

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL

VALPARAÍSO – CHILE



ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA PARA LA RECUPERACIÓN DE  
TIERRAS RARAS DESDE CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN MINERAL MEDIANTE UN  
PROCESO INTEGRADO DE BIOLIXIVIACIÓN Y ELECTROPRECIPITACIÓN

MARCELO NICOLÁS ARELLANO ORELLANA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL AMBIENTAL

PROFESOR GUÍA: Daniel Ramírez

PROFESOR CO-REFERENTE: Henrik Hansen

Valparaíso, marzo del 2026



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):**  Memoria o trabajo de título  Tesis de Postgrado

**Título del trabajo:** Estudio de factibilidad técnico-económica para la recuperación de tierras raras desde cenizas volantes de carbón mineral mediante un proceso integrado de biolixiviación y electro precipitación

**Nombre del candidato(a):** Marcelo Nicolás Arellano Orellana

**Carrera / Grado:** Ingeniería Civil Ambiental

**Campus:** Casa Central **Departamento:** Ingeniería Química y Ambiental

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Daniel Ramirez Livingston, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses  12 meses  2 años  3 años  5 años  10 años

**Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):**

---

---

---

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

**Fecha:** 6-5-2026

**Firma:**

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 30 de abril de 2026

**Firma:**

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

## Agradecimientos

Agradezco a mi familia por acompañarme y apoyarme durante toda esta etapa tan importante para mí, a mi mamá María Angélica y mi tío Óscar por haberme apoyado en altos y bajos, por haber estado siempre preocupados de mi bienestar físico y emocional durante este largo y acontecido camino por la universidad.

También, quiero agradecer a mi pareja Estefania, porque llegó en el momento en que más necesitaba alguien cercano, junto a ese apoyo y afecto que me brindó para poder salir adelante en días en los que no quería ver a nadie, motivándome a seguir con mi proceso y aclarar todas mis dudas y malos momentos que pude haber experimentado en su momento.

A todos mis amigos y compañeros que conocí en este camino y que sin duda dejaron algo de ellos en mí para motivarme a seguir avanzando con entusiasmo en la carrera.

Por último, quiero agradecer a todos los profesores, funcionarios y compañeros del departamento que conocí estos años, los conocimientos que me dieron, muchas veces más allá de lo propuesto por la malla curricular, el apoyo que recibí y los recuerdos que me llevaré de las actividades.

## Resumen

La creciente demanda global de tierras raras, impulsada por tecnologías limpias, contrasta con la alta concentración de su producción y los pasivos ambientales de la generación termoeléctrica a carbón en Chile. El presente estudio evalúa la factibilidad técnico-económica de recuperar estos elementos críticos desde las cenizas volantes acumuladas en el depósito Pangué de Central Ventanas, mediante un proceso integrado de biolixiviación con bacterias acidófilas nativas y electro obtención con filtros de nanotubos de carbono.

El análisis contempla la caracterización del residuo y el diseño conceptual del proceso a escala piloto e industrial, así como la evaluación de mercado, la gestión de riesgos, el marco regulatorio aplicable y los resultados experimentales que proyectan eficiencias de extracción cercanas al 90% para elementos como Lantano, Neodimio e Itrio.

La evaluación económica, con una tasa de descuento del 12%, arroja un Valor Actual Neto (VAN) de 1.554.703 [USD] y una Tasa Interna de Retorno del 33%, con un periodo de recuperación de 4,08 años. Por otro lado, el análisis de sensibilidad muestra que el proyecto es robusto en escenarios optimistas y de shock regulatorio, pero vulnerable a precios del concentrado por debajo de los 45 [USD/kg], concluyendo que el proceso es técnica y económicamente viable, transformando así un pasivo ambiental en una fuente de materias primas estratégicas. Este modelo de negocio, basado en una alianza con la termoeléctrica no solo ofrece rentabilidad, sino que también se alinea con los principios de economía circular y posiciona a Chile dentro de la cadena de suministro global de tierras raras, recomendándose avanzar en una fase piloto para validar los parámetros operacionales y consolidar las alianzas estratégicas.

## Abstract

The growing global demand for rare earth elements, driven by clean technologies, contrasts sharply with the high concentration of their production and the environmental liabilities associated with coal-fired power generation in Chile. This study evaluates the techno-economic feasibility of recovering these critical elements from the fly ash accumulated in the Pangué deposit of the Ventanas Power Plant, through an integrated process of bioleaching with native acidophilic bacteria and electrowinning using carbon nanotube filters.

The analysis encompasses the characterization of the residue and the conceptual design of the process at pilot and industrial scale, as well as market evaluation, risk management, and the applicable regulatory framework. Also, experimental results project extraction efficiencies close to 90% for elements such as Lanthanum, Neodymium and Yttrium.

The economic evaluation, using a 12% discount rate, yields a Net Present Value (NPV) of USD 1,554,703 and an Internal Rate of Return (IRR) of 33%, with a payback period of 4.08 years. Furthermore, the sensibility analysis shows that the project is robust under optimistic and regulatory shock scenarios but vulnerable to concentrate prices below 45 [USD/kg]. It is concluded that the process is technically and economically viable, thus transforming an environmental liability into a source of strategic raw materials. This business model, based on an alliance with the thermoelectric plant, not only offers profitability but also aligns with the principles of the circular economy and positions Chile within the global supply chain of rare earths, but it is recommended to proceed to a pilot phase to validate operational parameters and consolidate strategic alliances.

Índice general	
Introducción.....	8
Objetivos.....	9
Alcances y limitaciones del estudio.....	9
Estudio de mercado .....	10
1. Definición del producto e inclusión de tecnologías.....	10
1.1. Definición del producto principal.....	11
1.2. Subproductos .....	11
1.3. Procesos empleados.....	12
2. Cadena de valor del producto.....	12
2.1. Proveedores de materia prima .....	12
2.2. Emplazamiento del proceso.....	12
2.3. Clientes.....	13
2.4. Gestión de subproductos.....	13
3. Investigación de mercado.....	13
3.1. Mercado objetivo.....	13
3.2. Análisis de oferta y demanda.....	14
3.3. Análisis de precios.....	14
3.4. Proyecciones.....	14
4. Análisis estratégico.....	15
4.1. Análisis FODA .....	15
4.2. Análisis de las cinco fuerzas de Porter .....	15
5. Gestión de riesgos.....	17
5.1. Identificación de riesgos.....	17
5.2. Plan de mitigación .....	17
6. Sostenibilidad .....	18
6.1. Beneficios ambientales locales.....	18

6.2. Economía circular.....	19
Estudio técnico .....	20
1. Descripción del proceso experimental y diagrama de flujo de procesos.....	20
2. Balance de masa .....	24
3. Diseño de equipos principales .....	25
4. Escalamiento.....	26
5. Ubicación del módulo.....	27
5.1. Análisis del espacio .....	27
5.2. Requerimientos de terreno.....	27
6. Logística de producto, materia prima, materiales, etc.....	27
6.1. Materia prima .....	27
6.2. Producto final .....	28
7. Recursos humanos requeridos .....	28
8. Reglamentación aplicable.....	28
Estudio económico .....	31
1. Base de la evaluación económica.....	31
1.1. Antecedentes financieros.....	31
1.2. Vida útil del modulo .....	31
1.3. Listado de inversiones (CAPEX) .....	31
1.4. Detalles de costos (OPEX) .....	33
2. Evaluación económica.....	34
2.1. Criterios para la evaluación (VAN TIR).....	34
2.2. Flujo de caja.....	34
2.3. Evaluación de indicadores de rentabilidad.....	34
2.4. Análisis de sensibilidad .....	35
3. Recomendaciones de inversión .....	35

3.1. Propuesta de modelo de negocio .....	36
4. Gestión de riesgos.....	36
Conclusión.....	38
Bibliografía.....	40
Anexos.....	43

#### Índice de tablas

Tabla 1: Composición de flujos del proceso. (elaboración propia) .....	25
Tabla 2: Costos de inversiones en terreno y construcciones.....	31
Tabla 3: Costos de inversiones en equipos del proceso.....	32
Tabla 4: Costos de inversiones en aspectos complementarios.....	32
Tabla 5: Costos de operación de materia prima.....	33
Tabla 6: Costos de operación de reactivos químicos.....	33
Tabla 7: Costos de operación de servicios.....	33
Tabla 8: Costos de operación de mano de obra.....	33
Tabla 9: Flujo de caja acumulado.....	34
Tabla 10: Indicadores de rentabilidad.....	34
Tabla 11: Análisis de escenarios.....	35

## Introducción

Las tierras raras se encuentran en escasas cantidades en la corteza terrestre y durante la última década, la demanda de estos elementos se ha triplicado, debido a que sus propiedades son requeridas para la producción de tecnologías avanzadas, medicina, electrónica y procesos industriales (Alvarez, 2018), donde el principal productor actualmente es China, con potenciales nuevos actores en la materia como Ucrania, Brasil y Chile, que avanzan y prometen consolidar un aporte en la diversificación de la oferta global, fortaleciendo roles en la cadena de suministro de tecnologías limpias. (Rifo, 2025)

Actualmente Chile, según el reporte energético de noviembre del 2025, cuenta con una capacidad instalada de generación de 38.820,7 [MW], de la cual el 52,7% corresponde a Energía Renovable No Convencional (ERNC), mientras que la generación a partir de carbón es del 9%. (SEN, 2025)

En cuanto a la generación de energía eléctrica, durante octubre del 2025 se generaron 7.029,2 [GWh], del cual 1.117,4 [GWh] corresponde a la energía proveniente de fuentes a carbón (15,9%) y que se concentra en las regiones de Antofagasta, Atacama, Valparaíso y Bío Bío. (SEN, 2025)

En el período de 1973 a 2013 el carbón mineral llegó a representar más del 50% de la energía primaria para la generación eléctrica (Yáñez et al., s. f.), consolidando una matriz termoeléctrica que ha dejado un pasivo ambiental de gran escala y geográficamente concentrado, las cenizas volantes o fly ash, un residuo inerte que contiene trazas de elementos de alto valor estratégico, como las tierras raras.

Sin embargo, existe una brecha tecnológica para su valorización, ya que las prácticas actuales se limitan a su uso en construcción, como la producción de cemento, o disposición final. Esto presenta una oportunidad de innovación importante, la cual consiste en plantear, desarrollar y escalar procesos avanzados como la biolixiviación acoplada con procesos de electro precipitación para la recuperación de estos elementos críticos.

Transformar estos pasivos en una fuente nacional de materias primas, críticas, permitiría a Chile no solo mitigar un impacto ambiental, sino también contar con un método alternativo a la extracción de tierras raras, mejorando su posicionamiento dentro de la cadena de suministro global.

## Objetivos

Evaluar la factibilidad técnica de un proceso biotecnológico-electroquímico integrado para la recuperación de elementos de valor desde cenizas volantes de termoeléctricas a carbón, contribuyendo a la valorización de un pasivo ambiental bajo un enfoque de economía circular.

### Objetivos Específicos:

- I. Estimar la eficiencia de un proceso de biolixiviación, usando microorganismos acidófilos, para la liberación de elementos de valor como tierras raras y metales de interés desde una matriz de cenizas volantes (fly ash).
- II. Diseñar y evaluar conceptualmente una etapa de separación y concentración electroquímica para la recuperación de elementos lixiviados a partir del licor generado en la biolixiviación.
- III. Analizar, en un contexto de prefactibilidad, la viabilidad económica y los principales aspectos de sostenibilidad asociados al proceso propuesto, identificando oportunidades y barreras para su implementación.

### Alcances y limitaciones del estudio

La presente tesis, tiene como alcance el estudio de factibilidad económica del proceso de biolixiviación y electro precipitación propuesto, que va desde la recolección del residuo, el proceso de revalorización y la venta del producto a empresas interesadas.

Por otro lado, las limitaciones que presenta el estudio radican en la realidad a la que se puede ver el proyecto al momento del desarrollo de las fases piloto o industrial, cambios económicos dados por el contexto geopolítico y variabilidad en los precios de las tierras raras y contexto nacional.

## Estudio de mercado

### 1. Definición del producto e inclusión de tecnologías

El presente informe busca evaluar la factibilidad de implementar un sistema de revalorización de un residuo industrial como lo son las cenizas de carbón mineral generadas y acumuladas por las termoeléctricas, donde el producto principal son minerales con valor estratégico y económico para el país y las empresas, para esto se plantea realizar un proceso que transforme las cenizas de carbón, por medio de biolixiviación, electro precipitación, filtración y finalmente secado y calcinación para conseguir un sólido seco con una alta concentración de óxidos de tierras raras.

La elección del proceso integrado de biolixiviación con bacterias acidófilas nativas y electro obtención se fundamenta en la necesidad de valorizar un pasivo ambiental mediante tecnologías innovadoras y limpias, de menor impacto ambiental y adaptada al contexto nacional.

Este proceso presenta ventajas por ser una tecnología sostenible y de bajo impacto, en comparación con la minería convencional o la lixiviación química, al emplear microorganismos nativos para movilizar los metales de la materia inerte, operando a condiciones atmosféricas y con menor cantidad de reactivos químicos, lo que reduce significativamente la huella de carbono y gastos energéticos.

Por otro lado, el uso de bacterias nativas genera una disminución de costos de importación y adaptación, mientras que la selectividad en la recuperación permite que se alcancen altas concentraciones de tierras raras, aprovechando a su vez residuos mineros como pirita y azufre para el metabolismo bacteriano, reduciendo la necesidad de insumos externos, cerrando ciclos e incorporándose en la economía circular a su vez con el aprovechamiento de subproductos.

En contraparte, los métodos convencionales presentan un alto impacto como en el caso de la minería convencional, al generar altos volúmenes de estériles, necesidad de grandes volúmenes de agua y energía, que además dependen del contexto geopolítico y situación del mercado, al competir directamente con China.

En cuanto a los otros usos que suelen tener las cenizas volantes, como en la construcción, presentan un bajo costo añadido al usarlo como materia prima de un producto de bajo valor, como lo es el cemento o para rellenos, y que, al contener trazas de otros elementos, estos pueden contaminar el producto final, o bien, presentar contaminación por percolación en el depósito mientras se espera su movilización para otros usos.

## 1.1. Definición del producto principal

Teniendo en consideración que el principal importador de carbón mineral para Chile es Colombia (Aduanas, 2026), con un porcentaje de importación del 67,3% (Trade map, 2026) y teniendo como referencia el producto hulla con código arancelario 27011220, el cual es específico para uso térmico, desarrollaremos la idea propuesta en base a las trazas de tierras raras en el carbón de origen colombiano.

El producto principal consiste en un polvo oscuro con una alta concentración de tierras raras, obtenida mediante biolixiviación y electro precipitación a partir de las cenizas volantes, compuesta por tierras raras ligeras y pesadas, tales como Escandio (Sc), Itrio (Y), Lantano (La), Cerio (Ce), Praseodimio (Pr), Neodimio (Nd), Samario (Sm), Europio (Eu), Gadolinio (Gd), Terbio (Tb), Disprosio (Dy), Holmio (Ho), Erblio (Er), Tulio (Tm), Iterbio (Yb) y Lutecio (Lu), provenientes de carbón colombiano con trazas de 72.45 [ppm] ( $\approx 0.0072\%$ ), concentraciones mayores al promedio mundial de 68.5 [ppm] ( $\approx 0.0068\%$ ). (Restrepo, 2019)

De las cenizas volantes se considerará que los elementos más llamativos a recuperar son Ce, La, Nd, Pr, Dy, Tb, Eu e Y, por sus porcentajes de recuperación y relevancia que pueden presentarse según el estudio “Análisis de elementos de tierras raras en cenizas de Carbón a través de técnicas de aprendizaje automático no supervisado (CLUSTERING)” (Díaz et al., 2024), considerando que en promedio global de tierras raras en cenizas de carbón esta dentro del rango de 200 a 700 [ppm] (Mkhize et al., 2025) y se estima que la materia prima con la que se desarrolla el presente trabajo, contraria con concentraciones de 500 [ppm] (0.05%).

## 1.2. Subproductos

Además del concentrado de tierras raras se obtendrá como subproducto hierro (Fe), resultante de la etapa de purificación del licor de la biolixiviación, donde se debe precipitar el hierro disuelto para evitar la inhibición de las bacterias y su valor se limita como materia prima de baja ley que puede ser utilizado para la producción de acero, entre otros. (Rachappa et al., 2015)

Otro subproducto es el aluminio (Al) que podría recuperarse en conjunto con el hierro en la fase de purificación del licor de la biolixiviación, su pureza que puede llegar a alcanzar es alta, por lo que su valor podría basarse en la producción de aluminio metálico, sin embargo, el volumen es limitado y poco competitivo, pero cuenta con un valor como coproducto.

También se puede considerar como subproducto la sílice ( $\text{SiO}_2$ ), resultante de la extracción de los minerales de valor tras la biolixiviación, su valor se halla en si se comprueba que se encuentra en estado inerte y resulta ser no peligroso para su uso como material de construcción en rellenos estructurales, cemento o como componente abrasivo para limpiar y pulir superficies. (Rodríguez, 2026)

Por último, se considera que podrían existir varios subproductos pertenecientes al grupo de metales preciosos y depende del tipo de carbón mineral que se use y su procedencia, la cantidad resultante de estos, ya que las trazas de estos variarían en el volumen resultante, sin embargo, existe la posibilidad de hallar elementos como oro (Au), plata (Ag), platino (Pt) y paladio (Pd), pero que no se consideraran dentro del alcance de la presente memoria, por lo que se excluirán los beneficios o costos que estos generen.

### 1.3. Procesos empleados

El proceso para la obtención del producto principal consta de las siguientes fases:

- Preparación del inóculo bacteriano
- Recepción y preparación
- Biolixiviación
- Purificación del licor biolixiviado
- Precipitación y calcinación,
- Gestión de corrientes secundarias

## 2. Cadena de valor del producto

### 2.1. Proveedores de materia prima

Dada la naturaleza del proyecto planteado, se planea usar cenizas almacenadas por la misma termoeléctrica en cuestión, donde la idea central es realizar un módulo extra dentro las instalaciones de una termoeléctrica para poder trabajar con los mismos residuos sin valor generados de la producción de electricidad durante el tiempo.

### 2.2. Emplazamiento del proceso

La línea de producción debe realizarse dentro de las instalaciones de la empresa, idealmente cerca del depósito de descarte de estas cenizas para reducir costos de transporte, lo que también permite

la integración eficiente de los servicios auxiliares existentes en la planta, como agua, energía eléctrica o sistemas de control, facilitando así la supervisión conjunta.

### 2.3. Clientes

Actualmente en Chile no se cuenta con un consumidor local importante, sin embargo, el producto tiene un alto valor económico, tecnológico, ambiental, geopolítico y militar, y su potencial consumidor pueden ser los países que se especialicen en su procesamiento, al presentar una alternativa estratégica.

El producto cuenta con un valor agregado de reducir los pasivos ambientales en Chile, como también tener el potencial de ser un gatillante que active el interés en generar empresas innovadoras que puedan manejar y/o producir productos que usen tierras raras.

### 2.4. Gestión de subproductos

Dada la complejidad que podría generar evaluar el reúso y disposición de los lixiviados inertes, estos no se considerarán dentro del alcance del trabajo realizado, por lo que, para efectos de este estudio, se establecerá para no adentrarnos en normativas como el D.S. 43, que estas soluciones serán almacenadas en recipientes adecuados para posterior retiro y transporte a lugares autorizados para su disposición o bien su tratamiento.

## 3. Investigación de mercado

### 3.1. Mercado objetivo

Chile se encuentra en transición energética hacia energías limpias, por lo que el uso de carbón mineral para uso térmico va siendo menor de manera paulatina, sin embargo, dado el registro histórico de uso de este insumo, los residuos han sido acumulados en depósitos de cenizas, transformándose así en pasivos ambientales.

De esta manera, el mercado objetivo abarca toda termoeléctrica que actualmente sea consumidora de carbón mineral, o bien, todas aquellas que hayan utilizado y cuenten con un depósito de cenizas con terreno que permita la construcción de un edificio de tratamiento en las cercanías.

Por otro lado, en Chile no se encuentra desarrollada esta área de manufactura de productos con tierras raras, por lo que el mercado de venta del producto es limitado, sin embargo, se podría destinar el producto a empresas mineras que trabajen con tierras raras y las conviertan en un producto destinado a su exportación.

### 3.2. Análisis de oferta y demanda

La oferta de la materia prima para el proyecto está determinada por la generación histórica acumulada y el flujo vigente de cenizas volantes provenientes de la combustión de carbón mineral en centrales termoeléctricas chilenas.

El registro histórico indica que, a la fecha, Chile tiene un almacenamiento de 13.850.240 [m<sup>3</sup>] de cenizas a lo largo del territorio, sin embargo, para el desarrollo de esta tesis, se considerará el almacenamiento existente de la Central Ventanas, Depósito de cenizas Pangué, Puchuncaví de 1.533.292 [m<sup>3</sup>]. (Inodú, 2018)

Esta base brinda una oferta abundante, localizada y de costo bajo para el proyecto y desde una perspectiva de concentración geográfica y control corporativo, la oferta se centra en pocos actores, facilitando la identificación de potenciales socios estratégicos y la negociación de acuerdos a largo plazo, dado que las empresas generadoras cuentan con costos para la disposición de este residuo en depósitos.

Por otro lado, la demanda se rige por el mercado estratégico, oligopólico y con China como principal productor, sin embargo, lo llamativo del producto recae en el crecimiento sostenido impulsado por la transición energética y tecnológica.

Dado que las tierras raras son un insumo crítico no sustituible en aplicaciones tecnológicas, su demanda es altamente inelástica en el corto y mediano plazo, por lo que es llamativo para los compradores estratégicos que buscan fuentes alternas de esta materia prima.

### 3.3. Análisis de precios

Para los precios de las tierras raras, se considerará el producto puro, sin considerar contenido de hierro, aluminio y sílice, asignándole un valor referencial estimado entre 40 y 50 [USD/kg] considerando que la mezcla de tierras raras no será pura y el contenido será mixto.

### 3.4. Proyecciones

Las proyecciones están relacionadas con la aceleración de la transición energética, que, junto al no existir un sustituto tecnológico, la demanda tendría un comportamiento creciente, por otro lado, el cronograma de nuevos proyectos mineros primarios a nivel mundial que enfrentan plazos de estabilización sobre los 5 años junto a barreras ambientales y sociales, lo que establece un déficit o estancamiento de la oferta primaria durante la primera década.

En cuanto a la normativa, dentro de las próximas décadas, se podría ver un endurecimiento en cuanto a la clasificación de residuos, donde las fly ash se verían afectadas por su contenido de plomo, arsénico, molibdeno o selenio (Inodú, 2018), llevando a la necesidad por parte de las termoeléctricas, de librarse en cuanto antes de estos residuos.

#### 4. Análisis estratégico

##### 4.1. Análisis FODA

- Fortalezas:
  - Tecnología innovadora y sostenible.
  - Transformación de un costo de disposición en un ingreso.
  - Incorporación de economía circular, mejora en la transición energética, revalorización de productos y búsqueda de nuevas oportunidades con materiales críticos.
- Oportunidades:
  - Contexto normativo y cierre de termoeléctricas, demanda global creciente y diversificación, posicionamiento estratégico como productor a baja escala, sinergia con mineras existentes.
- Debilidades:
  - Poca madurez tecnológica, dependencia de la composición de la materia prima, alto consumo energético en fase electroquímica, gestión de residuos nuevos, falta de experiencia laboral.
- Amenazas:
  - Competencia por el residuo, volatilidad extrema de los precios de tierras raras, marco regulatorio, avance de tecnologías competitivas.

##### 4.2. Análisis de las cinco fuerzas de Porter

- Amenaza de nuevos competidores
  - Tecnologías (altas): El dominio de bio-electrometalurgia para una aplicación específica es complejo y constituye la principal barrera, sin embargo, se genera una alta ventaja.
  - Capital (media): No se requiere de una mina ni grandes instalaciones, por lo que el CAPEX es menor al que una mina tradicional tendría, pero sigue siendo significativo.
  - Regulatorias (medio a alto): Los permisos ambientales y la gestión de residuos peligrosos son una barrera seria y un filtro para la propuesta.

Acceso a materia prima (alta): La barrera crítica, sin relación exclusiva o preferencia con una termoeléctrica, por lo que, sin un acceso garantizado a las cenizas volantes, sería imposible competir.

- Poder de negociación de los nuevos proveedores

Proveedor único (medio a alto): La termoeléctrica generadora de fly ash es el único proveedor.

Factores que aumentan el poder: es un insumo de costo cero o negativo, al ver el valor añadido que se le puede otorgar, puede exigir una mayor participación en las ganancias, tiene la decisión final si vender las cenizas a otro cliente o almacenarlas o puede encontrar su propia solución.

Factores que disminuyen el poder: cuenta con una necesidad de gestionar el pasivo ambiental, carece de experiencia tecnológica o metodológica específica se brinda una solución sin inversiones ni riesgos económicos.

- Poder de negociación de los compradores

Perfil del comprador: Compradores internacionales de tierras raras, mineras chilenas cercanas dedicadas a la extracción de estas o incluso, la misma termoeléctrica si presenta interés en el producto.

Factores que aumentan su poder: grandes productores como China fijan el precio de referencia, lo que le da la posibilidad de comparar al comprador.

Factores que disminuyen su poder: Diferenciación por contar con un proceso sostenible, volumen pequeño fácil de ofrecer a clientes estratégicos, urgencia por diversificar fuentes al concentrarse en el mercado chino.

- Amenaza de productos sustitutos

Sustitutos directos: minería enfocada en tierras raras ofrecen menores precios a grandes volúmenes, pero el impacto ambiental y geopolítico es mayor, por otro lado, existe la minería urbana, sin embargo, tiene una logística compleja.

Sustitutos tecnológicos: La creciente innovación tecnológica busca la creación de equipos que no solo sean mejores en eficiencia y producción, sino que también signifique en una reducción de costos para su manufacturación, por ejemplo, la creación de alternativas para los motores eléctricos síncronos de imán permanente, que dependen del neodimio, reduciría el mercado objetivo del producto.

- Rivalidad entre competidores existentes

Competidores directos: Muy pocos competidores existentes a la fecha existen proyectos relacionados a su extracción, pero estos requieren tiempo para su tramitación, construcción y puesta en marcha.

Competencia por el recurso: Existe una rivalidad indirecta con la industria de la construcción que utilice fly ash como aditivo.

Competencia futura: Proliferación de startups de biominería que brinden más alternativas a los consumidores.

## 5. Gestión de riesgos

### 5.1. Identificación de riesgos

Para el desarrollo e implementación de la propuesta para la revalorización de cenizas volantes, se han identificado los siguientes posibles riesgos potenciales:

- a) Rechazo o falta de interés por la termoeléctrica: el cliente podría priorizar
- b) Competencia por recursos
- c) Alta variabilidad en la composición de las cenizas
- d) Mala optimización o escalamiento del proceso
- e) Altos costos energéticos en la etapa de electro precipitación
- f) Volatilidad en el precio de las tierras raras
- g) Cambios regulatorios
- h) Negación por parte de la comunidad

### 5.2. Plan de mitigación

Ante los riesgos identificados anteriormente, se plantean las siguientes medidas de mitigación para reducir la probabilidad de ocurrencia o minimizar su impacto:

- a) Alianza estratégica al no presentar el proyecto como una venta, sino como un servicio de gestión integral de pasivos, ofreciendo un modelo de negocio de ganancia compartida, donde la termoeléctrica no realiza inversión capital significativa (CAPEX).  
Para solidificar esta alianza se propone firmar un contrato de servicio a largo plazo que garantice el flujo de cenizas y establezca las reglas de reparto de beneficios, asegurando un ahorro mínimo para la termoeléctrica.

- b) Cláusulas de exclusividad o preferencia que se incluyan en el contrato de servicio que establezcan al operador del módulo el derecho de ser la primera opción sobre el consumo de cenizas volantes.
- c) Caracterización continua que establezcan un protocolo sobre los lotes de cenizas a tratar y cláusulas de ajuste tecnológico que permita modificar parámetros operativos o el reparto de ganancias en función de la calidad del insumo, permitiendo un proceso flexible que se adapte a un rango de composiciones, por ejemplo, variando el pretratamiento o el consorcio microbiano.
- d) Realizar un estudio de ingeniería robusto de I+D, ejecutando una fase piloto demostrativa *in-situ* financiada como proyecto de innovación que valide y optimice el proceso con el material real.
- e) Diseño enfocado en la valorización integral, investigando y desarrollando desde la etapa de diseño, aplicaciones para los sólidos residuales lixiviados y presupuestar el sistema de tratamiento de efluentes para cumplir con la normativa.
- f) Desarrollar estrategia de comercialización y cobertura que busque acuerdos de compra a largo plazo con consumidores finales a un precio indexado, pero con pisos mínimos. Diversificar los productos resultantes.
- g) Participar en mesas técnicas y definir en el contrato una cláusula de adaptación ante normativas que active la renegociación del acuerdo si un cambio normativo altera sustancialmente los supuestos económicos del proyecto.
- h) Participación temprana y comunicación transparente hacia la comunidad vecina desde las etapas iniciales, para comunicar de forma transparente los beneficios ambientales del proyecto y beneficios compartidos como empleo y proyectos de desarrollo local.

## 6. Sostenibilidad

### 6.1. Beneficios ambientales locales

- a) Reducción y gestión activa de pasivos ambientales

Dado el objetivo del proyecto, se ataca directamente el núcleo del problema, los depósitos históricos y el flujo continuo de cenizas, donde el procesamiento del material elimina una fuente de contaminación difusa y libera un terreno que puede ser destinado para otros usos o ser restaurados, lo que cambia el paradigma de disposición pasiva por una gestión activa y valorización.

#### b) Minimización de la lixiviación de metales y mejora de la calidad de suelos y aguas

Las cenizas de los depósitos están expuestas a los fenómenos meteorológicos en caso de no estar cubiertas, por lo que se podrían movilizar metales pesados y otros elementos hacia el suelo y aguas subterráneas, por lo que el proceso propuesto estabiliza químicamente estos elementos.

En la biolixiviación, los metales inertes y potencialmente tóxicos son extraídos de manera controlada y los sólidos residuales resultantes presentan menor reactividad y movilidad, lo que reduce significativamente el riesgo de contaminación del entorno y contribuye a la descontaminación de suelos al ser una remediación *ex-situ*.

#### c) Reducción de huella de carbono y emisiones asociadas

El proceso evita las emisiones de gases de efecto invernadero y material particulado asociados al transporte de grandes volúmenes de cenizas a vertederos distantes y a su manejo en esos sitios.

Por otro lado, como el producto se usa en tecnologías de baja huella de carbono, el proyecto genera un beneficio climático indirecto positivo al facilitar la transición energética.

### 6.2. Economía circular

El proyecto presenta principios de economía circular al cerrar el ciclo de materiales y entregándoles un valor, transformando el modelo de operación lineal a uno circular.

La termoeléctrica pasa a actuar como generadora de energía y extractora y refinadora de materias primas críticas a partir de su propio flujo de residuos, siendo un cambio estratégico dentro del marco de descarbonización de la matriz energética del país, ofreciendo así una oportunidad productiva y sostenible dentro de sus instalaciones.

Se genera así una nueva cadena de valor circular, donde el carbón y fly ash almacenado son transformados por medio de biolixiviación y electro precipitación para dar un producto principal (tierras raras) y subproductos potenciales.

De esta manera se contribuye a la seguridad de suministro y soberanía tecnológica al diversificar la matriz productiva hacia los materiales críticos, mediante un cambio de procedimientos desde la economía basada en extracción hacia una basada en la regeneración y refinación de materiales de alto valor desde fuentes secundarias.

## Estudio técnico

### 1. Descripción del proceso experimental y diagrama de flujo de procesos

Para efectos del presente informe de tesis, se describirá el proceso a realizar para la fase experimental que posteriormente se escalará a nivel piloto e industrial.

#### a) Módulo de pretratamiento y alimentación

El objetivo de esta fase es obtener una materia prima homogénea para poder tratarla con una mayor eficiencia, para lograrlo, primero se realiza la suposición de que las cenizas del depósito serán entregadas ya homogenizada y desde distintos puntos para conseguir primeros resultados que sean característicos y de manera adecuada del medio, posteriormente se debe pasar por una molienda de las cenizas con el fin de reducir el tamaño de partícula y aumentar el área de contacto en las fases posteriores, quedando así un polvo fino que puede ser almacenado en recipientes inertes para su transporte al siguiente módulo.

En paralelo se necesitará pirita mineral en polvo, idealmente del mismo tamaño que las cenizas, alcanzando un tamaño menor a 74 [ $\mu\text{m}$ ] y que debe permanecer durante el almacenamiento y molienda sin humedad para evitar la oxidación y generación de ácido.

Finalmente se mezclarán los polvos de ceniza y pirita en una proporción de 1 : 1,5 (Zhao et al., 2025), respectivamente (considerando que la pirita se encuentra en alta pureza), y asegurando una homogenización hasta su ingreso al reactor de biolixiviación.

#### b) Módulo de biolixiviación

Antes de explicar el módulo de biolixiviación, es necesario aclarar que para la operación se optó por trabajar con bacterias nativas por temas de disminución de costos, como también para divulgar los resultados a partir de la biodiversidad local.

Para esto se deberá tomar muestras idealmente de distintos puntos para maximizar la probabilidad de obtener cepas aptas para la biolixiviación y se guardarán en frascos de vidrio estériles para su transporte bajo condiciones de temperatura ambiente, posteriormente, mediante el medio de cultivo 9K de Silverman y Lundgren (Corrales et al., 2006) modificado, dado que no se usará una fuente de hierro ( $\text{FeSO}_4$ ), puesto que se obtendrá directamente desde la pirita, la cual tendrá como función la oxidación catalizada por parte de *A. ferrooxidans* en presencia de oxígeno y agua, produciendo

así agentes lixiviantes que son capaces de disolver los minerales, en específico se produce ácido sulfúrico e iones ferrosos. (Zhao et al., 2025)

Se sembrarán las muestras de 30 [g] maceradas si son sólidas, y de 100 [mL] si son líquidas en el medio, se homogenizarán y se mantendrán a temperatura ambiente para facilitar la presencia de bacterias ferruginosas y sulfuradas.

Las muestras ya homogeneizadas se someterán a un primer filtrado con papel Whatman N°42 y un segundo filtrado con filtros de membrana, que posteriormente se lavará con agua ácida (pH 2.0) para sembrar nuevamente en el medio 9K en fibulas de 100 [mL] para mantenerlas durante 7 días a 30 [°C], verificando en todo momento el pH dentro de un rango entre 1,0 y 2,0 para la proliferación de bacterias acidófilas. (Corrales et al., 2006)

Tras los 7 días de incubación, mediante una coloración Gram en cada cultivo se verifica la presencia de bacterias, posteriormente se resiembran las muestras incubadas con 1,5 [mL] de cultivo preincubado en 4 [mL] de medio líquido 9k en tubos de 13 x 100, previa homogenización por agitación y se usará un blanco como control para tener un indicador macroscópico de color y controlar posibles reacciones químicas, esta fase tendrá una duración de 7 días, para garantizar una mayor concentración de bacterias y facilitar su aislamiento. (Corrales et al., 2006)

Finalmente, el aislamiento de las bacterias se realizará tras la siembra en placas de medio 9K sólido mediante metodología por estría sencilla y previa homogenización por mezcla con vortex. La incubación se realizará a 30[°C] durante 7 días en atmosfera de 2% de CO<sub>2</sub>. (Corrales et al., 2006)

Mediante coloración Gram y aislamiento de nuevo en medio 9K sobre las colonias obtenidas, se incubó en las mismas condiciones durante 7 días, realizando coloración Gram una vez transcurrido el tiempo. (Corrales et al., 2006)

De este modo se espera conseguir bacterias acidofilicas nativas, que tengan un potencial similar al que tendrían las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*, microorganismos usados comúnmente para la biolixiviación en el área minera.

Una vez teniendo las bacterias ideales aisladas, se realizarán mediante un triplicado y un blanco en matraces de 500 [mL] con aireación, la fase de lixiviación, la cual constará de incorporar 225 [mL] de medio de cultivo 9K, 25 [g] de ceniza mezclada con 37,5 [g] de pirita molida y 25 [mL] de inóculo, a 30 [°C], con un pH estable entre 1,5 y 2,0 a 100 [RPM] (Menadier., 2009) a lo largo del

proceso y tomado muestras cada tres días en un transcurso de 21 días de la concentración de tierras raras, como también medir diariamente el pH y la concentración de óxido de hierro ( $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Fe}^{+3}$ ). Al finalizar la fase, se espera encontrar una disminución de la concentración de Fe, S y materia orgánica, como a su vez, un aumento en la concentración de hierro férrico ( $\text{Fe}^{+3}$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), los cuales actúan sobre los minerales de tierras raras, generando una digestión ácida y un ambiente de reacciones redox, capaz de desplazar los iones de las tierras raras que se encuentran débilmente absorbidos en la fase de intercambio iónico, generando así iones de tierras raras, mientras que la pirita, que actúa como reactivo límite, al finalizar el tiempo de residencia del lote, debería haber reducido un 55% de su masa inicial.

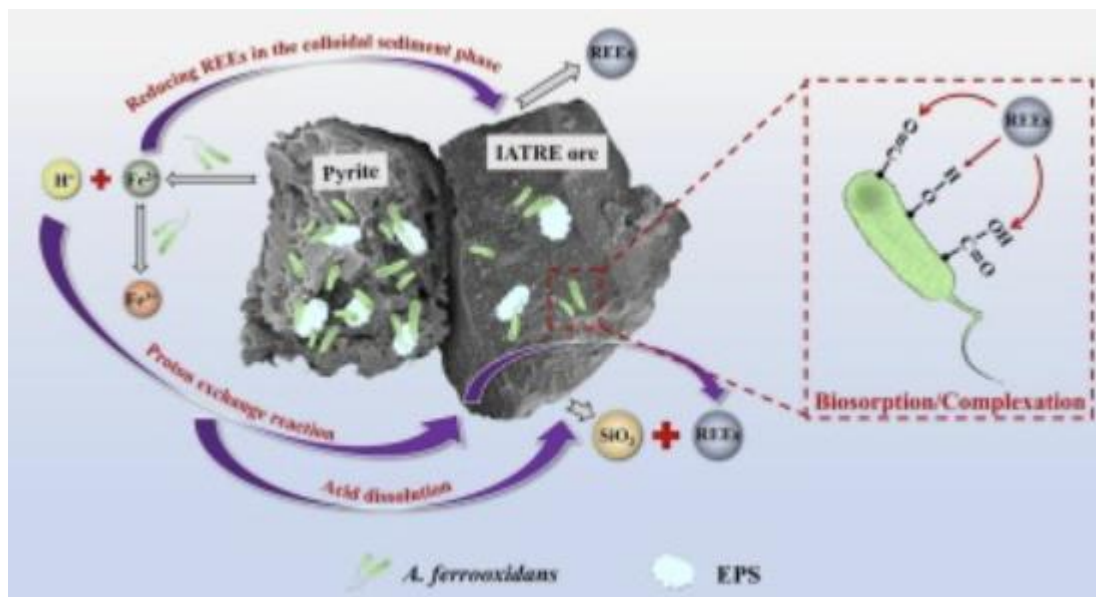


Ilustración 1: reacción de pirita en el proceso de biolixiviación. (Zhao et al., 2025)

Se espera encontrar eficiencias cercanas para tierras raras de 95% para Lantano (La), 75% para Cerio (Ce), 95% para Neodimio (Nd) y 90% para Itrio (Y), alcanzado una extracción de tierras raras del 85 a 95% al finalizar los 21 días de operación. (Zhao et al., 2025)

c) Módulo de separación sólido – líquido

Una vez terminada la fase, se llevará el licor de biolixiviado a una centrífuga para que se separe el medio sólido del medio líquido, donde este último será llevado a la siguiente etapa.

d) Módulo de electro obtención

Finalmente, el líquido es regulado para tener un pH entre 2 – 4 (Ma et al., 2018), para posteriormente mezclar con sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) o cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ) 100 [mM], para

aumentar la conductividad iónica de la solución, y posteriormente verter en la celda con filtros de Nanotubos de Carbono en serie con eficiencia estimada del 75%, donde por su alta conducción actúan como electrodos al aplicar una corriente, la cual es selectiva al variar el voltaje, produciendo así la electrolisis del agua y la reducción del oxígeno disuelto, generando así iones hidroxilo que aumentan el pH del medio y provoca que los iones de tierras raras reaccionen para formar hidróxidos metálicos insolubles que son retenidos en los filtros, que al ser inestables, se deshidratan transformándose en óxidos estables, obteniendo así finalmente en un sólido mixto de REE que se encuentra ya en su forma comercial. (O'Connor et al., 2017)

#### e) Manejo de efluentes y recirculación

Del proceso de separación de fases tras la biolixiviación, se puede recuperar la fase sólida rica en componentes sólidos y se puede llevar a un tratamiento correspondiente para separar materiales de interés, integrando este efluente en la economía circular.

Por otro lado, tras la electro obtención, una fracción del residuo se podría recircular a la entrada de la electro obtención, dado que es una solución rica en sulfatos y pH controlable que podría actuar como regulador de condiciones complementario, donde además aumentaría la eficiencia del procesos entre un 85 – 95%, por último, el RIL será almacenado para su disposición final, dado que contiene metales no recuperados, electrolito de soporte, pH alcalino y trazas de especies oxigenadas.

En paralelo en esta fase por efectos de la electrolisis, se generarán gases los cuales serán atrapados por una campaña para su almacenamiento, sin embargo, estos gases existirían sólo si se usa HCl para aumentar la conductividad iónica.

## 2. Balance de materia

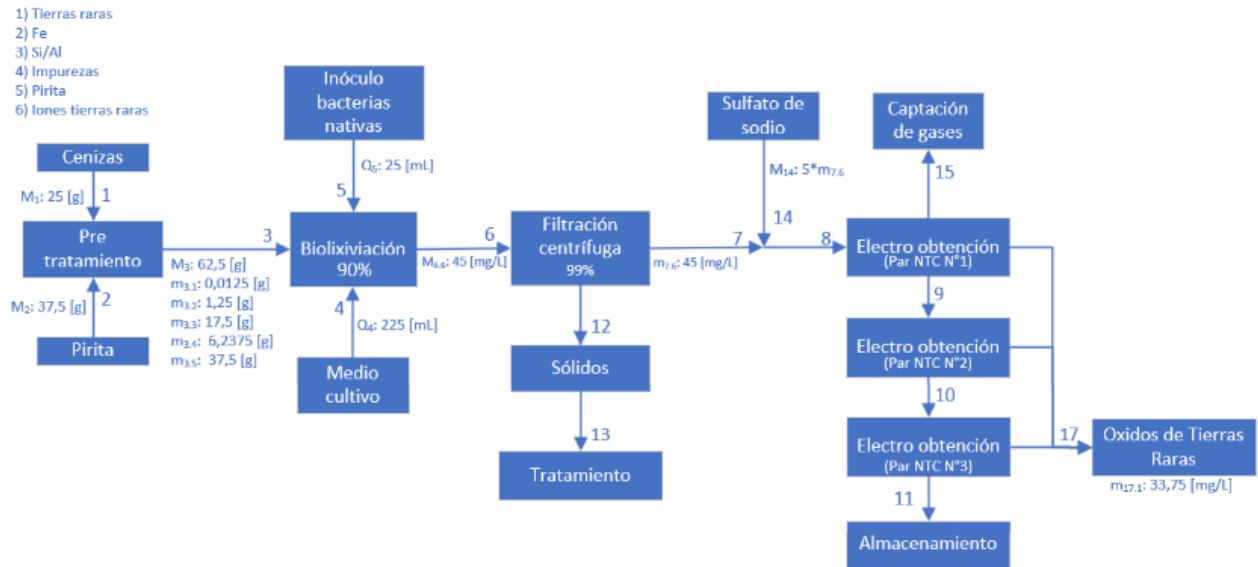


Figura 1: Balance de materia del proceso (elaboración propia).

Tabla 1: Composición de flujos del proceso. (elaboración propia)

Corriente	Pirita [g]	RR.EE. [g]	Fe [g]	Si/Al [g]	Impurezas [g]	Medio de cultivo [mL]	Inóculo [mL]	Iones RR.EE [mg/L]	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> [mL]	Gases [m <sup>3</sup> /h]
1	-	0,0125	1,25	17,5	6,2375	-	-	-	-	-
2	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	25	0,0125	1,25	17,5	6,2375	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	225	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	25	-	-	-
6	13,75	0,00125	1,25	17,5	6,2375	225	25	45	-	-
7	0,1375	0,0000125	0,0125	0,175	0,062375	225	25	45	-	-
8	0,1375	0,0000125	0,0125	0,175	0,062375	225	25	45	225	-
9	-	0,0000125	0,0125	0,175	0,062375	225	25	45	225	-
10	-	0,0000125	0,0125	0,175	0,062375	225	25	45	225	-
11	-	0,0000125	0,0125	0,175	0,062375	225	25	45	225	-
12	13,6125	0,0012375	1,2375	17,325	6,175125	-	-	-	-	-
13	0,13613	0,0012375	1,2375	17,325	6,175125	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	225	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Dependiente
16	-	-	-	-	-	-	-	33,75	-	-

Se realizaron los siguientes supuestos:

a) Composición de la alimentación

- Masa total = 25 [g cenizas] + 37,5 [g pirita]
- Tierras raras = 0,05%
- Fe = 5%
- Sílice/Aluminio = 70%
- Impurezas = 24,95%

b) Densidad de las cenizas: 0,8 [g/mL]

c) Masa aportada por el inóculo al flujo 4 despreciable.

d) Sin pérdidas en los flujos o procesos

3. Diseño de equipos principales

- Módulo de biolixiviación

Se necesitarán 4 matraces Erlenmeyer (triplicado + blanco) de 500 [mL] resistentes a pH bajo, agitadores magnéticos con 100 [RPM], termocupla para medir la temperatura constante cerca de

los 30 [°C], sensores de monitoreo de pH y espectrofotómetro para medir las concentraciones de iones férricos y sulfato.

- Módulo de separación centrifuga

Se necesitará una maquina centrifuga, tubos Falcon y pipetas para la toma de muestras.

- Módulo de electro obtención

Se necesitará una celda de acrílico con compartimentos separados de un volumen de 500 [mL], que pueda mantener los electrodos en serie y tenga sellos herméticos para electrodos y muestreo, 3 pares de filtros de nanotubos de carbono para la configuración, fuente de poder programable entre 0 a 30 [V], acoplado con sensores de pH, corriente y temperatura, que luego será almacenado para su disposición final o tratamiento para la recuperación de compuestos de interés, o bien, una fracción del efluente podría ser recirculado (40%) a la entrada de la electro obtención para el aprovechamiento de reactivos químicos, reducir costos operacionales y aumentar la eficiencia de obtención de 75% a 85%, o incluso hasta el 95% tras una optimización rigurosa e implementación de más pares de NTC en serie para aumentar la eficiencia por especie iónica.

#### 4. Escalamiento

Para la escala piloto, los parámetros experimentales de dimensiones se multiplicarán por 4000, manteniendo los parámetros de control y tiempo, quedando una masa de cenizas de alimentación de 100 [kg], el pretratamiento seria operado mediante un molino de martillos pequeño, la etapa de biolixiviación necesitaría un reactor de 1500 [L] con agitador, control de pH, temperatura y de un material resistente al liquido acido.

Para la separación se usaría un filtro de prensa y para la etapa de electro obtención se necesitarán celdas en serie con capacidad de 500 [L].

Para la escala industrial los parámetros de las dimensiones de la escala piloto se multiplicarán por 100, de manera que la alimentación será de 1 [ton], estimando una producción de tierras raras de 3.36 [kg] por lote.

Para esta escala es necesario un molino de bolas de capacidad de 1 tonelada mínimo, los reactores para la biolixiviación serán cambiados por piscinas con agitación , aproximadamente se usarán 5 de 60 [m<sup>3</sup>] y profundidad de 3,5 de profundidad y recubierta de geomembrana para impedir infiltración y contaminación al suelo y napas subterráneas, además tendrán aireadores en el fondo

para mantener las condiciones adecuadas de las bacterias aerobias, por otro lado para el control del proceso se necesitaran sensores de pH y temperatura.

La separación de fases usara el mismo filtro de prensa y para la etapa de electro obtención se emplearán 10 celdas de acrílico en paralelo y hechas a medida, cada una con 3 pares de electrodos de filtro de nanotubos de carbono en serie, con espesor de 1,5 a 2,0 [cm] y con capacidad de 200 [L] de solución, por otro lado, para el control del proceso se requerirá de sensores de pH, temperatura y conductividad, como también de bombas para la recirculación.

## 5. Ubicación del módulo

### 5.1. Análisis del espacio

El espacio propuesto para el caso de ejemplo se encuentra dentro del terreno de 220 hectáreas del depósito de cenizas pangué, para minimizar costos de traslado, como por ser un terreno extenso, relativamente alejado de las comunidades y ser propiedad de la empresa a la cual se le brindaría el servicio.

### 5.2. Requerimientos de terreno

Se estima que serán necesarias como máximo 0,5 hectáreas, idealmente plana, con superficie poco compacta, donde se disponga de acceso a energía eléctrica de alta tensión para alimentar los equipos, donde se considera la zona de producción, almacenamiento de insumos y producto, zona de RILes, áreas de servicio como laboratorios de control de calidad, baños, taller de mantenimiento, comedor, y caminos internos para el tránsito de vehículos al interior del espacio.

## 6. Logística de producto, materia prima, materiales, etc.

### 6.1. Materia prima

La materia prima será recolectada en terreno mediante excavadoras y dispuestas en tolvas que facilitarán su traslado de ser necesario y se dispondrán en espacios cerrados como silos techados para evitar dispersión con el viento o contacto con la lluvia y humedad.

En cuanto a los insumos, los reactivos a utilizar son ácido sulfúrico para el medio 9K y control de pH, hidróxido de sodio, para la digestión alcalina, ácido clorhídrico para la lixiviación ácida y sulfato de sodio o cloruro de sodio para la electro obtención y su transporte debe ser realizado por empresas autorizadas para el manejo de sustancias peligrosas, una vez en el sitio de operación,

deben ser guardados en bodegas RESPEL, mientras que los insumos biológicos deben realizarse en terreno dentro de los laboratorios.

## 6.2. Producto final

El producto será almacenado en tambores herméticos para proteger de condiciones climáticas como polvo, humedad o contaminación, dentro de bodegas techadas hasta el momento de transporte al cliente final.

## 7. Recursos humanos requeridos

Se requerirá de un jefe de planta, idealmente ingeniero de procesos, para la supervisión de la operación y optimizar parámetros para gestionar una buena calidad del producto, el cual estará a cargo de dos operadores de planta por turno, especializados en minería, química o metalurgia para manejar los equipos, tomar muestras y controlar variables de la producción, en paralelo existirá un encargado de laboratorio y de control de calidad, especializado en análisis químico, para hacer seguimiento de concentraciones y caracterización de bacterias, teniendo como rol adicional apoyar en la optimización del consorcio bacteriano y como mejorar el proceso electroquímico, se debe contar con un encargado de mantenimiento eléctrico/mecánico para mantener los equipos en condiciones óptimas y un encargado de seguridad y medio ambiente (SHE) que se encargue de cumplir las normativas de seguridad, manejo de residuos y coordinación con autoridades y la termoeléctrica.

En la parte administrativa, se deberá contar con un gerente, que puede ser el mismo jefe de planta, encargado de la relación con la termoeléctrica, búsqueda de compradores, gestión de contratos y revisión y autorización de protocolos o planes de trabajo seguro.

## 8. Reglamentación aplicable

- Ley N° 19.300

Por otro lado, bajo la modificación del RSEIA por el D.S. N° 17/2025, el proyecto no entraría como EIA al ser un Sistema o planta de tratamiento de residuos que presenten alguna de las características de peligrosidad establecidas en el decreto supremo N°148/2003 del ministerio de salud, o el que lo reemplace, con una tasa de ingreso menor a 5 [ton/día], donde las cenizas se categorizan en primera instancia como no peligrosas, sin embargo se deberían realizar análisis de composición para asegurar que no contengan concentraciones de elementos peligrosos de la Lista II.

Sin embargo, se deberían evaluar el resto de los artículos no modificados para evaluar si el proyecto genera algún cambio significativo en el ambiente, lo que determinaría si es necesaria o no la realización de un EIA.

- Ley N° 20.920

La ley REP es relevante en el aspecto de los potenciales subproductos, es decir, Hierro, Aluminio y Sílice obtenidos del proceso desde los efluentes que podrían tratarse para aprovechar al máximo el residuo almacenado.

- Ley N° 20.551

Ley que obliga a toda faena minera a presentar y garantizar un Plan de Cierre para que al finalizar las operaciones el sitio quede estable, libre de riesgos y con todos los equipos desmantelados, en el caso del ejemplo propuesto, la planta de tratamiento cuenta con parte de actividad minera/metalúrgica, por lo que debe regirse bajo esta al manejar residuos mineros. Como las instalaciones se realizan dentro del terreno de la termoeléctrica, esta debe actualizar su Plan de Cierre e incorporar el manejo de este módulo de tratamiento.

- Ley N° 132/2002

El reglamento de seguridad minera es de carácter obligatorio y se justifica al igual que la ley anterior, establece protocolos, normas internas, planes de emergencia ante derrames, incendios, accidentes y desastres naturales, como también las obligaciones del titular.

- D.S. N° 594/1999

Aplica para todo tipo de trabajo y fiscaliza las condiciones generales de iluminación, ventilación, temperatura, servicios higiénicos, acceso a agua potable y manejo de residuos sólidos no peligrosos, como también, la entrega de EPP's y establecer condiciones de almacenamiento de residuos sólidos para evitar proliferación de vectores sanitarios.

- D.S. N° 148/2003

El reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos determina si los RILes y sólidos lixiviados poseen alguna característica de peligrosidad, en caso de presentar alguna de estas características, se deberán almacenar en sitio bajo las condiciones que se definen, contar con libro de registros y hacer entrega a un gestor autorizado para su disposición final.

- D.S. N° 160/2008

El reglamento de seguridad para las instalaciones y operaciones de producción y refinación de sustancias químicas es clave para la seguridad de instalaciones que manejan grandes

cantidades de sustancias químicas, al fiscalizar las condiciones de estanques y depósitos de ácidos con condiciones establecidas en el decreto.

## Estudio económico

### 1. Base de la evaluación económica

El modelo económico se estructura dentro del escenario donde la termoeléctrica requiere internalizar el proceso para autogestionar sus cenizas, evitando costos de disposición y generando un nuevo flujo de ingresos.

Este escenario considera un ahorro significativo en cuanto a la compra del terreno, dado que, como se estaría brindando un servicio a la termoeléctrica dentro de su propio terreno, no deberían hacerse estimaciones de costos de suelo dentro del depósito Pangue, por otro lado, se realiza el supuesto de que ya se cuenta con las infraestructuras básicas, como caminos, acceso a electricidad, casinos y oficinas, reduciendo así las inversiones relacionadas a obras civiles.

#### 1.1. Antecedentes financieros

Para la elaboración del flujo de caja, se considerará una tasa de descuento del 12% anual, considerando el riesgo tecnológico, un horizonte de evaluación a 15 años, precio de venta del concentrado mixto de tierras raras de 45-50 [USD/kg].

Por parte de la empresa, esta ahorra los costos de disposición de las cenizas al depósito.

#### 1.2. Vida útil del módulo

Se estima que el módulo de la planta a escala industrial tendrá una vida útil de 15 años, la cual puede extenderse si se realizan los mantenimientos adecuados, de manera periódica y de buena manera, donde los equipos críticos que requerirían de estas mantenciones serían aquellas que trabajan con pH bajos, como el módulo de biolixiviación y las celdas de electro obtención, asegurando que los materiales resistentes a la corrosión como las geomembranas o el acrílico se mantengan sin fisuras y en buenas condiciones al contar con una inspección constante.

No obstante, se considera un costo adicional en el último año, asociado al costo del Plan de cierre de faena, el cual se estimará como un 15% del CAPEX, es decir, 32.014 [USD].

#### 1.3. Listado de inversiones (CAPEX)

*Tabla 2: Costos de inversiones en terreno y construcciones.*

Terreno y construcciones	\$USD
Terreno	N/A
Oficinas	N/A
Sala administrativa	N/A

Baños	N/A
Comedor	N/A
Estacionamiento de autos pequeños	N/A
Estacionamiento de autos pesados	N/A
Zona segura	N/A
Conectividad eléctrica	N/A
Caminos	N/A
Nivelación de terreno	3850
Losas industriales	22276
Almacén RESPEL	20000
Medidas de extinción de incendios	10000

*Tabla 3: Costos de inversiones en equipos del proceso.*

Pretratamiento	\$USD
Molino de bolas	20000
Tolvas	2500
Silos de almacenamiento	10500
Biolixiviación	\$USD
Piscina 60 [m3]	27000
Geomembrana	0
Sistema de aireación	17500
Sensores de pH y T	390
Bombas de recirculación	1260
Separación Sólido-Líquido	\$USD
Filtro de prensa industrial	4200
Electro obtención	\$USD
Celdas de acrílico de 200 [L]	746
Pares de electrodos de filtro de nanotubos de carbono	20000
Fuente de poder programable	979
Sensores de pH y T	650
Bombas de recirculación	1260

*Tabla 4: Costos de inversiones en aspectos complementarios.*

Laboratorio y control	\$USD
Espectrofotómetro	1122
Microscopio	2075
Estufa de cultivo	4895
Materiales de vidrio	1000
Balanza	103
Computadores para monitoreo	1122
Instalaciones auxiliares	\$USD

Sistema de ventilación	5000
Tuberías químicas	7500
Ingeniería y puesta en marcha	\$USD
Ingeniería de detalle	15000
Pruebas de arranque	10000
Capacitación del personal	2500
Total CAPEX	213428

#### 1.4. Detalles de costos (OPEX)

Tabla 5: Costos de operación de materia prima.

Materia prima	
Fly ash	-
Pirita	63225

Tabla 6: Costos de operación de reactivos químicos.

Reactivos químicos	
H2SO4	5250
NaOH	2184
HCl	16575
Na2SO4	381

Tabla 7: Costos de operación de servicios.

Servicios	
Agua	750
Electricidad	0
Mantenimiento	8537
Gestión de residuos	3000
Transporte de producto	2000

Tabla 8: Costos de operación de mano de obra.

Mano de obra	
Jefe de planta	20250
Operadores	52440
Encargado laboratorio	14748
Mantenimiento/SHE	28404
Total OPEX	217744

## 2. Evaluación económica

### 2.1. Criterios para la evaluación (VAN TIR)

Para el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR), se determinará considerando un flujo de caja a 15 años y una tasa de descuento del 12%.

### 2.2. Flujo de caja

Tabla 9: Flujo de caja acumulado.

Año	Flujo de caja acumulado [USD]
0	-213428
1	-164303
2	-85344
3	-6385
4	72574
5	151533
6	230492
7	309451
8	388411
9	467370
10	546329
11	625289
12	704249
13	783211
14	862173
15	916165

### 2.3. Evaluación de indicadores de rentabilidad

Tabla 10: Indicadores de rentabilidad.

VAN	\$1.554.703
IR	61970
Recuperación	4,08
TIR	33%

El VAN indica que el proyecto es rentable, mostrando que recuperar tierras raras desde cenizas volantes es económicamente viable, no solo por la propuesta de producción verde y revalorización de un pasivo ambiental, sino porque es económicamente sostenible, incluso tras optar por un modelo de mercado en el cual se le paga a las termoeléctricas un incentivo por prestar las instalaciones, terreno y materia prima.

El TIR es mayor que la tasa de descuento, evidenciando la alta rentabilidad, incluso soportando aumento de costos de operación o reducción de ingresos, siendo además altamente atractiva a ojos de los inversionistas al ver un TIR del 33% para un proyecto de economía circular.

Por último, el payback de 4,08 años es considerablemente bajo, lo que reduce el riesgo de inversión por parte de la termoeléctrica o inversionistas externos.

#### 2.4. Análisis de sensibilidad

Se realizaron tres escenarios, donde los indicadores de rentabilidad variaron en función en cada escenario, quedando de la siguiente manera:

Tabla 11: Análisis de escenarios.

	Optimista	Pesimista	Shock regulatorio
VAN	\$2.741.981	\$-696.349	\$-464.842
IR	177554	-143193	-131295
Recuperación	3,07	12,41	9,75
TIR	48%	3%	7%

Se puede observar cómo el proyecto es altamente sensible al precio de la venta de tierras raras, el incentivo a la termoeléctrica y la eficiencia del proceso, por lo que es altamente viable considerar estrategias de compra a largo plazo para fijar precios de base, por otro lado, el punto de equilibrio, cuando el VAN es 0 se encuentra entre los 44 y 45 [USD/kg], por lo que cualquier precio inferior a 45 [USD/kg], junto a sus respectivas modificaciones en las variables analizadas hace inviable este proyecto.

Por otro lado, el escenario de shock regulatorio indica que, a pesar de tener un VAN negativo, el TIR sigue siendo positivo, por lo que el proyecto podría ser viable aún si es que se realizan pequeños ajustes.

Por último, en todos los escenarios menos el pesimista se observa que el TIR supera la tasa de descuento, lo que evidencia el alto atractivo del proyecto para inversionistas.

#### 3. Recomendaciones generales

Por parte del estudio técnico, se recomienda concentrar previamente el licor que alimenta la fase de electro obtención, lo cual se podría lograr con técnicas de evaporación controlada u osmosis inversa, lo que permitiría aumentar la concentración de tierras raras en el licor, mejorando así la

eficiencia del proceso electroquímico y reduciendo también el consumo eléctrico y de reactivos por kilogramo de producto obtenido.

También se recomienda el estudio del consorcio bacteriano a utilizar, contando con un mejoramiento continuo para reducir el tiempo de residencia en la biolixiviación por debajo de los 21 días, idealmente logrando un tiempo de residencia de 15 días.

En base a los resultados del estudio económico se recomienda avanzar en la fase piloto in-situ, con el fin de dar mayor robustez a los datos presentados, como también validar las composiciones de los depósitos, ya que las trazas de tierras raras pueden variar y no encontrarse perfectamente homogenizadas en el material depositado.

Se recomienda también establecer un precio basal de las tierras raras de 45 [USD/kg] así como establecer un precio máximo de incentivo a las termoeléctricas de 5 [USD/kg] para evitar que se invalide el proyecto por no encontrarse dentro de los umbrales permisibles de factibilidad económica.

Por último, se recomienda diseñar la planta con una sobrecapacidad para cumplir ante cambios normativos a futuro que podrían ocurrir por shock regulatorio a mediano plazo, especialmente ante modificaciones o nuevas regulaciones que afecten directamente la bodega RESPEL, sistema de ventilación y medidas de seguridad.

### 3.1. Propuesta de modelo de negocio

Se propone ofrecer un modelo de servicio de gestión integral de pasivos, el cual permite que el socio estratégico (termoeléctrica) brinde el terreno, cenizas a costo cero y servicios auxiliares como agua y electricidad, generándoles así un ahorro por la disposición evitada como también un ingreso variable por kilogramo de tierras raras producidas.

Esto significa ventajas para el operador al no realizar una inversión inicial, mientras que el operador asegura el acceso exclusivo a la materia prima mediante el contrato entre las partes.

## 4. Gestión de riesgos

A partir del análisis de sensibilidad, se consideran y priorizan los riesgos por caída de precio de las tierras raras por debajo de 45 [USD/kg], lo que genera un impacto económico alto al dar un VAN negativo, a pesar de presentar una probabilidad de ocurrencia media. Las medidas de mitigación

radican en realizar acuerdos de compra a largo plazo con precios basales y promover la venta de los subproductos.

También se consideran posibles malos diseños de operación que se reflejen en malas eficiencias, generando un alto impacto y con baja probabilidad de ocurrencia si se generan las pruebas adecuadas y se cuenta con buena literatura referencial, se propone como medida de mitigación realizar una fase piloto y experimental rigurosa antes del escalamiento final, además de una caracterización continua tanto del consorcio bacteriano como de las cenizas.

Por último, se considera un aumento en los costos de los insumos, los cuales tienen un impacto medio, son probables que ocurran y como medida de mitigación se propone contar con contratos de suministro de insumos a largo plazo para evitar estas fluctuaciones, como también evaluar sustitutos.

## Conclusión

En síntesis, y en directa relación con los objetivos planteados al inicio de esta investigación, se concluye que estos fueron abordados y cumplidos de manera satisfactoria, ya que se desarrolló una evaluación integral de la factibilidad técnico-económica para la valorización de las cenizas de carbón mineral del depósito Pangué como fuente de tierras raras.

A través del estudio fue posible caracterizar el residuo, definir una propuesta conceptual de procesamiento para la recuperación de elementos de valor, analizar las condiciones de mercado asociadas a su eventual comercialización, identificar riesgos y exigencias regulatorias relevantes, como también determinar indicadores económicos que respaldan la viabilidad preliminar de la alternativa propuesta.

El estudio de mercado valida la existencia de una oportunidad estratégica significativa, sustentada en una oferta de materia prima abundante y de bajo costo como el mencionado en el depósito Pangué, de la Central Ventanas en Quintero – Puchuncaví de 1.533.292 [m<sup>3</sup>] de cenizas volantes, con una concentración estimada de tierras raras del 0,05%.

En conjunto con la demanda global de tierras raras en constante crecimiento, impulsada por tecnologías limpias y caracterizada por una alta inelasticidad, sin embargo, las proyecciones indican un déficit de oferta primaria en las próximas décadas, dada la volatilidad inherente del mercado oligopólico, lo que refuerza el atractivo de fuentes secundarias como la evaluada, como también, justifica la búsqueda de acuerdos de compra a largo plazo.

En cuanto al estudio técnico, la implementación a escala industrial, procesando 1 tonelada de cenizas por lote, permitiría obtener aproximadamente 425 [kg/lote] de concentrado mixto de óxidos de tierras raras, traducéndose en 5525 [kg/año], demostrando la factibilidad del proceso integrado y que la combinación de biolixiviación con bacterias acidófilas nativas y electro obtención con filtros de nanotubos de carbono puede alcanzar eficiencias de extracción cercanas al 90% para elementos clave como La, Nd e Y.

Desde la perspectiva económica, los indicadores de rentabilidad resultan altamente prometedores, con un Valor Actual Neto (VAN) de USD 1.554.703, una Tasa Interna de Retorno del 33% y un período de recuperación de 4,08 años, considerando un precio de venta del concentrado entre 45 y 50 [USD/kg] y una tasa de descuento del 12%. El análisis de sensibilidad muestra que el proyecto es robusto en escenarios optimistas (VAN de USD 2.741.981 y TIR del 48%), aunque presentando

una vulnerabilidad importante ante caídas del precio por debajo de los 45 [USD/kg]. Incluso en un escenario de shock regulatorio, el TIR se mantiene en 7%, evidenciando la resiliencia del modelo de negocio basado en la gestión integral de pasivos ambientales.

Finalmente, el proyecto no solo demuestra viabilidad económica, sino que se alinea con los principios de economía circular y transición energética, buscando transformar un pasivo ambiental de 13.850.240 [m<sup>3</sup>] de cenizas acumuladas a nivel nacional en una fuente de materias primas críticas, donde la generación de subproductos como hierro, aluminio y sílice, junto con el ahorro en costos de disposición para las termoeléctricas, y la reducción de riesgos de contaminación de suelos y aguas, posiciona a Chile dentro de la diversificación de la cadena de suministro global de tierras raras, sin embargo se recomienda avanzar en la fase piloto in-situ para validar los parámetros operacionales y consolidar alianzas estratégicas que mitiguen los riesgos como volatilidad de precios y la variabilidad composicional de las cenizas.

## Bibliografía

Rachappa, S., Prakash, Y., & Amit. (2015). Iron Ore Recovery from Low Grade by using Advance Methods. *Procedia Earth And Planetary Science*, *11*, 195-197. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.024>

Rodríguez, J. (2026). El uso de la arena de sílice en la construcción. *Rai pintores*. <https://www.raipintores.com/blog/arena-silice/>

Alvarez, D. C. (2018). *Monografía. Las Tierras raras y los actínidos Estado natural Propiedades físicas de las tierras raras y actínidos Importancia en tecnología de punta Aplicaciones Impactos sobre la biodiversidad de las tierras raras y los actínidos.*

Rifo, M. (2025, 13 junio). Tierras raras: crece la competencia global por minerales estratégicos - Reporte Minero | El portal de minería en Chile. *Reporte Minero | el Portal de Minería En Chile*. <https://www.reporteminero.cl/noticia/reportajes/2025/06/mineria-tierras-raras-competencia-global-minerales-criticos>

SEN (2025, noviembre). Reporte energético noviembre 2025.

Yáñez, C., Garrido-Lepe, M., Yáñez, C., & Garrido-Lepe, M. (s. f.). El tercer ciclo del carbón en Chile, de 1973 a 2013: del climaterio al rejuvenecimiento. *www.scielo.org.mx*. <https://doi.org/10.18232/alhe.v24i3.833>

Aduanas Chile (2025). *Base de datos dinámicas de importaciones*. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZGE1OGNkYWYtN2YyZS00ZmY4LWExMzItNGUzYzgxNmJiNTg2IiwidCI6IjJiMjRkYmQ1LTMzYmEtNDgyZi04ZGMzLTAyMWJiMTU0ZjdiMSIsImMiOiR9>

Trade map (2025), *2701 – Coal; briquettes, ovoids and similar solid fuels manufactured from coal*. [https://www.trademap.org/Country\\_SelProductCountry\\_Graph.aspx?nvpm=1%7c152%7c%7c%7c%7c2701%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c1%7c1%7c2%7c1%7c%7c2](https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry_Graph.aspx?nvpm=1%7c152%7c%7c%7c%7c2701%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c1%7c1%7c2%7c1%7c%7c2)

Restrepo, J. H. (2019). *Identificación de elementos de tierras raras en carbones colombianos*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76680>

Díaz, H. F., Romero, M. H., Bernal, J. A. S., & Martínez, E. F. G. (2024). Análisis de elementos de tierras raras en cenizas de Carbón a través de técnicas de aprendizaje automático no supervisado

(CLUSTERING). *Apuntes de Ciencia E Ingeniería*, 3(2).  
<https://doi.org/10.37511/apuntesci.v3n2a6>

Mkhize, M., Wagner, N., & Bada, S. (2026). The distribution and occurrence of rare earth elements (REEs) in coal and industrial scale boiler and gasifier ash. *Fuel (London, England)*, 405(136618), 136618. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136618>

Inodú. (2018). Informe final – licitación ID: 584105-9-LE18. *Estudio de Variables Ambientales y Sociales que deben Abordarse para el Cierre o Reconversión Programada y Gradual de Generación Eléctrica a Carbón*.  
[https://energia.gob.cl/sites/default/files/12\\_2018\\_inodu\\_variables\\_ambientales\\_y\\_sociales.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/12_2018_inodu_variables_ambientales_y_sociales.pdf)

Zhao, C., Yang, B., Hu, S., Wang, J., Liu, Y., & Qiu, G. (2025). Bioleaching and mechanism of ion-adsorption type rare earth ores and tailings using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Hydrometallurgy*, 236, 106495. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2025.106495>

Corrales, L. C., Sánchez, L. C., León, A. S., Quintero, V. S., Díaz, J. Z., & Cortes, P. S. (2006). Estudio piloto de aislamiento y fenotipificación de bacterias que participan en los procesos de biolixiviación, en las zonas mineras del Departamento de Boyacá. *Nova*, 4(5), 57-63. <https://doi.org/10.22490/24629448.348>

Menadier, M., Vargas, J., De Ciencias Físicas y Matemáticas, F., De Ingeniería Química y Biotecnología, D., Blanca, E. M., & Francisco, G. C. (2009). *Biolixiviación de Piritas por Acidithiobacillus Ferrooxidans y Cepas Nativas*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103540>

Modiga, A., Eterigho-Ikelegbe, O., & Bada, S. (2024). Extractability and mineralogical evaluation of rare earth elements from Waterberg Coalfield run-of-mine and discard coal. *International Journal Of Coal Science & Technology*, 11(1). <https://doi.org/10.1007/s40789-024-00702-z>

Sabrina F. Lütke, Marcos L.S. Oliveira, Samuel R. Waechter, Luis F.O. Silva, Tito R.S. Cadaval, Fabio A. Duarte, Guilherme L. Dotto. (2022). Leaching of rare earth elements from phosphogypsum. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134661>

Ma, Y., Stopic, S., & Friedrich, B. (2018). Hydrometallurgical Treatment of an Eudialyte Concentrate for Preparation of Rare Earth Carbonate. *Johnson Matthey Technology Review*, 63(1), 2-13. <https://doi.org/10.1595/205651318x15270000571362>

O'Connor, M. P., Coulthard, R. M., & Plata, D. L. (2017). Electrochemical deposition for the separation and recovery of metals using carbon nanotube-enabled filters. *Environmental Science Water Research & Technology*, 4(1), 58-66. <https://doi.org/10.1039/c7ew00187h>

## Anexos

Se utilizó planilla Excel de elaboración propia para realizar el estudio económico y tabla de composiciones en el flujo de caja.