineral m en el periodo de tiempo t (kg) .
- α_{kl} : Multiplicador de agua utilizado por el mineral l en el proceso k . (m^3/kg)
- b : Presupuesto anual entregado para la gestión de relaves. (\$)
- r_j : Índice de exposición de un relave minero a alta pluviometría.
- r_{crit} : Índice crítico de exposición a alta pluviometría el cual urge inspeccionar a los depósitos que estén por sobre este.
- Δ_{jt} : Costo de inspeccionar el relave j en el tiempo t . (\$)
- f_k : Costo por metro cúbico de agua utilizado en el proceso k . ($\$/m^3$)
- ρ_{ikl} : Proporción de relave que se genera en la mina i por procesar el mineral l en el proceso k (adimensional).
- e_j : Volumen específico del relave j . (m^3/kg)
- c : Costo de transportar de $1 m^3$ de relave minero en 1 metro. ($\$/m$)
- g_{ij} : Distancia de la mina i al depósito j . (m)
- h : Agua continental producida. (m^3)
- M_j^a Big-M = P_j (una cota máxima)
- q_i : Cantidad máxima de desechos que puede poseer la mina i (kg).

2.3 Variables

- X_{iklt} : Volumen de agua utilizado por la mina i en el proceso k para el mineral l en el tiempo t . (m^3)

- Y_{ijt} : Masa de desechos producidos en lugar de origen i , depositados en el relave j en el tiempo t . (kg)
- Z_{iklt} : Cantidad a procesar del mineral l en el periodo t dentro de la mina i en el proceso k . (kg)
- U_{it} : Desechos que posee la mina i que aún no son enviados a algún relave en el tiempo t . (kg)
- W_j : {1, Si el depósito j está activo. 0, en otro caso.}
- V_{jt} : {1, Si se hace una inspección en el relave en el tiempo t . 0, en otro caso.}

2.4 Función Objetivo

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} X_{iklt} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} Y_{ijt} + \sum_{j \in J} r_j W_j$$

Explicado en palabras, con esta función se busca minimizar el impacto ambiental generado por los relaves, considerando el volumen de agua utilizado, los desechos generados y la exposición a lluvias intensas.

La función objetivo busca representar de manera cualitativa un valor de contaminación de tal manera que un valor mayor implica una contaminación mayor. Esto nos permite modelar de manera simultánea varias áreas, por esta razón las unidades de cada sección no coinciden y deben ser consideradas como valores adimensionales.

2.5 Restricciones

1. No se debe sobrepasar peso máximo permitido de relave:

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} Y_{ijt} \leq P_j \quad \forall j \in J$$

2. No se debe sobrepasar volumen máximo permitido de relave:

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} e_j Y_{ijt} \leq v_j \quad \forall j \in J$$

3. Se tiene que hacer una inspección anual en el depósito:

$$\sum_{t \in T} V_{jt} = 1 \quad \forall j \in J$$

4. Se debe usar menos del 10% de agua continental producida:

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} X_{iklt} \leq 0.1 * h \quad \forall t \in T$$

5. Cada mineral debe satisfacer una demanda:

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} Z_{iklt} \geq d_{lt} \quad \forall l \in L, \forall t \in T$$

6. Cada proceso minero necesita ocupar agua en cierta cantidad:

$$\sum_{i \in I} X_{iklt} \geq \sum_{i \in I} Z_{iklt} \alpha_{kl} \quad \forall k \in K, \forall l \in L, \forall t \in T$$

7. Cada mina no puede superar una cantidad máxima de agua disponible.

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} X_{iklt} \leq A_i \quad \forall i \in I$$

8. Si el depósito está inactivo, no se puede depositar material en él.

$$\sum_{i \in I} Y_{ijt} \leq M_j^a W_j \quad \forall j \in J, \forall t \in T$$

9. Al procesar mineral, se genera relave, este puede transportarse hacia un depósito o quedarse en la mina:

$$U_{it} + \sum_{j \in J} Y_{ijt} = U_{it-1} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \rho_{ikl} Z_{iklt} \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

$$U_{i0} = 0 \quad \forall i \in I$$

10. El presupuesto está dado por utilizar agua, por las inspecciones anuales y el gasto por transporte de relave.

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} f_k X_{iklt} + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \Delta_{jt} V_{jt} + c \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} g_{ij} \leq b$$

11. Cota máxima para los desechos acumulados.

$$U_{it} \leq q_i \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

12. Existe una urgencia por inspeccionar relaves con exposición a alta pluviometría.

$$\sum_{t \in \{1, \dots, T/2\}} V_{jt} \geq 1 \quad \forall j \in J \mid r_j \geq r_{crit}$$

2.6 Naturaleza de las variables

- $X_{iklt} \in R^+$ $\forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall k \in \{1, \dots, K\}, \forall l \in \{1, \dots, L\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$
- $Y_{ijt} \in R^+$ $\forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall j \in \{1, \dots, J\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$
- $Z_{iklt} \in R^+$ $\forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall k \in \{1, \dots, K\}, \forall l \in \{1, \dots, L\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$
- $W_j \in \{0, 1\}$ $\forall j \in \{1, \dots, J\}$
- $V_{jt} \in \{0, 1\}$ $\forall j \in \{1, \dots, J\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$
- $U_{it} \in R^+$ $\forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$

4. Anexo

Referencias

iAgua. (26 de octubre de 2023). *El agua, un recurso esencial para la minería en Chile*. iAgua Magazine 46.

<https://www.iagua.es/noticias/almar-water-solutions/agua-recurso-esencial-mineria-chile>

Comisión Chilena del Cobre. (2024). *Informe Consumo de Agua en la Minería del Cobre año 2023 – COCHILCO*.

<https://www.cochilco.cl/web/informe-consumo-de-agua-en-la-mineria-del-cobre-ano-2023>

Comisión Chilena del Cobre. (2024). *Proyección de demanda de agua en la minería del cobre 2023-2034 – COCHILCO*.

<https://www.cochilco.cl/web/informe-proyeccion-del-consumo-de-agua-en-la-mineria-del-cobre-2023-2034>

Martínez, P. (4 de septiembre de 2021). *La contaminación del agua en la minería*. OBELA – Observatorio Económico Latinoamericano.

<https://www.obela.org/analisis/la-contaminacion-del-agua-en-la-mineria>

Minería Chilena (MCH). (s. f.). *Las cifras tras el consumo hídrico de la minería*. Minería Chilena.

<https://www.mch.cl/negocios-industria/las-cifras-tras-el-consumo-hidrico-de-la-mineria>

Ministerio de Minería de Chile. (2022). *Agua en minería* [PDF]. MinMinería.

https://www.minmineria.cl/wp-content/uploads/2022/03/MinMineria-2022-Agua-en-mineria_vf.pdf

Ministerio del Medio Ambiente (Chile). (s.f.). *Plataforma ARClím: Impacto de la altapluiometría en relaves mineros* [Mapa interactivo]. ARClím.

https://arclim.mma.gob.cl/atlas/view/relaves_pluviometria_addcbit/

Mussa, Y. (14 de mayo de 2025). *Chile recurre a las plantas desaladoras para hacer frente a la crisis hídrica*. Dialogue Earth.
<https://dialogue.earth/es/agua/chile-recurre-plantas-desaladoras-hacer-frente-crisis-hidrica/>

Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN). (s.f.).
Plataforma pública de relaves. SERNAGEOMIN.
<https://www.sernageomin.cl/plataforma-publica-de-relaves/>

Ministerio de Minería. (2023). *Datos de geoquímica de depósitos de relaves de Chile 2023* [Archivo de Excel].
<https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves>

Ministerio de Minería. (2024). *Catastro de Depósitos de Relaves en Chile 2024* [Archivo de Excel].
<https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves>