

1 Definición y justificación de Datos

Los conjuntos a definir para poder resolver el problema son: $\mathcal{P}, \mathcal{U}, \mathcal{D}, \mathcal{A}, \mathcal{F}$

Para definir de manera realística estos conjuntos de datos, utilizamos Geoportal de Chile que contiene información de áreas y coordenadas de las divisiones políticas administrativas, la planificación urbana dentro de Copiapó, y todas las posiciones de los relaves abandonados e inactivos. Estos archivos eran Shapefiles (.shp), que se podían visualizar usando QGis y trabajar con ellos dentro de Python. Para definir el conjunto \mathcal{P} , definimos una distancia entre cada punto dentro de un rectángulo que encapsula todo el área de la comuna de Copiapó. Además, agregamos los Shapefiles de las zonas urbanas, fuentes de agua, y los puntos de los depósitos ya existentes. Cuando un punto se encuentra dentro del Shapefile de una zona urbana, se agrega a una lista para indicar una posición de una zona urbana. El conjunto final de los puntos se puede ver en la [fig:mapa-grid]Figura 1, encontrada en el Anexo.

Por otro lado, los parámetros quedaron definidos de la siguiente manera. Todo los valores de aquellos parámetros que dependan del depósito se encuentran en el archivo *"Parámetros - Entrega 3"*

- T_p : [Valor por depósito] (ton): Tonelaje total autorizado según reportado por las empresas al *Servicio Nacional de Geología y Minería (Octubre 2025)* de todo depósito de relave ubicado en la comuna de Copiapo que se encuentren abandonados o inactivos, con excepción de aquellos con ID = 0261-3N, 0263-3N, 0807-3N, 0808-3N y 0812-3N (por falta de datos informados). [3]
- CT : 1500000 (USD/km): Según estudios realizados por el *National Renewable Energy Laboratory (2022)* [14], los costos de construcción en infraestructura lineal minera (como cañerías de relaves o líneas de transmisión de alta tensión) suelen variar entre 1,3 y 2,5 millones (USD/km), por lo que este monto representa una estimación realista y coherente, que se asocia a las condiciones técnicas y geográficas de la zona de Copiapó.
- CF_f :
 - **Fitoextracción:** 60 USD/tonelada de relave. Para fijar este valor se hizo un estudio de la técnica en sí, la cual trata de usar plantas para extraer metales pesados del suelo. La idea general es plantarla, esta retira los contaminantes al absorber los metales disueltos en el agua del relave, y posteriormente eliminar la planta contaminada. Los costos de técnicas de fitoremediación fluctúan entre los 25-100 (USD/t), pero dado que la técnica implica múltiples ciclos de cosecha y costos de disposición de planta, adoptamos un valor alto en comparación a las otras técnicas.
 - **Fitoestabilización:** 15 USD/tonelada de relave. Por otro lado, esta es una técnica pasiva de fitoremediación, esto significa que no busca extraer los contaminantes del suelo, si no, inmovilizarlos, sellandolos biológicamente con una cobertura vegetal permanente. Esto permite que el depósito de relave deje de contaminar activamente. Según *CEPAL-MINSUS: Gestión de pasivos mineros (2024)*, este costo fluctúa entre 10-25 (USD/ton).[13]
 - **Rizorremediación:** 25 USD/tonelada de relave. Finalmente, esta técnica utiliza las raíces de las plantas como estabilizadores, pero además como promotores de microhabitats que estimulan microorganismos en el suelo capaces de degradar o transformar contaminantes. Se requiere de especies de plantas más específicas que para la fitoestabilización y además hay un costo asociado a la adición de sustrato para favorecer el crecimiento microbiano.
- KI_p : [Valor por depósito] (ton): Al revisar los datos reportados por las empresas al *Servicio Nacional de Geología y Minería (2025)* de todos los depósitos considerados en T_p (72 en total), solo 7 depósitos de relave tienen declarado su tonelaje actual, lo que se consideraría en el modelo como cantidad inicial de relave en el depósito p [4]. Al necesitar estos datos e investigando las capacidades promedio de los depósitos una vez se vuelven inactivos, se consideró ideal tomar un número aleatorio entre $(T_p/2, T_p)$.
- CS_d : [Valor por depósito] (USD). Este valor se calcula al multiplicar KI_p , tonelaje de relave inicial de un depósito, por el costo por tonelada de sellar un relave, 0,75 (USD/ton). Este costo es promedio, se consideró un tipo de cobertura intermedia (lo que incluye suelo vegetal y geomembrana), promedio

de toneladas de relave por m^2 ($1\ m^2 = 40\ toneladas$) y un rango declarado de 10 - 150 USD/m^2 en CEPAL-MINSUS (2024). [13]

- L_{ij} : [Función dentro del programa] (km): Se toman dos puntos de Conjunto \mathcal{P} y se transforma esta distancia a km en la vida real.
- $MCNT_u$: 20 (μ/m^3): El valor promedio anual determinado por la normativa legal en Chile, según la *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2011)* para la contaminación medioambiental de material particulado fino respirable. [17]
- $MCNT_a$: 220 (mg/l): Valor determinado por la normativa legal en Chile, según el Decreto 609 del Ministerio de Obras Públicas para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. [16]
- CNT : 0,000027 (μ/m^3 por tonelada de relave): Este parámetro representa la cantidad de contaminación atmosférica (polvo o material particulado) emitido por cada tonelade de relave expuesta. Esto es un estimado a partir de relaves secos en Copiapo (*CEDEUS, 2025*) coherentes con niveles de material particulado medidos en zonas urbanas según la norma de calidad del aire. (Decreto N°12/2011) [15]
- α : 0,17: El ponderador α depende de la tecnología efectiva que se decida aplicar al sellado de depósito de relave por el consorcio. A su vez, siempre se encontrará entre los valores de 0 y 1, ya que permite modelar la efectividad del sellado y la contaminación final emitida. El valor 0,17 se utiliza como un supuesto, el cual indica que el sellado es de alta tecnología y tiene una eficiencia del 83%.
- β_f :
 - **Fitoextracción: 0,8**: Este evidencia la eficiencia que proporciona la fitoextracción, donde esta depende del tipo de contaminante que esté presente, el tipo de planta que se use, y su horizonte de tiempo. El valor de 0,8 representa una eficiencia del 20%, este valor se elige ya que en un horizonte de tiempo corto la fitoextracción es un proceso biológico lento y a largo plazo.
 - **Fitoestabilización: 0,3**: Este ponderador representa la eficiencia de fitoestabilizar un depósito de relave, esto significa de que genera una contención de los relaves y sus contaminantes. Esta acción tiende a ser más eficiente a corto plazo, ya que se aplican métodos físicos y químicos que logran la debida inmovilización de metales pesados. Por tanto, un valor de 0,3 que representa una eficiencia del 70% es una cifra adecuada.
 - **Rizorremediación: 0,6**: El siguiente ponderador representa la eficiencia que genera la rizorremediación, la cual consiste en el uso de microorganismos (bacterias y hongos) para neutralizar la presencia de metales pesados en el depósito de relaves. El valor de 0,6 indica que este proceso tiene un 40% de eficiencia, esto se debe a que la degradación de estos metales por los microbios conlleva un periodo relativo de tiempo. Sin embargo, este no es tan largo como el tiempo que implica aplicar un proceso de fitoestabilización.
- DM : 1 (km): La legislación chilena dicta que cualquier explotación minera situada a menos de 500 metros de alguna área habitada debe seguir regulaciones específicas. [12] Además, SERNAGEOMIN utiliza un radio de 500 metros para identificar zonas de posibles interacciones de relaves entre sí [3]. Es por esta razón que al establecer una distancia mínima de 1 kilómetro entre cada depósito y ciudad se asegura que todas las posibles soluciones de traslado superen este margen.
- PS : 10^{10} (USD): Estimado para cubrir la remediación integral de 80 depósitos de relaves en Copiapó, consistente con rangos de inversión en cierres de faenas mineras en Chile (CEPAL-MINSUS, 2024). [13]
- λ_k :
 - λ_1 : 5. Al elegir este valor como ponderador base para la fitorremediación por tonelada de relave a tratar, se establece una conexión directa con la *Política Nacional Minera 2050* de Chile [5], que plantea un liderazgo en la industria con base sustentable. De esta manera, se asegura que el beneficio proveniente de una restauración ecológica sea considerado al momento de tomar decisiones, priorizando soluciones de largo plazo cuando los costos y condiciones lo permitan.

- λ_2 : 4. Se asigna este valor al ponderador ya que la estabilización de pasivos mineros mediante el sellado constituye una medida esencial para el control inmediato de riesgos ambientales. La efectividad y rapidez del sellado (según datos del SERNAGEOMIN [3]) para mitigar el drenaje ácido y reducir el material particulado justifican una ponderación alta, aunque inferior a la de la fitorremediación por su menor impacto a largo plazo.
- λ_3 : 3. Finalmente, se otorga este valor al ponderador asociado a la contaminación percibida, debido a su relación directa con el riesgo a la salud pública ocasionado por la exposición prolongada a metales pesados. Al basarse en un método de ponderación por distancia inversa, los depósitos próximos a zonas urbanas o fuentes de agua adquieren mayor relevancia, garantizando que la minimización del riesgo sanitario siga siendo un criterio fundamental dentro del modelo.