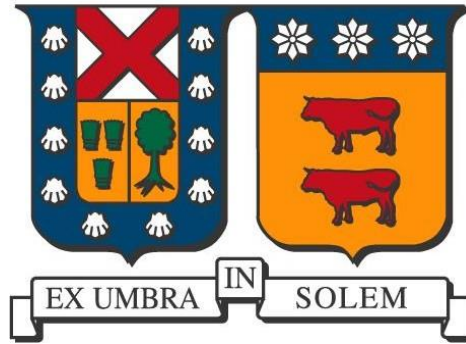


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO – CHILE



**“DESARROLLO DE ESTRATEGIA AUTOMATIZADA PARA EL DISEÑO DE PROCESOS Y SELECCIÓN
DE ELEMENTOS CRÍTICOS DESDE RELAVES MINEROS”**

BRANKA BELÉN DRAGICEVIC PIZARRO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

PROFESOR GUÍA:
CLAUDIO ACUÑA PÉREZ
PROFESOR CO-GUÍA:
FERNANDO ESPERGUES ZÚÑIGA

VALPARAÍSO 2023

RESUMEN

En Chile se estiman pérdidas por 5 mil millones de dólares al año de cobre en los relaves. Actualmente hay 26 mil millones de toneladas depositadas de relaves mineros y diariamente se generan 2,5 millones de toneladas que se encuentran repartidas en 760 depósitos de relaves. Dentro de ellos, se encuentran elementos como Cu, Mo, Fe, Zn, Si, Sn, V, Ge, Be, As, Hg y tierras raras (Ce, Nd, Sm, Tb, Gd, entre otros). Algunos de estos elementos son identificados como minerales estratégicos (CRM: Critical Raw Materials), se destacan por su versatilidad y rol crucial en la economía mundial. Estos minerales poseen cualidades únicas, que son fundamentales para la industria y contribuyen significativamente al avance tecnológico, siendo utilizados en la fabricación de baterías, celdas de combustible, motores, robótica, drones, paneles fotovoltaicos, entre otros. Son irremplazables en estas tecnologías limpias, sostienen una economía a la transición energética, y por lo tanto, se consideran esenciales.

Se propuso desarrollar e implementar una estrategia automatizada para el diseño de diagramas de procesos de configuración adaptativa a partir de una matriz de elementos químicos previamente priorizados. Para ello se confeccionó la matriz de selección, con criterios económicos, sociales y ambientales, con el objetivo de potenciar el desarrollo de una ingeniería sostenible. Se diseñó la ruta de procesos general, considerando cuatro fases principales, acondicionamiento, separación, selección y purificación del producto comercial. Considerando el tratamiento del relave para llevarlo a pulpa, operaciones unitarias para separar y recuperar los elementos críticos hasta obtener el producto comercial. Mediante el diseño general de los diagramas de procesos, con los elementos químicos priorizados previamente, se diseña la ruta específica para cada uno de ellos, para que los resultados de capex y opex sean confiables. Se desarrolló con mayor detalle el proceso de transformación desde diagramas de procesos a diagramas de grafos y nodos, para luego obtener el algoritmo necesario para la programación del software y obtener resultados.

En conclusión, se crearon matrices de selección adaptadas a características mineralógicas y tendencias de mercado, aspectos ambientales y sociales. Se integraron metodologías para propuestas de procesos y diseño de ingeniería, con cálculos de capex y opex. En definitiva, el software posee una capacidad adaptativa a múltiples configuraciones en proyectos mineros, en función de la información ingresada desde planilla simplificada, basado en matriz de selección de elementos.

ÍNDICE

RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN.....	5
OBJETIVOS	6
OBJETIVO GENERAL.....	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	7
CAPÍTULO 1: RELAVES EN CHILE Y EL POTENCIAL ECONÓMICO DE LOS MINERALES ESTRATÉGICOS	8
RELAVES EN CHILES.....	8
TIPOS DE DEPÓSITOS DE RELAVES.....	10
ELEMENTOS DE VALOR: MINERALES ESTRATÉGICOS.....	16
MINERALES ESTRATÉGICOS EN CHILE.....	19
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA MATRIZ DE SELECCIÓN Y PRIORIZACIÓN DE ELEMENTOS CRÍTICOS	22
CRITERIOS ECONÓMICOS.....	23
CRITERIOS SOCIALES.....	25
CRITERIOS AMBIENTALES.....	25
MATRIZ DE SELECCIÓN.....	28
CAPÍTULO 3: DISEÑO DE DIAGRAMAS DE PROCESOS.....	31
ACONDICIONAMIENTO	32
SEPARACIÓN.....	36
SELECCIÓN	38
PURIFICACIÓN DEL PRODUCTO	41
CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE ALGORITMO PARA SELECCIÓN DE RUTA DE PROCESOS.....	44
REPRESENTACIÓN EN GRAFOS Y NODOS PARA EL ALGORITMO EN EL MODELO DE PROGRAMACIÓN	44
SOFTWARE A UTILIZAR.....	46
CONFECCIÓN DE MATRIZ DESDE GRAFOS Y NODOS	47
PROGRAMAR EL MODELO EN MATLAB.....	48
VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO	49
CAPÍTULO 5: RESULTADOS	51
CONCLUSIONES	55
RECOMENDACIONES	56
REFERENCIAS	57
ANEXOS	61
ANEXO A. TEORÍA DE PIERRE GY.....	61
ANEXO B. PRECIOS MINERALES ESTRATÉGICOS.....	62
ANEXO C. CRITICAL RAW MATERIALS.....	63
ANEXO D. MINERALES ESTRATÉGICOS: PRECIOS Y COSTOS DE PRODUCCIÓN.....	64
ANEXO E. LEY 19.300: ARTÍCULO 11	65
ANEXO F. OBJETIVOS DESARROLLO SOSTENIBLE.....	66
ANEXO G. DESARROLLO EJEMPLO MATRIZ DE SELECCIÓN	67
ANEXO H. RUTA GENERAL CON FACTORES DE SELECCIÓN	70
ANEXO I. RUTA PARA GeS2	72

Índice de Figuras

Figura 1. Estado depósitos de relaves en Chile.....	8
Figura 2. Tonelaje depósitos de relaves en Chile.....	9
Figura 3. Tranque de relave	11
Figura 4. Concentración de Tierras Raras en relaves de la minería del cobre.....	14
Figura 5. Concentración de Cobre en relaves de la minería del cobre	15
Figura 6. Contenido de Tierra Rara en relaves de la minería del cobre	15
Figura 7. Potencial económico	16
Figura 8. Movimiento de los elementos entre años 2017 y 2020	18
Figura 9. Riesgo de suministro de minerales estratégicos para tecnologías	19
Figura 10. Fases generales	31
Figura 11. Ruta general	32
Figura 12. Fase acondicionamiento - Etapa repulpeo	33
Figura 13. Fase acondicionamiento - Etapa molienda ultrafina (MOU)	34
Figura 14. Fase acondicionamiento - Etapa molino de bolas (MB)	34
Figura 15. Fase acondicionamiento - Etapa molino de bolas con clasificación (MBC)	35
Figura 16. Fase acondicionamiento - Etapa separación magnética.....	35
Figura 17. Fase separación – Etapa flotación.....	37
Figura 18. Fase separación – Etapa lixiviación presurizada	38
Figura 19. Fase separación – Etapa lixiviación atmosférica	38
Figura 20. Fase selección – Etapa extracción por solvente	39
Figura 21. Fase selección – Etapa intercambio iónico	40
Figura 22. Fase purificación - Etapa electro obtención	41
Figura 23. Ruta general en nodos	44
Figura 24. Grafo de nodos ruta general	46
Figura 25. Grafos y nodos a matriz	47
Figura 26. Objetivos desarrollo sostenible	66
Figura 27. Fases acondicionamiento y separación	70
Figura 28. Fases selección y purificación del producto	71

Índice de Tablas

Tabla 1. Información Depósitos de relaves seleccionados	13
Tabla 2. Contenido por elemento en depósitos de relaves Chile	13
Tabla 3. Contenido por elemento en depósitos de relaves Chile.....	13
Tabla 4. Critical Raw Materials 2023.....	17
Tabla 5. Rangos ejes Figura 6.	17
Tabla 6. Criterios económicos en matriz de selección.....	24
Tabla 7. Criterios sociales en matriz de selección.....	25
Tabla 8. Criterios ambientales en matriz de selección	26
Tabla 9. Matriz de selección.....	28
Tabla 10. Descripción nodo y sigla	45
Tabla 11. Ponderación criterios en matriz de selección	50
Tabla 12. Ejemplo matriz de selección.....	52
Tabla 13. Vector principal software	53
Tabla 14. Precios minerales estratégicos.....	62
Tabla 15. Critical Raw Materials 2020.....	63
Tabla 16. Critical Raw Materials 2017.....	63
Tabla 17. Cálculo eficiencia matriz de selección	64
Tabla 18. Criterios económicos	67
Tabla 19. Criterios sociales.....	68
Tabla 20. Criterios ambientales	69

INTRODUCCIÓN

Cada 36 horas, en Chile se depositan cantidades de relaves equivalentes al Cerro Santa Lucía ubicado en Santiago, es decir, 2,5 millones de toneladas. Anualmente, la industria minera genera 537 millones de toneladas de relaves. Estimaciones predicen que, en los próximos 20 años, aumentará la producción en un 75%, 900 millones de toneladas anuales. (Ojeda-Pereira, 2022)

Estos relaves, poseen elementos como Níquel, Zinc, Plomo, Uranio, Arsénico, Wolframio y lo más importantes, los minerales estratégicos. La presencia de estos minerales estratégicos en los depósitos de relaves entrega un gran potencial a estos denominados residuos de la industria minera. Estos elementos, también conocidos como Critical Raw Materials (CRW), son reconocidos por la Comisión Europea, ya que poseen una alta aplicación en modernas tecnologías como en la vida cotidiana y buscan fomentar su investigación y producción al destacarlos. Las Tierras Raras forman parte de la lista generada por la Comisión Europea y reciben este nombre ya que es poco común encontrarlos en forma pura. Todos estos elementos, son esenciales en las áreas de tecnología, electromovilidad, medicina y energía.

Actualmente, existen alrededor de 760 depósitos de relaves a lo largo de todo el país. Sin embargo, la gran mayoría está en la Región de Coquimbo. Del total de relaves, el 95% de ellos pertenece a la Gran Minería. Respecto al tonelaje, la gran mayoría de los depósitos poseen valores entre 10 y 100 kilotoneladas. Todos estos datos fueron obtenidos del catastro realizado por el Servicio Nacional de Geología y Minería. Para demostrar el contenido de minerales estratégicos en los depósitos de relaves en Chile, se realizó el cálculo conociendo la concentración promedio de cobre en los depósitos de relaves y considerando el precio y costo de producción del cobre. Con una eficiencia de 50% y una concentración de 2000 [g/ton], obteniendo que 550 mil toneladas de cobre pueden ser recuperadas, equivalentes a aproximadamente 5 mil millones de dólares.

De los relaves, es necesario conocer su estado, si existe acceso para poder extraer los minerales, si está ubicado cerca de comunidades y si hay acceso a agua. Conocer si el depósito está ubicado cerca de una población, es clave para poder incentivar el reproceso de estos pasivos ambientales mineros. Debido a que, personas están en exposición viviendo cerca de estas estructuras con posibles riesgos. Por lo que disminuir el riesgo, al disminuir la cantidad de relave, entrega mayor valor al proyecto. Por lo que en este trabajo se desarrollará la estrategia que diseñe diagramas de procesos flexibles para la recuperación de CRM.

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollo e implementación de estrategia automatizada (software) para el diseño de procesos de una configuración adaptativa a partir de una matriz de priorización de elementos químicos.

Objetivos específicos

1. Diseñar una metodología para generar una matriz de selección de elementos, dada las características mineralógicas de un relave y tendencias de mercado de los elementos contenidos.
2. Desarrollar una metodología que permita proponer ruta de procesos y la ingeniería básica, partiendo de la matriz de selección y la especificación técnica de los productos a obtener.
3. Determinar funciones a incluir en el software, que permita generar la matriz de selección, la ruta de procesos, la ingeniería básica con estimación de capex y opex para recuperar elementos de valor.
4. Validar el software desarrollado basado en caso de estudios, con verificación de especialistas en diseño de procesos.

ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Capítulo 1. Relaves en Chile y el potencial económico de los minerales estratégicos:

Se presenta la situación de los depósitos de relaves en Chile y como se lleva el control y estudio de ellos. Evidenciando también el potencial económico que existe en Chile respecto a los minerales estratégicos.

Capítulo 2. Metodología matriz de selección y priorización elementos críticos:

Se muestra el paso a paso de la confección de la matriz de selección, se indican los criterios económicos, sociales y ambientales. Explicando los diferentes factores y valores que son asignados según la situación en que esté el elemento analizado.

Capítulo 3. Diagrama de procesos con herramienta automatizada:

Descripción de cada operación planteada en el diagrama de proceso general, clasificada por fases y los criterios que se utilizaron para ir generando las alternativas de rutas para un mismo elemento de interés.

Capítulo 4. Desarrollo de algoritmo para selección de ruta de procesos:

Explicación del proceso de transición desde diagramas de procesos a resultados obtenidos del software. El proceso consta de la utilización de diagramas de grafos y nodos, y matrices para la programación.

Capítulo 5. Resultados:

Resultados del proceso general, de acuerdo con los objetivos planteados y las actividades realizadas. Se muestra el funcionamiento principal de la estrategia realizada mediante el software a elección, MATLAB.

CAPÍTULO 1: RELAVES EN CHILE Y EL POTENCIAL ECONÓMICO DE LOS MINERALES ESTRATÉGICOS

Relaves en Chile

Según el Decreto Supremo N°248, la definición de relave corresponde a:

“Suspensión de sólidos en líquidos, formando una pulpa, que se generan y desechan en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina.” (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2007)

Hasta el día de hoy, existen 757 relaves a lo largo del país, con 26 billones de toneladas depositadas en total. De todos los relaves existentes en el país, existen diferentes estados en los que estos son clasificados. Conocer el estado de los depósitos también es importante, de acuerdo con la Figura 1. se observa que la mayoría están inactivos, de los 757 un 62% clasifica en ese estado. Un 23% abandonado y un 15% activos y en construcción. Es importante destacar que, si bien es una gran cantidad de relaves, el mayor aporte de tonelaje lo genera la Gran Minería, aproximadamente 20 relaves son los que contienen el 95% de las toneladas totales. Los demás pertenecen a la Pequeña Minería. Además, es destacable notar que, de la cantidad total de relaves, el 51% están ubicados en la Región de Coquimbo y un 22% en la Región de Atacama.



Figura 1. Estado depósitos de relaves en Chile

elaboración propia

La Figura 2. representa la distribución de masa por depósito de relave, dividido en rangos de tonelaje. Este análisis permite dimensionar la masa aproximada que contiene cada relave, en donde se observa que la mayoría de los depósitos de relaves contiene entre 10 mil y un 1 millón de toneladas. (SERNAGEOMIN, 2022)

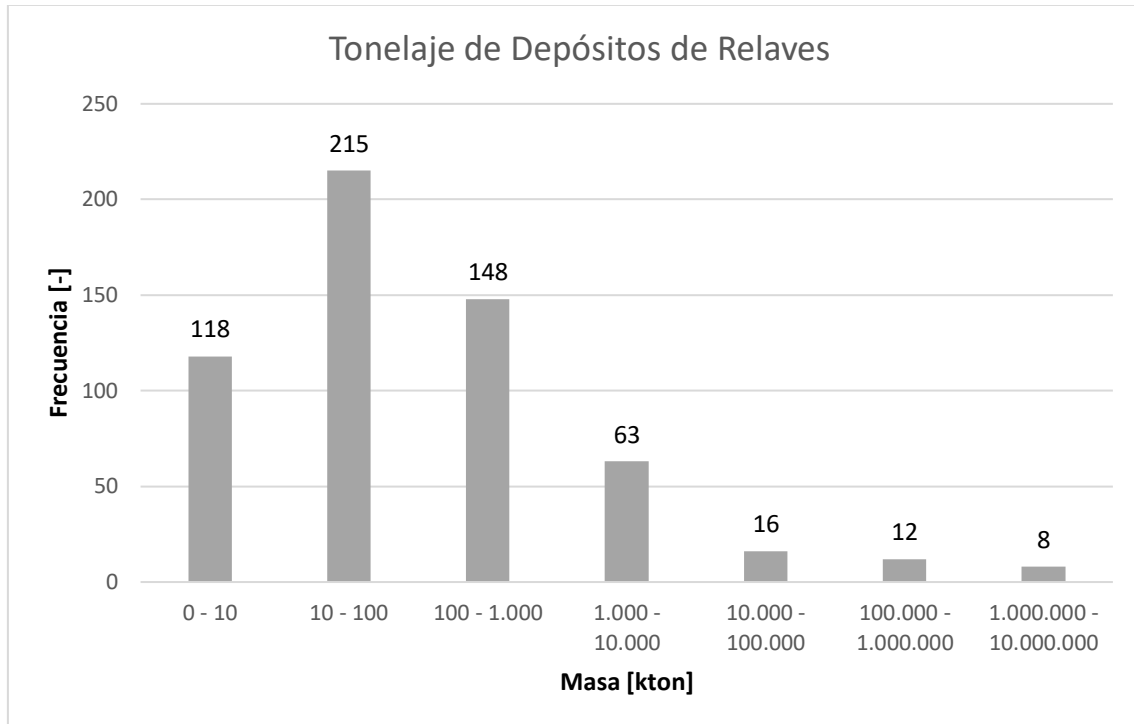


Figura 2. Tonelaje depósitos de relaves en Chile

elaboración propia

Un depósito de relave se considera como abandonado cuando la faena termina sus operaciones y no cumple con la Ley 20.551. Esta normativa fue promulgada en 2011 y establece que cada faena debe contar con un Plan de Cierre. La ley 20.551 indica que la faena responsable debe cumplir con un conjunto de medidas para obtener la estabilidad física y química del lugar. Impidiendo de esta forma deslizamientos, deformación, infiltraciones de fluidos, la generación de otros, etc. (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2011)

Cabe destacar que la mayoría de los relaves que hoy clasifican como abandonados fueron construidos bajo normativas de los años 70, que solo establecían ciertas exigencias para resguardar que los depósitos no se vinieran abajo. Por lo que, si bien, SERNAGEOMIN fiscaliza a faenas operativas, no está encargado de la fiscalización y control de los depósitos de relaves abandonados. Además, si la faena fue abandonada antes de que la Ley 20.551 comenzara a regir, la persona jurídica no está obligada a cumplir con las medidas de cierre que actualmente se exigen. Por otro lado, que un relave esté inactivo, significa que terminó su vida útil pero no ha tenido un cierre de acuerdo con las regulaciones.

Actualmente, este organismo, a través del Departamento de Depósitos de Relaves, colabora en la implementación de la normativa vigente en relación con las obligaciones del D.S. 248 del reglamento para la aprobación de proyectos de diseños, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves. Este departamento genera y actualiza información para el catastro nacional de depósitos de relaves activos e inactivos, atlas virtual y registro geoquímico de depósitos. (SERNAGEOMIN, s.f.)

A medida que crece la población, aumentan las necesidades del mercado y crece la industria. Afectando directamente en la minería, ya que los desechos mineros también aumentan. Al año se generan 537 millones de toneladas y se estima que para el año 2026 serán 915 millones de toneladas que se producen. Si ahora se compara la generación de relaves con el Cerro Santa Lucía, cada 36 horas, para el 2026 será cada 20 horas.

De la minería, lo que más problemas causa son los relaves, debido a los problemas que pueden traer, por lo que la estabilidad, tanto física como química son muy relevantes. La estabilidad física depende de la construcción de dicho depósito. Mientras que la estabilidad química, significa evitar al máximo la generación de reacciones químicas dentro del relave, causando ácidos. De los datos disponibles entregados por el SERNAGEOMIN, se encuentra el volumen, tonelaje, concentración por elementos. El estudio realizado corresponde a la composición geoquímica superficial, la cual se ve afectada por contaminantes, material arrastrado por viento, y si la muestra pertenece a la superficie del depósito, no refleja completamente al relave en sí. Por esta misma razón, es que el estudio no es 100% representativo, ya que se pierde el potencial que existe en los depósitos respecto al contenido de minerales estratégicos.

Dentro de los depósitos de relaves, es importante reconocer e identificar las diferencias entre tipos de depósitos. Debido a que cada uno cuenta con características específicas, que serán útiles para el re procesamiento de estos y así evitar dificultades en el proceso.

Tipos de depósitos de relaves

Para poder analizar los relaves, es esencial conocer los diferentes tipos de depósitos de relaves y sus características. Es importante mencionar que, para la construcción de estos, se analiza la topografía del lugar, la distancia a la planta y el almacenamiento disponible (Claussen et al., 2019):

- **Tranque de relave:** En este tipo de depósito de relave el muro de contención está construido con la fracción más gruesa del relave. En la cubeta sedimentan los sólidos finos, mientras que en la superficie se genera una laguna de aguas claras. Existen diferentes formas de construir el muro de contención a partir de las arenas de los relaves, “aguas arriba”, “eje central o mixto” y “aguas abajo”.

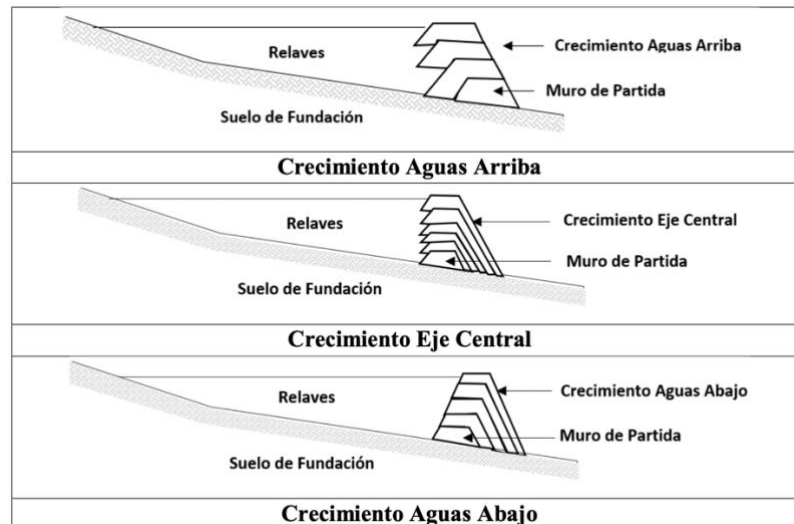


Figura 3. Tranque de relave

(Quilodran Cortes, 2021)

- **Embalse de relaves:** En este caso el muro de contención es construido con material de empréstito (tierras y rocas alledañas), impermeabilizando a la parte superior del muro y al talud interno. Los embalses, desde un aspecto sísmico, son más estables que los tranques de relave. Además, se denomina embalse de relaves a depósitos que están ubicados en cierta depresión del terreno, la cual no requiere construcción de un muro de contención.

También se clasifican los relaves que son depositados, ya sea en tranque o embalse. Las diferentes características provienen del proceso que siga cada planta, lugar en donde esté ubicando el depósito, cantidad y costo del agua.

- **Relaves espesados:** Corresponden a aquellos que pasan por un tratamiento previo a ser depositados. El tratamiento es un proceso de sedimentación, mediante espesadores, con el objetivo de eliminar la mayor cantidad de agua posible de la pulpa. Aun así, el contenido de agua de los relaves espesados sigue siendo alto, por lo que es importante que la construcción esté realizada de manera correcta. Se debe impedir que el relave fluya a otras áreas que no sean las especificadas, para eso existe un sistema de piscinas de recuperación para el agua remanente.

- **Relaves filtrados:** Son relaves que pasan por un proceso de filtración, con el fin de que la humedad esté bajo 20%. Si bien esta opción requiere una inversión en equipos de filtros y manejo de relaves secos, es bastante sugerida debido a la gran cantidad de agua que se recupera. De igual manera, se debe asegurar que el relave se mantenga en el área designada.
- **Relaves en pasta:** Es la combinación entre relaves espesados y filtrados, una mezcla de sólido y agua (10% - 25% de agua), con alta concentración de partículas finas.

Se debe mencionar también, que existen depósitos de relaves que clasifican como Pasivos Ambientales Mineros (PAM). Según SERGANEOMIN, se definen como una faena minera, abandonado o paralizada, incluyendo sus residuos, que constituye un riesgo significativo para la vida, la salud de las personas o el medio ambiente. Actualmente existen 14, que fueron identificados por la Comisión Investigadora creada por la Cámara de Diputados. Para los PAM no existen normativas vigentes, y SERNAGEOMIN tampoco cuenta con un catastro oficial, impidiendo la clasificación de estos. (Garagay & Jerez, 2021)

La ubicación de los relaves abandonados es un punto importante, debido a que, si están posicionados cerca de comunidades, estas pueden verse afectadas en temas sociales y ambientales. El peligro se asocia a que el agua o napas subterráneas puedan estar contaminadas con los metales pesados que poseen los relaves mineros. Un relave abandonado ya es un riesgo a la salud, debido a que una persona puede consumir alimentos que fueron cosechados con agua contaminada o simplemente ir al lugar e inhalar polvo en suspensión. Por lo que con mayor razón es importante disminuir la cantidad de relaves existentes mientras estos estén cerca de poblaciones.

De la misma manera, enfocándose en el re procesamiento de los relaves, es importante reconocer si estos depósitos cuentan con un camino que permita el acceso a ellos y si existe disponibilidad de agua, por la etapa de extracción que es necesaria para valorizar estos desechos.

La valorización de los relaves desde hace un par de años ha estado presente en proyectos, que buscan reducir la cantidad de estos depósitos y a la vez obtener nuevos productos. Debido a estos nuevos intereses, la Cámara Chilena-Alemana (CAMCHAL), realizó un estudio que consideró muestras de relaves de plantas concentradoras de cobre con un análisis geoquímico a 57 elementos en las muestras con el objetivo de evaluar la posibilidad de recuperar elementos de valor a partir de estos residuos mineros. (Comisión Chilena del Cobre, 2016) Dentro de este estudio, el principal resultado correspondía a la ley de cobre de cada relave, y considerando la finalidad de este trabajo, se destacaron los cinco principales depósitos de relaves con la mayor cantidad de Tierras Raras contenidas según el muestreo.

Tabla 1. Información Depósitos de relaves seleccionados

Relaves seleccionados	REE Total [ppm]	Contenido de Cobre [%]	Producción relave [TPD]
Planta Delta	212	0,2	1900
Las Luces, Taltal	226	0,3	3200
Tranque El Salado	350	1,2	1300
Planta Vallenar	370	4,1	700
Tranque Carola	525	0,2	4300

A partir del análisis geoquímico, se determinó el contenido de cada elemento de Tierra Rara en cada depósito de relave en partes por millón. Se observan los resultados en la Tabla 2. y 3.:

Tabla 2. Contenido por elemento en depósitos de relaves Chile

Relaves seleccionados	Contenido en [ppm]									
	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Planta Delta	7,0	1,3	5,8	0,9	5,5	1,3	3,5	0,5	3,6	0,6
Las Luces, Taltal	8,0	2,0	7,9	1,3	7,8	1,7	4,6	0,7	4,4	0,7
Tranque El Salado	6,5	1,3	6	0,8	4,8	1,0	3,0	0,5	2,7	0,5
Planta Vallenar	5,4	1,3	4,3	0,7	3,0	0,7	1,8	0,3	1,7	0,3
Tranque Carola	5,3	1,0	4,0	0,3	1,7	0,3	1,0	0,2	1,2	0,2

Tabla 3. Contenido por elemento en depósitos de relaves Chile

Relaves seleccionados	Contenido en [ppm]					
	Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd
Planta Delta	20,0	30,8	25,8	61,7	7,5	31,7
Las Luces, Taltal	31,7	36,7	21,7	55,8	7,5	32,5
Tranque El Salado	4,2	28,3	87,5	149,1	11,7	35,0
Planta Vallenar	16,6	15,8	98,3	165,8	13,3	37,5
Tranque Carola	10,0	10,0	158,0	260,5	19,2	50,0

A continuación, se realiza el análisis del potencial económico de algunos elementos pertenecientes a las Tierras Raras. Se comenzó el análisis con la concentración por elemento en los relaves, para luego con la información disponible de cada relave, determinar la cantidad disponible de cada elemento y luego determinar la cantidad de dinero que estas concentraciones significan.

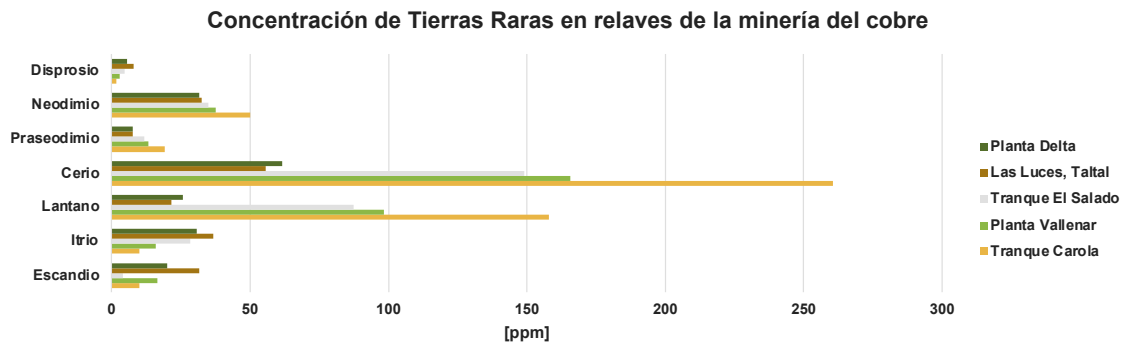


Figura 4. Concentración de Tierras Raras en relaves de la minería del cobre

elaboración propia

De los resultados, se aprecia que existen relaves con potencial en minerales estratégicos, con posibilidad de revalorización. Siendo Tranque Carola y Planta Vallenar los depósitos de relaves con mayor contenido de ppm de Tierras Raras (REE). Tranque Carola pertenece a la Minera Carola, ubicada en Tierra Amarilla, Copiapó (Región de Atacama). Mientras que Planta Vallenar pertenece a Enami, en Vallenar. Además, para las concentraciones de Disprosio, Neodimio, Praseodimio, Itrio y Escandio, todos los relaves poseen concentraciones similares.

Según lo planteado por la teoría de Pierre Gy, que es descrita en el Anexo A., se debe considerar que para las muestras realizadas para el estudio hecho por la Cámara Chilena-Alemana fue específicamente para la medición de ley de cobre y no para cada elemento en particular de Tierras Raras. Por lo que eso afecta directamente en los resultados obtenidos, generando grado de incertidumbre en el estudio. De acuerdo con Pierre Gy, para obtener resultados precisos y confiables en los análisis, es fundamental realizar un muestreo normado y representativo que capture de manera fiel las características de la totalidad del material que se está estudiando.

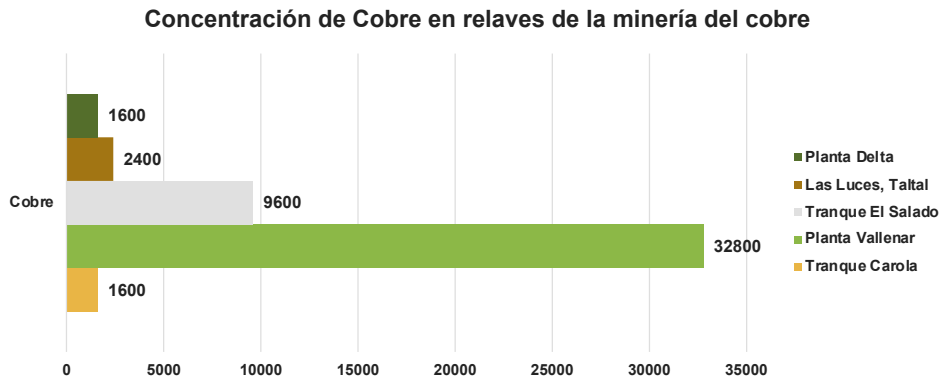


Figura 5. Concentración de Cobre en relaves de la minería del cobre

elaboración propia

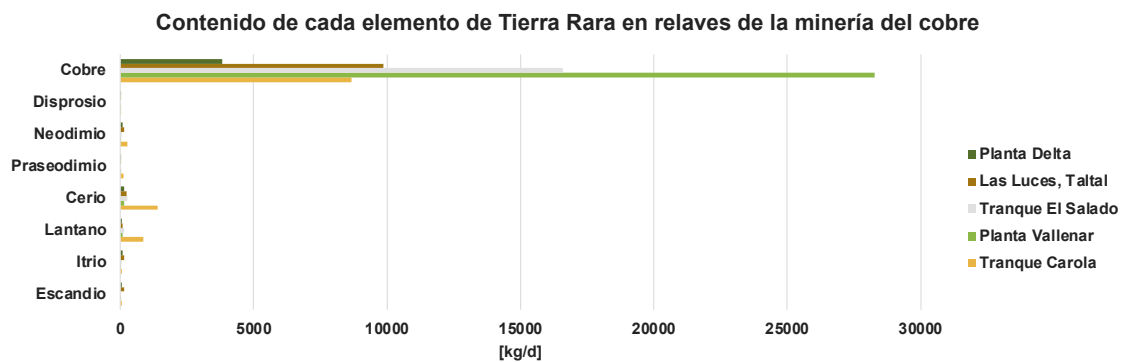


Figura 6. Contenido de Tierra Rara en relaves de la minería del cobre

elaboración propia

Respecto a la Figura 5. se observa que Planta Vallenar y Tranque El Salado poseen mayor concentración de Cobre en sus depósitos. Mientras que en la Figura 6. el Cobre es el elemento que mayor cantidad posee. Luego para el potencial económico, mediante los precios de cada elemento se determinó la cantidad de millones de dólares que pueden obtenerse por año recuperando las concentraciones determinadas de cada elemento. En el Anexo B. están los valores utilizados para este cálculo. En la Figura 7. se observa que si bien Cobre es el elemento que mayor cantidad posee, Escandio es el elemento más prometedor, con un mayor potencial económico para la recuperación de este a partir de los relaves.

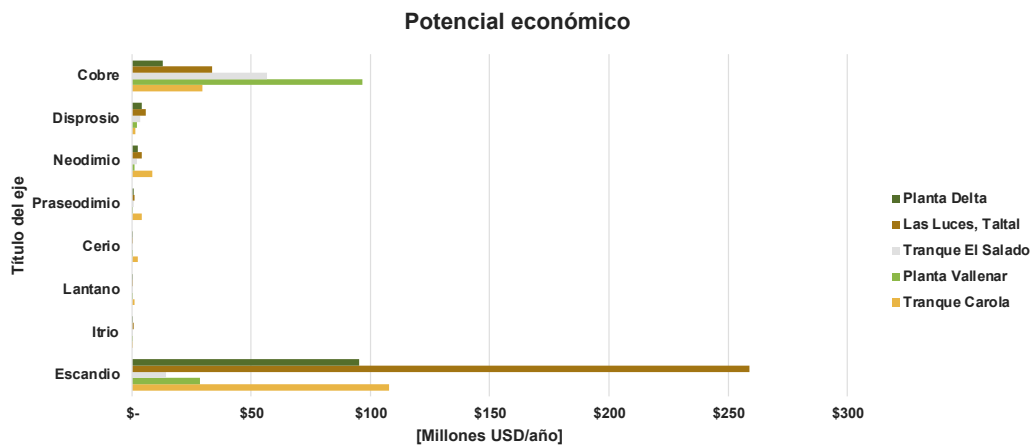


Figura 7. Potencial económico

elaboración propia

Elementos de valor: Minerales estratégicos

Los minerales estratégicos destacan por su versatilidad y son esenciales en el aspecto económico. Principalmente en Europa, donde más se incentiva su investigación durante los últimos años. Estos minerales, también conocidos como Critical Raw Materials, poseen una alta aplicación tanto en modernas tecnologías como en la vida cotidiana. Por esta razón, desde el 2010, la Comisión Europea ha generado una lista periódicamente con los minerales estratégicos que destacan en ese tiempo. Esta lista es generada considerando dos aspectos en cada elemento, la importancia económica y el riesgo de suministro, todo esto con el fin de levantar el interés de las investigaciones y proyectos.

A continuación, en la Tabla 4. se aprecia la lista de Critical Raw Materials (CRM) correspondiente al año 2023: (European Commission, 2023)

Tabla 4. Critical Raw Materials 2023

2023 Critical Raw Materials			
Antimonio	Feldespato	LREE	Escandio
Arsénico	Fluorita	Magnesio	Metal de silicio
Barita	Galio	Manganeso	Estroncio
Berilio	Germanio	Grafito natural	Tántalo
Bismuto	Hafnio	Niobio	Metal titanio
Boro/Borato	Helio	Metales del grupo del platino	Tungsteno
Cobalto	HREE	Roca de fosfato	Vanadio
Carbón de Coque	Litio	Cobre	Níquel

Cada 3 años esta lista es actualizada, en donde se observa como los elementos van cambiando de posición según la criticidad que posean al año correspondiente. En la Figura 8. se aprecia el movimiento de los Critical Raw Materials entre las listas de los años 2017 y 2020. Como se mencionó anteriormente, los elementos que son definidos como minerales estratégicos, es porque están dentro de los rangos definidos como críticos, en importancia económica y en riesgo de suministro. La Tabla 5. indica los rangos en que un elemento debe ubicarse para clasificar como mineral estratégico. Se infiere que a mayor importancia económica y que mientras mayor sea el riesgo de suministro, mayor es la criticidad del elemento.

Tabla 5. Rangos ejes Figura 8.

	Rango normal	Rango crítico
Importancia económica	0 - 3	3 - 9
Riesgo de suministro	0 -1	1 -7

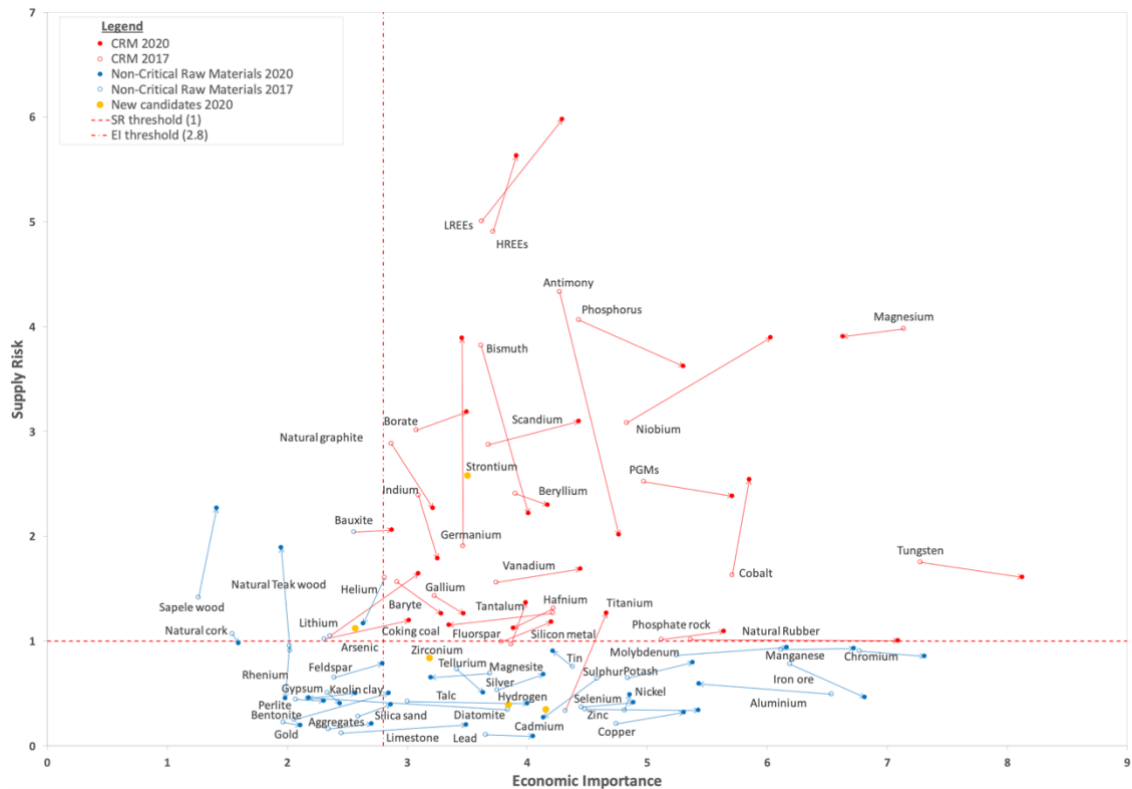


Figura 8. Movimiento de los elementos entre años 2017 y 2020

(European Commission, 2020)

En el Anexo C. se pueden apreciar listas de años anteriores y cómo el cobre, por ejemplo, en la última lista se hizo presente debido a su importancia en la electromovilidad. Estos minerales son importantes porque están vinculados directamente con el mundo industrial, y un enorme aporte al avance de la tecnología. Estos son utilizados en la generación de baterías, celdas de combustible (fuel cells), motores, robótica, drones, paneles fotovoltaicos y mucho más. Además, CRM están relacionados con las conocidas tecnologías limpias, su aporte en ellas los hace imposible de sustituir en los equipos mencionados anteriormente. Cada uno de los minerales estratégicos presentes en la lista es único, poseen diferentes cualidades y pueden ser de mucha utilidad si se investigan y utilizan de la forma correcta. En la Figura 9. se observa el riesgo de suministro que poseen los diferentes minerales estratégicos, y al tipo de tecnología en que son utilizados. (European Commission, 2022)

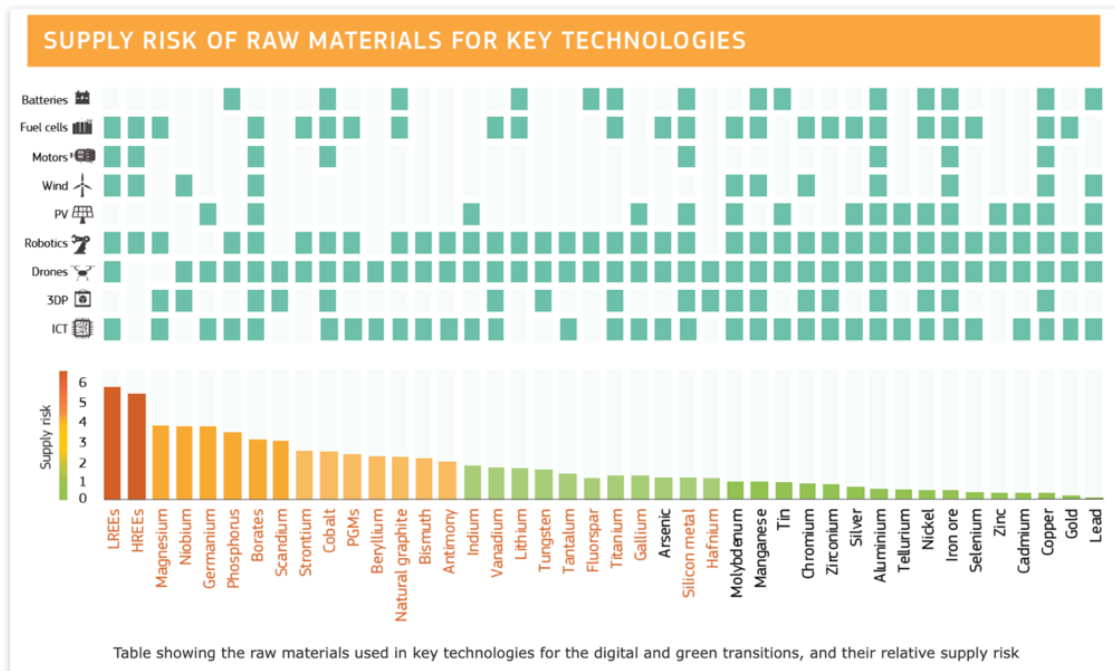


Figura 9. Riesgo de suministro de minerales estratégicos para tecnologías

(European Commission, 2020)

Dentro de los minerales estratégicos, se encuentran las Tierras Raras, que corresponden a 17 elementos de la tabla periódica. La mayoría de ellos son lantánidos, específicamente 15. Son denominadas Tierras Raras porque una gran cantidad de ellos fueron aislados durante los siglos XVIII y XIX como óxidos de minerales raros. Debido a su reactividad, era muy difícil refinarlos a metal puro. Además, los procesos de separación eficientes no se desarrollaron hasta el siglo XX debido a la similitud química de estos minerales, ese mismo siglo fue cuando todos los elementos de Tierras Raras fueron identificados. Los elementos son: Escandio, Itrio, Lantano, Cerio, Praseodimio, Neodimio, Prometio, Samario, Europio, Gadolino, Terbio, Disproseo, Holmio, Erbio, Tulio, Iterbio y Lutecio. (Castor & Hedrick, 2006) Cabe mencionar que, dentro del conjunto de diecisiete elementos, el único que no está presente naturalmente en la Tierra es el Prometio (Pm) debido a que todos sus isótopos son radiactivos y se forman en el interior de los reactores nucleares.

Minerales estratégicos en Chile

En la actualidad, en el ámbito de tratamiento de relaves en Chile destaca Minera Valle Central. MVC lleva 3 décadas en operación, con una producción acumulada de 526 mil toneladas de cobre y 9 mil toneladas de molibdeno. Se reprocessan relaves frescos, 130.000 tpd, que provienen de Codelco Chile División El Teniente a través del canal de relaves desde el concentrador.

Por otro lado, los flujos de relaves antiguos, depositados en el Tranque Cauquenes son extraídos mediante la técnica de monitoreo hidráulico, que consiste en la inyección de agua a alta presión en el relave depositado, disgregando el mineral y produciendo una pulpa. Esta ingresa a la Planta de Flotación para su procesamiento y recuperación de los elementos de interés. Luego sigue la clasificación, en donde la fracción fina es enviada al proceso de Flotación de Cascada, mientras que la fracción gruesa es enviada a clasificación de deslamados para posteriormente ser enviado al proceso de Molienda. En la fase de Molienda, la fracción gruesa es reducida para la liberación y limpieza de las partículas de cobre para su posterior proceso de flotación colectiva. Luego, usando la agitación e inyección de aire en celdas de flotación, se realiza la concentración de mineral que ayuda a facilitar la colección de los elementos de interés. Los descartes de este proceso son enviados a una última etapa de flotación en la Planta de Cascadas. El contacto del agua con el mineral genera un pre-concentrado de baja ley, 0,25% de cobre, que es enviado nuevamente a flotación convencional para enriquecer el producto de molienda. Los descartes de la Planta de Flotación de Cascadas son enviados a tres espesadores, que son capaces de recuperar en total 1.200 [Lt/s] y que aportan con el 90% del consumo de agua de la Planta. El concentrado final de la flotación colectiva es enviado a la Planta Flotación Selectiva para la separación de concentrado de cobre y molibdeno. (Minera Valle Central S.A., 2019)

Respecto a la valorización de residuos, existen también proyectos como Biolantánidos, ubicado en la ciudad de Concepción. El proyecto consiste en la construcción y operación de una faena minera y una planta procesadora de maicillo granítico con presencia de Lantánidos (Tierras Raras), con una capacidad de procesamiento de hasta 240 [ton/hr] de mineral y para producir 1700 [ton] anuales de Concentrado de Tierras Raras. El procesamiento de mineral consiste en un proceso cerrado de desorción continua y sus etapas son: extracción del mineral del yacimiento, transporte desde la mina a la planta, recepción de materia prima, mezclado y desorción, separación de sólidos finos, espesamiento y desaguado de fondos de sedimentadores de finos, precipitación, espesamiento y filtrado, extracción, filtrado, secado y calcinación de carbonatos de tierras raras, para lograr el producto final, Concentrado de Tierras Raras. Sin embargo, el proyecto presentó dificultades en el proceso del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y no pudo ponerse en marcha. (Minera Biolantánidos, 2018)

Por otro lado, Codelco y LS-Nikko en 2014 crearon una alianza para construir una Planta Recuperadora de Metales en la ciudad de Mejillones. En 2016 entró en producción, la planta posee una capacidad de procesar 3.500 [ton/año] de productos intermedios de refinería.

A partir de los barros anódicos, se obtienen lingotes de oro y plata, y utilizando refinación para selenio, paladio, platino y telurio. (Portal Minero, 2014)

La industria basada en los relaves mineros de a poco va capturando más territorio, pero todavía queda mucho por avanzar. Utilizar como ventaja el proceso por el que el material ya ha pasado, para obtener materiales valiosos y posteriormente buscar una correcta deposición de los residuos, son avances importantes. Sin embargo, debido a la realidad en que se está inmerso hoy, impulsa a más avances. Considerar los requerimientos de la industria global (además del cobre y molibdeno), como es el caso de los minerales estratégicos.

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA MATRIZ DE SELECCIÓN Y PRIORIZACIÓN DE ELEMENTOS CRÍTICOS

Siguiendo el análisis realizado por Tabatha Chávez en su memoria, con título “Diseño de proceso para la extracción de minerales estratégicos a partir de pasivos ambientales mineros”. En donde se realiza un análisis para determinar la selección de elementos críticos a recuperar a través del diagrama de procesos. En este se compara la concentración del elemento en el relave estudiado, fuente alternativa, precio, demanda anual, riesgo de suministro, eficiencia y ganancia por tonelada. (Chávez, 2017)

Fuente alternativa hace referencia al porcentaje del elemento que es reciclado, un valor alto reduce el riesgo de suministro. Respecto al riesgo de suministro, este se considera como un índice de criticidad, estos son evaluados de manera anual por Royal Society of Chemistry. Respecto a valores, estos van de 1 a 10, siendo 1 muy bajo riesgo y 10 muy alto riesgo. Para calcular este índice se utilizan dos parámetros establecidos desde el 2010 por la Comisión Europea, que son: Importancia económica (IE) y Riesgo de suministro (RS). El riesgo de suministro de los minerales estratégicos es calculado en función de la concentración de suministro primario de los países productores, considerando su desempeño de gobernanza, aspectos comerciales de los países productores, dependencia de importaciones de la Unión Europea y factores sociales y políticos de los países. RS se mide en la etapa de “cuello de botella” del material (extracción o procesamiento), cuantificando la insuficiencia de suministro para satisfacer la demanda industrial. Dentro de los países productores, existen dos grupos, los proveedores globales y los países de los cuales la UE obtiene la materias primas. (European Commission, 2023)

Para utilizar esta información, pero realizar la actualización correspondiente y agregar valor a la nueva matriz de selección, se realizará un nuevo análisis incluyendo nuevos criterios. Este análisis considera criterios no solo económicos, si no que también, sociales y ambientales, todo esto con el fin de generar una propuesta de ingeniería sostenible. Para que en el futuro, los proyectos no solo sean enfocados en la parte económica, sino que consideren los tres pilares esenciales del desarrollo sostenible. En donde a continuación

Criterios económicos

En este caso, al analizar un elemento que pertenezca a los minerales estratégicos, se busca determinar la posición en el mercado con los diferentes factores a analizar. Los criterios económicos para la matriz de selección son: Precio, riesgo de suministro, incremento de producción y potencial (económico).

Respecto al incremento de la producción, este se determina según el comportamiento que ha experimentado la producción del elemento a analizar en los últimos 10 años, porcentualmente. La producción del elemento analizado podría ir en disminución y poseer un incremento negativo. Por lo que en la Tabla 6. se observan los rangos en que son clasificados para la matriz de selección. Mientras que para determinar el valor del potencial, se necesita conocer la cantidad del elemento de valor dentro del depósito de relave a reprocessar y su precio. El cálculo es el siguiente:

$$\text{Potencial} \left[\frac{\text{USD}}{\text{ton}} \right] = \frac{\text{Precio} \left[\frac{\text{USD}}{\text{kg}} \right] \cdot \text{Fino} [\text{kg}] \cdot \text{Relación} [-]}{\text{Relave} [\text{ton}]}$$
$$\text{Fino} [\text{kg}] = \text{Volumen}_{\text{relave}} [\text{L}] \cdot \text{Concentración} \left[\frac{\text{kg}}{\text{L}} \right]$$
$$\text{Relación} [-] = \frac{\text{Costo de producción}}{\text{Precio elemento}}$$

Es importante mencionar que para el cálculo del potencial es muy relevante considerar el costo y precio de producción de cada elemento, ya que las relaciones no son iguales y pueden afectar el cálculo. Por lo mismo, en el Anexo D. se pueden encontrar valores referenciales de los elementos clasificados como minerales estratégicos, con su precio y costo de producción.

Tabla 6. Criterios económicos en matriz de selección

	Valor asignado			
	1	2	3	4
Precio [USD/kg]	0,0 – 9,9	10,0 – 99,9	100,0 – 999,9	>1000,0
Riesgo de suministro [-]	0,0 – 3,0	3,0 – 6,0	6 – 8,5	8,5 – 10,0
Incremento de producción [%]	> 24,9	25,0 – 49,9	50,0 – 74,9	>75,9
Potencial [USD/ton]	0 – 4,9	5,0 – 9,9	10,0 – 14,9	>15,0

Respecto a los valores asignados, el objetivo es igualar los diferentes factores a números y que así puedan ser comparados por elementos y por criterio. Para efectos de cálculo, lo que se busca es que el elemento con mayor potencial en todos los criterios, posea el valor más alto en la matriz de selección. Por lo que en los criterios económicos, mientras mejor sea el resultado, mayor será el valor asignado. En resumen, (1) es el peor valor asignado y (4) es el mejor valor.

En relación al cálculo del potencial, si bien se observa que la ganancia por tonelada es baja, es importante incluir la concentración del elemento en el relave. Para así dimensionar las oportunidades que hay, sin correr el riesgo de realizar la alta inversión que estos tipos de proyectos requieren. Por lo que, la metodología depende totalmente del valor de concentración que se tenga disponible para el depósito de relave. Esto implica que la inversión del proyecto es muy alta, ya que para poder obtener resultados que sean buenos, confiables y reales se necesita que el muestreo del relave sea completo. En este caso es esencial tener en consideración la teoría de Pierre Gy, ya que lo que se busca con ella es mejorar la precisión del muestro, permitiendo una estimación más precisa de los recursos.

Criterios sociales

Para los criterios sociales, se analizará el impacto del proceso productivo de cada elemento considerado como mineral estratégico. Uno de estos factores es potenciar la igualdad de género en la industria, para ello el porcentaje de equidad de género es analizado en el proceso productivo del elemento. El otro factor considera el impacto del proceso productivo respecto a las emisiones de cualquier tipo en las comunidades. Con ese enfoque, se considera que las emisiones líquidas (RILES), poseen un alcance local, afectando directamente a las comunidades cercanas. Mientras que las emisiones gaseosas, clasificados como gases antropogénicos, poseen un alcance global, por lo que su impacto es menor en las comunidades. Por otro lado, las emisiones que contengan metales pesados, son las con peor puntaje, ya que para los seres humanos son considerados como tóxicos. Dentro de los metales pesados se encuentra arsénico, cadmio, mercurio, plomo. Siendo entonces la matriz de selección para los criterios sociales:

Tabla 7. Criterios sociales en matriz de selección

	Valor asignado			
	1	2	3	4
Igualdad de género [%]	0 -4,9	5,0 – 19,9	20,0 – 49,9	>50,0
Impacto de las emisiones en comunidades	Emisiones de metales pesados	Líquida	Sólida	Gaseosa

En la Tabla 7. los valores asignados para el factor de igualdad de género, indican que mientras mayor sea el porcentaje de equidad de género, será mejor evaluado el elemento. Respecto a las emisiones, se clasificaron según el impacto que generan en las comunidades. En donde emisiones de metales pesados poseen el menor valor (1), las emisiones líquidas, sólidas y gaseosas clasifican de mejor manera (2), (3) y (4) respectivamente.

Criterios ambientales

Mientras que como criterio ambiental, se evaluará el consumo de agua fresca en el proceso productivo de los minerales estratégicos a analizar, junto con la incidencia del daño ambiental frente al cambio climático. Respecto al impacto de consumo de agua, se analizará según la zona en que esté ubicado el depósito de relave a reprocessar y la disponibilidad de agua en esa misma zona. Por el lado del cambio climático, el elemento tiene incidencia en él al aportar en el efecto invernadero en alguna etapa de su proceso productivo.

La principal causa de este son los gases antropogénicos, que son el resultado de actividades humanas. El consumo de energía es la mayor fuente de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, siendo responsable por el 76% de las emisiones globales. Dentro del sector energía, la generación de calor y electricidad es el subsector responsable del 32% de las emisiones. Mientras que el transporte representa el 14% y la industria el 13% y el resto corresponde a la energía domiciliaria. (Ge, Friedrich, & Vigna, 2021) Dentro de los gases de efecto invernadero asociados a la minería, se encuentra el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y vapor de agua (H₂O).

Tabla 8. Criterios ambientales en matriz de selección

	Valor asignado			
	1	2	3	4
Consumo de agua fresca (Nivel de sequía)	Zona de sequía extrema	-	-	Zona de sequía normal
Cambio climático	Si aporta GEI	-	-	No aporta GEI

Para este caso, si el nivel de sequía es extremo en la zona donde está encuentra el depósito, utilizar agua fresca en determinado lugar será más dañino que reprocesar un relave que esté en una zona con nivel de sequía normal. Por lo que, si se encuentra en un lugar de sequía extrema, el valor asignado es (1). Por lado contrario, si el depósito de relave está en una zona con nivel de sequía normal, el valor es (4). Respecto al cambio climático, se asigna el valor (4) al elemento cuando su proceso productivo no genera gases que aporten al efecto invernadero. Mientras que el valor es (1), cuando el proceso productivo si genera gases como CO₂ y CH₄.

Cabe mencionar, que de todos los criterios, los más importantes son los ambientales. Debido a que, hoy en día son los que más influyen en el desarrollo de un proyecto. En Chile, el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) es un instrumento de gestión destinado a la evaluación y predicción de los impactos ambientales que puedan generar los proyectos y actividades que se realizan en el país. Todo proyecto o actividad que sea capaz de generar impacto, solo pueden ser ejecutados mediante la evaluación de este a través de la presentación, según corresponda, de una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o un Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

- **DIA:** Si el proyecto no genera ni presenta ninguno de los efectos, características o circunstancias establecidas en el artículo N° 11 de la Ley 19.300.

- **EIA:** Si el proyecto genera o presenta a lo menos uno de los efectos, características o circunstancias establecidas en el artículo N° 11 de la Ley sobre las Bases de Medio Ambiente (impactos significativos).

El titular de todo proyecto o actividad comprendido en el artículo 10 de la Ley 19.300 debe presentar una Declaración de Impacto Ambiental o elaborar un Estudio de Impacto Ambiental.

En resumen, en Chile, todo proyecto o actividad susceptible de causar impacto ambiental debe ser evaluado mediante la presentación de DIA o EIA, según corresponda. La Ley 19.300 establece los principios y normas para la protección, fomento y desarrollo del medio ambiente, y regula los instrumentos de gestión ambiental. Para que una empresa siga el proceso regido por la Ley 19.300, se deben afectar los artículos N° 10 y N° 11 de la Ley sobre las Bases de Medio Ambiente. En el Anexo E. están disponibles los efectos, características o circunstancias que se establecen en el artículo N° 11 de la Ley 19.300. (BCN, 2023)

También existen los Permisos Ambientales Sectoriales, autorizaciones entregadas por los distintos órganos del estado para desarrollar una actividad en particular, cuyo objetivo es la protección del medio ambiente. Son relevantes para la industria minera, ya que esta puede generar impactos ambientales significativos. (Servicio de Evaluación Ambiental, 2014)

Algunos ejemplos de permisos ambientales sectoriales que se aplican a la industria minera en Chile son:

- Permiso para ejecutar labores mineras en sitios donde se han alumbrado aguas subterráneas en terrenos particulares o en aquellos lugares cuya explotación pueda afectar un caudal o la calidad natural del agua.
- Permiso para la ejecución de labores mineras en lugares declarados parques nacionales, reservas nacionales o monumentos naturales.
- Permiso para la aprobación del plan de cierre de una faena minera.

Si bien los criterios ambientales, abarcan temas relacionados con la huella de carbono y huella de agua. No se habla de estos como tal, debido a que la información no está disponible, no se están midiendo esos valores dentro del alcance de la ingeniería. Debido a que la matriz de selección, como se mencionó anteriormente, es una propuesta de ingeniería sostenible.

Matriz de selección

Una vez explicados todos los criterios que contiene la matriz de selección y cómo funcionará la priorización de elementos de valor sostenible, se observa el resultado en la Tabla 9.:

Tabla 9. Matriz de selección

	Elementos				
	X ₁	X ₂	X ₃	X...	X _n
Precio [USD/kg]					
Riesgo de suministro					
Incremento de producción [%]					
Potencial [USD/ton]					
Criterios económicos					
Igualdad de género [%]					
Impacto de las emisiones en comunidades					
Criterios sociales					
Consumo de agua fresca					
Cambio climático					
Criterios ambientales					
PRIORIZACIÓN					

Es importante mencionar que de los tres criterios planteados, si bien los económicos son la base de la decisión, los ambientales son los que deciden realmente el futuro del proyecto.

Debido a que por más viable que sea un proyecto, si este genera un daño irreversible al medio ambiente, en las situaciones que se encuentra el planeta hoy, simplemente no es posible realizarlo. De hecho, el Artículo 1 de la Ley 19.300 dice lo siguiente:

“El derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental se regularán por las disposiciones de esta ley, sin perjuicio de lo que otras normas legales establezcan sobre la materia.” (BCN, 2023)

A modo de ejemplo, para proyectos que no consideraron lo suficiente los ámbitos ambientales en su desarrollo, se presenta lo sucedido con la ex empresa Biolantánidos, que ingresó al Estudio de Impacto Ambiental (EIA) en diciembre de 2018, en marzo del 2022 se retiró. Esto fue porque los vecinos de las comunidades no aprobaron el proyecto, la consulta ciudadana movilizó a 7.400 personas, en donde el 99% manifestó estar en contra de Biolantánidos. (Placencia, 2022)

Otro ejemplo es el proyecto Dominga, que fue un proyecto minero-portuario que se ubicaría en la Región de Coquimbo, Chile, y que incluía la extracción de concentrados de hierro y cobre. El proyecto ya había sido rechazado en 2017 por dos organismos: la Comisión de Evaluación Ambiental de Coquimbo y el Comité de Ministros del Servicio de Evaluación Ambiental. La razón para el rechazo fueron los riesgos que podría implicar para el ecosistema marino de la zona. En mayo de 2021, la Comisión de Evaluación Ambiental de la Región de Coquimbo aprobó el proyecto. Sin embargo, la aprobación no implica definitivamente la construcción del proyecto, ya que todavía existían recursos pendientes ante la Corte Suprema (BBC News Mundo, 2021). En enero de 2023, el Comité de Ministros deliberó sobre la viabilidad del proyecto minero Dominga y lo rechazó por unanimidad debido a razones técnicas y ambientales, debido a su cercanía al Archipiélago Humboldt, un conjunto de ocho islas e islotes que resguardan uno de los ecosistemas más ricos del mundo. (Diario UChile, 2023)

Por lo tanto, en el contexto actual, la importancia de la licencia social, el desarrollo sostenible y la crisis climática ha adquirido una relevancia fundamental en la planificación y ejecución de nuevos proyectos mineros. La obtención de la licencia social para operar es esencial para garantizar la aceptación y el apoyo de las comunidades locales, las empresas mineras deben comprometerse activamente con las comunidades locales. Respecto al desarrollo sostenible, existen 17 objetivos globales que buscan erradicar la pobreza, proteger al planeta y asegurar la prosperidad para todos, dentro de ellos se encuentra igualdad de género, agua limpia y saneamiento, producción y consumo responsable, acción por el clima. (Naciones Unidas, 2015)

Todos estos son enfoques que se han planteado a lo largo de la matriz de selección, por lo que se puede decir que esta matriz busca el cumplimiento de la sostenibilidad. Para mayor detalle sobre los 17 objetivos de desarrollo sostenible, estos se encuentran en el Anexo F. Por lo tanto, para poder aplicar esta matriz de selección es esencial conocer la caracterización mineralógica del depósito de relave que se esté analizando. Con esa información, se podrá seguir con el diseño de los diagramas de procesos flexibles.

CAPÍTULO 3: DISEÑO DE DIAGRAMAS DE PROCESOS

Para diseñar las diferentes alternativas de diagramas de procesos, es necesario conocer determinada información del depósito de relave a estudiar. Esencial es la caracterización mineralógica, con concentraciones y tamaños, para poder diseñar las fases principales y así recuperar elementos de valor. Estas fases corresponden a las cuatro secciones en que se divide el proceso de reprocesamiento y recuperación de minerales estratégicos a partir de depósitos de relaves, que son, acondicionamiento, separación, selección y purificación del producto. Como se mencionó anteriormente, el objetivo principal de esta memoria es desarrollar una estrategia automatizada para el diseño de procesos de una configuración adaptativa, por lo que algunas etapas consideran variadas opciones de operaciones, con diferentes características, funcionamientos y resultados, que serán descritas a continuación. El objetivo es aumentar la ley de los minerales que sean de interés, lo importante es descartar tempranamente las partículas que no posean valor económico.

El re procesamiento de depósitos de relaves y la recuperación de elementos de valor considera:



Figura 10. Fases generales

elaboración propia

La primera etapa, de acondicionamiento del relave, contiene las etapas de pre-concentración y liberación mecánica. La segunda fase contiene los procesos de separación y liberación química. La tercera fase, de selección, considera la concentración específica de cada elemento y la última fase es de purificación del producto final. Profundizando más en el diseño de los diagramas, en la Figura 11. se aprecia la ruta general que contiene todas las operaciones unitarias siguiendo el mismo orden de fases, que serán ingresadas en el software. Dependiendo de las características de cada operación y del elemento de interés, se selecciona la ruta de procesos para la recuperación de este a partir del relave.

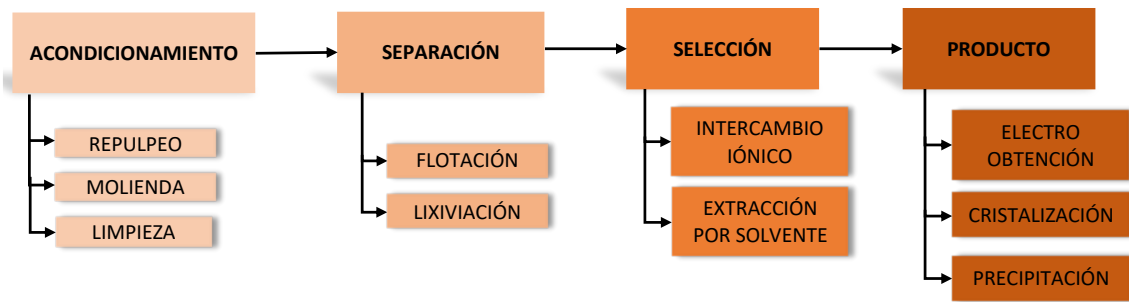


Figura 11. Ruta general

elaboración propia

A continuación, se describe cada etapa que pertenece a la ruta general de los diagramas de procesos, divididas por la fase que corresponde.

Acondicionamiento

La etapa inicial, conocida como pre-concentración, implica el repulpeo de los relaves para formar una pulpa que facilite la recuperación de minerales valiosos. Estos relaves presentan una amplia gama de tamaños (30 [µm] a 250 [µm]) debido a su origen. Al abordar el reprocesamiento de los relaves, es esencial comprender sus características, como tamaño de partícula, composición mineral, ubicación y accesibilidad para la extracción.

Dentro de las operaciones esenciales, se destaca el repulpeo (REP) de los relaves, una etapa crucial para la formación de una pulpa con la adición de agua, que facilita las fases posteriores y agrega valor a este pasivo ambiental minero. El proceso implica la extracción del relave del tranque mediante un cargador frontal, seguido de la alimentación a una tolva y posteriormente a una correa transportadora. Esta correa lleva el material a un Roll Sizer, cuya función es desagregar el relave antes de pasar a un Attrition Scrubber, donde, con la adición de agua y mediante los agitadores, se obtiene la pulpa de relave. (Ormeño Luna, 2008)

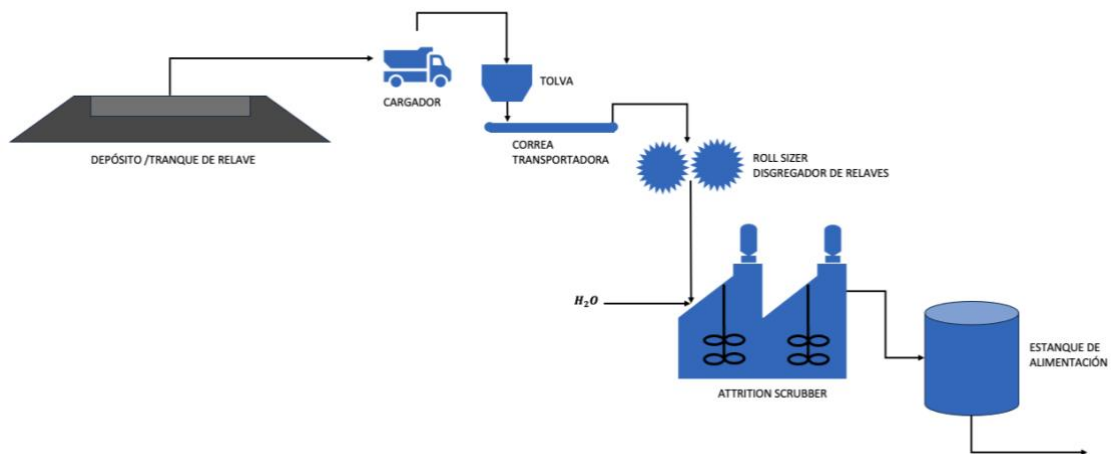


Figura 12. Fase acondicionamiento - Etapa repulpeo

elaboración propia

La eficiencia técnica depende de la etapa siguiente, que es la liberación mecánica, que influye directamente en la etapa de separación. Como se mencionó, los rangos de tamaño son amplios y es importante no trabajar con una gran diferencias de tamaños en las etapas posteriores. Por lo que la etapa de liberación mecánica consiste en diferentes circuitos de molienda. Esta etapa generará una pulpa con tamaños de partícula entre 5 a 30 $[\mu\text{m}]$, dependiendo del circuito que se seleccione.

Para la etapa de molienda, se cuenta con tres opciones: Molienda ultrafina (MOU), Molino de Bolas (MB) o Molino de bolas con clasificación (MBc). Para la primera opción, considera un molino modelo HIGmill. Este molino forma parte de un circuito abierto húmedo. Este circuito tiene el propósito de triturar de manera efectiva la pulpa hasta un tamaño de partícula reducido. El diagrama para molienda ultrafina consta de un ciclón, sumidero de bomba y el molino. Respecto a los rangos de operación del molino, este considera que el 80% de la alimentación (f_{80}) se encuentra entre 60-250 $[\mu\text{m}]$. Mientras que el 80% del producto en tamaño de partícula (p_{80}) corresponde a 5-30 $[\mu\text{m}]$. (Metso Outotec, 2023)

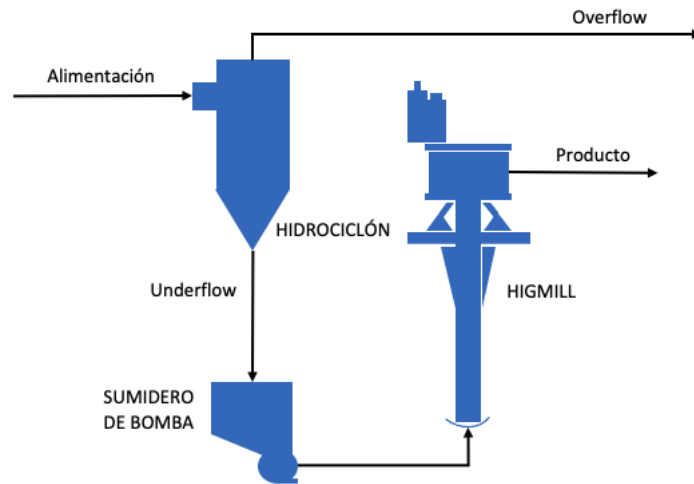


Figura 13. Fase acondicionamiento - Etapa molienda ultrafina (MOU)

elaboración propia

Para la opción de molienda convencional, se considera un molino de bolas en un circuito cerrado directo.

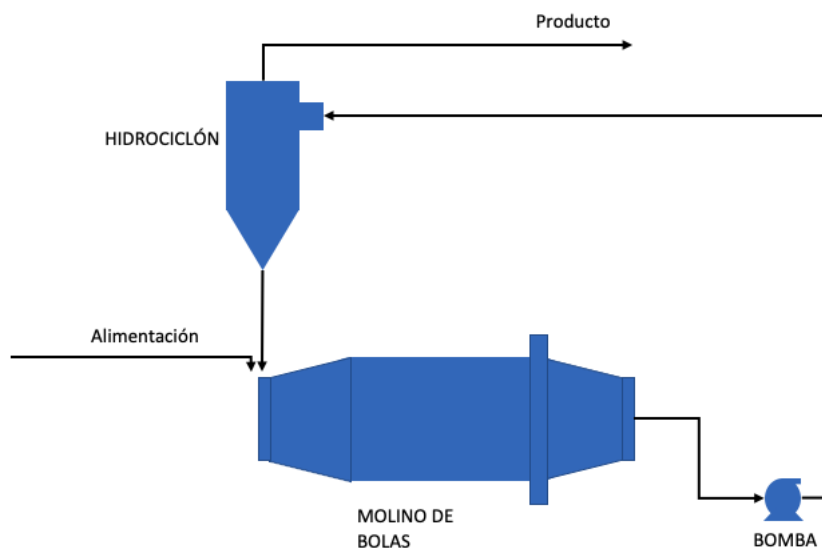


Figura 14. Fase acondicionamiento - Etapa molino de bolas (MB)

elaboración propia

En este circuito la alimentación pasa directamente al molino de bolas y después a un hidrociclón, en donde el overflow es el producto y el underflow recircula al molino de bolas.

La última opción de circuito de molienda contiene como equipos molino de bolas, clasificador e hidrociclón. La alimentación ingresa directamente al clasificador y luego pasa al hidrociclón, en donde el overflow es el producto y el underflow es la alimentación del molino de bolas. Mientras que el producto del molino de bolas pasa nuevamente al clasificador. (JRI Ingeniería S.A., 2020)

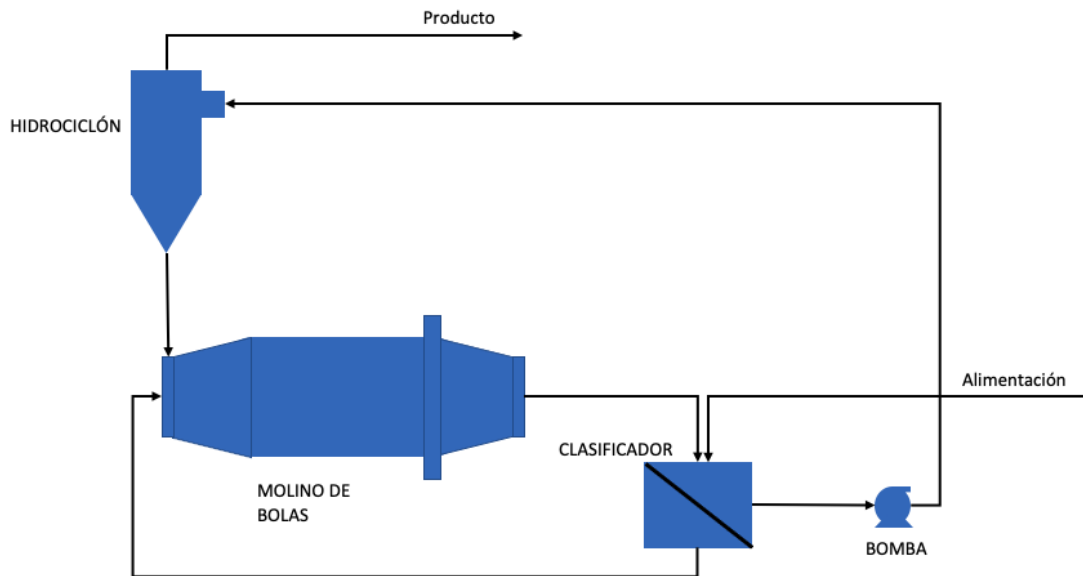


Figura 15. Fase acondicionamiento - Etapa molino de bolas con clasificación (MBC)

elaboración propia

Dentro de la etapa de liberación mecánica, se recomienda utilizar separación magnética, para concentrar minerales que poseen diferencias en su susceptibilidad magnética. La distribución granulométrica es una variable esencial, ya que están ligados a la liberación de las especies de interés (lo cual influye en la intensidad de campo magnético frente al cual reaccionan las partículas) y la gravedad específica.

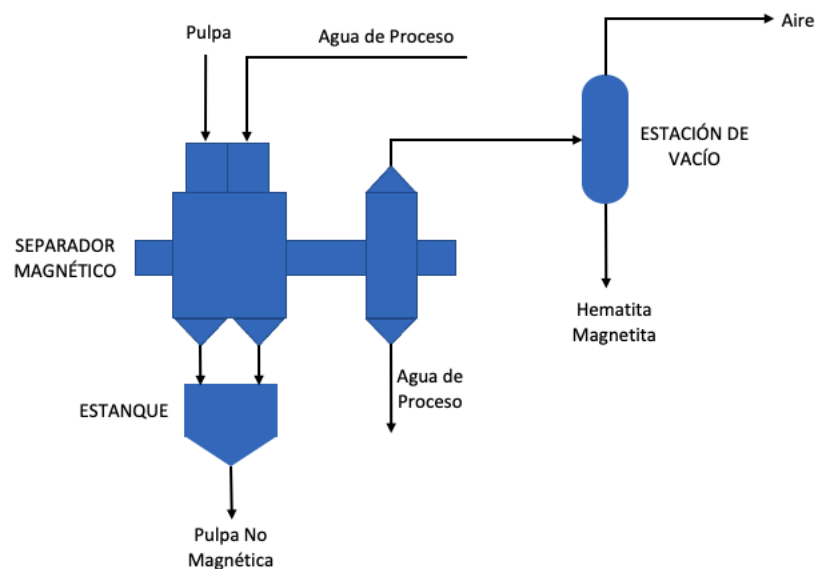


Figura 16. Fase acondicionamiento - Etapa separación magnética

elaboración propia

Al separador magnético, ingresa la pulpa que proviene de algunos de los circuitos de moliendas descritos anteriormente, junto con agua de proceso. En donde la porción magnética de la pulpa entrará en contacto directo con el magneto y luego será extraída por la estación de vacío.

En donde, según los contenidos más comunes de minerales en los relaves, se obtendrá principalmente hematita y magnetita como desecho, debido a que poseen una susceptibilidad magnética mucho mayor que el resto de los minerales en el proceso. Mientras que la porción no magnética de la pulpa, continúa al resto de las operaciones para obtener el elemento de interés. (Metso, 2015)

Separación

Una vez liberado el mineral, se continúa con el proceso de flotación colectiva. En esta etapa se busca concentrar los minerales que sean de interés y eliminar la ganga. La flotación es un proceso heterogéneo, en donde es fundamental considerar las propiedades fisicoquímicas de las superficies de los minerales, la relación entre las fases sólida, líquida y gaseosa, y sus interfases. El uso de reactivos es esencial para poder obtener el comportamiento necesario de las especies presentes en la pulpa. Estas especies de interés interactúan con las burbujas de aire en el equipo, permitiendo concentrar el material valioso y descartando aquel que no lo sea. Cabe mencionar que en esta etapa, se tiene la generación de nuevos relaves, no segregados. Relaves no segregados hace referencia a cuando los relaves no pasan por un proceso de clasificación, siendo depositados sin ser separados por tamaño. En la etapa de separación, se busca disminuir considerablemente la cantidad de masa a procesar para luego pasar a una etapa hidrometalúrgica, que busca obtener los productos de interés, a través de lixiviación, extracción por solvente, intercambio iónico, cristalización, precipitación y/o electro obtención.

Para el proceso de flotación colectiva, las celdas neumática poseen altos valores de eficiencia cuando se trata de reprocesamiento de relaves, debido a su capacidad para operar con tamaños de partículas finas. (JRI Ingeniería S.A., 2020) Cabe destacar que en el proceso de flotación se obtienen residuos, que corresponde a la cola, para tratar estos desechos estos pasan por una etapa de sedimentación. En donde se recupera agua de proceso y los sólidos son dirigidos a botadero.

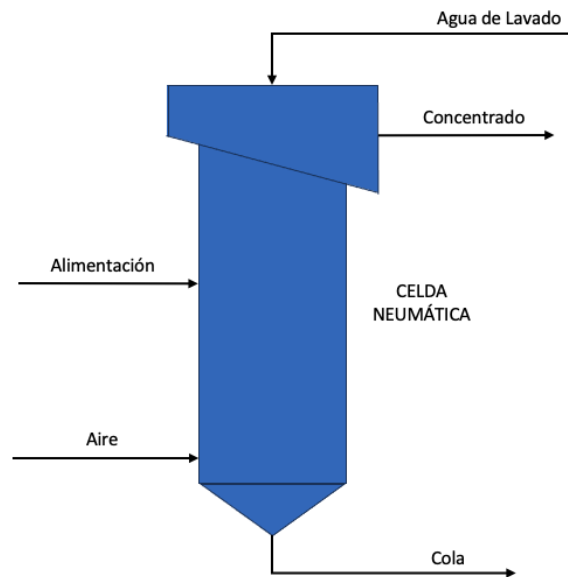


Figura 17. Fase separación – Etapa flotación
elaboración propia

Luego de la flotación, se busca realizar una liberación de especies química, para poder liberar realmente los minerales de interés. Esta liberación se realizará con el proceso de lixiviación, oxidando los elementos presentes en la pulpa con dos opciones, presurizada o atmosférica. Si es lixiviación presurizada, se realiza en un reactor autoclave, en donde sulfuros y óxidos pueden ser lixiviados sin ningún problema. Mientras que si se trabaja con lixiviación atmosférica, solo pueden tratarse óxidos, para que realmente se cumpla el objetivo de esta etapa. Para eso se asume que todos los elementos se encuentran en la fase líquida del proceso para luego ser filtrados y continuar en el proceso de revalorización.

Los equipos necesarios para lixiviación presurizada son: precalentador, reactor a presión, separadores flash de alta y baja presión y un equipo de lavado de gases. El reactor a presión contiene agitadores que permiten homogenizar mejor la mezcla de la pulpa a presión y temperatura alta, con la adición de agua y oxígeno. Del reactor y los separadores flash se obtiene SO_2 como gas tóxico, por lo que este se colecta y pasa por un lavador de gases. (Metso, 2021)

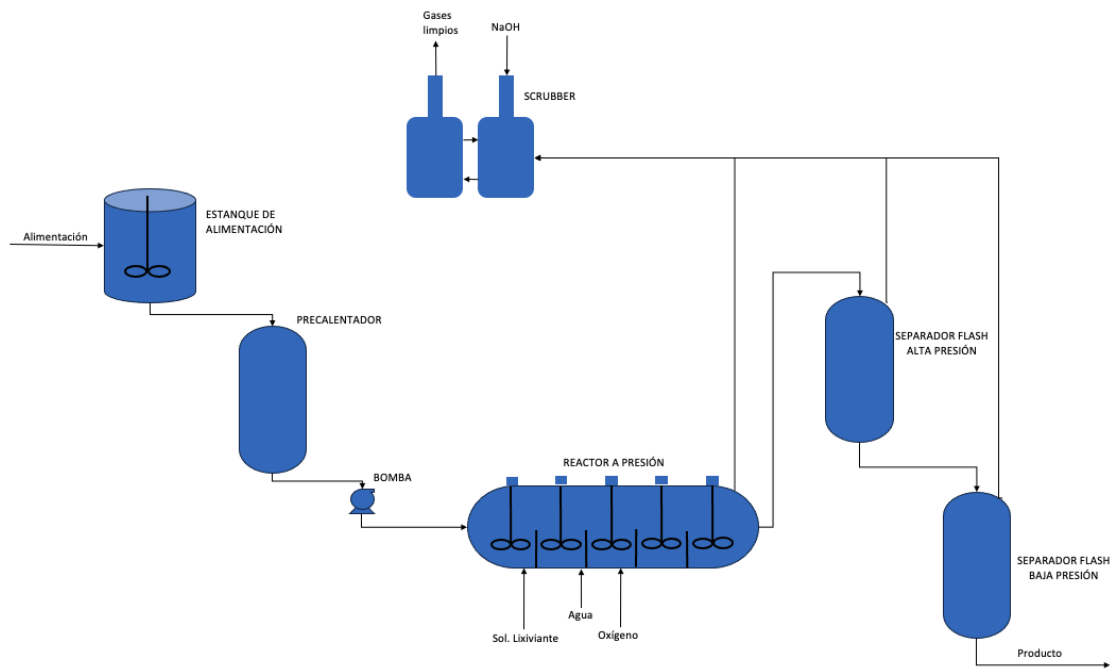


Figura 18. Fase separación – Etapa lixiviación presurizada

elaboración propia

En lixiviación atmosférica se utiliza un tanque agitado, en donde se adiciona la solución lixivante y dependiendo del elemento a recuperar se puede agregar oxígeno como reactivo y así aumentar la eficiencia de la operación. Es importante mencionar para ambos tipos de lixiviación, el producto de ambas pasa directamente al proceso de filtración, para así obtener la conocida PLS (Pregnant Leach Solution) y que luego sea tratada en los siguientes procesos de selección y purificación, con el fin de obtener el elemento seleccionado de interés (JRI Ingeniería S.A., 2020).

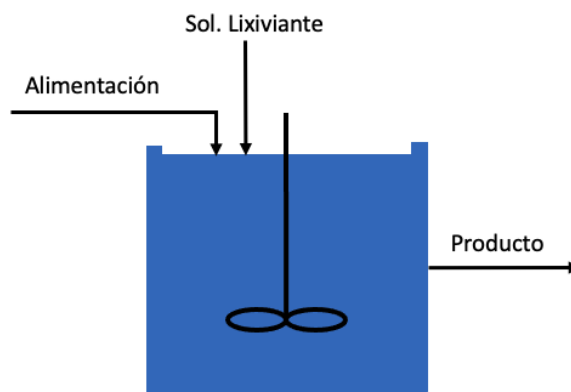


Figura 19. Fase separación – Etapa lixiviación atmosférica

elaboración propia

Selección

Posterior a la liberación química, se continúa con la selección por elemento químico, utilizando extracción por solventes y/o intercambio iónico. Para este caso, el factor de selección se basa en la concentración del elemento de interés en la solución lixiviada.

Si la concentración es alta (>100 ppm), se seleccionará extracción por solvente. En cambio, si se tiene una concentración baja (menor a 100 ppm) se realizará intercambio iónico para la concentración del elemento de interés. La purificación de cada elemento depende de la pureza comercial que se desee obtener, por eso esencial la selección de etapas para tratar estos elementos y así obtener el producto deseado.

Es importante destacar, que el proceso de extracción por solventes por etapas es un proceso utilizado para la extracción mediante vías hidrometalúrgicas de minerales críticos menores, cada proceso debe ser validado por pruebas experimentales, sin embargo, para el caso de los minerales estratégicos, los minerales se obtienen dependiendo de su peso molecular, donde el primero en ser extraído es el con menor peso (Makanyire et al., 2015). Siendo un proceso exitoso para lograr la concentración de minerales menores, con concentraciones bajas, en donde la separación y recuperación de múltiples elementos es fundamental para la viabilidad del proceso.

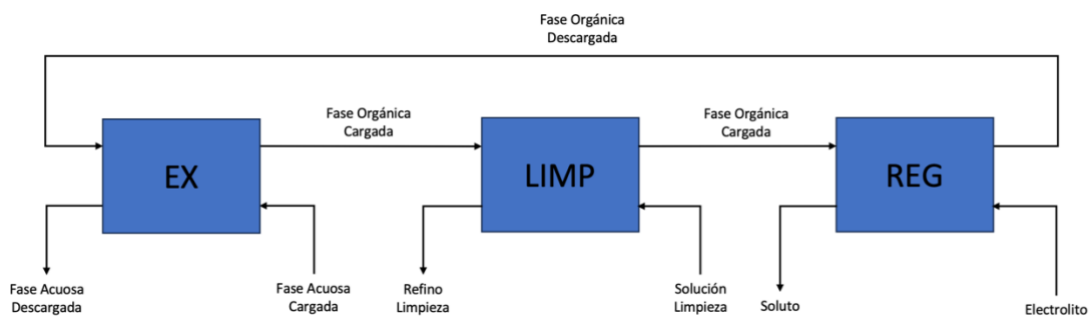


Figura 20. Fase selección – Etapa extracción por solvente

elaboración propia

Para el proceso de extracción por solvente hay tres etapas esenciales, como se observa en la Figura 20. La primera consiste en la extracción del elemento de interés de la fase acuosa (solución lixiviada) a la fase orgánica, que contiene el extractante. La fase orgánica consta de un reactivo orgánico activo cuya estructura está diseñada para extraer selectivamente el ion metálico deseado en un diluyente de hidrocarburo inerte. Transformándose en fase orgánica cargada, que pasa a la segunda etapa. Esta corresponde a una limpieza de la corriente orgánica cargada, para eliminar impurezas que perturben en etapas posteriores de purificación. Mientras que en la tercera etapa, se separa el extractante del elemento de interés. Regenerando la capacidad del extractante y recirculándolo a la primera etapa. (Nicol, 2022)

Para la etapa de intercambio iónico, consiste en un intercambio reversible de iones desde una solución cargada hacia una solución líquida o matriz sólida con contraiones inestables. Estos corresponden a intercambiadores iónicos de uso industrial, con resinas sólidas insolubles que contienen grupos funcionales, de carga positiva o negativa. La carga iónica de los grupos funcionales determinará el tipo de resina que se utilizará. Las resinas de intercambio se clasifican en: Intercambiadores de cationes, que tienen iones móviles cargados positivamente disponibles para el intercambio e intercambiadores de aniones, cuyos iones intercambiables están cargados negativamente. El equipo más utilizado es la columna de intercambio iónica, en su interior contiene la resina que se contacta con un flujo de solución acuosa en forma ascendente o descendente, hasta agotar la capacidad de intercambio. (Treybal, 1997) La Figura 21. muestra los tipos de columnas con los que se trabaja, dependiendo del tipo de resina que se utilice.

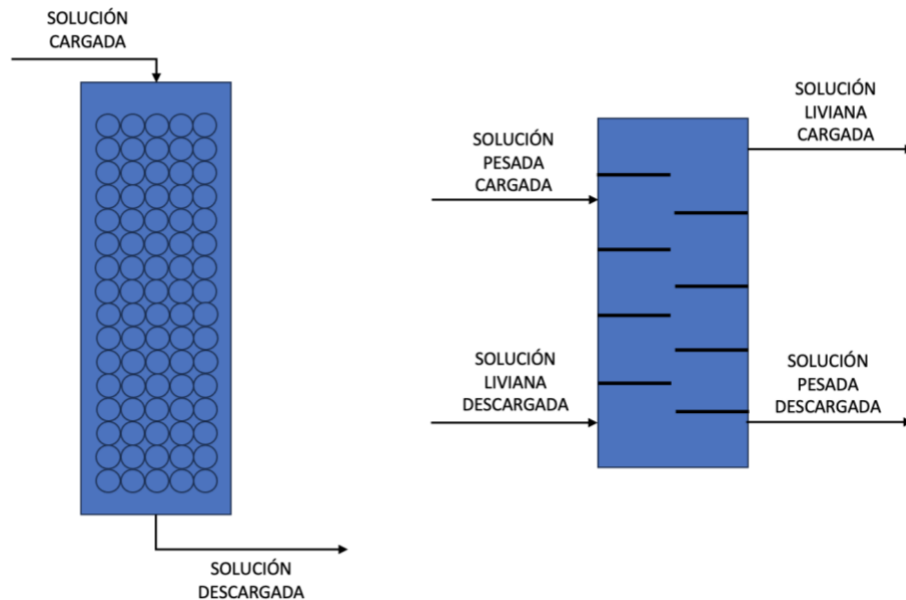


Figura 21. Fase selección – Etapa intercambio iónico

elaboración propia

Importante mencionar que en las operaciones unitarias de extracción por solvente e intercambio iónico se generan residuos industriales líquidos (RILES). Por lo que es necesario considerar el tratamiento de estos, para eso se plantea una etapa que neutraliza estos desechos y además genera la precipitación de sólidos. Por lo que de la etapa de tratamiento de riles se obtiene agua de proceso, que será reutilizada en las diferentes operaciones y además sólidos que se dirigen a botaderos en forma de desecho. (JRI Ingeniería S.A., 2020) Luego de concentrar cada elemento según las necesidades de mercado, este debe ser purificado. Para esta etapa se pueden utilizar los procesos de cristalización, electro obtención o precipitación. Dependiendo de las características del elemento y el producto al que se necesita llegar, serán seleccionadas las operaciones unitarias.

Purificación del producto

Estas tres operaciones se utilizarán para obtener el producto final, para realizar la selección de etapa, se utilizan los siguientes criterios: Si se necesita el elemento en formato de sal, entonces se selecciona cristalización. En cambio, si se necesitan en estado metal, se utiliza precipitación o electro obtención. Para seleccionar entre ambas etapas, depende de la pureza que se requiera en el producto, si se requiere alta pureza, se realiza electro obtención.

En electro obtención, el objetivo de esta operación es recuperar cierta especie metálica a partir de soluciones concentradas del metal en forma de ion a partir de la aplicación de una corriente eléctrica. Este proceso permite recuperar metales en forma pura y selectiva, con purezas del orden de 99,999%.

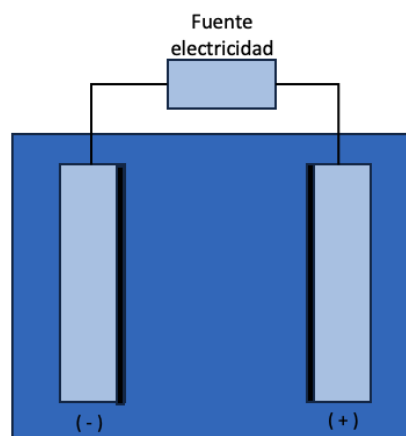


Figura 22. Fase purificación - Etapa electro obtención

elaboración propia

El ion positivo (catión) se reduce en el cátodo, debido a la oxidación del agua en el ánodo. Dependiendo del elemento que se busque capturar es que se define el material de la placa del cátodo y ánodo. Por ejemplo, para la electro obtención del cobre, el cátodo suele ser una placa de acero inoxidable con polaridad negativa, mientras que el ánodo, una placa de aleación Pb/Ca/Sn con polaridad positiva. (Nicol, 2022)

Para las otras dos operaciones, precipitación y cristalización, son procesos similares que se utilizan como técnicas de separación. Ambos procesos implican la formación de un sólido como producto final, pero difieren en la forma y el proceso de formación del sólido. Cuando el producto de la precipitación es un material cristalino que a menudo es el producto final de proceso hidrometalúrgico, la técnica suele denominarse cristalización.

La cinética de los procesos de precipitación y cristalización es compleja, las dos observaciones más importantes que se deben tener en cuenta al describir estos procesos son:

- Se puede exceder la solubilidad normal de cualquier sustancia sin que se produzca un cambio de fase, es decir, las soluciones pueden sobresaturarse.
- La formación espontánea de una fase sólida estable a partir de una solución debe ir acompañada de una disminución de la energía libre.

Estos conceptos son la fuerza impulsora de los procesos de nucleación y crecimiento de cristales, que se detallarán a continuación. Destacar que la cristalización es el proceso de precipitación de cristales de una solución debido a cambios en las condiciones de solubilidad del soluto en la solución. Mientras que en la precipitación, el sólido se forma a partir de una solución sobresaturada que ha superado su punto de saturación.

A medida que aumenta la concentración del soluto, existe una tendencia creciente de que los iones del soluto se asocien entre sí. Estos grupos se forman y se re dispersan constantemente. Si la concentración del soluto aumenta lo suficiente, estos grupos se convertirán en nuevas partículas sólidas estables. Para que se produzca ese proceso espontáneo, conocido como nucleación homogénea, debe producirse una reducción de la energía libre. A medida que aumenta el tamaño del cúmulo, la energía libre neta alcanza un valor máximo conocido como energía libre crítica de nucleación. En el radio crítico del cúmulo hay dos posibilidades y ambas dan como resultado una disminución de la energía libre. El grupo puede encogerse y volver a dispersarse en la solución o continuar aumentando de tamaño formando un núcleo estable.

Una vez que ha ocurrido la nucleación, los núcleos más pequeños pueden reducir aún más su energía libre creciendo hasta alcanzar tamaños mayores. El crecimiento continúa hasta que se elimina la sobresaturación de la solución en equilibrio. Existen dos modos de crecimiento de cristales, crecimiento primario es cuando los cristales existentes aumentan de tamaño y crecimiento secundario cuando las partículas se agregan y se cementan entre sí. El crecimiento primario suele ocurrir cuando hay una gran cantidad de partículas pequeñas que proporcionan un área alta para el crecimiento y una alta difusión de la solución a la superficie de la partícula, ya sea intrínsecamente o por agitación de la suspensión. El crecimiento secundario ocurre cuando hay partículas grandes con una superficie baja que están mal suspendidas en una solución donde hay una mezcla deficiente debido al estancamiento. (Nicol, 2022)

Luego de explicar cada posible etapa que puede formar parte de los diagramas de procesos, el siguiente paso es traspasar esta estrategia y su filosofía al software. Para que este sea capaz de realizar un estudio comparativo de las diferentes opciones de operaciones para cada etapa, identificando el mejor recorrido. En el Anexo H. se observa el diseño de ruta general considerando los criterios. Lo que se espera del software, es que sea capaz de seleccionar automáticamente las etapas que serán necesarias para obtener el elemento, generando todas las combinaciones posibles. Siendo entonces el resultado una ruta de procesos, que además posea buenos valores de costos, en relación con CAPEX y OPEX. Estos costos serán clave para determinar la alternativa de ruta que se decida, los cuales serán determinados utilizando inteligencia artificial, de modo estimativo.

CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE ALGORITMO PARA SELECCIÓN DE RUTA DE PROCESOS

Representación en grafos y nodos para el algoritmo en el modelo de programación

Según lo mencionado anteriormente, una vez definidas todas las rutas con sus operaciones unitarias, esta información debe ingresarse al software. Por lo que, a continuación se muestra el proceso de representación desde diagramas de procesos a diagramas de grafos y nodos y cómo se relacionan para el modelo de programación. De la Figura 23., que considera todos las operaciones unitarias como un diagrama de procesos general, es necesario modificarlo al formato de diagramas de grafo y nodos. Para ello, solo se considerarán las operaciones en donde el elemento de interés es tratado, ya que esa será la línea de enfoque en el modelo de programación.

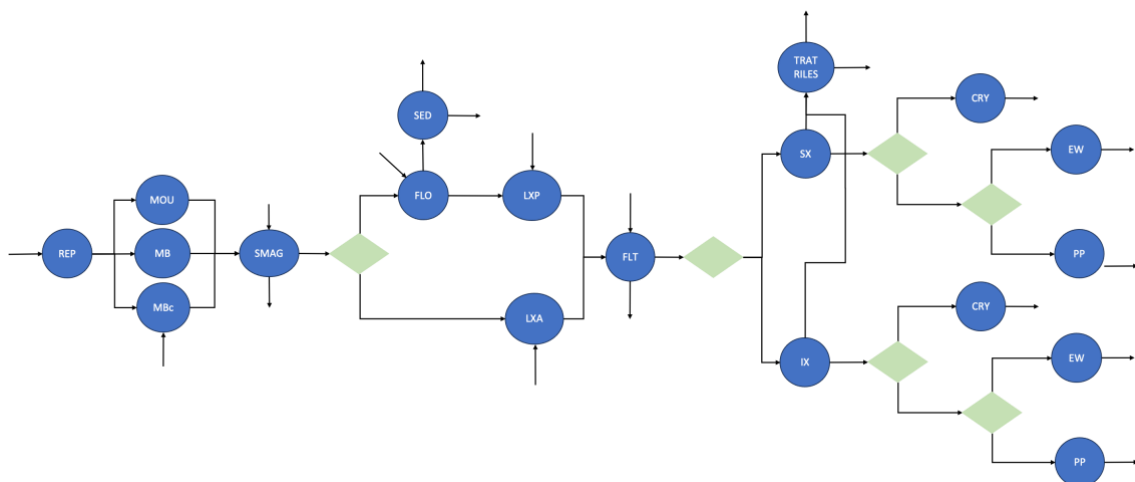


Figura 23. Ruta general en nodos

elaboración propia

Para manejar de manera más fácil los grafos, a cada operación se le asigno un número. En la Tabla 10. se observa el número que se le asignó a cada etapa de la ruta general planteada en la Figura anterior.

Tabla 10. Descripción nodo y sigla

Número nodo	Sigla	Descripción	Fase
0	REP	Repulpeo	Acondicionamiento
1	MOU	Molienda ultrafina	Acondicionamiento
2	MB	Molino de bolas	Acondicionamiento
3	MBc	Molino de bolas clasificación	Acondicionamiento
4	SMAG	Separación magnética	Acondicionamiento
5	-	Criterio	-
6	FLO	Flotación colectiva	Separación
7	LXP	Lixiviación presurizada	Separación
8	LXA	Lixiviación atmosférica	Separación
9	FLT	Filtración	Separación
10	-	Criterio	-
11	SX	Extracción por solvente	Selección
12	IX	Intercambio iónico	Selección
13	-	Criterio	-
14	CRY	Cristalización	Purificación del producto
15	-	Criterio	-
16	EW	Electro obtención	Purificación del producto
17	PP	Precipitación	Purificación del producto
18	-	Criterio	-
19	CRY	Cristalización	Purificación del producto
20	-	Criterio	-
21	EW	Electro obtención	Purificación del producto
22	PP	Precipitación	Purificación del producto

A continuación, se observa el grafo de nodo para la ruta general en la Figura 24., considerando las diferentes etapas y criterios aplicados.

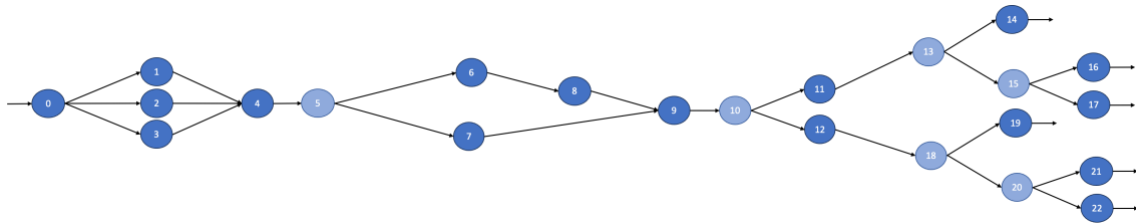


Figura 24. Grafo de nodos ruta general

elaboración propia

Software a utilizar

MATLAB es un software de computación numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado, es utilizado por ingenieros y científicos para analizar y diseñar sistemas y productos. La plataforma de MATLAB está optimizada para resolver problemas científicos y de ingeniería. El lenguaje está basado en matrices, siendo ésta la forma más natural para expresar las matemáticas computacionales. Además, cuenta con una amplia biblioteca de herramientas integradas (Toolboxes) que permiten empezar a trabajar inmediatamente con algoritmos esenciales para su dominio.

Dentro del software se pueden realizar las siguientes actividades básicas: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. MATLAB también dispone de dos herramientas adicionales, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). (MathWorks, 2023)

Para este caso, la herramienta principal para lograr el objetivo de esta memoria, consiste en la utilización de matrices. Esta matriz representa lo mismo que plantea la Figura 24., las entradas y salida de cada fase y etapa. A partir de la matriz, se van generando los diferentes vectores, que representan el recorrido que realiza un elemento de interés por la ruta general. Cabe destacar que se utiliza MATLAB para la implementación de esta estrategia debido a que sus características cumplen con lo que se busca para este trabajo. Puesto que también existe la opción de utilizar otros softwares, ANSYS, por ejemplo. Ambos softwares se utilizan en la ingeniería y ciencia, con una amplia variedad de herramientas y funciones para análisis numérico y la interfaz gráfica de usuario (GUI), que permite a los usuarios interactuar con el software de manera visual.

Sin embargo, MATLAB se enfoca en el análisis numérico y la programación, y ANSYS en la simulación y análisis de elementos finitos. (FinancesOnline, 2018) ANSYS se recomienda para el análisis de estructuras complejas y problemas de ingeniería, mientras que MATLAB es adecuado para el análisis matemático y la programación, que es el objetivo principales de este trabajo. Utilizar el software para que este sea capaz de analizar diferentes rutas con diferentes resultados y valores de CAPEX y OPEX, y que sea capaz de decidir cuál es la alternativa a seleccionar.

Confección de matriz desde grafos y nodos

Lo que es esencial para el algoritmo de programación es la matriz que representa el vector que cada elemento seguirá, es decir, el recorrido por la ruta general. Para generar esa matriz, es necesario conocer bien el diagrama de procesos general. A modo de ejemplo, en la Figura 25., se observa cómo se genera la matriz a partir de los diagramas de grafos y nodos:

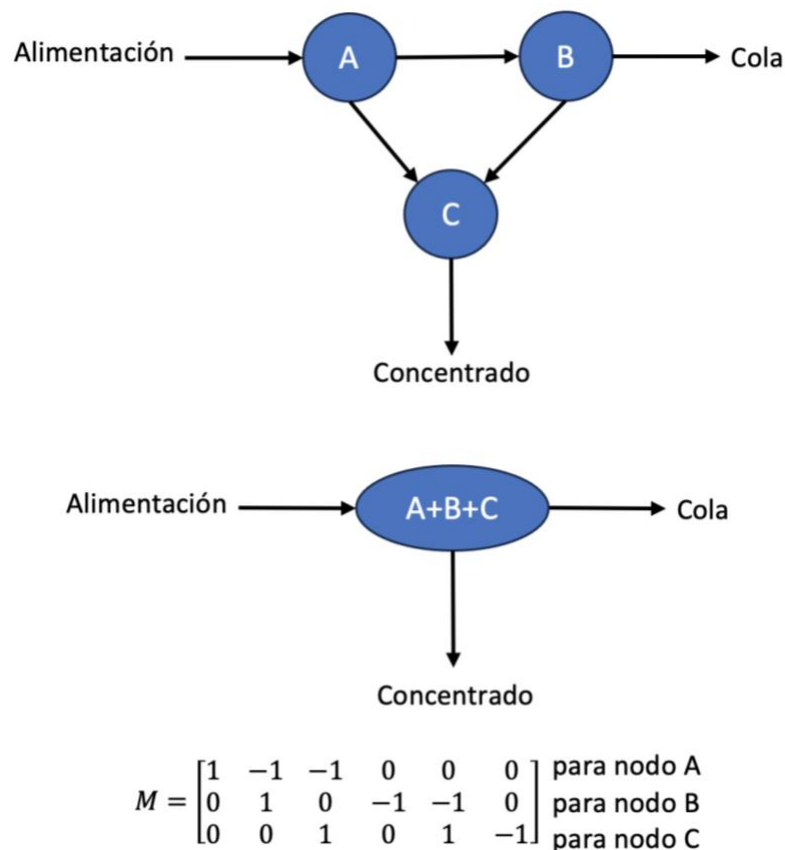


Figura 25. Grafos y nodos a matriz

(Wills, 2016)

Analizando la matriz, esta representa cada corriente de cada nodo, donde 1 significa que esa corriente es una entrada para el nodo, -1 significa que es una salida para el nodo y 0 que la corriente no pertenece a ese nodo.

A modo de ejemplo, el nodo A contiene una corriente de alimentación, que es la primera, porque en la matriz en la posición $i=1$ y $j=1$, se tiene como valor 1. Para la posición $i=1$, y $j=2,3$, son corrientes de salida del nodo A, por lo que el valor es -1. Mientras que para las posiciones restantes, $i=1$, y $j=4,5,6$ no se encuentran esas corrientes en ese nodo, por lo que el valor asignado es 0.

Programar el modelo en MatLab

El objetivo de este algoritmo es predecir, comparar y optimizar el comportamiento de sus procesos, sin el costo ni el riesgo de llevarlos a cabo, haciendo posible la representación de los procesos, recursos, productos y servicios en un mismo modelo. Este tiene la capacidad de considerar complejas actividades interrelacionadas y proyectarlas a través de muchas combinaciones alternativas en cuestión de segundos, teniendo un gran número de escenarios y de posibles resultados. La estrategia consiste en una especie de retroalimentación continua, ya que cuando se actúa sobre un determinado sistema, se obtiene continuamente información sobre los resultados de las decisiones tomadas, información que será utilizada para las decisiones sucesivas que se deben tomar, hasta formar el vector de recorrido final para el elemento.

Un proceso se define como una serie de actividades lógicas relacionadas secuencialmente que toma una *entrada* de un suministro, le añade valor y produce una *salida*. El paso esencial para comenzar con el análisis del proceso fue la representación de este. Se refiere a la construcción del diagrama de bloques o diagramas de procesos, otorgando una visión rápida y simple del proceso. Cabe mencionar que el método que en este caso se utiliza corresponde al analítico. Este está basado en técnicas asociadas a la teoría de colas, consistiendo esencialmente en nodulos ensamblados entre sí en una red multinivel. (Fullana Belda & Urquia Grande, 2009)

Para la elaboración e implementación del algoritmo es necesario determinar las necesidades del modelo. Que a lo largo de los capítulos se han ido identificando, siendo la más importante la caracterización mineralógica del relave a estudiar. Para ello, se generó una planilla en Microsoft Excel como herramienta para el almacenamiento de la información de alimentación del relave. La planilla se divide en hojas, con el siguiente contenido en cada una de ellas:

- **Nomenclatura:** Hoja para identificar variables utilizadas en la planilla, con su definición y unidad de medida.

- **Equipos:** Hoja en donde se especifica cada operación, por su sigla correspondiente (diagramas de grafos y nodos) y la información relevante. Como condiciones de operación, flujo, costo de operación, energía necesaria y factor de separación.
- **Datos minerales:** Esta hoja fue creada para indicar las condiciones de operaciones de cada elemento, según la operación en la que se encuentre, se indican valores de tamaño de partícula de alimentación y producto, pH, temperatura, presión, densidad, concentración, reactivos que se utilizan, etc.
- **Reactivos:** Se definen los valores de costo [USD/ton], la dosis que se utiliza y su función en la operación en que se utiliza.
- **Alimentación:** En esta hoja se encuentran información correspondiente a la caracterización mineralógica del relave que se está analizando, lista para ser ingresada al software y que sea de fácil análisis. Se encuentran datos como flujo a reprocesar, densidad del relave, porcentaje de sólidos, tamaños de partículas, especies minerales que se encuentran, con el porcentaje en peso y liberación.

Los factores de separación (split factor) se utilizan para determinar la separación de una corriente en una operación específica, siempre enfocado en la ruta que sigue el elemento de interés. Es necesario mencionar que la información utilizada para las condiciones de operaciones son valores referenciales, para poder entregar referencias y estimaciones. Lo que se busca con el software es que este sea capaz de realizar todas las combinaciones posibles, utilizando cada ruta disponible y que al final, la mejor ruta sea que la que posea mejores valores de capex y opex. Se decidió trabajar con esta planilla, ya que lo interesante del programa es que sea simple de interactuar para cualquier persona que la necesite o desee utilizar.

Verificación y validación del modelo

El modelo se encuentra validado, por un especialista en diseño de procesos. Todas las operaciones planteadas siguen una línea de proceso, que es coherente para lo cual se plantea, la recuperación de elementos de valor a partir de relaves mineros. Al momento de realizar la validación, se presentó el trabajo completo y se recibieron sugerencias respecto a la matriz de selección. Originalmente esta contenía ponderaciones por criterio, el razonamiento detrás de esto era para otorgar una mayor importancia a los criterios ambientales. Ya que como se mencionó anteriormente, estos en la actualidad poseen un mayor peso en el futuro de un proyecto, si este daña o genera un impacto en el medio ambiente o comunidades, es muy probable que no sea posible llevarlo a cabo.

Por lo que, en un principio, para entregar una mayor importancia a los criterios ambientales, cada criterio poseía una ponderación, que corresponden a las que se observan en la Tabla 11. Con el proceso de verificación se llegó a la conclusión que, los criterios de ambientales tienen dos opciones, permiten el proyecto o lo cancelan. Por lo que la ponderación otorgada no representa completamente la importancia de ellos, y no aporta realmente al desarrollo de la matriz. Los resultados que se obtienen con ponderación o sin ponderación, son esencialmente los mismos, un 10% no genera mayor cambio en los puntajes finales. Sin embargo, la ruta de procesos planteada y la metodología indicada para transformar de diagramas de procesos a resultados obtenidos por MATLAB fue aprobada.

Tabla 11. Ponderación criterios en matriz de selección

	Criterios		
	Económicos	Sociales	Ambientales
Ponderación [%]	30	30	40

Por lo mismo, es que se modificó el polinomio de evaluación de la matriz. Como anteriormente se consideraba diferente ponderación para los criterios, el polinomio era el siguiente:

$$\sum C.Económicos + C.Sociales + C.Ambientales$$

Sin embargo, con la validación se modificó el valor de los criterios sociales y ambientales. Funcionando como potenciadores o multiplicadores. Debido a que si no se cumplen, el elemento queda descalificado automáticamente. Siendo entonces el polinomio final de evaluación:

$$\sum (C.Económicos) \cdot C.Sociales \cdot C.Ambientales$$

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

Para finalizar, se repasará el proceso que se siguió a lo largo de este trabajo para cumplir con todos los objetivos. El primer paso necesario para definir la dirección de los objetivos, fue identificar el problema a resolver. En este caso, la problemática es la cantidad de minerales estratégicos que se encuentran en los depósitos de relaves, y cómo a la vez estos van en aumento, aumentando también la cantidad de desechos mineros. Estos desechos irán en aumento, ya que los valores de ley de cobre van disminuyendo a medida que se va extrayendo desde los yacimientos, causando que se procesen mayores cantidades de mineral, creciendo también la cantidad de relaves.

Siendo entonces el objetivo principal, el desarrollo de estrategia automatizada para el diseño de procesos y selección de elementos críticos desde relaves mineros. Con el objetivo definido, se estructuró el plan de trabajo y los pasos a seguir. Comenzando por crear la matriz de selección, para que con los resultados de ella se pudieran diseñar los diagramas de procesos y estos ser traspasados al algoritmo de programación para MATLAB. Por lo que primero se trabajó la metodología para la matriz de selección, creando una nueva versión que incluye criterios sociales y ambientales, con el fin de potenciar el desarrollo sostenible en futuros proyectos.

A modo de ejemplo, se aplicó la matriz de selección a a cuatro elementos estratégicos presentes en el depósito de relave de la Minera Carola. La matriz se aplica sólo a estos cuatro elementos, ya que estos fueron seleccionados de la matriz de la memoria de Tabatha Chávez. El desarrollo de esta matriz de selección observada en la Tabla 12. se encuentra en el Anexo G.

Tabla 12. Ejemplo matriz de selección

	Elementos			
	Ge	Cu	Co	Ga
Precio [USD/kg]	4	1	2	3
Riesgo de suministro	3	2	3	3
Incremento de producción [%]	1	1	2	2
Potencial [USD/ton]	4	4	1	3
Criterios económicos	12	8	8	11
Igualdad de género [%]	2	2	3	2
Impacto de las emisiones en comunidades	2	1	2	4
Criterios sociales	4	3	5	6
Consumo de agua fresca	4	4	4	4
Cambio climático	4	1	4	1
Criterios ambientales	8	5	8	5
PRIORIZACIÓN	384	120	320	330

Después se diseñaron los diagramas de procesos y las diferentes alternativas de rutas, y luego se explicó la transición de diagramas de procesos a diagramas de grafos y nodos. El paso siguiente consistió en la elaboración del algoritmo, llevando todo lo diseñado anteriormente (diagramas de procesos y diagramas de grafos y nodos) al software elegido, MATLAB. Respecto a los resultados obtenidos, como se mencionó anteriormente, el software realiza todas las combinaciones posibles de acuerdo a la información de cada operación que posea.

Donde cada etapa pertenece a una fase respectiva, por lo que la idea de vector principal es la que se observa en la Tabla 13:

Tabla 13. Vector principal software

VECTOR PRINCIPAL					
ACONDICIONAMIENTO, SELECCIÓN, SEPARACIÓN, PURIFICACIÓN					
FASE	ETAPAS				
ACONDICIONAMIENTO	REP	MOU	MB	MBC	SMAG
SEPARACIÓN	FLO	LIXP	LIXA		
SELECCIÓN	SX	IX			
PURIFICACIÓN DEL PRODUCTO	EW	CRY	PP		

Por lo que el software realizó todas las combinaciones posibles, considerando que para algunas etapas existen diferentes condiciones de operación, obteniendo así las siguientes combinaciones a modo de ejemplo:

```
"REP1" "MOU" "FLO" "LXP" "IX2" "SXM" "CRY"
"REP2" "MB" "SMAG" "LXA" "---" "---" "EW"
"REP1" "MBC" "---" "LXP" "IX2" "SXM" "PP"
"REP2" "---" "FLO" "LXA" "---" "---" "CRY"
"REP1" "MOU" "SMAG" "LXP" "IX2" "SXM" "EW"
"REP2" "MB" "---" "LXA" "---" "---" "PP"
"REP1" "MBC" "FLO" "LXP" "IX2" "SXM" "CRY"
"REP2" "---" "SMAG" "LXA" "---" "---" "EW"
"REP1" "MOU" "---" "LXP" "IX2" "SXM" "PP"
"REP2" "MB" "FLO" "LXA" "---" "---" "CRY"
"REP1" "MOU" "---" "LXP" "IX2" "SXM" "PP"
"REP2" "MB" "FLO" "LXA" "---" "---" "CRY"
"REP2" "---" "---" "LXA" "---" "---" "PP"
"REP1" "MOU" "FLO" "LXP" "IX2" "SXM" "CRY"
"REP2" "MB" "SMAG" "LXA" "---" "---" "EW"
"REP1" "MBC" "---" "LXP" "IX2" "SXM" "PP"
"REP1" "MBC" "SMAG" "LXP" "IX2" "SXM" "EW"
"REP2" "MB" "SMAG" "LXA" "---" "---" "EW"
"REP1" "MBC" "---" "LXP" "IX2" "SXM" "PP"
```

Se obtuvo un total de 567 combinaciones, en donde ese valor será todas las rutas por las que el elemento que se recupere del relave será evaluado, analizando en cada combinación los resultados estimados de capex y opex.

Respecto a la validación, las sugerencias recibidas respecto a la matriz de selección, generaron modificaciones en la matriz final. Se eliminaron las ponderaciones, ya que se concuerda que los criterios ambientales poseen un impacto binario en un proyecto (permitirlo o cancelarlo), por lo que la ponderación no refleja su importancia real. El polinomio de evaluación fue modificado también con la validación, pasando de una sumatoria a considerar los criterios sociales y ambientales como potenciadores. Sin embargo, la ruta de procesos propuesta y la metodología para traducir los diagramas de procesos a resultados en MATLAB fueron aprobadas.

Finalmente, el aporte que se busca realizar con esta estrategia automatizada, es potenciar la revalorización de los desechos mineros y el análisis de posibles escenarios sin correr el alto riesgo de llevar a cabo un proyecto sin el estudio previo. El objetivo de la matriz de selección es la priorización de elementos considerados como minerales estratégicos dentro de un determinado depósito de relave, pero también es una herramienta que busca potenciar el desarrollo sostenible de proyectos. Que estos logren considerar todos los ámbitos al momento de crear nuevos proyectos, que cuiden al planeta y a los seres que habitan en él, sin dejar rastros o daños para el futuro.

Respecto al alcance de los resultados obtenidos, es importante mencionar que estos corresponden a un nivel de ingeniería conceptual. Durante el desarrollo de un proyecto, este se divide en tres fases: ingeniería conceptual, ingeniería básica e ingeniería de detalle. Las primeras fases consisten en analizar el problema y definir las soluciones, mientras que la última consiste en la descripción detallada de las soluciones planteadas en las fases anteriores, para que estas sean llevadas a la realidad. La fase de ingeniería conceptual consiste en identificar la variabilidad de un proyecto, técnica y económica. (Coll, 2018) Se basa en un estudio de viabilidad y en la determinación de los requerimientos del proyecto, que es lo realizado por el software. El análisis de miles de combinaciones, con sus costos estimativos de costos de capital (capex) y costos de operación (opex), con un alto valor de incertidumbre.

CONCLUSIONES

A modo de conclusión, de acuerdo con el primer objetivo específico, se logró la creación de una matriz de selección adaptada a características mineralógicas y tendencias de mercado, que considera ámbitos sociales y ambientales. Con el proceso de confección de la matriz y la validación de esta, se concluye que de todos los criterios, los aspectos ambientales hoy en día poseen mayor peso en la decisión de aprobación de proyectos industriales. Considerando todos los indicadores que se analizan en cada criterio, todos van dirigidos al desarrollo sostenible de proyectos futuros. Con todos esos criterios analizados, la matriz es capaz de seleccionar a los elementos con mayor valor en los resultados, lo cual indica que poseen una buena respuesta frente a los criterios aplicados, cumpliendo con el desarrollo sostenible, es decir, con ámbitos económicos, sociales y ambientales.

Una vez diseñada la matriz de selección se comenzó con el diseño de diagramas de procesos. La mayoría de los procesos planteados se clasifican como hidrometalúrgicos. No se plantean operaciones clasificadas como pirometalúrgicos, debido a que la tendencia es evitarlos, por las restricciones ambientales que presentan. Por lo que, cumpliendo con el segundo objetivo específico, se integran metodologías para propuestas de procesos y diseño de ingeniería, incluyendo el cálculo estimativo de capex y opex.

Con el diagrama de procesos general diseñado, se genera el diagrama de grafos y nodos para crear la matriz que describe el vector de cada elemento a recuperar. Este vector es el que genera el software, con 567 combinaciones y el algoritmo debe ser capaz de seleccionar la mejor opción mediante la evaluación económica y entregar el diagrama de proceso de la mejor alternativa para el relave. Mediante la validación, se verificaron los criterios de selección de elementos y la asignación de ponderación mediante estudio de caso y expertos en diseño de procesos.

Finalmente, se demuestra la capacidad adaptativa del software a múltiples configuraciones en proyectos mineros, en función de la información ingresada desde planilla simplificada, basado en matriz de elementos.

RECOMENDACIONES

Como primera recomendación, para lograr utilizar el software de manera correcta, se necesita información de relaves que sea fidedigna, con un muestreo adecuado. Puesto que, como se mencionó anteriormente, el alcance corresponde a ingeniería conceptual. La siguiente fase de ingeniería, corresponde a nivel básico, que considera pruebas de laboratorio y muestras del relave que se analizará. De esta manera, se podría obtener toda la información necesaria para poder determinar las especies presentes, con tamaño de partícula y liberación. Pudiendo ingresar información de ingeniería básica al programa.

Respecto a los datos geoquímicos otorgados por el SERNAGEOMIN, se recomienda verificar la forma en que se realiza el muestro. Ya que esto afecta directamente en los resultados que se obtienen, como menciona la teoría de Pierre Gy. En donde, para cada elemento se debe realizar una muestra diferente, ya que esta pasará por experimentos diferentes. Lo mismo sucede con el catastro de depósitos de relaves, con información incompleta y dificulta lograr un conteo preciso de la cantidad de depósitos que hay, con su tonelaje y volumen real. Se sugiere también, ampliar la cantidad de variables estudiadas, tales como tamaño de partícula y liberación, otorgaría mayores facilidades para estudiarlos y así promover su revalorización. Hoy en día, existen herramientas que permiten analizar mineralógicamente muestras, permitiendo conocer al máximo las características de la muestra, y así poder trabajar con esos datos.

Como recomendación, se plantea analizar subproductos tales como escoria y/o polvos de función como alternativa de fuente de recuperación de minerales estratégicos. Si bien existen diferentes características de alimentación para el software, esto no afecta en el desarrollo de la estrategia. Puesto que el software es indiferente a lo que se analice, sea relave, o escoria. Lo importante del software es poder analizar y decidir una ruta, respecto a la información de entrada y al producto que se desea llegar, considerando siempre los costos de capital y de operación.

Además, debido a que los cálculos de costos de capital y operación son realizados de forma estimativa, se recomienda también que la evaluación económica debiese pasar por un proceso de validación con expertos en el tema.

REFERENCIAS

- Baritto, M., Oni, A. O., & Kumar, A. (Agosto de 2022). *The development of a techno-economic model for the assessment of vanadium recovery from bitumen upgrading spent catalyst*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622019795>
- BBC News Mundo. (Agosto de 2021). *Dominga*. Recuperado el Octubre de 2023, de BBC New Mundo: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-58189099>
- BCN. (Septiembre de 2023). *Ley 19300*. Recuperado el Octubre de 2023, de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667&idVersion=2023-09-06>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (Noviembre de 2011). *Ley 20551*. Recuperado el Junio de 2023, de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1032158>
- BSG Institute. (2015). Teoría de muestreo de Pierre Gy.
- Castor, S. B., & Hedrick, J. B. (2006). Rare Earth Elements. En *Industrial Minerals and Rocks* (págs. 769 - 788).
- Chavez, T. (2017). *Diseño de proceso para la extracción de minerales estratégicos a partir de pasivos ambientales mineros*. Valparaíso.
- Claussen, P., Zuñiga, E., Diaz, B., & Fernandez, B. (2019). *Plan Nacional de Depósito de Relaves para una Minería Sostenible*. Recuperado el Junio de 2022, de Ministerio de Minería.
- Coll, X. (Febrero de 2018). *La definición de ingeniería conceptual e ingeniería básica*. Recuperado el Octubre de 2023, de Interempresas.
- Comisión Chilena del Cobre. (2016). Situación actual del mercado de tierras raras y su potencial en Chile.
- Diario UChile. (Enero de 2023). *Abogada de Oceana y rechazo a minera Dominga*. Recuperado el Octubre de 2023, de Diario UChile: <https://radio.uchile.cl/2023/01/18/abogada-de-oceana-y-rechazo-a-minera-dominga-es-evidente-que-este-proyecto-no-se-evaluo-de-forma-correcta/>
- European Commission. (2020). Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study.
- European Commission. (2020). Study on the EU's list of Critical Raw Materials.
- European Commission. (2023). *Critical raw materials*. Recuperado el Junio de 2022, de European Commission: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en

- European Commission. (Julio de 2022). *Raw Materials Information System*. Recuperado el Julio de 2022, de EU SCIENCE HUB: <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=crm-list-2020-e294f6>
- FinancesOnline. (Octubre de 2018). *Compare MATLAB vs ANSYS DesignModeler*. Recuperado el Octubre de 2023, de FinancesOnline: <https://comparisons.financesonline.com/matlab-vs-ansys-designmodeler>
- Fullana Belda, C., & Urquia Grande, E. (2009). *Los modelos de simulación: una herramienta multidisciplinar de investigación*. Universidad Pontificia de Comillas.
- Garagay, J., & Jerez, S. (Febrero de 2021). *El 60% de los relaves abandonados de Chile se concentra en la IV región*. Recuperado el Julio de 2023, de El desconcierto: <https://www.eldesconcierto.cl/medio-ambiente-y-naturaleza/2021/02/16/el-60-de-los-relaves-abandonados-de-chile-se-concentra-en-la-iv-region-vacio-legal-impide-fiscalizacion-del-sernageomin.html>
- Ge, M., Friedrich, J., & Vigna, L. (Septiembre de 2021). *Cuatro gráficos que explican las emisiones de efecto invernadero por país y por sector*. Recuperado el Septiembre de 2023, de WRI México: <https://wrimexico.org/bloga/cuatro-graficos-que-explican-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-por>
- Hoyos Mondragon, E. A., & Cieza Castillo, M. R. (2020). *Estudio de prefactibilidad de la instalación de una planta de producción de Antimonio a partir de concentrado de Estibina*. Escuela Profesional de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias, Lambayeque.
- JRI Ingeniería S.A. (2020). Manual de uso público. *Reprocesamiento de relaves y recuperación de elementos de valor*. Santiago, Chile.
- Lanuza, E. (Agosto de 2022). *Copper all-in sustaining cost jumps 16.2% YOY in 2021, margins double*. Recuperado el Octubre de 2023, de S&P Global: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/research/copper-all-in-sustaining-cost-jumps-16-percent-yoy-in-2021-margins-double>
- Makanyire, T., Sanchez-Segado, S., & Jha, A. (Diciembre de 2015). Separation and recovery of critical metal ions using ionic liquids. United Kingdom.
- MathWorks. (2023). *Descripción del producto MATLAB*. Recuperado el Septiembre de 2023, de https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html
- Metso. (2015). *High Gradient Magnetic Separators (HGMS)*. Recuperado el Septiembre de 2023, de Metso: https://www.metso.com/globalassets/saleshub/documents---episerver/hgms-brochure-en_lr.pdf

- Metso. (Diciembre de 2021). *Beginners guide to hydrometallurgical Autoclave processes*. Recuperado el Julio de 2023, de Metso: <https://www.metso.com/insights/blog/mining-and-metals/beginners-guide-to-hydrometallurgical-autoclave-processes/>
- Metso Outotec. (Enero de 2023). *Molino de alta intensidad HIGmill*. Recuperado el Septiembre de 2023, de Metso: https://www.metso.com/globalassets/industry-pages/mining-industry-pages/comminution/grinding/higmill-leaflet-4459-en_hires.pdf
- Minera Biolantánidos. (Noviembre de 2018). Capítulo 2: Descripción del proyecto o actividad. *Estudio de Impacto Ambiental: Proyecto Biolantánidos*. Santiago, Chile.
- Minera Valle Central S.A. (2019). *Quiénes Somos*. Recuperado el Julio de 2022, de MVC: <https://mineravallecentral.cl/quienes-somos/>
- Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Obtenido de Naciones Unidas: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Nicol, M. (2022). *Hydrometallurgy Practice* (Vol. 2). Elsevier.
- Ojeda-Pereira, I. (Abril de 2022). *Relaves mineros bajo cambio climático*. Recuperado el Julio de 2023, de Ciper Chile: <https://www.ciperchile.cl/2022/04/13/relaves-mineros-bajo-cambio-climatico-gestion-de-riesgo-de-desastres-gobernanza-e-innovacion/>
- Ormeño Luna, H. R. (2008). Evaluación del uso de finos en pilas de lixiviación dump para tratar el tranque de relaves Compañía Minera Zaldívar. Antofagasta, Chile.
- Placencia, F. (Marzo de 2022). *En Penco celebran que la minera exBiolantánidos desista de sacar tierras raras*. Recuperado el Agosto de 2023, de Diario Concepción: <https://www.diarioconcepcion.cl/ciudad/2022/03/25/en-penco-celebran-que-la-minera-exbiolantánidos-desista-de-sacar-tierras-raras.html>
- Portal Minero. (Julio de 2014). *Codelco y LS-Nikko anuncian Planta Recuperadora de Metales en Mejillones*. Recuperado el Octubre de 2023, de Portal Minero: <https://www.portalminero.com/display/NOT/2014/07/08/Codelco+y+LS-Nikko+anuncian+Planta+Recuperadora+de+Metales+en+Mejillones>
- Quilodran Cortes, C. A. (Septiembre de 2021). Distancia peligrosa tranque de relaves Las Palmas. Santiago, Chile.
- SERNAGEOMIN. (Octubre de 2022). *Datos Públicos Depósito de Relaves*. Recuperado el Mayo de 2023, de Servicio Nacional de Geología y Minería: <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- SERNAGEOMIN. (s.f.). *Depósito de Relaves*. Obtenido de Servicio Nacional de Geología y Minería: <https://www.sernageomin.cl/deposito-de-relaves/>
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (Abril de 2007). *Decreto Supremo N°248*. Recuperado el Junio de 2022

- Servicio de Evaluación Ambiental. (2014). *Permisos y pronunciamientos ambientales sectoriales*. Recuperado el Octubre de 2023, de Servicio de Evaluación Ambiental.
- Statista Research Department. (Octubre de 2023). *Average lithium carbonate price from 2010 to 2022*. Recuperado el Noviembre de 2023, de Statista.
- Treybal, R. E. (1997). *Operaciones de Transferencia de Masa* (2 ed.).
- U.S. Geological Survey. (Enero de 2020). *Barite*. Recuperado el Noviembre de 2023, de <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-barite.pdf>
- Wills, B. A. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology* (8ª ed.). Oxford, United Kingdom.
- Yao, S. (Julio de 2022). *Nickel industry margins surged in 2021 amid stronger nickel prices*. Recuperado el Noviembre de 2023, de S&P Global: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/research/nickel-industry-margins-surged-in-2021-amid-stronger-nickel-prices>

ANEXOS

Anexo A. Teoría de Pierre Gy

La ecuación de Pierre Gy es la más utilizada en el muestreo de minerales. Se basa en la descomposición del error total de muestreo, considerando que el muestreo se realiza en diferentes etapas y separando el error en las etapas de muestreo del error de análisis:

$$OE = TE + AE$$

Donde:

OE (Overall Error): Error total

TE (Total Sampling Error): Error total en las etapas de muestreo

AE (Analytical Error): Error analítico

Principalmente, la teoría plantea que existen dos principios:

- Principio de la Equiprobabilidad – “Que todas las partículas o fragmentos tengan la misma probabilidad de ser escogidas y que formen parte de la muestra”
- Principio de la Integridad – “Que en todo el proceso de muestreo se mantengan las características del lote original”

El primer principio está asociado al proceso de selección, es decir, aquella etapa donde se extrae una porción a partir de un lote incluye los errores: fundamental, segregación y/o agrupamiento, delimitación y extracción. El segundo principio está asociado a todo el proceso e incluye el error de preparación. (BSG Institute, 2015)

Anexo B. Precios minerales estratégicos

Tabla 14. Precios minerales estratégicos

(Institut für Seltene Erden und Metalle Ag, 2023)

Elemento	Precio [US\$/ton]
Cobre	\$ 9.371
Disprosio	\$ 499.000
Neodimio	\$ 87.740
Praseodimio	\$ 105.300
Cerio	\$ 4.650
Lantano	\$ 3.690
Itrio	\$ 16.400
Escandio	\$ 5.452.630

Anexo C. Critical Raw Materials

Lista correspondiente al año 2020: (European Commission, 2023)

Tabla 15. Critical Raw Materials 2020

2020 Critical Raw Materials			
Antimonio	Fluorita	Magnesio	Metal de silicio
Barita	Galio	Grafito natural	Tántalo
Bauxita	Germanio	Caucho natural	Titanio
Berilio	Hafnio	Niobio	Vanadio
Bismuto	HREE	Metales del grupo del platino	Tungsteno
Boratos	Indio	Roca de fosfato	Estroncio
Cobalto	Litio	Fósforo	
Carbón de Coque	LREE	Escandio	

Lista correspondiente al año 2017: (European Commission, 2023)

Tabla 16. Critical Raw Materials 2017

2017 Critical Raw Materials			
Antimonio	Fluorita	Grafito natural	Metal de silicio
Barita	Galio	Caucho natural	Tántalo
Berilio	Germanio	Niobio	Tungsteno
Bismuto	Hafnio	Roca de fosfato	Vanadio
Borato	Helio	Fósforo	Metales del grupo del platino
Cobalto	Indio	Escandio	HREE
Carbón de Coque	Magnesio	Escandio Cobre	LREE

Anexo D. Minerales estratégicos: Precios y costos de producción

Tabla 17. Cálculo eficiencia matriz de selección

Elemento	Precio	Costo de producción	Unidad	Eficiencia	Referencia
Antimonio	7000	3400	[USD/ton]	0,49	(Hoyos Mondragon & Cieza Castillo, 2020)
Barita	190	112	[USD/ton]	0,59	(U.S. Geological Survey, 2020)
Litio	37000	6500	[USD/ton]	0,17	(Statista Research Department, 2023)
Cobre	4,5	2,1	[USD/lb]	0,47	(Lanuza, 2022)
Vanadio	30	10,6	[USD/lb]	0,35	(Baritto, Oni, & Kumar, 2022)
Níquel	18	4,5	[USD/lb]	0,24	(Yao, 2022)

Anexo E. Ley 19.300: Artículo 11

Los proyectos o actividades enumerados en el artículo precedente requerirán la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental, si generan o presentan a lo menos uno de los siguientes efectos, características o circunstancias (BCN, 2023):

- a) Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones o residuos;
- b) Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire;
- c) Reasentamiento de comunidades humanas, o alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de grupos humanos;
- d) Localización en o próxima a poblaciones, recursos y áreas protegidas, sitios prioritarios para la conservación, humedales protegidos, glaciares y áreas con valor para la observación astronómica con fines de investigación científica, susceptibles de ser afectados, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar;
- e) Alteración significativa, en términos de magnitud o duración, del valor paisajístico o turístico de una zona, y
- f) Alteración de monumentos, sitios con valor antropológico, arqueológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural.

Anexo F. Objetivos desarrollo sostenible



Figura 26. Objetivos desarrollo sostenible

(Naciones Unidas, 2015)

Anexo G. Desarrollo ejemplo matriz de selección

Para ejemplificar el funcionamiento de la matriz de selección, a partir de información obtenida de la memoria de Tabatha Chávez y la caracterización mineralógica del Depósito de Relave de la Minera Carola se aplicarán los criterios a los elementos: Cobre – Cobalto – Galio – Germanio

Para los criterios económicos entonces, los valores para cada elemento son:

Tabla 18. Criterios económicos

Elemento	Precio [USD/kg]	Riesgo de suministro	Incremento de producción [%]	Potencial [USD/ton]
Cobre	8	4,3	21%	13,7
Cobalto	50	7,6	29%	3,8
Galio	330	7,6	37%	10,2
Germanio	1800	8,1	15%	18,1

Para los criterios sociales y ambientales, es necesario profundizar en el proceso productivo de estos cuatro elementos. Partiendo por el cobre, su proceso productivo en Chile consiste en la extracción del mineral mediante la minería subterránea y/o a cielo abierto. Se utilizan procesos hidrometalúrgicos para extraer el cobre de los óxidos, tales como lixiviación y extracción por solvente. La extracción del cobre a partir de sulfuros se realiza mediante flotación para separar, y para concentrar y obtener cátodos de cobre se realizan procesos pirometalúrgicos. Respecto al consumo de agua, es un aspecto importante debido a las grandes cantidades que se requieren, tanto de agua fresca, como agua de mar y agua de proceso. Mientras que la materia prima de este proceso, después de extraer el cobre, este material explotado pasa a ser clasificado como desecho minero, también conocido como relave. Como residuos dentro del proceso productivo, se generan gases cuando se produce cobre mediante procesos pirometalúrgicos, específicamente dióxido de azufre (SO₂).

En Chile no se produce cobalto, a pesar de tener el potencial. Por lo que se analizará el proceso productivo del país que posea la mayor producción de este elemento, la República Democrática del Congo, con un 70% específicamente. El proceso productivo del cobalto en la RDC consiste en la extracción del mineral de las minas industriales y artesanales, para luego ser refinadas para su uso en la fabricación de baterías. La minería artesanal de cobalto ha sido asociada con violaciones de los derechos humanos y el trabajo infantil, debido a que implica enviar hombres y niños por túneles precarios hasta alcanzar el metal de interés. Los hombres y niños trabajan

por 12 horas bajo pésimas condiciones, además de la exposición al polvo tóxico que surge de la trituración del mineral, otorgando así enfermedades profesionales.

En Chile tampoco existe producción de Galio, China el país con mayor producción (80%). El proceso productivo más utilizado es la cristalización, es el proceso de refinación electrolítica utilizado para producir Galio de alta pureza. Este elemento también se obtiene como subproducto del procesamiento de la bauxita, mediante el proceso de Bayer. Respecto a los riesgos, el Galio es corrosivo para el Aluminio y este puede emitir vapores tóxicos si es expuesto a altas temperaturas. Además, la producción de este elemento demanda mucha energía y requiere altas temperaturas.

Para el proceso productivo de Germanio, se considerará como ruta el diagrama que se observa en el Anexo I., que consiste en reprocesar el contenido de los depósitos de relaves mediante procesos como flotación, lixiviación, extracción por solvente e intercambio iónico para separar el elemento y luego mediante operaciones como electro obtención, cristalización o precipitación, obtener el producto comercial. Respecto al impacto ambiental, en este caso no se extrae materia prima desde los yacimientos, si no que la materia con la que se trabaja son los relaves. Por lo que se está disminuyendo el impacto ambiental de otro proceso productivo. Si bien no se generan las mismas cantidades de desechos que en el proceso productivo de cobre, si hay desechos sólidos y líquidos, pero no gases contaminantes. El consumo de agua es mayor en este proceso productivo, debido a que se requiere que los relaves pasen a ser pulpas, por lo que son grandes cantidades de agua necesarias para reprocesar el contenido de los depósitos de relaves. Lo mismo con la exposición a soluciones ácidas y alta tensión, por las operaciones necesarias para obtener Germanio a partir de relaves.

Siendo los resultados de los criterios sociales:

Tabla 19. Criterios sociales

Elemento	Igualdad de género [%]	Impacto de las emisiones en comunidades
Cobre	15	Emisiones de metales pesados
Cobalto	30	Líquida
Galio	14	Gaseosa
Germanio	18	Líquida

Mientras que para los criterios ambientales, el depósito de relave analizado se encuentra en la Región de Atacama. Esta ha sido declarada como zona de sequía extrema, pero en los últimos años su situación ha mejorado y su nivel de sequía actualmente se considera como normal.

Siendo entonces los resultados para los criterios ambientales:

Tabla 20. Criterios ambientales

Elemento	Consumo de agua fresca (Nivel de sequía)	Impacto de las emisiones en comunidades
Cobre	Zona de sequía normal	Si aporta GEI
Cobalto	Zona de sequía normal	No aporta GEI
Galio	Zona de sequía normal	No aporta GEI
Germanio	Zona de sequía normal	Si aporta GEI

Anexo H. Ruta general con factores de selección
Acondicionamiento - Separación

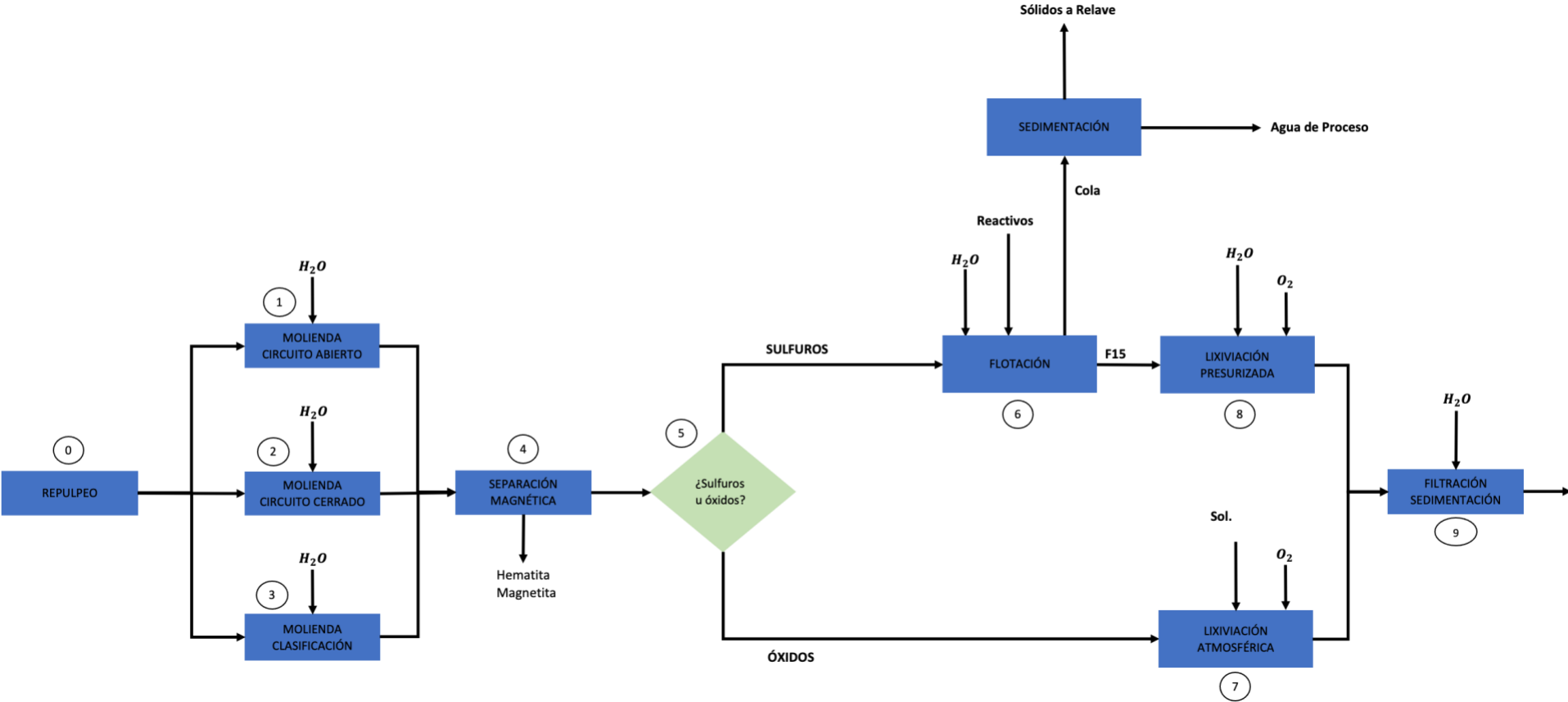


Figura 27. Fases acondicionamiento y separación

elaboración propia

Selección – Purificación del producto:

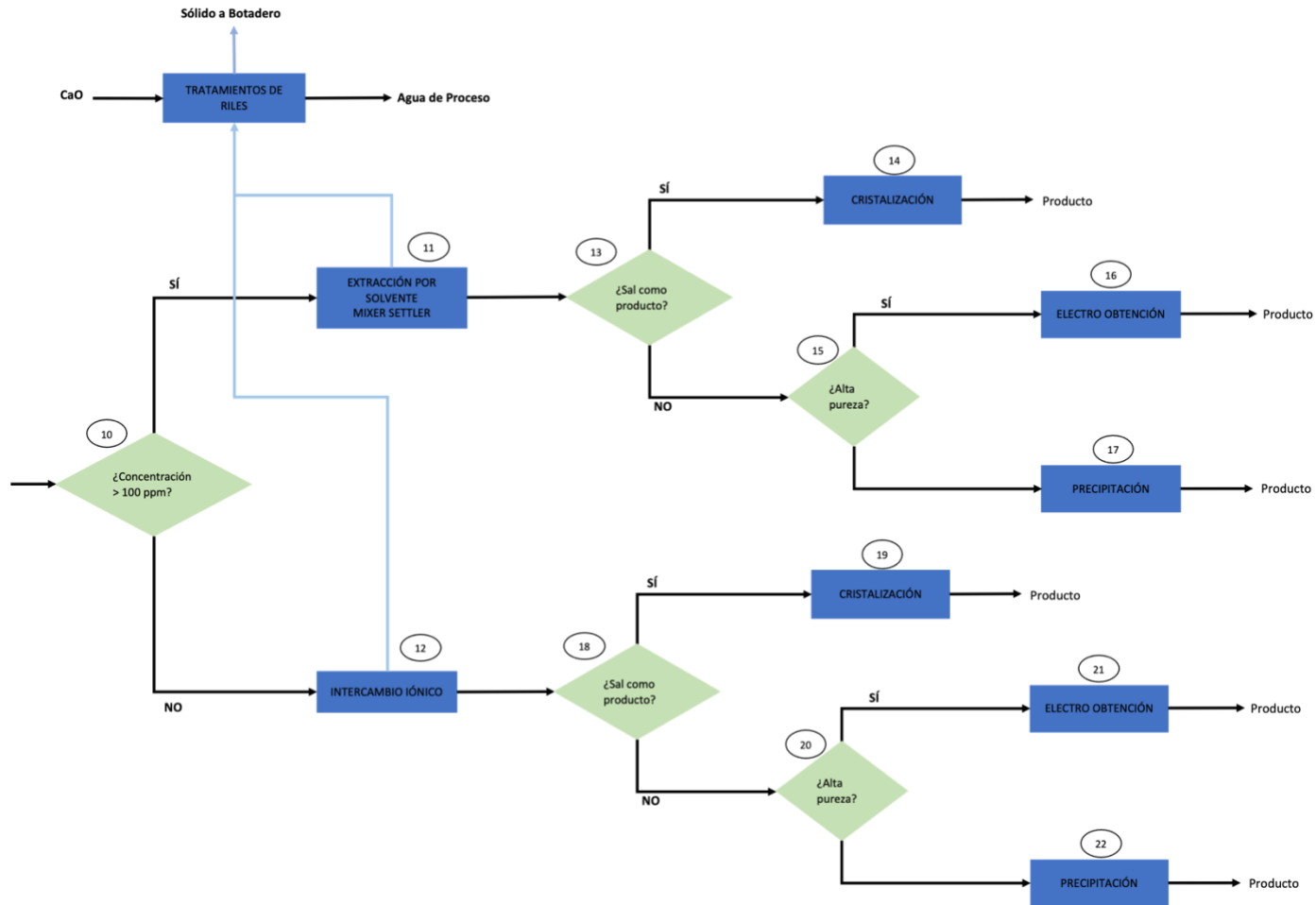


Figura 28. Fases selección y purificación del producto

elaboración propia

Anexo I. Ruta para GeS2

