

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE
MATERIALES**



**UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA**

**Evaluación técnica y económica de la extracción
selectiva de litio mediante solventes eutécticos
profundos**

Profesor Guía: Yahaira Barrueto J.

Cotutor: Robinson Constanzo

CATALINA RAFAELLA ORTIZ TOLEDO

2025



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: Evaluación técnica y económica de la extracción selectiva de litio mediante solventes eutécticos profundos

Nombre del candidato(a): Catalina Rafaella Ortiz Toledo

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Metalúrgica

Campus: Casa Central Valparaíso; Departamento: DIMMM

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Yahaira Barrueto, 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

☒ 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:

☐ 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: 12/08/2025

; Firma:

Y. Barrueto J.

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 12/08/2025

; Firma:

Catalina

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.

Resumen Ejecutivo

Una de las problemáticas actuales para la producción de productos de litio es el tiempo requerido por el proceso convencional, esto debido la evaporación solar puede tardar hasta 18 meses en concentrar la salmuera y obtener compuestos como carbonato o hidróxido de litio. Este alto tiempo representa una limitación crítica frente a la creciente demanda mundial por litio, especialmente en el contexto de la transición energética y el crecimiento de la industria de vehículos eléctricos. Además, en Chile actualmente no se produce litio metálico, a pesar de contar con condiciones geológicas favorables y una posición estratégica en el mercado global.

Frente a esta situación, el presente trabajo propone y evalúa un proceso alternativo para la obtención de litio metálico a partir de salmuera, combinando extracción por solvente y electrodeposición, con el uso de disolventes eutécticos profundos como medio extractante. Estos solventes se destacan por su bajo impacto ambiental, baja volatilidad y alta selectividad hacia el ion litio, lo que los convierte en una opción prometedora frente a solventes orgánicos tradicionales. Con base en lo anterior, se desarrollaron y analizaron cuatro escenarios distintos, que varían según el tipo de salmuera y el tipo de DES empleado. Cada uno fue evaluado desde el punto de vista técnico y económico.

Los resultados demostraron que el Escenario 3, basado en salmuera sulfatada y una sola etapa de extracción con el sistema DES compuesto por $N_{8881}Cl/DecA$, ofrece el mejor balance de masa y económico general. Este escenario logró una eficiencia global del 43%, un VAN de 6,760 MUSD, una tasa interna de retorno del 30% y un payback de 3.4 años, todo con una demanda significativamente menor de salmuera y DES en comparación con los demás escenarios. Este enfoque no solo resulta viable desde el punto de vista económico, sino que también contribuye a reducir el impacto ambiental asociado al proceso de obtención de litio.

Abstract

One of the current challenges in lithium product manufacturing is the long time required by the conventional process. This is due to solar evaporation, which can take up to 18 months to concentrate the brine and obtain compounds such as lithium carbonate or lithium hydroxide. This long duration represents a critical limitation given the growing global demand for lithium, especially in the context of the energy transition and the expansion of the electric vehicle industry. Additionally, lithium metal is not currently produced in Chile, despite having favorable geological conditions and a strategic position in the global market.

In response to this situation, the present work proposes and evaluates an alternative process for obtaining lithium metal from brine, combining solvent extraction and electrodeposition, using deep eutectic solvents (DES) as the extracting medium. These solvents stand out due to their low environmental impact, low volatility, and high selectivity toward lithium ions, making them a promising alternative to traditional organic solvents. Based on this, four different scenarios were developed and analyzed, varying according to the type of brine and the DES system used. Each was evaluated from both a technical and economic perspective.

The results demonstrated that Scenario 3, based on sulfate-rich brine and a single extraction stage using the DES system composed of N8881Cl/DecA, offers the best overall mass and economic balance. This scenario achieved a global efficiency of 43%, a net present value (NPV) of 6.76 million USD, an internal rate of return of 30%, and a payback period of 3.4 years, all while requiring significantly lower amounts of brine and DES compared to the other scenarios. This approach is not only economically viable but also contributes to reducing the environmental impact associated with lithium production.

Agradecimientos

A mis padres, gracias por todo el esfuerzo que hicieron por mí y por el apoyo incondicional que me brindaron durante estos siete años. Gracias siempre por esperarme siempre con comida calentita, y por estar presentes en cada etapa de este camino.

A mi hermana, gracias por enseñarme con tu ejemplo a ser perseverante y constante. Tu dedicación en la escuela me inspiró a no rendirme, incluso en los momentos difíciles.

A mis abuelos, gracias por sus oraciones, sus palabras de aliento y su fe en mí. Su cariño fue un pilar importante en este proceso universitario.

A mis tíos y primos, gracias por las conversaciones sobre historias del pasado, que en más de una ocasión me ayudaron a desconectarme y aliviar la carga de los días más pesados.

A Matías, gracias por tu apoyo durante estos últimos años de universidad. Compartir esta etapa contigo la hizo más significativa y llevadera. Gracias por acompañarme en este cierre tan importante.

A mis amigos, gracias por los buenos momentos compartidos a lo largo de estos años. Algunos quedaron en el camino, pero sin duda me llevo los mejores recuerdos de cada uno. A mis amigas, gracias por estar siempre ahí, por las conversaciones, los chismes, las risas y por su compañía constante. Han sido un pilar importante en mi vida universitaria.

A mis profesores, gracias por cada orientación, por responder a mis dudas, por su paciencia y por formar parte de mi crecimiento académico y profesional. Sus enseñanzas quedarán conmigo más allá de las aulas.

A la profesora Yahaira, gracias por su apoyo desde el primer momento. Su disposición y guía fueron fundamentales para la realización de esta memoria. No habría sido posible sin su acompañamiento. Gracias por estar presente en el cierre de esta etapa universitaria.

A Cloy, mi querida perrita, gracias por acompañarme durante las clases online, por esperarme pacientemente y recibirme siempre moviendo tu colita con alegría. Tu compañía silenciosa fue tranquilidad en los momentos de estrés.

Índice

Resumen Ejecutivo	2
Abstract	3
Agradecimientos	4
Índice	5
Índice de Figura	8
Índice de Tablas	9
Capítulo 1: Introducción	10
1.1 Problemática	12
1.2 Alcance	12
1.3 Objetivos	12
1.3.1 Objetivo General	12
1.3.1 Objetivos Específicos	12
Capítulo 2: Antecedentes Teóricos	13
2.1 SQM Salar	13
2.2 Mercado del Litio	13
2.3 Procesos actuales de litio	14
2.3.1 Proceso de litio a partir de pegmatitas.....	14
2.3.2 Proceso de litio a partir de salmuera clorurada	15
2.3.3 Proceso de Litio a partir de Salmuera Sulfatada	18
2.4 Productos de Litio.....	20
2.5 Solventes eutécticos profundos (DES)	20
2.5.1 Propiedades de los DES.....	21
2.6 Factores que afectan la eficiencia de extracción por solvente.....	22
2.6.1 Proceso de extracción por solvente	22
2.6.2 Coeficiente de distribución.....	22
2.6.3 Selectividad	23
2.6.4 pH	23
2.6.5 Razón O/A	23

2.6.6 Tiempo de contacto por medio de agitación.....	24
2.6.7 Eficiencia de Extracción.....	24
2.7 Electrodeposición	25
2.7.1 Proceso industrial actual de obtención de litio metálico a partir de salmueras	26
2.8 Antecedentes bibliográficos.....	28
Capítulo 3: Evaluación Técnica	31
3.1 Escenario 1	31
3.2 Escenario 2	34
3.3 Escenario 3	35
3.4 Escenario 4	37
3.5 Resumen de evaluación técnica.....	39
Capítulo 4: Evaluación Económica	40
4.1 Metodología de evaluación.....	40
4.1.1 Estados de resultados.....	40
4.1.2 CAPEX	40
4.1.3 OPEX.....	42
4.1.4 Depreciación.....	42
4.1.5 Valor actual neto (VAN)	43
4.1.6 Tasa interna de retorno	43
4.1.7 Relación beneficio/costo	44
4.1.8 Equipos utilizados en todos los escenarios.....	44
4.2 Supuestos	46
4.3 Comparación de escenarios	46
Capítulo 5: Análisis y discusión	47
5.1 Escenario 1: Extracción de litio desde salmuera clorurada con DES (N ₈₈₈₁ Cl/DecA)	47
5.2 Escenario 2: Extracción de litio desde salmuera clorurada con DES (HTTA/TOPO).....	49
5.3 Escenario 3: Extracción de litio desde salmuera sulfatada con DES (N ₈₈₈₁ Cl/DecA)	51

5.4 Escenario 4: Extracción de litio desde salmuera sulfatada con DES (HTTA/TOPO).....	52
5.5 Análisis Final	54
Capítulo 6: Diagrama de Flujo del Escenario 3	56
Capítulo 7: Conclusión y recomendaciones	58
Referencias	61
Anexos	64
Anexo 1.....	64
Anexo 2.....	64
Anexo 3.....	64
Anexo 4.....	65
Anexo 5.....	65
Anexo 6.....	65
Anexo 7.....	66
Anexo 8.....	66
Anexo 9.....	66
Anexo 10.....	67
Anexo 11.....	68
Anexo 12.....	68

Índice de Figura

Figura 1. Bomba de extracción.....	15
Figura 2. Proceso productivo SQM Salar de atacama.....	16
Figura 3. Diagrama del proceso de absorción para procesar litio	17
Figura 4. Diagrama del proceso DLE de extracción por solvente.....	18
Figura 5. Proceso de precipitación	18
Figura 6. Proceso de sulfato de litio	19
Figura 7. Proceso de obtención de sulfato de litio en detalle	19
Figura 8. Proceso de extracción por solvente.....	22
Figura 9. Celda electrolítica	25
Figura 10. Escenario 1 para la extracción selectiva y electrodeposición.	33
Figura 11. Diagrama de cajas Escenario 2	35
Figura 12. Diagrama de cajas Escenario 3	37
Figura 13. Diagrama de cajas Escenario 4	38
Figura 14. Diagrama del Proceso Escenario 3	57
Figura 15. OUTPUT de simulación en Phreeqc	64
Figura 16. INPUT de simulación en Phreeqc	65
Figura 17. OUTPUT de simulación en Phreeqc	65

Índice de Tablas

Tabla 1. Producto de Litio con sus respectivos precios.....	20
Tabla 2. Clasificación de los DES	20
Tabla 3. Comparación de extracción desde salmuera y agua de mar utilizando DES.....	29
Tabla 4. Comparación de electrodeposición de distintos metales	29
Tabla 5. Composición química salmuera clorurada	31
Tabla 6. Parámetros de operación de la salmuera para el proceso de extracción.	32
Tabla 7. Eficiencia del orgánico DEHPA	32
Tabla 8. Eficiencia DES 2.....	34
Tabla 9. composición química de salmuera sulfatada	35
Tabla 10. parámetros de operación para el proceso.....	36
Tabla 11. Resumen de evaluación técnica	39
Tabla 12. Ponderaciones para CAPEX.....	41
Tabla 13. Factores de instalación.....	41
Tabla 14. Ponderaciones para OPEX.....	42
Tabla 15. Costos de los equipos e instalación	45
Tabla 16. Comparación de escenarios	46
Tabla 17. Elección de escenarios con evaluación.....	54
Tabla 18. Balance de masa Escenario 1	64
Tabla 19. Balance de masa Escenario 2.....	65
Tabla 20. Escenario 3: Balance de masa	66
Tabla 21. Balance de masa Escenario 4.....	66
Tabla 22. Estado de Resultado Escenario 1 (Parte 1).....	66
Tabla 23. Estado de Resultado Escenario 1 (Parte 2).....	67
Tabla 24. Estado de Resultado Escenario 2 (Parte 1).....	67
Tabla 25. Estado de Resultado Escenario 2 (Parte 2).....	67
Tabla 26. Estado de Resultado Escenario 3 (Parte 1).....	68
Tabla 27. Estado de Resultado Escenario 3 (Parte 2).....	68
Tabla 28. Estado de Resultado Escenario 4 (Parte 1).....	68
Tabla 29. Estado de Resultado Escenario 4 (Parte 2).....	69

Capítulo 1: Introducción

En la última década, la transición hacia energías sustentables ha incrementado la demanda global de litio, un componente clave en la fabricación de baterías de ion-litio para dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos. Esta demanda se evidencia en el crecimiento exponencial de la industria de vehículos eléctricos, las ventas aumentaron de 131 mil unidades en 2012 a 6.8 millones en 2021, proyectándose que alcanzarán los 30 millones para 2030, según la Agencia Internacional de Energía.[1]

Para la producción de litio metálico, una de las vías más reconocida es la obtención de hidróxido de litio a partir de salmueras. Esta vía se considera preferencial por diversas razones, entre las que destacan sus menores costos de producción en comparación con la minería de roca dura y su potencialmente menor impacto ambiental. Las salmueras, aguas altamente concentradas en sales ubicadas en cuencas de salares, no solo contienen iones de litio (Li^+) sino también una variedad de otros iones, siendo el ion magnesio (Mg^{2+}), uno de los principales acompañantes.

El manejo adecuado de estos iones coexistentes es crucial, ya que la presencia de concentraciones elevadas de Mg^{+2} pueden dificultar la recuperación de litio debido a su comportamiento químico similar, interfiriendo en los procesos de separación y purificación del litio. Por lo tanto, la eficiencia en la extracción de litio desde salmueras no solo depende de la disponibilidad del recurso, sino también del desarrollo e implementación de técnicas de procesamiento que permitan una separación efectiva del litio. Este enfoque de extracción sostenible es vital para asegurar que la producción de litio pueda mantenerse al ritmo de la demanda creciente, especialmente en aplicaciones de alta tecnología y en la industria de vehículos eléctricos [2]. En respuesta a esta necesidad, es que nació el concepto de la extracción directa de Litio (DLE por sus siglas en inglés). Esta técnica consiste en que la salmuera se extrae desde el acuífero y se bombea a un reactor, donde se utiliza una resina de absorción selectiva para litio. Posteriormente, la salmuera gastada o libre de litio se reinyecta en los acuíferos de la cuenca, lo que permite conservar el equilibrio hidrológico y mitigar el impacto medioambiental.

En este contexto, SQM, es una de las empresas más importantes en la producción de litio a partir de salmueras. La empresa ha invertido enormemente en el desarrollo de tecnologías avanzadas que optimizan la extracción y

refinación del litio, asegurando una producción más limpia y eficiente de este metal.

En el marco de contribuir al desarrollo de la investigación de SQM, se propone realizar una extracción por solvente (SX) selectiva de litio, seguida de una electrolisis para obtener litio metálico. Esta técnica ofrece ventajas significativas sobre otros métodos de recuperación de litio, como la posibilidad de operación continua y la utilización de equipos relativamente simples. Tradicionalmente, la SX involucra fases orgánicas y acuosas; sin embargo, en esta propuesta se busca innovar mediante la sustitución del orgánico por un Deep Eutectic Solvent (DES). Estos solventes se caracterizan por su baja volatilidad, bajo impacto ambiental y capacidad de reciclaje, alineándose con prácticas de sostenibilidad ambiental. Además, estudios recientes han demostrado la viabilidad del uso de DES como electrolito en procesos de obtención de metales como el cobalto, lo que fundamenta la hipótesis de su aplicabilidad en la producción de litio metálico.

1.1 Problemática

La producción de carbonato e hidróxido de litio a partir de salmueras puede tardar hasta 18 meses, lo que representa una limitación significativa en términos de eficiencia y respuesta a la demanda.[3] Además, en Chile actualmente no se produce litio metálico, a pesar de contar con las condiciones y recursos necesarios para su desarrollo. Ante este escenario, resulta fundamental buscar alternativas que reduzcan los tiempos de procesamiento y, al mismo tiempo, implementar un proceso que permita la obtención de litio metálico de forma sustentable y tecnológicamente viable, debido a la disponibilidad de materia prima.

1.2 Alcance

Las principales limitaciones de este trabajo radican en el uso de solventes eutécticos profundos, cuyas variables operacionales están definidas por literatura. Además, la evaluación del depósito del litio metálico en el electrodo se realizará solo con fines de determinar su factibilidad, sin profundizar en su caracterización o eficiencia.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar técnica y económicamente, en base a datos recopilados desde bibliografía, la selectividad y eficiencia de la extracción de litio en disolventes eutécticos profundos (DES) a partir de salmuera y el análisis de un posible depósito de litio metálico.

1.3.1 Objetivos Específicos

- ☐ Desarrollar una evaluación técnica de extracción por solvente y electrodeposición de litio utilizando DES para determinar la viabilidad.
- ☐ Desarrollar una evaluación económica del proceso de extracción por solvente y electrodeposición de litio utilizando DES para determinar su rentabilidad y viabilidad financiera.
- ☐ Proponer un proceso conceptual de extracción por solvente selectiva y electrodeposición para obtener litio metálico.

Capítulo 2: Antecedentes Teóricos

2.1 SQM Salar

SQM Salar, una división de Sociedad Química y Minera de Chile destaca no solo por su eficiente producción de litio y potasio desde el Salar de Atacama, sino también como parte de una organización global que desempeña un papel vital en industrias clave para el desarrollo sostenible. SQM está activamente involucrada en sectores esenciales como la salud, la alimentación, la tecnología y las energías limpias, operando con cinco líneas de negocio líderes a nivel mundial: Nutrición Vegetal de Especialidad, Yodo y derivados, Litio y derivados, Potasio y Sales Solares.

Con una historia de 52 años, SQM se ha comprometido profundamente con la innovación y el desarrollo tecnológico, adaptando sus procesos productivos, comerciales y logísticos a las exigentes condiciones de los mercados globales. Esto se alinea con sus valores corporativos de Excelencia, Seguridad, Integridad y Sostenibilidad. La empresa no solo asegura la continuidad operacional con altos estándares de sostenibilidad, sino que también trabaja para mejorar continuamente sus resultados y crear mayor valor para sus clientes, accionistas y las comunidades donde opera.[3]

2.2 Mercado del Litio

El mercado del litio experimentó un crecimiento en 2022, alcanzando cifras récord en Chile debido a la creciente demanda impulsada por la transición energética hacia alternativas más sostenibles al petróleo. El litio es un elemento clave en la fabricación de baterías recargables para vehículos eléctricos, una de las tecnologías que ha liderado esta transformación. Sin embargo, en 2023, los precios del litio comenzaron a disminuir significativamente, influenciados por varios factores del mercado global.

Uno de los principales factores que contribuyó a esta caída fue la desaceleración en las ventas de vehículos eléctricos, que no alcanzaron las proyecciones iniciales. Esto se debe, en parte, al incremento en la preferencia por automóviles híbridos enchufables, que, aunque también utilizan baterías de litio, lo hacen en cantidades menores que los vehículos eléctricos de batería. Los PHEV (sigla en inglés de vehículos híbridos enchufables) son considerados más económicos y accesibles para los consumidores debido a sus menores

requerimientos de batería y la posibilidad de alternar entre energía eléctrica y combustibles tradicionales.

Otra razón que ha influido en la baja del precio del litio ha sido la reducción de inventarios de las empresas que operan en este sector. Al haber acumulado suficiente stock en años anteriores, muchas compañías disminuyeron sus compras de litio en 2023, lo que generó una menor demanda en el mercado global. La acumulación de inventarios es un fenómeno común en mercados, donde las empresas buscan optimizar costos y aprovechar los periodos de precios altos para asegurar suministro futuro, lo que en periodos de menor demanda puede provocar variaciones negativas en los precios.[1]

2.3 Procesos actuales de litio

El litio se encuentra en la naturaleza en dos principales fuentes: pegmatitas y salmueras naturales. Las pegmatitas son rocas ígneas que contienen minerales ricos en litio, como la espodumena ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_3$) y la lepidolita ($\text{K}(\text{Li},\text{Al},\text{Rb})_3(\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$). Por otro lado, las salmueras naturales son soluciones concentradas de sales que contienen litio disuelto, ubicadas en salares y lagos salinos.

2.3.1 Proceso de litio a partir de pegmatitas

El proceso de extracción del litio a partir de pegmatitas comienza con la explotación de depósitos de roca dura, que puede realizarse en minas subterráneas o a cielo abierto, dependiendo de la ubicación y el tipo de yacimiento. Una vez extraído, el mineral se somete a un proceso de conminución, que incluye la trituración y molienda para reducir el tamaño de las partículas, facilitando la liberación de minerales que contienen litio de los minerales no deseados.

El mineral ya reducido se somete a un proceso de concentración, utilizando métodos como la flotación y la separación por gravedad, con el objetivo de obtener un concentrado rico en espodumena u otro mineral de litio. Este concentrado se somete a un proceso de tostación, donde se calienta a temperaturas superiores a $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ para convertir la fase alfa de la espodumena en fase beta. Se necesita la fase beta porque es más soluble en ácidos, lo que permite extraer el litio con mayor facilidad durante la lixiviación. En este proceso, el concentrado se trata con ácido sulfúrico, disolviendo el litio en forma

de sulfato de litio. La solución resultante se purifica para eliminar impurezas como calcio, hierro y magnesio, antes de pasar al proceso de precipitación. Dependiendo del producto que se quiera obtener, se elige el agente precipitante: para obtener carbonato de litio, se utiliza carbonato de sodio, mientras que para producir hidróxido de litio se utiliza hidróxido de calcio.

El producto resultante, ya sea carbonato o hidróxido de litio, se purifica mediante métodos adicionales, como recristalización o filtración, para alcanzar la alta pureza necesaria en aplicaciones industriales, particularmente para la fabricación de baterías.[4]

2.3.2 Proceso de litio a partir de salmuera clorurada

La precipitación de litio a partir de salmueras ocurre después de un proceso de concentración mediante evaporación solar, donde, tras la precipitación de sales como la halita y la Silvita, el litio se concentra hasta el punto de cristalizarse como carbonato de litio o hidróxido de litio. En cambio, las tecnologías de extracción directa de litio (DLE) buscan recuperar el litio sin necesidad de evaporar el agua, utilizando técnicas avanzadas como la adsorción selectiva, el intercambio iónico y la electrodiálisis.

2.3.2.1 Proceso de precipitación de litio

En SQM el proceso productivo para la producción de carbonato de litio y hidróxido de litio es el método de precipitación fraccionada en pozas de evaporación solar. Para comenzar este proceso se realiza bombeando la salmuera que es dirigida a través de tuberías a los sistemas de evaporación tal como se observa en la Figura 1.

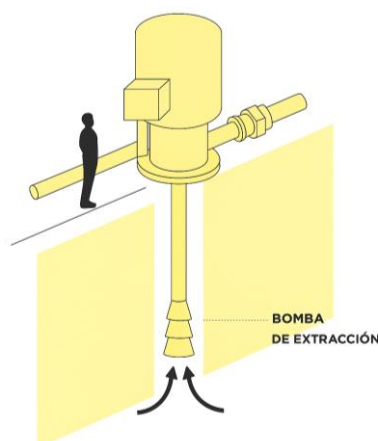


Figura 1. Bomba de extracción

Luego de que la salmuera es bombeada a las pozas de evaporación siguen una ruta de precipitación el cual es halita – silvinitas – carnalitas de potasio – bischofita – carnalitas de litio tal como se observa en la Figura 2. Las pozas de precipitación tienen un área en el terreno bastante grande y tienen poca profundidad, en ellas se disponen lienzos de polietileno para evitar filtraciones a capas de suelos inferiores. El periodo para concentrar una salmuera que alcance el objetivo es de 18 meses.

Proceso productivo SQM Salar de Atacama

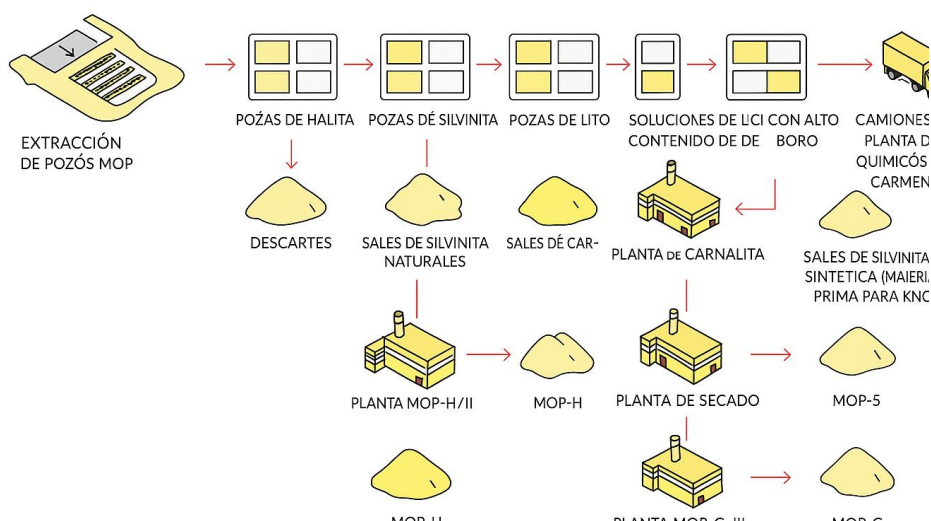


Figura 2. Proceso productivo SQM Salar de atacama

El proceso de evaporación de salmueras sigue un orden específico, tal como se nombró anteriormente, ya que algunas especies precipitan antes que otras debido a sus distintas solubilidades. A medida que la salmuera se concentra, las sales que quedan como residuo en cada etapa, en las diferentes pozas de evaporación, pueden contener cantidades significativas de litio. Sin embargo, estos residuos no se reprocesan, ya que la industria considera que el costo de recuperar el litio de estas sales no es rentable, dada la baja concentración de litio y los costos adicionales que implica su tratamiento.

2.3.2.2 Extracción directa del litio

La extracción directa de litio (DLE) a partir de salmueras son un conjunto de tecnologías relativamente recientes, diseñadas para ser más eficiente y ambientalmente sostenible que los métodos tradicionales de evaporación solar. A diferencia del proceso convencional, que requiere la evaporación de grandes volúmenes de agua, las DLE se enfocan en recuperar el litio directamente de las

salmueras, reduciendo significativamente el uso de agua y el impacto ambiental. Estos procesos permiten una extracción más rápida y controlada, lo que lo convierte en una alternativa más sostenible y viable a largo plazo.

1. **Absorción Selectiva:** Esta tecnología utiliza materiales absorbentes que capturan los iones de litio presentes en las salmueras, dejando pasar otros iones como sodio potasio y magnesio tal como se observa en la izquierda de la Figura 3. El proceso consiste en poner la salmuera en contacto con un adsorbente que tenga una alta afinidad con el litio, atrapando estos iones en su superficie. Luego el litio es liberado mediante una solución química en un paso llamado desorción, obteniendo una solución más concentrada tal como se observa en la derecha de la Figura 3 [5].

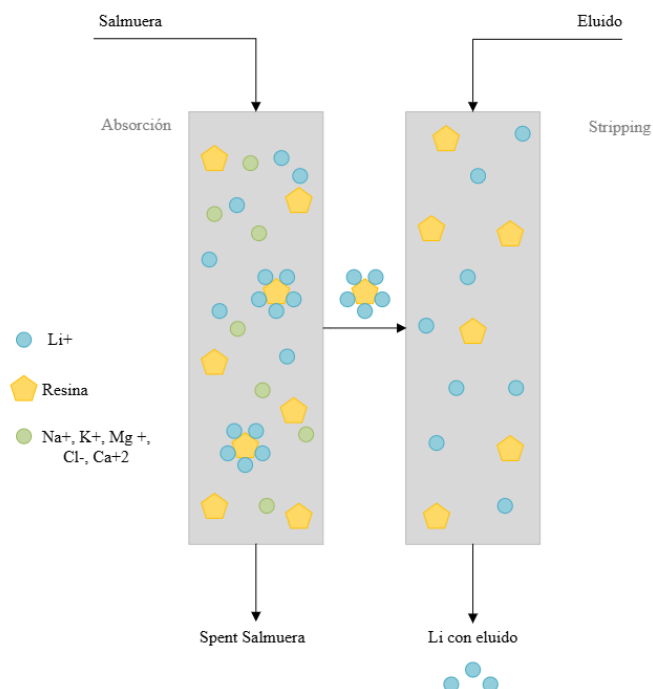


Figura 3. Diagrama del proceso de absorción para procesar litio

2. **Extracción por solvente:** Es un fenómeno de volumen basado en el equilibrio cuyo mecanismo impulsor es la concentración de la salmuera, en un sistema liquido-liquido. El ion se transporta a un medio más afín que su medio actual, esto quiere decir que se extrae el ion litio por medio de la fase orgánica. [5]

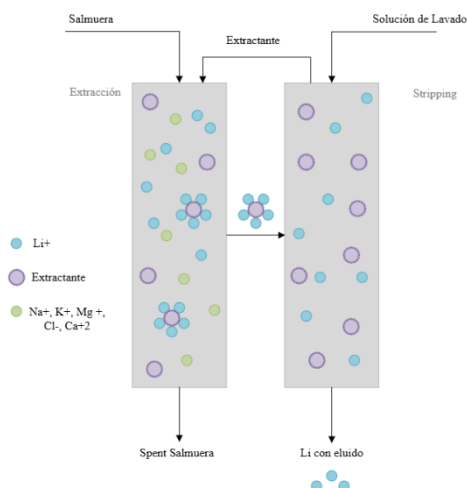


Figura 4. Diagrama del proceso DLE de extracción por solvente

3. Precipitación: La precipitación es un proceso químico clave en la recuperación de litio desde soluciones salinas. Consiste en la adición de un reactivo precipitante que reacciona selectivamente con los iones de litio (Li^+) presentes en la salmuera, formando compuestos insolubles, comúnmente sales de litio, que se separan del líquido por sedimentación o filtración. Este método permite concentrar el litio y removerlo del medio acuoso, facilitando su posterior purificación, tal como se observa en la Figura 5. La eficiencia del proceso depende de factores como el pH, la temperatura, la composición de la salmuera y la naturaleza del reactivo utilizado.

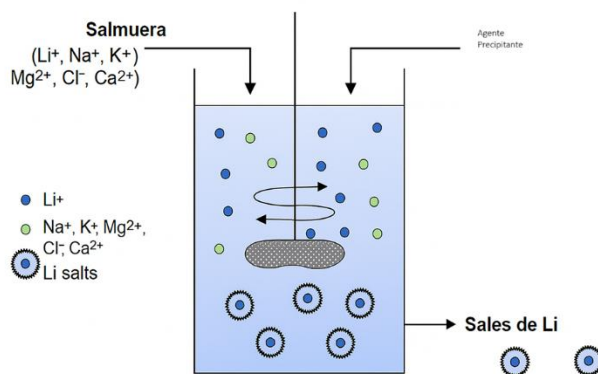


Figura 5. Proceso de precipitación

2.3.3 Proceso de Litio a partir de Salmuera Sulfatada

En los últimos años, SQM ha enfrentado desafíos con la gestión de salmueras sulfatadas, que son desechadas en acopios debido a su composición química problemática. Recientemente, la compañía ha lanzado un proyecto

innovador para abordar este problema mediante la producción de sulfato de litio a partir de estas salmueras desafiantes, tal como se observa en la Figura 6. Este proceso no solo reduce el desperdicio, sino que también logra una pureza del 88% en la producción de sulfato de litio, con una capacidad inicial de 90,000 toneladas por año, que se espera duplicar a 180,000 toneladas por año. Este enfoque no solo optimiza el uso de recursos, sino que también refuerza la posición de SQM como líder en prácticas sostenibles dentro de la industria del litio.

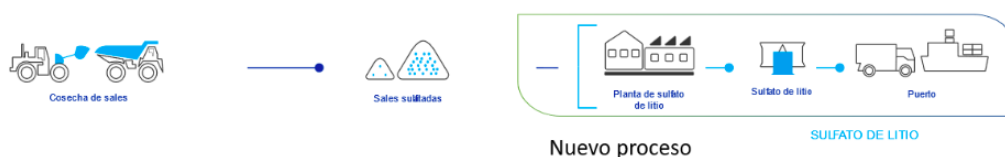


Figura 6. Proceso de sulfato de litio

El proyecto tiene como objetivo transformar un sistema no productivo de litio en uno productivo, mediante la precipitación de sales de sulfato de litio a partir de las salmueras que actualmente se reinyectan en el sistema MOP II. Basado en el sulfato de litio precipitado en las pozas de carnalita, se busca concentrar el sulfato de litio y posteriormente convertirlo en hidróxido de litio de grado batería. El objetivo del proyecto es diseñar y validar un proceso de producción de $\text{LIOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ grado batería en base de salmueras de medio sulfato.

El proceso está ilustrado en la Figura 7, donde la etapa más relevante es la de flotación. Esta etapa se organiza en tres fases principales: el rougher, diseñado para separar los componentes más gruesos con el objetivo de recuperar la máxima cantidad de material de interés; el scavenger, que se encarga de reprocesar las colas del rougher para maximizar la recuperación; y el cleaner, que refina el concentrado asegurando la calidad del mineral para su uso en procesos subsiguientes. [6]

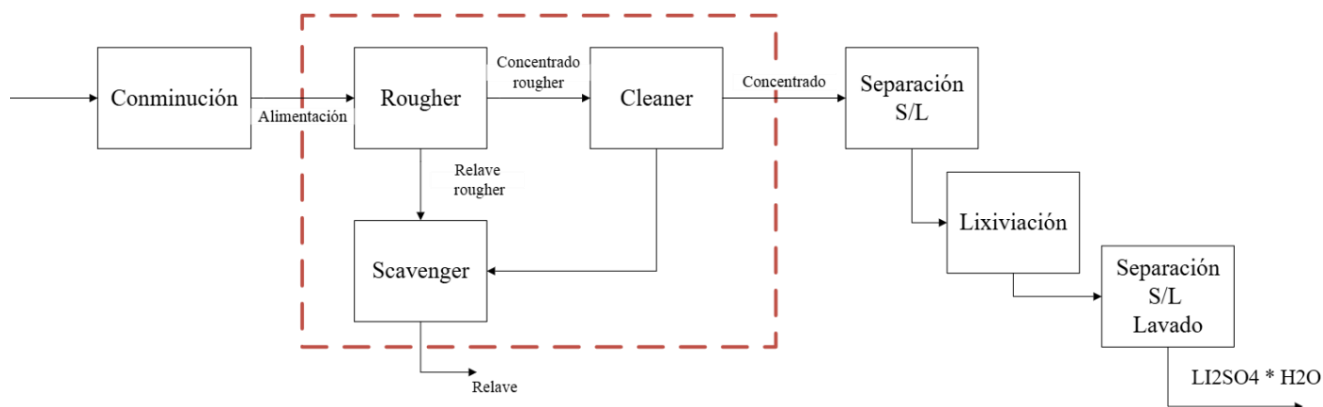


Figura 7. Proceso de flotación para obtención de sulfato de litio en detalle

2.4 Productos de Litio

Debido a las dos principales vías de obtención de litio mencionados en la sección 2.2, así como a las diversas composiciones químicas de las salmueras, se derivan diferentes productos finales de litio, los cuales se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Producto de Litio con sus respectivos precios[7]

	Carbonato de litio	Hidróxido de litio	Cloruro de litio	Sulfato de litio	Litio metálico
Formula química	Li_2CO_3	LiOH	LiCl	Li_2SO_4	Li
Precio [CLP/gr]	1,320	646	600	4,460	4,500

2.5 Solventes eutécticos profundos (DES)

Los solventes eutécticos profundos son solventes líquidos formados por la mezcla de dos o más componente que al combinarse genera una disminución de su punto de fusión en comparación a los componentes puros. Estos se obtienen al combinar en una relación molar eutéctica enlaces de hidrogeno donantes (HBS) y enlaces de hidrógenos aceptores (HBA). La fórmula general para los DES, se representa en la Ecuación 1.



Donde Cat^+ representa el catión orgánico, mientras que X^- es el contraión base de Lewis, donde generalmente es un ion halógeno y por ultimo Y^- representa a un ácido de Lewis, el cual interviene en la formación del complejo aniónico con X^- . En las investigaciones recientes, la mayoría de los DES sintetizados, se agrupan en cinco categorías que se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de los DES

Clasificación DES	Formula General	Términos
Tipo I	$\text{Cat}^+ \text{X}^- \cdot \text{MCl}_x$	
Tipo II	$\text{Cat}^+ \text{X}^- \cdot \text{MCl}_x \cdot y\text{H}_2\text{O}$	
Tipo III	$\text{Cat}^+ \text{X}^- \cdot \text{RZ}$	
Tipo IV	$\text{MCl}_x \cdot \text{RZ}$	$\text{M} = \text{Al}, \text{Zn}; \text{Z} = \text{CONH}_2$
Tipo V	No iónico	COOH, OH

Los DES Tipo I y II combinan una sal de amonio cuaternario y un cloruro metálico, siendo anhidro en el Tipo I y en forma hidratada en el Tipo II. Los DES Tipo III se obtienen mezclando una sal de amonio cuaternario con un HBD, como en los sistemas basados en cloruro de colina (ChCl), donde el HBD suele ser una molécula orgánica pequeña. Los DES Tipo IV combinan características de los Tipos II y III, incluyendo mezclas eutécticas profundas de cloruros metálicos hidratados y HBD orgánicos. Recientemente, se agregó una quinta categoría (Tipo V), que incluye sistemas compuestos solo por HBA y HBD moleculares no iónicos.

Los DES Tipo III son los más estudiados, donde el HBA suele ser una sal halógena iónica, como amonio o fosfonio. El cloruro de colina (ChCl) es uno de los HBA más utilizados debido a su bajo costo, alta biodegradabilidad, baja toxicidad y buena disponibilidad biológica. Los HBD suelen ser moléculas seguras y accesibles, como urea, ácidos carboxílicos (mono o dicarboxílicos, ácido cítrico, aminoácidos) o polioles (glicerol, etilenglicol o carbohidratos). [8]

2.5.1 Propiedades de los DES

2.5.1.1 Densidad

La densidad es una de las propiedades más importantes de los líquidos. Muchos de los líquidos eutécticos profundos (DES) reportados en la literatura presentan densidades superiores a la del agua; en particular, los DES basados en sales metálicas tienden a tener densidades más altas que los DES convencionales. En contraste, los DES hidrófobos presentan una densidad menor en comparación con los DES estándar. Además, la densidad de estos líquidos muestra una clara dependencia de la temperatura, disminuyendo a medida que ésta aumenta.[9]

2.5.1.2 Viscosidad

La viscosidad al igual que la densidad es una de las propiedades claves de los DES y al igual que en el caso de la densidad, la viscosidad del agua es menor que la de los DES. Una elevada viscosidad en los puede influir en el transporte de masa y en las aplicaciones de los DES, como la extracción por metales. La viscosidad de los DES depende de varios factores, como la composición de sus componentes, la temperatura y la presencia de agua.[9]

2.6 Factores que afectan la eficiencia de extracción por solvente

2.6.1 Proceso de extracción por solvente

Para la recuperación de metales como el óxido de cobre que es el más común se realiza mediante la hidrometalurgia, y la extracción por solvente es un proceso fundamental en este proceso, los objetivos que tiene este proceso son:

- ☐ Separación y purificación
- ☐ Concentración de los metales
- ☐ Transferencia de los metales disueltos
- ☐ Recuperación selectiva de un solo metal

El proceso de SX consta de dos operaciones secuencial, la primera es la extracción en el cual el reactivo extractante orgánico captura el o los metales de la fase acuosa y la descarga del reactivo orgánico el cual es el proceso inverso de la primera etapa y se regenera el reactivo orgánico. En la Figura 8 se observa lo mencionado anteriormente.[10]

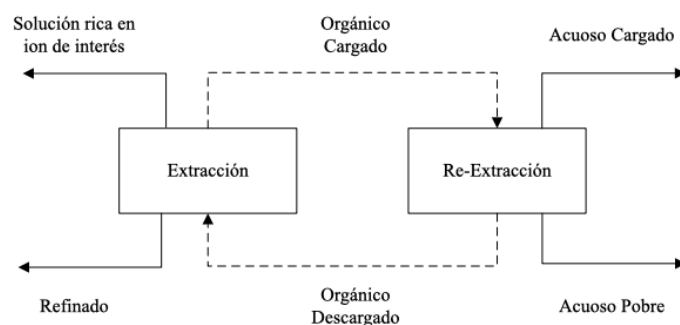


Figura 8. Proceso de extracción por solvente[10]

2.6.2 Coeficiente de distribución

La extracción de un determinado metal se suele medir por el coeficiente de distribución (D), el cual es la relación entre las concentraciones en condiciones de equilibrio, de la fase orgánica versus la fase acuosa, tal como en la Ecuación 2. Mientras mayor es D, más eficiente es la transferencia.

$$D = \frac{\text{concentración en la fase organica que se carga}}{\text{concentración en la fase acuosa que se extrae}} \quad (2)$$

Para la descarga, el coeficiente de distribución se invierte, tal como se observa en la Ecuación 3.

$$D' = \frac{\text{concentración en la fase acuosa que receptora de la descarga}}{\text{concentración en la fase organica que se descarga}} \quad (3)$$

2.6.3 Selectividad

La selectividad determina cuanto del componente objetivo, como por ejemplo el cobre o el litio, se transfiere a la fase organica en comparación a las impurezas, como el magnesio, el calcio, etc. Según Ecuación 4, se expresa como la relación entre los coeficientes de distribución de dos especies. Donde D_A es el coeficiente de distribución de la especie de interés y D_B es el de la impureza.[10]

$$S_{A/B} = \frac{D_A}{D_B} \quad (4)$$

2.6.4 pH

El pH afecta directamente la extracción por solvente desde el inicio del proceso hasta las etapas de carga y descarga del orgánico, ya que varía a medida que estas ocurren.

El pH desempeña un papel fundamental en los procesos de extracción por solvente, ya que determina el estado de ionización de muchos compuestos, en especial aquellos con grupos ácidos ($-\text{COOH}$) o básicos ($-\text{NH}_2$). Las especies ionizadas tienden a ser más solubles en la fase acuosa, mientras que las formas neutras o no cargadas son más afines a la fase orgánica. Por ejemplo, un ácido débil en solución acuosa puede encontrarse como forma no ionizada o como forma ionizada, y su distribución depende del pH. A pH bajos, predomina la forma no ionizada, que es más soluble en el disolvente orgánico, favoreciendo la extracción; en cambio, a pH altos, predomina la forma ionizada, que permanece en la fase acuosa, reduciendo la eficiencia del proceso. Por tanto, ajustar el pH permite optimizar la extracción: se recomienda trabajar a pH bajos para ácidos débiles y a pH altos para bases débiles, maximizando así la recuperación del compuesto deseado.

2.6.5 Razón O/A

La razón O/A (orgánico/Acuoso) es la relación volumétrica entre la fase orgánica y la fase acuosa en una etapa de extracción por solvente, donde la relación se expresa como en la Ecuación 5.

$$\text{Razón } \frac{O}{A} = \frac{\text{Volumen de fase organica}}{\text{Volumen de fase acuosa}} \quad (5)$$

Este parámetro es crucial para la optimización del proceso de extracción, ya que permite ajustar la eficiencia de transferencia del metal entre las fases. Si el O/A es demasiado alto, es posible que no se utilice toda la capacidad de carga del solvente, lo que resulta en un uso ineficiente del mismo. Por el contrario, si el O/A es demasiado bajo, el solvente orgánico puede saturarse rápidamente, limitando la cantidad de metal que se puede extraer. Por lo tanto, se busca un equilibrio que permita maximizar la extracción del metal sin desperdiciar solvente ni generar fases orgánicas saturadas.

2.6.6 Tiempo de contacto por medio de agitación

La agitación en un proceso de extracción por solvente es un factor, para mejorar la transferencia de masa entre las fases inmiscibles, como una solución acuosa y un solvente orgánico. Una agitación adecuada permite aumentar el área de contacto al dispersar una fase en la otra, favoreciendo una mayor eficiencia en la extracción del soluto deseado. Además, asegura la homogeneización de las fases y acelera la cinética del proceso, reduciendo las resistencias a la transferencia de masa en la interfaz. Sin embargo, un exceso de agitación puede generar emulsiones estables que dificultan la separación de las fases, disminuyendo la eficacia del proceso. Por lo tanto, es importante encontrar un equilibrio en la velocidad de agitación para maximizar la eficiencia de extracción sin afectar la selectividad, ni la facilidad de separación de las fases.

2.6.7 Eficiencia de Extracción

La eficiencia de extracción en SX, mide la cantidad de iones de interés transferido de la fase acuosa a la fase orgánica, donde el cálculo se realiza comparando la concentración inicial ($C_{inicial}$) y concentración final (C_{final}) del ion de interés, tal como en la Ecuación 6.

$$\%E = \frac{C_{inicial} - C_{final}}{C_{inicial}} \quad (6)$$

Esta eficiencia puede variar debido a varios factores, como el pH de la fase acuosa, la relación entre las fases orgánica y acuosa (O/A), el tiempo de contacto, la temperatura del proceso, la selectividad del extractante, el número de

etapas de extracción y la presencia de impurezas o emulsiones que puedan afectar la separación de fases debido a la agitación.

2.7 Electrodeposición

La electrodeposición es un proceso electroquímico ampliamente utilizado para aplicar una capa delgada de un metal sobre la superficie de otro material conductor, con el objetivo de modificar sus propiedades superficiales. Este proceso se fundamenta en el principio de la electrólisis, mediante el cual se emplea una corriente eléctrica continua para inducir la reducción de iones metálicos presentes en una solución, generando así el depósito metálico sobre el sustrato.

En términos funcionales el objeto a recubrir se conecta como cátodo, mientras que el ánodo está constituido generalmente por el mismo metal que se desea depositar o por un material inerte. La solución electrolítica contiene iones del metal a depositar, los cuales, bajo la acción de la corriente eléctrica, migran hacia el cátodo y se reducen para formar una capa metálica adherida a la superficie del objeto, tal como es observado en la Figura 9.

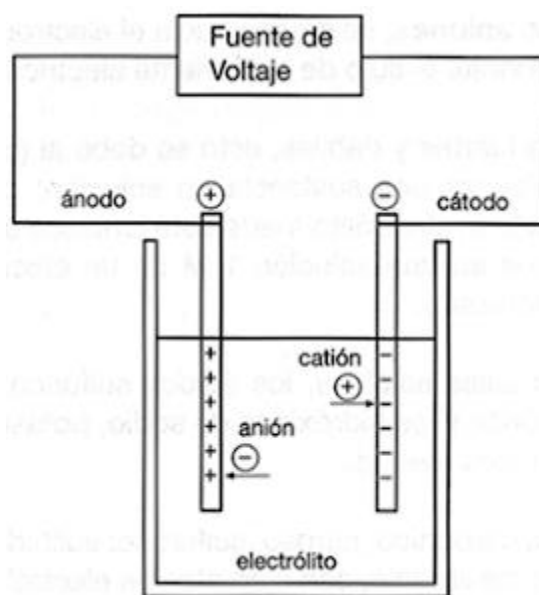


Figura 9. Celda electrolítica

Durante este proceso, al aplicarse un potencial eléctrico, se origina una reorganización de los iones en las proximidades de la superficie del electrodo. Esto da lugar a la formación de una estructura interfacial conocida como doble capa eléctrica, compuesta por dos regiones: la doble capa de Helmholtz y la capa

de difusión. Esta estructura desempeña un papel fundamental en la eficiencia y calidad del recubrimiento. El proceso ocurre a través de las siguientes etapas:

1. Migración iónica: los iones metálicos hidratados presentes en la solución se desplazan hacia el cátodo debido a la corriente aplicada, además de los efectos de difusión y convección.
2. Transferencia electrónica: al llegar a la interfaz, el ion hidratado primero entra en la doble capa difusa, donde las moléculas de agua que lo rodean se alinean. Posteriormente, el ion ingresa en la capa de Helmholtz, donde pierde su envoltura de hidratación.
3. Reducción y adsorción: el ion metálico, ahora deshidratado, es reducido eléctricamente y se adsorbe sobre la superficie del cátodo.
4. Difusión superficial: finalmente, el átomo metálico adsorbido se desplaza o difunde hasta alcanzar un sitio estable de crecimiento, contribuyendo a la formación uniforme del recubrimiento.

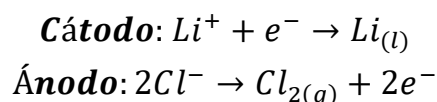
El espesor del depósito metálico dependerá principalmente de la densidad de corriente aplicada y del tiempo de exposición al proceso de electrodeposición, lo cual permite ajustar con precisión las características del recubrimiento según la aplicación. [11]

2.7.1 Proceso industrial actual de obtención de litio metálico a partir de salmueras

La producción industrial de litio metálico a partir de salmueras es un proceso clave en la cadena de valor de este elemento estratégico, ampliamente utilizado en aplicaciones aeroespaciales, baterías de estado sólido, aleaciones especiales y síntesis orgánica. Actualmente, el proceso más empleado a nivel industrial para obtener litio metálico desde salmueras consiste en una secuencia de etapas que permiten transformar una solución diluida de litio en un metal altamente puro mediante operaciones fisicoquímicas y electroquímicas. Este flujo de producción se encuentra plenamente consolidado en países como China, donde explotan salmueras naturales de alta concentración, como las del Salar de Atacama o Hombre Muerto, para producir inicialmente carbonato de litio o hidróxido de litio, que luego son convertidos en cloruro de litio (LiCl) y sometidos a electrólisis para obtener el litio metálico. El atractivo de este proceso radica en su capacidad de generar litio con purezas superiores al 99,9 %, pero también presenta importantes limitaciones desde el punto de vista técnico, energético y ambiental, lo que motiva la búsqueda de rutas alternativas más sostenibles y eficientes.

Para llevar a cabo este proceso se requieren condiciones iniciales estrictamente controladas. La salmuera extraída debe contener una concentración significativa de litio, un bajo contenido de magnesio, boro y calcio, y una composición favorable para su posterior purificación. Esta salmuera pasa por una etapa de concentración por evaporación solar que puede durar hasta 18 meses, donde se precipitan selectivamente otras sales (NaCl, KCl, MgCl₂) para obtener una solución rica en LiCl. Luego se aplican tratamientos químicos para remover impurezas: precipitación con carbonato de sodio y cal, extracción por solvente para eliminar el boro, y filtración. A continuación, la salmuera purificada se convierte en carbonato o hidróxido de litio, que se trata con ácido clorhídrico para producir cloruro de litio, el cual debe ser posteriormente secado para eliminar toda traza de humedad, dado que el proceso final, el cual es la electrólisis de sales fundidas, no tolera presencia de agua. El LiCl anhidro se mezcla con KCl para formar una mezcla eutéctica con punto de fusión cercano a los 352 °C, que se funde y se introduce en una celda electrolítica operada a temperaturas entre 450 y 500 °C, este método industrial es el más utilizado actualmente para la producción de litio metálico es la electrólisis de una mezcla eutéctica de cloruro de litio (LiCl) y cloruro de potasio (KCl), en proporciones típicas de 55:45. Esta mezcla permite reducir el punto de fusión del sistema y mejorar su conductividad iónica. Luego en el cátodo, el ion litio (Li⁺) se reduce a litio metálico líquido, mientras que en el ánodo se oxida el cloruro (Cl⁻) a gas cloro (Cl₂), el cual es recolectado. El litio metálico, por su baja densidad, flota sobre la mezcla fundida y se extrae bajo atmósfera inerte o aceite mineral, donde luego se solidifica. El producto final alcanza una pureza ≥99,9 %, apto para aplicaciones especiales[12].

El proceso ocurre a temperaturas entre 673 y 723 K (400–450 °C) en una celda electrolítica que contiene un cátodo de acero (donde se deposita el litio metálico) y un ánodo de grafito (donde se libera gas cloro como subproducto). Las reacciones involucradas son:



A pesar de su eficacia, este proceso presenta limitaciones importantes que afectan su desempeño y sustentabilidad. La principal limitante es la necesidad de contar con materia prima de muy alta pureza: tanto el LiCl como la mezcla fundida deben estar libres de humedad y de impurezas metálicas, ya que su presencia afecta la eficiencia farádica y puede generar reacciones no deseadas o problemas de corrosión. El consumo energético es elevado, tanto por el

requerimiento térmico de mantener la mezcla en estado fundido como por la corriente eléctrica de alta intensidad necesaria para la electrólisis. Además, el diseño de las celdas debe garantizar la completa separación entre el litio líquido y el cloro gaseoso para evitar recombinaciones peligrosas. Otro factor crítico es el manejo seguro del litio metálico, altamente reactivo con el oxígeno y la humedad ambiental, lo que obliga a operar en atmósferas inertes controladas y utilizar sistemas de enfriamiento y encapsulado. La corrosión de materiales refractarios por efecto de las sales fundidas y gases clorados impone altos costos de mantenimiento, y la operación discontinua por enfriamiento no programado puede provocar la solidificación del sistema y la paralización del proceso. Finalmente, el largo tiempo de concentración de las salmueras, la baja recuperación global de litio (40–60 %) y la ocupación extensiva de superficie hacen que este proceso, si bien consolidado, tenga limitaciones claras frente a las crecientes exigencias de eficiencia, rapidez y sustentabilidad.[12]

En este contexto, mi propuesta de tesis se enfoca en desarrollar un proceso alternativo basado en solventes eutécticos profundos para la extracción selectiva de litio desde salmueras, y su posterior electrodeposición directa de litio metálico desde el DES, evitando las etapas de evaporación, conversión a LiCl y electrólisis en sales fundidas. Esta ruta alternativa permite operar a temperaturas mucho menores (entre 25 y 35 °C), en soluciones no acuosas que estabilizan el ion litio y permiten su reducción electroquímica en condiciones controladas. Los DES tienen propiedades ajustables, bajo costo, bajo impacto ambiental y pueden diseñarse para ser altamente selectivos frente a otros cationes como Mg^{2+} o Na^{+} , lo cual mejora la eficiencia del proceso. Además, la electrodeposición desde DES puede realizarse en sistemas cerrados, sin generación de gases tóxicos como el cloro, y con una eficiencia farádica comparable o superior a la del proceso actual. Esta estrategia representa una alternativa más limpia, modular y eficiente, con menor huella hídrica, energética y ambiental, y es particularmente adecuada para salmueras de baja ley o para condiciones donde la evaporación solar no es viable. La implementación de este enfoque contribuiría a diversificar las tecnologías de producción de litio metálico, avanzar hacia procesos más sustentables y adaptarse mejor a las exigencias de un mercado que demanda cada vez más velocidad, pureza y responsabilidad ambiental.

2.8 Antecedentes bibliográficos

En la búsqueda de métodos que permitan reducir los tiempos asociados al procesamiento del litio mediante extracción por solvente, se han identificado diversas investigaciones que proponen metodologías avanzadas y

complementarias para su recuperación selectiva. En la Tabla 3 se resumen las condiciones experimentales de tres estudios relevantes. En el primero, la solución acuosa utilizada corresponde a una salmuera sinterizada sulfatada, compuesta principalmente por litio (Li), sodio (Na), potasio (K), cloruros y sulfatos. En el segundo estudio, la solución empleada fue agua de mar, la cual contiene los iones Li, Mg, Ca, K y Na.

Tabla 3. Comparación de extracción desde salmuera y agua de mar utilizando DES

Solución	DES	Extracción de Li	Razón O/A	Selectividad	Referencia
Salmuera Sulfatada	HTTA/TOPO	95%	1:2	Na y K	[13]
Agua de Mar	N ₈₈₈₁ Cl/DecA	66%	1:2	Mg, Ca, Na y K	[14]
Salmuera sintética	DecA/Lid	90%	1:1	Mg y Ca	[15]

Para abordar la problemática de producir litio metálico de forma local, se revisaron distintos estudios que evalúan el uso de solventes eutécticos profundos (DES) como electrolitos en procesos de electrodeposición. Estos solventes, formados generalmente por un donador de protones y una sal de amonio cuaternario como el cloruro de colina, han demostrado ser una alternativa sostenible a los electrolitos convencionales debido a su bajo costo, baja toxicidad, amplia ventana electroquímica y capacidad para disolver metales en diferentes estados de oxidación.

Aunque los estudios disponibles no se centran específicamente en el litio metálico, permiten proyectar su comportamiento mediante la comparación con otros metales. En la Tabla 4 se resumen los resultados obtenidos para distintos sistemas DES aplicados a la electrodeposición de metales como cobalto, arsénico, tungsteno y metales nobles. Se incluyen las condiciones operativas clave como el pH, voltaje, densidad de corriente, temperatura y tiempo, así como las eficiencias farádicas alcanzadas cuando están disponibles. Estos antecedentes sugieren que los DES no solo son capaces de disolver especies metálicas, sino también de facilitar su reducción sobre superficies conductoras bajo condiciones controladas.

La electrodeposición de litio, sin embargo, implica desafíos adicionales como su alta reactividad, la formación de dendritas y la necesidad de controlar con precisión el entorno químico para evitar reacciones secundarias. Por ello, es

relevante identificar sistemas eutécticos que puedan estabilizar tanto el ion litio en solución como el depósito metálico sobre el electrodo.

Tabla 4. Comparación de electrodeposición de distintos metales

DES	Metales depositados	Condiciones	Eficiencia farádica	Referencia
EG:ChCl	Metales oxidados	pH neutro, 48 [hora], 2.7 [V], 50 [°C]	-	[16]
Cloruro de colina/Etanol	Metales Nobles	20 [hora], 4 [mA/cm ²]	-	[17]
Cloruro de Colina/Urea	Cobalto	-	54%	[18]
Cloruro de colina/Ácido malónico	arsénico y tungsteno	100 [mA], pH 5.1, 24 [hora]	82% As y 77% W	[19]

Dos estudios relevantes han investigado las condiciones operativas óptimas para la obtención de productos derivados del litio. En el primer caso, se evaluó la producción de hidróxido de litio (LiOH), alcanzando buenos resultados bajo una densidad de corriente de 1200 [A/m²], a temperaturas entre 75 y 85 [°C], y un pH en el rango de 10.5 a 11.5, según lo reportado en la referencia[20]. Por otro lado, para la obtención de litio metálico, el segundo estudio determinó que una densidad de corriente de 120 [A/m²], temperaturas entre 25 y 35 [°C], y un pH cercano a 4 fueron las condiciones más adecuadas, conforme a lo señalado en la referencia [21].

Capítulo 3: Evaluación Técnica

La evaluación técnica tiene como objetivo analizar y cuantificar los parámetros más relevantes del proceso de extracción por solvente, tal como se mencionó en el marco teórico, con el fin de determinar la viabilidad operativa y sus ventajas respecto a los procesos actuales, como las pozas de precipitación. Para llevar a cabo esta evaluación se realizarán los balances de masa del proceso de extracción por solvente utilizando una composición química en peso de una salmuera específica, que en cada escenario se definirá. En total, se considerarán cuatro escenarios diferentes, con el objetivo de evaluar distintas combinaciones de condiciones y solventes.

3.1 Escenario 1

El primer escenario considera un proceso de extracción por solvente en dos etapas, utilizando como punto de partida una salmuera clorurada. Esta salmuera corresponde a la solución obtenida en las pozas de evaporación, previo al inicio del proceso tradicional de precipitación de sales. Para caracterizar sus condiciones fisicoquímicas, se realizó una simulación mediante el software PHREEQC Interactive. Como base para la simulación, se utilizó la composición química detallada en la Tabla 5. El código de entrada utilizado para esta modelación se presenta en el Anexo 1.

Tabla 5. Composición química salmuera clorurada

Elemento	Na	K	Mg	Li	Ca	Cl	SO ₄	H ₂ O
[%]	7.1	2.3	1.4	0.1	0.032	16.5	1.5	71

El resultado de la simulación se encuentra en el Anexo 2, donde se presentan las propiedades finales de la salmuera que serán consideradas como condiciones de entrada para el desarrollo de la evaluación técnica de los escenarios 1 y 2.

En la Tabla 6 podemos observar los parámetros que se utilizan para realizar el proceso donde el pH viene dado por la simulación en software “Phreeqc interactive” que se realizó y los otros parámetros se obtuvieron por literatura [14].

Tabla 6. Parámetros de operación de la salmuera para el proceso de extracción.

Parámetros	
pH	9.19
O/A	1:3
Agitación [rpm]	300
Tiempo [min]	20
Temperatura [°C]	25
Densidad [g/cm ³]	1.1707

La fase orgánica de la primera etapa estará compuesta por DEHPA (Ácido 2-etilhexilfosfónico) diluido en keroseno, donde el objetivo es extraer selectivamente magnesio y calcio en su gran mayoría, la eficiencia de extracción del orgánico se muestra en la Tabla 7 [14].

En la segunda etapa de extracción, se utilizará un solvente eutéctico profundo (DES) compuesto por N₈₈₈₁Cl (Cloruro de tricaprilmetilamonio) y DecA (Ácido decanoico), permitiendo una mayor selectividad en esta etapa del proceso sobre el litio y utilizando la fase acuosa de la primera extracción por solvente, donde la eficiencia del DES viene dada por literatura y se encuentra en la Tabla 7.

Tabla 7. Eficiencia del orgánico DEHPA

Porcentajes de extracción	Eficiencia orgánico	Eficiencia DES
Mg	95%	0%
Ca	70%	0%
Li	40%	66%
K	30%	31%
Na	20%	15%

El disolvente eutéctico profundo (DES) seleccionado está compuesto N₈₈₈₁Cl como sal cuaternaria y DecA como ácido carboxílico, formando un eutéctico hidrofóbico capaz de generar pares iónicos con alta afinidad por el litio. Este sistema ha sido reportado en la literatura por su elevada selectividad hacia Li⁺ en presencia de aniones como SO₄²⁻ y Cl⁻, lo que lo hace especialmente competitivo frente a medios sulfatados con alta carga salina. A nivel molecular, se ha propuesto que el mecanismo de extracción involucra la formación de complejos iónicos reversibles entre el litio y el anión carboxilato del DecA,

estabilizados por el entorno apolar del DES, lo que minimiza la extracción de especies acompañantes.[14]

Luego el orgánico cargado con los iones de litio son dirigidos al proceso de electrodeposición donde se depositará el litio metálico y luego el orgánico que este descargado vuelve a la etapa de extracción por solvente Etapa 2. En la Figura 10 podemos observar lo descrito anteriormente, donde se observa el diagrama de flujo con sus respectivas descripciones.

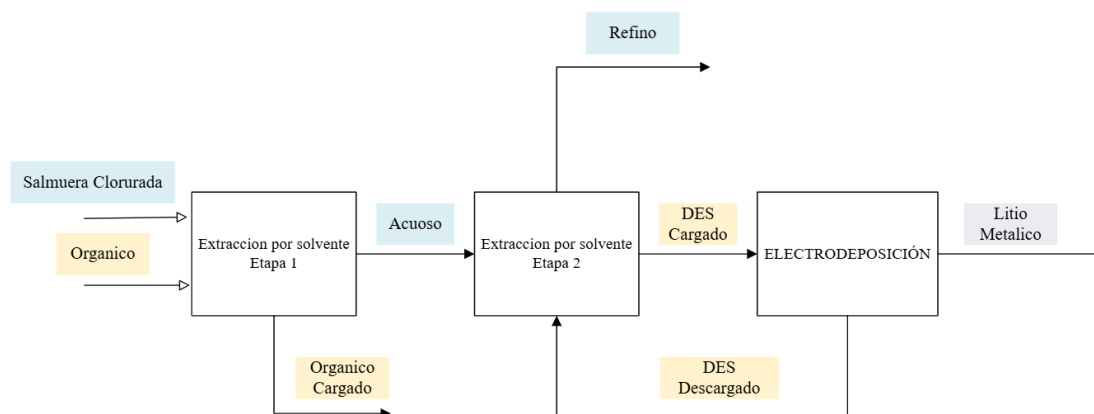


Figura 10. Escenario 1 para la extracción selectiva y electrodeposición.

Para llevar a cabo el balance de masa del escenario 1, se consideró la composición de salmuera presentada en la Tabla 5. Se asumió una producción anual de 1,500 toneladas de litio metálico [22], así como una eficiencia de extracción según los valores presentados en la Tabla 7. Otros supuestos considerados incluyen:

- ☐ Relación O/A de 1:3.
- ☐ Reutilización de los solventes orgánicos durante 10 ciclos de operación.
- ☐ Eficiencia constante de extracción durante todos los ciclos.
- ☐ Eficiencia del proceso de electrodeposición: 66%

Para alcanzar una producción anual de 1500 toneladas de litio metálico, se requiere procesar 4,158,848 [ton/año] de salmuera clorurada, de acuerdo con la composición química especificada. El análisis del balance de masa (Anexo 3) revela que el flujo de orgánico reciclado contiene 11.7 % de sodio y 7.18 % de potasio en relación con el total de solvente reutilizado, el cual fue de 205,528 [t/año], lo que indica una retención significativa de impurezas tras la etapa de extracción.

3.2 Escenario 2

El segundo escenario propuesto considera el mismo punto de partida que el escenario anterior: una salmuera clorurada, cuya composición química se detalla en la Tabla 5, simulada previamente mediante el software PHREEQC. Al igual que en el Escenario 1, se asumió una producción anual de 1500 toneladas de litio metálico, así como condiciones operativas constantes para ambas etapas del proceso, incluyendo una relación O/A de 1:3, agitación de 300 rpm, un tiempo de contacto de 20 minutos y reutilización del solvente orgánico por 10 ciclos consecutivos.

La primera etapa del proceso mantiene el mismo sistema extractante que en el Escenario 1, compuesto por DEHPA diluido en keroseno, cuyo objetivo principal es la remoción selectiva de magnesio y calcio, además de parte del sodio, potasio y litio. Las eficiencias de extracción empleadas se resumen en la Tabla 7.

La innovación de este escenario radica en la utilización de un sistema extractante alternativo, que es el DES, el cual está compuesto por HTTA (ácido 2-thenoiltrifluoroacético) y TOPO (óxido de trioctilfosfina) como fase orgánica en la segunda etapa. Este sistema presenta una alta selectividad hacia el litio, alcanzando eficiencias de extracción cercanas al 95%, y una mínima coextracción de sodio, potasio y otros cationes, lo cual se traduce en una mayor pureza de la fase orgánica. La eficiencia utilizada para esta etapa fue obtenida de literatura y también se resumen en la Tabla 8.[13]

Tabla 8. Eficiencia DES 2

Eficiencia DES 2	
Porcentajes de extracción	
Mg	0%
Ca	0%
Li	95%
K	1%
Na	1%

El proceso se desarrolla en dos etapas de extracción por solvente. En la primera etapa, se utiliza un sistema DEHPA/keroseno, el cual además de remover magnesio y calcio, extrae un 40% de litio, lo cual no es el objetivo de esta etapa.

La fase acuosa resultante, según balance de masa (Anexo 4) corresponde a 2,632 toneladas al año de litio, la cual es posteriormente tratada en una segunda etapa de extracción con el sistema HTTA/TOPO, transfiriendo el 95% de litio al

DES, lo que se traduce en 2500 toneladas al año de litio desde la fase acuosa al solvente orgánico.

El litio contenido en el orgánico cargado se dirige luego a una etapa de refinamiento mediante electrodeposición, en la cual se obtienen 1,500 toneladas de litio metálico como producto final, donde la eficiencia de esta etapa del proceso de electrodeposición es de 66% (eficiencia del 60%). Las 1,000 toneladas restantes permanecen en el orgánico descargado. El solvente descargado se recircula al sistema de extracción. En la Figura 11 podemos observar el diagrama de flujo propuesto para este escenario y descrito.

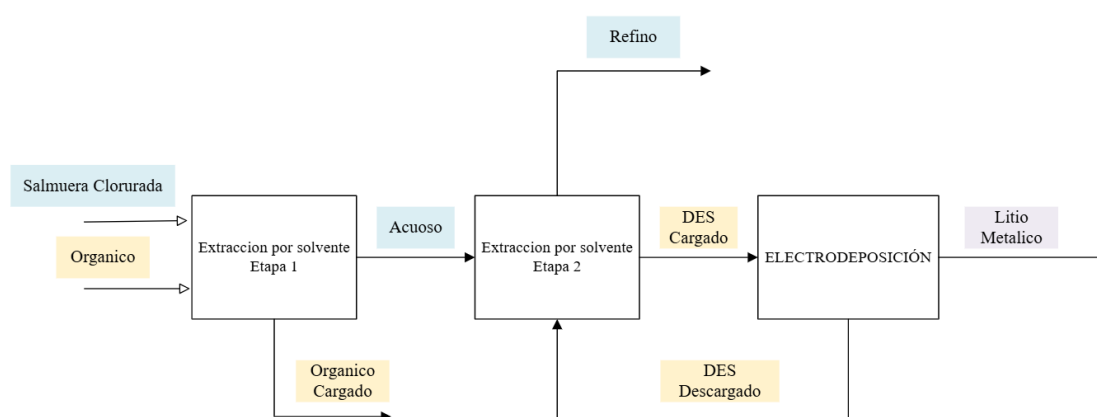


Figura 11. Diagrama de cajas Escenario 2

3.3 Escenario 3

A diferencia de los escenarios anteriores, el presente evalúa la extracción directa de litio desde una salmuera **sulfatada**, cuya composición química se detalla en la Tabla 9. Esta salmuera proviene de una etapa previa de flotación selectiva, donde se reducen las impurezas más críticas para la extracción que generalmente son el magnesio y el calcio, permitiendo así realizar una única etapa de extracción por solvente de alta eficiencia.

Tabla 9. composición química de salmuera sulfatada

Elemento	Na	K	Mg	Li	Ca	Cl	SO ₄	H ₂ O
[%]	0.12	0.32	0.47	3.54	0.032	0.99	25.58	69.00

En este escenario se utiliza un disolvente eutéctico profundo compuesto por N₈₈₈₁Cl y DecA, el cual presenta alta selectividad sobre el ion litio, incluso en presencia de altas concentraciones de sulfato e iones de magnesio. El proceso se

lleva a cabo bajo las condiciones operacionales descritas en la Tabla 10, las cuales fueron simuladas en el Software “Phreeqc”, los respectivos inputs y output están en Anexo 5 y Anexo 6. Con estos parámetros se espera lograr una eficiencia de extracción de litio del 66%. Para realizar los balances de masas respectivos, se supondrá una producción de 1,500 toneladas de litio metálico al año, según literatura.

Tabla 10. parámetros de operación para el proceso

Parámetros	
pH	9.19
O/A	1:3
Agitación [rpm]	300
Tiempo [min]	20
Temperatura [°C]	25
Densidad [g/cm ³]	1.1707

Se parte de un flujo de 3,444 toneladas al año de litio en la salmuera sulfatada, del cual 2,273 toneladas al año son extraídas hacia la fase orgánica cargada. Luego, en la etapa de refinado, se obtienen 1,500 toneladas al año de litio metálico, y 773 toneladas al año retornan al orgánico descargado. Esto representa una eficiencia global del proceso del 66%, considerando solo la etapa de extracción. El orgánico es reutilizado en ciclos sucesivos, manteniendo la eficiencia de separación y reduciendo los costos operacionales, el cual es de 10 veces para la realización del balance. El Anexo 7 muestra el balance de masa detallado del proceso. Todo lo descrito anteriormente se representa con el diagrama de flujo de la Figura 12.

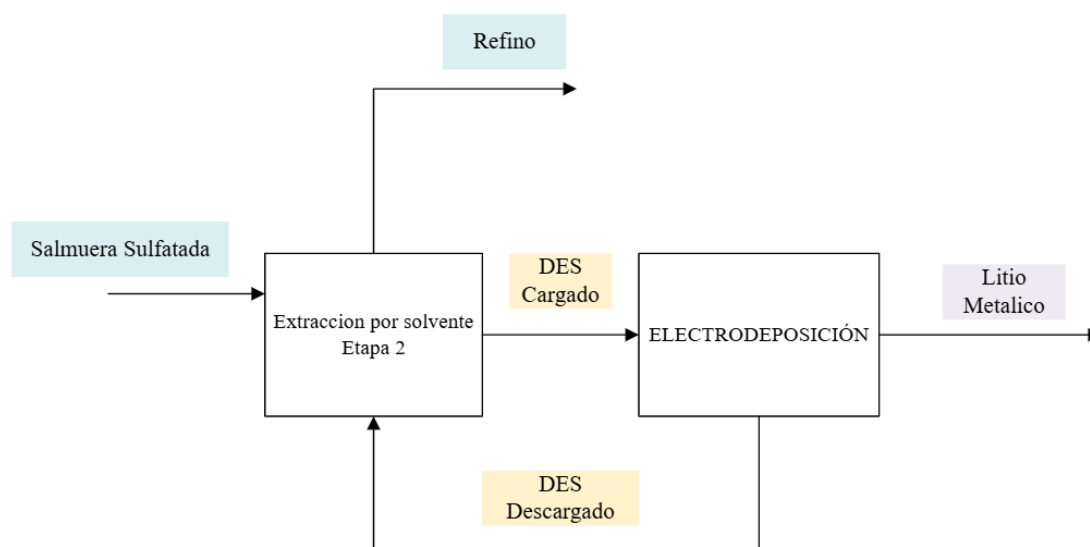


Figura 12. Diagrama de cajas Escenario 3

3.4 Escenario 4

En este escenario los parámetros de operación considerados serán los mismos utilizados en el Escenario 3, dado que se trabaja con la misma salmuera. Similar al escenario anterior, esta salmuera ha sido obtenida a una previa etapa de flotación selectiva, destinada a la remoción de impurezas críticas como magnesio y calcio, mejorando así la eficiencia del proceso de extracción.

La fase orgánica utilizada está formada por un DES, compuesto por ácido 2-etilhexanoico (HTTA) como donador de puentes de hidrógeno (HBD) y óxido de trioctilfosfina (TOPO) como aceptador de iones de hidrógeno (HBA). La interacción de estos dos componentes genera una estructura eutéctica líquida que mejora la solubilidad y la selectividad hacia el ion litio, incluso en presencia de altas concentraciones de sulfato.

El proceso se realiza en una única etapa de extracción por solvente, operando bajo las condiciones indicadas en la Tabla 10. Posteriormente, la fase orgánica cargada se somete a electrodeposición, permitiendo obtener un depósito de litio metálico.

El flujo de entrada corresponde a 2,392 toneladas anuales de litio contenidas en la salmuera. Tras la etapa de extracción con el DES, 2,273 toneladas anuales son transferidas a la fase orgánica cargada. En la etapa de recuperación mediante electrodiálisis, se logra obtener 1,500 toneladas anuales de litio metálico o concentrado de alta pureza, mientras que 773 toneladas anuales de litio permanecen en el orgánico descargado, el cual es recirculado para

su posterior procesamiento. El balance de masa detallado se observa en el Anexo 8. En la Figura 13, se puede observar el diagrama de bloques del proceso.

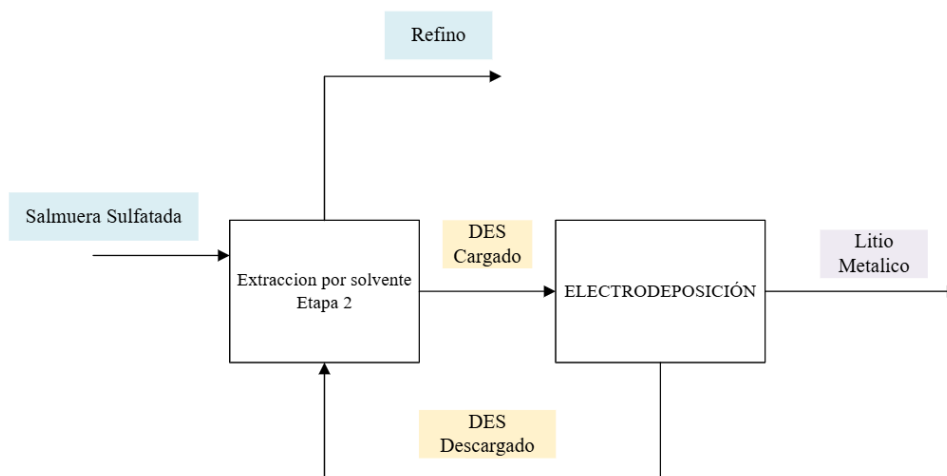


Figura 13. Diagrama de cajas Escenario 4

3.5 Resumen de evaluación técnica

En la siguiente tabla resumen se muestran los diferentes escenarios desarrollados, sus eficiencias, así como la cantidad de salmuera y DES que se utilizarán.

Tabla 11. Resumen de evaluación técnica

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Rendimiento	26%	34%	43%	63%
Tipo de salmuera	Salmuera Clorurada	Salmuera Clorurada	Salmuera Sulfatada	Salmuera Sulfatada
Cantidad de salmuera [ton/año]	4,158,848	2,933,756	97,204	67,530
Producción de litio metálico [ton/año]	1,500	1,500	1,500	1,500
Cantidad de DES [ton/año]	138,628	97,792	3,240	2,251
Coefficiente de distribución	1.06	1.76	2.25	4.84

Capítulo 4: Evaluación Económica

4.1 Metodología de evaluación

El método empleado para evaluar la viabilidad económica del proyecto será el **estado de resultados**, una herramienta esencial que compara los costos de inversión y operación con los beneficios económicos que se esperan generar. Este análisis es crucial para determinar la rentabilidad del proyecto y facilitar la toma de decisiones informadas sobre su ejecución. Para entender lo que se desarrollara se realizara una breve descripción de cada concepto.

4.1.1 Estados de resultados

El estado de resultados es un informe financiero importante que presenta los logros económicos alcanzados por la administración de una empresa durante un periodo determinado. Este documento detalla de manera detallada los ingresos obtenidos y los gastos incurridos en las operaciones de la empresa, ofreciendo una visión clara de su rendimiento financiero. Al reflejar tanto los resultados operativos como los no operativos, el estado de resultados permite a los administradores evaluar si la empresa está logrando sus objetivos financieros y operativos. Además, es utilizado para tomar decisiones informadas sobre posibles ajustes en las estrategias y operaciones, asegurando la sostenibilidad y crecimiento económico de la organización. En contexto de evaluación de proyectos, el estado de resultados puede adaptarse para incluir parámetros de evaluación adicionales como el Valor actual neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Estos indicadores proporcionan medidas de riesgo y rentabilidad respectivamente, que se explicaran a fondo más adelante.[23]

4.1.2 CAPEX

El CAPEX representa el costo total de inversión del proyecto, el cual es calculado con los costos directos e indirectos. En la Tabla 12 podemos observar la ponderación que se utilizara para calcular lo que se requiere.

Tabla 12. Ponderaciones para CAPEX

Costos	Categoría	Ponderación (%)
Costos directos	Compra e instalación de equipos	30
	Instrumentación	5
	Sistemas de tuberías	5
	Sistemas eléctricos	5
	Edificaciones	1
	Instalación de servicios	5
	Terrenos	1
Costos indirectos	Ingeniería y supervisión	1
	Construcción	25
	Contingencias	20
	Tarifa del contratista	2

Para estimar el costo total instalado de equipos en plantas industriales, se utiliza comúnmente el método de factores de instalación. Este método consiste en multiplicar el costo de compra del equipo base por un factor específico que representa los costos asociados a su instalación, como tuberías, cimentaciones, electricidad, instrumentación, pintura y montaje. Este método permite obtener una estimación rápida del CAPEX instalado, especialmente útil en etapas preliminares del diseño de plantas de proceso.

Se escogerá el costo directo de compra e instalación de equipos ya que es lo más relevante de la Tabla 12 de ponderaciones. Se comenzará realizando una lista de los equipos que se necesitan para cada proceso, luego el precio de compra y por último el precio de instalación. El precio de instalación se calculará según los factores que corresponda observados en la Tabla 13, que en este caso será de equipos varios según literatura.

Tabla 13. Factores de instalación

Tipo de Equipo	Factor de instalación
Compresores	2.5
Columnas de destilación	4
Calentadores a fuego directo	2
Intercambiadores de calor	3.5
Instrumentación	4
Equipos varios	2.5
Bombas	4

4.1.3 OPEX

El OPEX incluye los costos asociados a la operación y mantenimiento del proyecto. Este se calcula con los costos de manufactura y costos generales. Para realizar el cálculo se considerará los insumos que requieren en todo el proceso, debido a que es lo que tiene más peso en la ponderación. Primero se realizará una lista por proceso y luego se sumará los costos de obtención de estos.

Tabla 14. Ponderaciones para OPEX

Costos	Categoría	Ponderación (%)
Costos de manufactura	Materias primas	60
	Labor operativa	10
	Mantenimiento y reparación	15
Costos generales	Costos administrativos	5
	Costos de venta y distribución	5
	Costos de investigación	5

4.1.4 Depreciación

La depreciación es un término contable que describe la reducción en el valor de un activo fijo a lo largo de su vida útil, atribuida generalmente al desgaste, uso o la obsolescencia. Se contabiliza como un gasto que refleja el consumo del activo en el proceso de generación de ingresos. Existen varios métodos para calcular la depreciación, entre ellos:

- ❑ Método lineal: Distribuye de manera uniforme el costo del activo, menos su valor residual, a lo largo de su vida útil estimada. La Ecuación 7, es la que se utiliza para el cálculo.

$$\text{Depreciación} = \frac{\text{Costo inicial del activo} - \text{Valor residual}}{\text{Vida útil}} \quad (7)$$

- ❑ Depreciación acelerada: permite a una empresa asignar proporcionalmente más depreciación a los primeros años de vida útil de un activo. Este método asume que los activos pierden más valor en sus primeras etapas de uso.

Para la evaluación de proyecto de esta memoria para los distintos escenarios se utilizará el método lineal.

4.1.5 Valor actual neto (VAN)

El VAN es el valor actual neto, el cual es un método usado en para evaluar la rentabilidad de un proyecto. El VAN se calcula sumando los flujos de caja futuros que se espera que genere la inversión del proyecto, cada uno de ellos descontado al presente, y luego restando la inversión inicial, tal como se muestra en la Ecuación 8.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (8)$$

Donde:

- F_t : Flujo de Caja en el tiempo t
- r : Tasa de descuento
- n : Número total de periodos
- I_0 : Inversión inicial

Si el VAN es positivo, indica que la inversión generará una rentabilidad superior a la tasa de descuento utilizada, lo cual sugiere que el proyecto es aceptable. Si el VAN es negativo, indica que la rentabilidad sería inferior a la tasa de descuento, por lo que se concluye que el proyecto no es rentable. Por último, si el VAN es cero, indica que la rentabilidad de la inversión sería exactamente igual a la tasa de descuento. La tasa de descuento se aplica para reducir el valor de los flujos de caja futuros al presente, reflejando así el costo de oportunidad del capital.

4.1.6 Tasa interna de retorno

La tasa interna de retorno es un indicador financiero utilizado para evaluar la rentabilidad de posibles inversiones o proyectos. Es la tasa de descuento que hace que el VAN de todos los flujos de cajas futuros de un proyecto sea igual a cero, esto quiere decir que se analiza el rendimiento que un proyecto puede generar a lo largo de la vida útil de este. Para calcular este indicador de utiliza la ecuación 9.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} - I_0 = 0 \quad (9)$$

Donde:

- ☐ F_t : Flujo de Caja en el tiempo t
- ☐ r : TIR
- ☐ n : Número total de periodos
- ☐ I_0 : Inversión inicial

Cuando se evalúa un proyecto, existen tres posibles escenarios con respecto a la Tasa Interna de Retorno (TIR). Primero, si la TIR es superior al costo de oportunidad, el proyecto se considera viable, pues sus rendimientos superan la rentabilidad mínima esperada. Segundo, un TIR negativo indica que el proyecto no es rentable, ya que no alcanza a cubrir la rentabilidad mínima necesaria. Finalmente, si la TIR es exactamente cero, el proyecto resulta neutral en términos financieros; es decir, no proporciona ganancias adicionales, pero tampoco incurre en pérdidas respecto al umbral de rentabilidad mínima. [24]

4.1.7 Relación beneficio/costo

La relación beneficio/costo (B/C) es un indicador utilizado en la evaluación económica de proyectos para determinar su rentabilidad relativa. Consiste en dividir el valor presente de los beneficios esperados entre el valor presente de los costos asociados al proyecto. Su interpretación es sencilla: si el resultado es mayor a uno ($B/C > 1$), significa que los beneficios superan a los costos, lo que indica que el proyecto es económicamente viable. Si es igual a uno, los beneficios apenas cubren los costos; y si es menor a uno, el proyecto no resulta rentable. Este indicador es especialmente útil para comparar distintas alternativas de inversión, ya que permite identificar cuál de ellas genera un mayor retorno por cada unidad monetaria invertida.[23]

4.1.8 Equipos utilizados en todos los escenarios

La Tabla 16 presenta los costos asociados a los equipos necesarios para llevar a cabo las distintas etapas del proceso evaluado económicamente, el cual incluye dos etapas de extracción por solvente y una etapa de electrodeposición. En ella se especifican los equipos requeridos, sus precios individuales y los costos estimados de instalación para cada uno. Durante las etapas de extracción por solvente se requieren componentes tales como estanques de almacenamiento para salmuera y disolvente orgánico (DES), bombas para ambos fluidos, unidades mix-settler, y bombas adicionales para el transporte del flujo hacia procesos posteriores. Estas unidades se repiten en ambas etapas debido a la naturaleza secuencial del proceso de separación. Por otra parte, la etapa de

electrodeposición considera equipos como celdas electrolíticas, electrodos y bombas.

Tabla 15. Costos de los equipos e instalación

Proceso	Equipo	Precio Equipo	Precio de instalación
Extracción por solvente Etapa 1	Estanque de almacenamiento Salmuera	\$12,000	\$30,000
	Estanque de almacenamiento DES	\$3,000	\$7,500
	Bombas salmuera	\$10,000	\$40,000
	Bomba DES	\$8,000	\$32,000
	Mix-Settler	\$50,000	\$125,000
	Bomba de Pozo a Procesos	\$1,000	\$4,000
Extracción por solvente Etapa 2	Estanque de almacenamiento Salmuera	\$12,000	\$30,000
	Estanque de almacenamiento DES	\$3,000	\$7,500
	Bombas salmuera	\$10,000	\$40,000
	Bomba DES	\$8,000	\$32,000
	Mix-Settler	\$50,000	\$125,000
	Bomba de Pozo a Procesos	\$1,000	\$4,000
Electrodeposición	Celdas	\$20,000	\$50,000
	Electrodos	\$220,495	\$551,236
	Bomba	\$1,000	\$4,000
		TOTAL	\$1,082,236

4.2 Supuestos

Para realizar la evaluación se realizarán los siguientes supuestos:

- ☐ Años de proyección del proyecto: 15 años
- ☐ Producción: 1,500 [ton/año]
- ☐ Impuesto a la renta: 25%
- ☐ Royalty: 8%
- ☐ Tasa de interés promedio: 4.8% [25]

4.3 Comparación de escenarios

La Tabla 16 muestra una comparación de cuatro escenarios de evaluación económica para un proyecto determinado. Se analizan los indicadores financieros clave: CAPEX, OPEX, Payback, VAN, TIR y una evaluación final de viabilidad.

Tabla 16. Comparación de escenarios

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
CAPEX [MUSD]	\$3,607	\$3,607	\$2,762	\$2,762
OPEX [MUSD]	\$19,616	\$351,723	\$12,234	\$60,912
Payback [años]	2	No recupera	3.4	No recupera
VAN [MUSD]	\$18,422	-\$5,357,185	\$6,762	-\$649,148
TIR [%]	54%	No definida	30%	No definida
Evaluación Final	Viable	Inviable	Viable	Inviable

Capítulo 5: Análisis y discusión

5.1 Escenario 1: Extracción de litio desde salmuera clorurada con DES (N₈₈₈₁Cl/DecA)

El Escenario 1 propone el tratamiento de una salmuera clorurada con una concentración promedio de litio del 0.14% en peso, con el objetivo de producir 1,500 toneladas anuales de litio metálico. Para alcanzar esta meta, y considerando una eficiencia global del proceso del 26%, se estima necesario procesar aproximadamente 4,158,848 [ton/año]. Esta cantidad de salmuera del proceso resulta técnicamente viable, dado que estudios hidrogeológicos realizados en el Salar de Atacama por la empresa “IGSA Consultores”, realizaron un informe, en el marco de la evaluación ambiental de proyectos extractivos, indicando que el caudal autorizado de extracción de salmuera alcanza los 276 [l/s] [26]. Al convertir el volumen requerido para este escenario a una tasa de flujo continua, se obtiene un valor estimado de 115 [l/s], lo que representa menos del 41% del caudal autorizado. Por lo tanto, la disponibilidad operacional es compatible con los requerimientos del escenario propuesto, dentro del marco normativo y de capacidad extractiva vigente.

La primera etapa del proceso de extracción contempla el uso del extractante orgánico DEHPA diluido en keroseno, ampliamente utilizado en sistemas de extracción por solventes debido a su alta afinidad por cationes divalentes. En este escenario, se logra una eficiencia de extracción del 95% para Mg^{+2} y del 70% para Ca^{+2} , lo cual representa una remoción efectiva de las principales impurezas que dificultan la posterior recuperación del litio. No obstante, uno de los desafíos de esta etapa es la extracción de litio, la cual es 40% del total contenido de litio en la salmuera. Otro desafío que se presenta en este proceso es que hacer con el orgánico cargado con los iones de magnesio y calcio. Ante este punto, se propone una estrategia complementaria basada en el lavado del orgánico cargado con HCl diluido, seguido de un tratamiento de la fase acuosa mediante precipitación química selectiva utilizando carbonato de sodio (Na_2CO_3) o hidróxido de sodio (NaOH), para remover Mg^{2+} y Ca^{2+} como sólidos. Posteriormente, la solución purificada podría ser tratada para recuperar el litio en forma de carbonato de litio (Li_2CO_3), el cual tiene un valor comercial de 1,320 [CLP/gr]. Esta estrategia permite recuperar litio desde flujos que de otro modo serían considerados residuos, mejorando el rendimiento global del proceso y su viabilidad económica [27][28].

El litio restante en la fase acuosa, aproximadamente el 60% del total presente en la salmuera, luego de que un 40% fue extraído por DEHPA en la primera etapa. El litio que queda en solución acuosa es tratado en una segunda etapa mediante un DES compuesto por $N_{8881}Cl$ y DecA. Este sistema ha demostrado una alta selectividad hacia el ion Li^+ , lo que se refleja en una eficiencia de extracción del 66% sobre la fracción residual[14]. La selectividad del sistema se basa en la capacidad del anión carboxilato del DecA para formar complejos estables y reversibles con el litio, mientras que el entorno hidrofóbico del DES minimiza la co-extracción de otros iones presentes en la matriz salina, como Na^+ que se extrae en un 15% y K^+ en un 31%, cuyas interacciones con la fase orgánica son menos favorecidas. Esta combinación molecular permite una extracción diferencial eficiente en un entorno químicamente complejo, lo que técnicamente hace viable a este DES como una alternativa viable para procesos de separación selectiva de litio.

Otro parámetro clave para evaluar el desempeño del sistema extractivo en el Escenario 1 es el coeficiente de distribución, en este caso el litio, en la fase orgánica cargada versus su concentración en la fase acuosa en equilibrio. En este escenario, el valor de D obtenido fue de 1,06, lo que indica que, bajo las condiciones de operación establecidas, relación O/A de 1:3, pH 9, y tiempo de contacto de 20 minutos[14] el litio muestra una preferencia moderada por la fase orgánica DES frente a la acuosa. Este valor refleja un sistema funcional pero no altamente eficiente, ya que idealmente se busca un D significativamente mayor a 2 para asegurar una extracción más completa en etapas simples. Un D de 1.06 implica que por cada parte de litio que permanece en la fase acuosa, aproximadamente 1.06 partes han sido transferidas al disolvente orgánico, lo cual se correlaciona con la eficiencia de extracción del 66% reportada para esta etapa. Este valor también explica por qué, a pesar del buen desempeño del DES, una parte relevante del litio permanece en solución o requiere etapas de recirculación o concentración para su posterior recuperación. Además, valores de D cercanos a 2, aunque aceptables, podrían presentar sensibilidad frente a pequeñas variaciones de pH, temperatura o concentración salina, por lo que la estabilidad del proceso dependerá en gran medida del control operativo y del mantenimiento del equilibrio en las condiciones de extracción.

Se realizó una proyección financiera a 15 años para evaluar el desempeño económico del proyecto, considerando una tasa de inflación promedio del 4.8% anual. El precio de venta por tonelada se ajusta cada año según la inflación, partiendo desde 14,000 USD/ton en el año 1 hasta alcanzar 26,989 USD/ton en el año 15, con una producción constante de 1,500 toneladas anuales. Los ingresos aumentan progresivamente de 21 millones a más de 40 millones de dólares,

mientras que el OPEX también se incrementan en función de la inflación. Se calcularon indicadores como la utilidad antes y después de impuestos, considerando una tasa impositiva del 25% y un royalty del 8%. El flujo de caja anual es positivo desde el año 1, y se utiliza para calcular los principales indicadores financieros del proyecto. El Valor Actual Neto del proyecto asciende a 18,422 MUSD, y la Tasa Interna de Retorno se estima en un 54%, lo que demuestra una alta rentabilidad del proyecto bajo los supuestos planteados, tal como se observa en Anexo 9. El análisis del flujo de caja muestra que la inversión inicial se recupera completamente en el año 2, lo que significa que el payback del proyecto es de 2 años. Este corto período de recuperación destaca la rápida recuperación del capital invertido y refuerza la viabilidad financiera del proyecto. Todo esto se ve resumido en el Anexo 9.

Aunque los DES han sido ampliamente promovidos como alternativas más sostenibles frente a disolventes orgánicos convencionales, su impacto ambiental depende fuertemente de la naturaleza de sus componentes. En el caso específico del DES utilizado en este escenario, compuesto por DecA y $N_{8881}Cl$, esta distinción es especialmente relevante. El DecA es un ácido graso de cadena media, biodegradable y de bajo impacto eco-toxicológico. Sin embargo, el $N_{8881}Cl$, por ser una sal cuaternaria con una larga cadena alquilo, ha sido asociado a problemas de baja biodegradabilidad y potencial bioacumulación, lo cual puede comprometer la sostenibilidad del sistema si no se implementan medidas de manejo y regeneración adecuadas[29]. Por otro lado, a nivel del sistema completo, el consumo masivo de salmuera sin estrategias de reinyección controlada podría generar impactos sobre el balance hídrico del salar y los ecosistemas asociados. Asimismo, el proceso genera residuos sólidos, principalmente carbonatos de magnesio y calcio, además de corrientes salinas enriquecidas en sodio y potasio, que deben ser correctamente tratadas o reutilizadas para evitar efectos acumulativos. En consecuencia, aunque el proceso puede optimizarse mediante circuitos de recirculación y etapas de regeneración química, su implementación a gran escala debe ir acompañada de un análisis de ciclo de vida que evalúe de manera integral sus impactos ambientales, energéticos y sociales [28].

5.2 Escenario 2: Extracción de litio desde salmuera clorurada con DES (HTTA/TOPO)

El Escenario 2 propone una estrategia de extracción por solvente en dos etapas, utilizando la misma salmuera clorurada con una concentración promedio de litio del 0.14% en peso, con el objetivo de obtener 1,500 toneladas anuales de litio metálico. A diferencia del Escenario 1, este caso introduce una mejora en la

segunda etapa de extracción mediante un sistema orgánico altamente selectivo compuesto por ácido 2-thenoiltrifluoroacético (HTTA) y óxido de trioctilfosfina (TOPO). Considerando una eficiencia global del proceso del 37%, se estima necesario procesar aproximadamente 2,933,756 toneladas de salmuera por año. Esta cantidad sigue siendo técnicamente viable, ya que representa un caudal estimado de 81 litros por segundo, lo cual equivale a aproximadamente 29% del caudal autorizado de 276 l/s reportado en el informe hidrogeológico de IGSA Consultores para el Salar de Atacama [26]. Por tanto, el volumen requerido de salmuera se encuentra dentro de los límites permitidos por las resoluciones de calificación ambiental vigentes, y no representa un riesgo operativo ni normativo para la implementación del escenario.

La segunda etapa del proceso introduce una mejora tecnológica significativa mediante el uso del sistema orgánico HTTA/TOPO, conocido por su alta afinidad y especificidad hacia el ion Li^+ . En esta configuración, la eficiencia de extracción de litio alcanza el 95% sobre la fracción remanente en solución, es decir, del 60% que no fue extraído en la etapa con DEHPA. Esto representa una recuperación neta del 57% del litio total original contenido en la salmuera. Adicionalmente, el sistema muestra una selectividad extraordinaria, con valores de extracción insignificantes como el sodio que fue de un 0.1%, el potasio el cual es de un 1% y de magnesio y calcio es menor a 1%, lo que contribuye a una alta pureza en la fase orgánica y facilita las etapas posteriores de refinado o electrodeposición. Esta selectividad se explica por la formación de complejos quelatos entre el HTTA y el ion Li^+ , estabilizados por el TOPO, el cual actúa como modificador sinérgico, favoreciendo el transporte del complejo hacia la fase orgánica.

El coeficiente de distribución obtenido para el sistema extractante DES (HTTA/TOPO) en la segunda etapa del proceso fue de 1.76, lo que indica una preferencia significativa del litio por la fase orgánica respecto a la fase acuosa. Este valor refleja un equilibrio favorable para la transferencia del ion litio hacia el disolvente orgánico, permitiendo una alta eficiencia de extracción sin requerir excesivas etapas de contacto. En términos operacionales, un coeficiente mayor a 1 representa una buena capacidad del sistema para concentrar el litio en el extractante, optimizando así el rendimiento del proceso. Este resultado, coherente con lo reportado en literatura especializada, valida la idoneidad del sistema HTTA/TOPO para su aplicación en condiciones industriales donde se prioriza la selectividad y pureza del producto final. Además, este coeficiente respalda técnicamente la elección del DES como segunda etapa en el esquema de

extracción por solventes, especialmente en comparación con otros sistemas menos selectivos frente a cationes competidores como sodio o potasio.

En el escenario 2 se mantuvieron constantes las condiciones de inflación, precio proyectado y producción anual, sin embargo, se obtuvo el OPEX significativamente más alto, lo que impactó negativamente la rentabilidad del proyecto. A pesar de generar ingresos crecientes debido al ajuste inflacionario, los costos superan ampliamente los beneficios, resultando en utilidades netas negativas en todos los periodos analizados. Esto se refleja en un flujo de caja negativo durante los 15 años del proyecto, lo que indica una pérdida sostenida. Como consecuencia, el Valor Actual Neto del proyecto es negativo, con un valor de -5,357,185 MUSD, y la TIR no es definida debido a flujos de caja negativos en todos los periodos, lo que impide su cálculo según la fórmula estándar, lo que confirma la inviabilidad financiera del proyecto bajo estas condiciones. Este escenario representa una alternativa no recomendable desde el punto de vista económico, esto se ve reflejado en Anexo 10. Con respecto al payback tampoco es definido debido a que no hay retorno de dinero.

5.3 Escenario 3: Extracción de litio desde salmuera sulfatada con DES (N₈₈₈₁Cl/DecA)

El Escenario 3 introduce un cambio fundamental en la materia prima del proceso, reemplazando la salmuera clorurada utilizada en los escenarios anteriores por una salmuera sulfatada, que presenta una mayor concentración de litio y menores niveles de impurezas como Mg²⁺ y Ca²⁺. En esta solución de salmuera, se estima que el contenido de litio es de 3.54% en peso, lo que representa una mejora significativa respecto al 0.1% de la salmuera clorurada. Esta concentración permite alcanzar el mismo objetivo de producción de 1,500 toneladas anuales de litio metálico, pero con un volumen mucho menor de materia prima. Es por esta razón que se tomó la decisión de eliminar la primera etapa, que consideraba utilizar el orgánico que contiene DEHPA y solo realizar la extracción por solvente con el DES.

Una de las ventajas operacionales clave de este escenario, tal como se mencionó anteriormente es que el proceso se realiza en una sola etapa de extracción, a diferencia de los escenarios anteriores que requerían pretratamiento con DEHPA para remover impurezas. Esto se debe a que la salmuera sulfatada ya ha sido sometida a un proceso de flotación previo, el cual permite eliminar selectivamente una gran parte de los sólidos y cationes interferentes. Gracias a ello, la solución que ingresa al proceso de extracción ya se encuentra en

condiciones adecuadas para ser tratada directamente con el disolvente eutéctico profundo (DES) compuesto por N_{8881}Cl y ácido decanoico (DecA).

El análisis técnico del balance de masa del Escenario 3 revela un proceso de extracción de litio altamente eficiente y simplificado, apoyado en un coeficiente de distribución (D) de 2.25. Este valor representa la relación entre la concentración de litio en la fase orgánica y en la fase acuosa, indicando una fuerte afinidad del disolvente por el litio. En términos prácticos, significa que por cada unidad de litio que permanece en la salmuera, 2.25 unidades se transfieren a la fase orgánica, lo cual se traduce en una elevada eficiencia de extracción en una sola etapa, la cual es de 43%.

En el escenario 3, el estado resultado (Anexo 11) se mantiene con una producción anual constante de 1,500 toneladas, con un precio por tonelada ajustado por una tasa de inflación promedio del 4.8%, lo cual genera ingresos crecientes a lo largo de los 15 años proyectados. Este caso incluye tanto los costos operacionales (OPEX) como la depreciación anual, lo que permite un cálculo más completo del resultado operacional. A pesar de estos costos, el proyecto logra generar utilidades después de impuestos positivas en todos los periodos. Los indicadores financieros muestran un desempeño sólido, con un Valor Actual Neto de \$6,762 [MUSD] y una Tasa Interna de Retorno del 30%, lo que indica una rentabilidad razonable y sostenida a lo largo del horizonte del proyecto.

5.4 Escenario 4: Extracción de litio desde salmuera sulfatada con DES (HTTA/TOPO)

El Escenario 4 evalúa un proceso de recuperación de litio a partir de una salmuera sulfatada previamente tratada mediante flotación selectiva, lo que permite remover eficientemente impurezas muy problemáticas como magnesio y calcio. Esta purificación previa mejora significativamente las condiciones de entrada del sistema extractivo, al reducir la interferencia de cationes competidores y permitir un tratamiento más directo del litio.

En este caso, se utiliza un sistema de extracción en una única etapa basado en un disolvente eutéctico profundo compuesto por HTTA y TOPO. Esta combinación conforma una fase orgánica altamente selectiva hacia el ion Li^+ , incluso en presencia de elevadas concentraciones de aniones sulfato. El sistema HTTA/TOPO demuestra una notable eficiencia de extracción del 97% sobre la

fracción de litio presente en la solución, lo que incrementa la eficiencia global del proceso al 63%.

Al igual que en el Escenario 3, el proceso opera en una sola etapa de extracción, bajo condiciones operativas similares, eliminando la necesidad de etapas de pretratamiento adicionales como la extracción con DEHPA. Posteriormente, el litio cargado en la fase orgánica es recuperado mediante electrodeposición, permitiendo obtener un total de 1,500 toneladas anuales de litio metálico. El rendimiento total de recuperación alcanza un 62% respecto al contenido inicial de litio en la salmuera, cifra que destaca dentro del conjunto de escenarios evaluados.

Desde el punto de vista técnico, este sistema presenta una selectividad sobresaliente. La afinidad del HTTA por el ion Li^+ se ve reforzada por el efecto sinérgico del TOPO, que facilita la estabilización y transporte del complejo hacia la fase orgánica. Los niveles de coextracción de cationes como sodio, potasio, magnesio y calcio son prácticamente nulos, lo cual permite una alta pureza del litio extraído y reduce significativamente los requerimientos de etapas posteriores de purificación o refinado.

Sin embargo, a pesar del destacado desempeño técnico, el escenario enfrenta importantes desafíos económicos. El OPEX son considerablemente elevados debido a varios factores: el costo de los componentes del DES, el consumo energético asociado al proceso de electrodeposición, y los gastos de tratamiento y disposición de residuos. Aunque el proyecto contempla un precio de venta ajustado por inflación (partiendo de 14,000 USD/tonelada), y una producción estable a lo largo de los 15 años analizados, los ingresos no logran compensar los altos costos operativos.

El análisis financiero indica un flujo de caja negativo durante todos los años del proyecto, lo cual se traduce en un Valor Actual Neto de -\$649,148 [MUSD]. Además, la Tasa Interna de Retorno no puede calcularse, debido a la ausencia de flujos netos positivos, lo que confirma la inviabilidad económica del proyecto en su configuración actual. Este comportamiento se mantiene incluso considerando la depreciación y ajustes por impuestos y regalías. En consecuencia, el período de recuperación de la inversión no puede determinarse, ya que el capital inicial invertido no logra recuperarse en ningún momento del horizonte de evaluación de 15 años. Este resultado es indicativo de un modelo de negocio financieramente insostenible bajo las condiciones actuales del escenario, y refuerza la conclusión de que, sin medidas correctivas significativas en los

costos o ingresos, el proyecto no es factible desde el punto de vista económico. Todo este análisis está sustentado con el Anexo 12.

5.5 Análisis Final

Para realizar un análisis final se realizó una tabla con criterios y puntaje, donde a cada escenario se le asignó un puntaje según criterio personal, tal como se observa en la Tabla 17. Este enfoque es consistente con métodos multicriterio como el Análisis de Decisión por Múltiples Criterios (MCDA), ampliamente utilizados en la toma de decisiones complejas dentro de la ingeniería de procesos, donde se busca equilibrio entre rendimiento técnico y viabilidad económica. [30]

Tabla 17. Elección de escenarios con evaluación

Criterio	Condición Escenario 1 Salmuera clorurada N8881Cl/DecA	Condición Escenario 3 Salmuera clorurada N8881Cl/DecA	Puntaje Escenario 1	Puntaje Escenario 3
Viabilidad técnica				
Eficiencia del Proceso	26%	43%	0	1
Cantidad de DES	138,628	3,240	0	1
Cantidad de etapas del proceso	3	2	0	1
Coefficiente de distribución	1.06	2.25	0	1
Viabilidad económica				
VAN [MUSD]	18,422	6,762	1	0
Payback [año]	2	3.4	1	0
TIR	54%	30%	1	0
CAPEX [MUSD]	3,607	2,762	0	1
OPEX [MUSD]	19,616	12,234	0	1
Total			3	7

Tras evaluar los cuatro escenarios propuestos utilizando criterios técnicos y económicos, se observa que el Escenario 3 es el más equilibrado y favorable. Este escenario destaca por obtener uno de los puntajes más altos, con 7 puntos posibles. Presenta un desempeño técnico sólido, con altos puntajes en eficiencia del proceso, bajo consumo energético, bajo consumo de salmuera y una configuración optimizada del número de etapas del proceso. Desde el punto de vista económico, también resulta atractivo, ya que exhibe un buen Valor Actual

Neto, un periodo de recuperación corto, y bajos costos operativos. Estos factores en conjunto hacen del Escenario 3 la opción más recomendable.

En segundo lugar, el Escenario 1 ofrece una viabilidad económica muy buena, con puntajes máximos en VAN, TIR y OPEX, pero presenta debilidades técnicas importantes. Su eficiencia, consumo de energía y generación de salmuera son limitados, lo cual puede afectar la sostenibilidad y el impacto ambiental del proyecto. A pesar de ser una opción viable, requiere mejoras técnicas para ser competitivo a largo plazo.

En resumen, aunque el Escenario 1 exhibe una recuperación y un VAN más altos, el Escenario 3 resulta superior en la mayoría de los criterios operacionales y económicos relevantes para procesos escalables y sostenibles. Esta evaluación justifica técnicamente la selección del **Escenario 3** como el más viable en términos integrales

Capítulo 6: Diagrama de Flujo del Escenario 3

Desde el punto de vista económico, este escenario presenta un proceso altamente favorable, ya que el proyecto indica un VAN de positivo de \$6,762 MUS\$D, lo que indica que los flujos de caja generados en un periodo de 15 años superan ampliamente la inversión inicial, considerando los respectivos impuestos y la tasa de interés, haciendo que este sea el de mejor proyección. La tasa muestra cuánto podría crecer el capital invertido anualmente si se mantuviera dentro del proyecto, y un valor de 30% es considerado muy atractivo en contextos industriales y tecnológicos como la minería no metálica, y esto según comparación [31]. El ultimo indicador que se analizo es el Payback, el cual es de 3.4 años, lo que implica que en menos de cuatro años se recupera completamente la inversión inicial de capital.

El proceso de electrodeposición de litio metálico utilizando DES, si bien no está reportado en literatura para este elemento si esta para el cobalto, los problemas que enfrentamos al momento de realizar este proceso son las impurezas como el potasio, sodio y el calcio. Por lo que es necesario agregar una etapa de lavado, esta implementación permitirá la eliminación de impurezas, asegurando que el DES mantengas las propiedades y pueda ser recirculado sin comprometer la eficiencia del proceso de recuperación del litio.

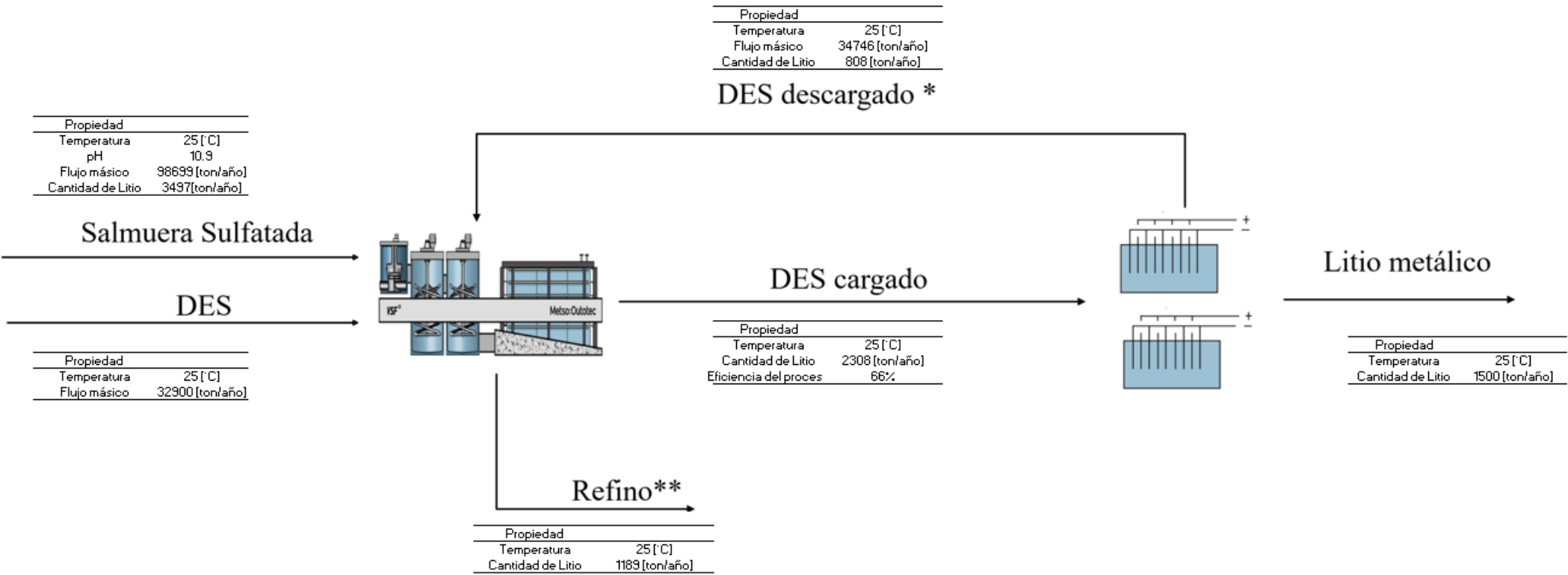


Figura 14. Diagrama del Proceso Escenario 3

* El flujo de DES que es recirculado antes de entrar al sistema de nuevo se limpia con HCl, para remover las impurezas.
** El refino se va al sistema de pozas de precipitación para que siga el proceso tradicional.

Capítulo 7: Conclusión y recomendaciones

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar técnica y económicamente la viabilidad de un proceso innovador para la obtención de litio metálico a partir de salmueras, mediante una combinación de extracción por solvente (SX) utilizando los DES y electrodeposición. Esta investigación surge como respuesta a una problemática actual: los largos tiempos de procesamiento en métodos convencionales como la evaporación solar y la falta de producción nacional de litio metálico, a pesar de que Chile dispone de importantes reservas de salmueras ricas en este recurso estratégico.

Se diseñaron y analizaron cuatro escenarios distintos, diferenciados por el tipo de salmuera utilizada las cuales son clorurada o sulfatada, la configuración del proceso en una o dos etapas de extracción, debido a las condiciones de la materia prima que ingresa al sistema y los tipos de DES empleados. A través de esta comparación fue posible determinar no solo la eficiencia técnica de cada proceso, sino también su factibilidad económica, tomando en cuenta indicadores financieros clave como el VAN, la Tasa Interna de Retorno, el periodo de recuperación, es decir, el payback, y el CAPEX y OPEX.

Desde el análisis técnico, se pudo comprobar que la utilización de DES ofrece ventajas considerables en comparación con solventes orgánicos tradicionales. Su baja toxicidad, baja volatilidad, reciclabilidad y alta selectividad hacia el ion litio en medios salinos complejos los posicionan como una opción prometedora para la separación selectiva de litio. En particular, el sistema HTTA/TOPO demostró ser el más eficiente, con una eficiencia global de 63% mientras que el sistema $N_{8881}Cl/DecA$, utilizado en el escenario 3, alcanzó una eficiencia del 43%, mostrando una buena selectividad en condiciones de salmueras sulfatadas con alta carga salina. Ambos sistemas presentaron una coextracción mínima de impurezas como sodio, potasio, magnesio y calcio, lo cual favorece la posterior purificación y recuperación de litio metálico en la etapa de electrodeposición, pero igual en recomendaciones sería evaluar cómo afectan estas impurezas en el sistema de electrodeposición.

Desde el punto de vista técnico, se comprobó que la utilización de una salmuera sulfatada con alta concentración de litio y baja relación Mg/Li , combinada con un sistema de extracción basado en DES, permite una alta eficiencia de transferencia de litio, con condiciones de operaciones estándar como la temperatura a 25°C y un pH de 9 y diseño de planta compacto.

Asimismo, se propuso una etapa de lavado intermedio para controlar las impurezas que podrían afectar la posterior electrodeposición, logrando de esta forma una recuperación más selectiva y estable del litio metálico.

Un aspecto importante que destacar es que el proceso propuesto no solo apunta a la eficiencia y rentabilidad, sino también a la sostenibilidad. La reutilización del DES en múltiples ciclos, la reducción del consumo de agua al evitar la evaporación solar, y la posibilidad de manejar las corrientes residuales mediante tratamiento y recuperación de subproductos como carbonato de litio desde flujos secundarios, permiten reducir el impacto ambiental y aumentar el valor agregado del proceso.

Además, aunque el proceso de electrodeposición de litio metálico aún no ha sido validado ampliamente en la literatura, la presente investigación aporta evidencia experimental y teórica de su factibilidad, tomando como referencia experiencias exitosas en la electrodeposición de otros metales como el cobalto en medios DES. La etapa de electrodeposición representa un punto crítico de innovación en esta propuesta, ya que permitiría cerrar el ciclo de obtención del litio metálico de forma más limpia, directa y con menor dependencia de procesos químicos convencionales.

Aunque los disolventes eutécticos profundos son considerados alternativas verdes, algunos de sus componentes como el N_{8881}Cl pueden presentar baja biodegradabilidad o toxicidad acumulativa. Se recomienda realizar un análisis de ciclo de vida y estudios de ecotoxicidad para validar su sustentabilidad en condiciones reales.

A partir de los resultados obtenidos y considerando las limitaciones del presente estudio, se proponen diversas recomendaciones orientadas a fortalecer, profundizar y proyectar el desarrollo de este proceso innovador para la obtención de litio metálico mediante extracción por solvente y electrodeposición con disolventes eutécticos profundos.

En primer lugar, se recomienda realizar estudios experimentales específicos que validen la viabilidad de la electrodeposición de litio metálico utilizando DES. Si bien existen antecedentes para otros metales como el cobalto, no se ha documentado suficientemente el comportamiento del litio bajo estas condiciones. Por tanto, es fundamental realizar ensayos controlados que permitan definir las condiciones electroquímicas óptimas (potencial, tipo de electrodo, temperatura, concentración, entre otros) y analizar la morfología y pureza del depósito obtenido, así como la eficiencia farádica del proceso.

Asimismo, se sugiere avanzar hacia una evaluación a escala piloto del proceso completo. Esta etapa permitirá observar el comportamiento real del sistema bajo operación continua, evaluar la estabilidad del DES a lo largo de

múltiples ciclos de extracción y descarga, y detectar posibles desviaciones o acumulaciones de impurezas que no se evidencian a escala de laboratorio. La validación piloto es clave para proyectar con mayor precisión los costos, consumos y tiempos de operación de una eventual implementación industrial. Por otra parte, se recomienda, de cara a un eventual escalamiento, incorporar sistemas de monitoreo y control automático que permitan gestionar variables críticas como el pH, la temperatura, el tiempo de residencia y la saturación del DES, favoreciendo así la eficiencia operativa, la trazabilidad del proceso y la reducción de errores humanos.

En paralelo, se recomienda optimizar el tratamiento de impurezas, particularmente los iones sodio, potasio, calcio y magnesio, que pueden afectar la eficiencia del sistema y comprometer la calidad del litio recuperado. Para ello, se podrían integrar etapas complementarias de purificación, como precipitación química selectiva o técnicas de separación avanzadas, que permitan recuperar estos compuestos o reducir su interferencia en el sistema.

Desde una perspectiva ambiental, se considera que el estudio debe considerar no solo el uso del recurso salmuera, sino también el origen, fabricación, regeneración y disposición del DES, así como las emisiones, residuos y consumo energético asociados al conjunto del proceso. Esto permitirá identificar oportunidades de mejora en términos de sustentabilidad, impacto ecosistémico y cumplimiento normativo, contribuyendo al diseño de un proceso más limpio y responsable.

Referencias

- [1] A. Gonzéles, F. Donoso, and V. Garay, “El mercado de litio”.
- [2] A. Khalil, S. Mohammed, R. Hashaikeh, and N. Hilal, “Lithium recovery from brine: Recent developments and challenges,” *Desalination*, vol. 528, p. 115611, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.DESAL.2022.115611.
- [3] N. R. Toro Villarroel and D. A. Torres Albornoz, *La fuerza del litio*. Comité editorial SQM, 2023. doi: 10.61303/978-956-416-471-7.
- [4] “Procesamiento de Espodumeno para Extraer Litio - 911Metallurgist.” Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: https://metalurgia.911metallurgist.com/procesamiento-de-espodumeno-para-extraer-litio/?utm_source=chatgpt.com
- [5] D. Fuentealba, C. Flores-Fernández, E. Troncoso, and H. Estay, “Technological tendencies for lithium production from salt lake brines: Progress and research gaps to move towards more sustainable processes,” *Resources Policy*, vol. 83, p. 103572, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.RESOURPOL.2023.103572.
- [6] “Home | SQM.” Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://sqm.com/>
- [7] “Merck Millipore | Ciencias de la vida | Productos químicos industriales y de laboratorio | Tienda virtual.” Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.merckmillipore.com/CL/es>
- [8] A. Mannu, M. Blangetti, S. Baldino, and C. Prandi, “Promising Technological and Industrial Applications of Deep Eutectic Systems,” *Materials 2021, Vol. 14, Page 2494*, vol. 14, no. 10, p. 2494, May 2021, doi: 10.3390/MA14102494.
- [9] T. El Achkar, H. Greige-Gerges, and S. Fourmentin, “Basics and properties of deep eutectic solvents: a review,” *Environ Chem Lett*, vol. 19, no. 4, pp. 3397–3408, Aug. 2021, doi: 10.1007/S10311-021-01225-8/FIGURES/1.
- [10] Esteban Domic Mihovilovic, *Hidrometalurgia*, vol. 1. 2001.
- [11] Fernando Zinola, “ELECTROQUÍMICA FUNDAMENTAL Y APLICACIONES,” 2007.
- [12] N. Pereira, “ESCALAMIENTO INDUSTRIAL DE UNA CELDA DE ELECTRÓLISIS DE SALES FUNDIDAS PARA LA OBTENCIÓN DE LITIO METÁLICO”.
- [13] T. Hanada and M. Goto, “Synergistic Deep Eutectic Solvents for Lithium Extraction,” *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 9, no. 5, pp. 2152–2160, Feb. 2021, doi: 10.1021/ACSSUSCHEMENG.0C07606/SUPPL_FILE/SC0C07606_SI_001.PDF.
- [14] L. Y. Yu, K. J. Wu, and C. H. He, “A two-step green liquid-liquid extraction strategy for selective lithium recovery and application to seawater,” *Hydrometallurgy*, vol. 220, p. 106102, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.HYDROMET.2023.106102.

- [15] B. Chen, Y. Guo, X. Zhang, and G. Yu, “Deep eutectic solvent-assisted selective extraction of valuable metals from waste lithium-ion batteries,” *AIChE Journal*, vol. 70, no. 5, May 2024, doi: 10.1002/AIC.18394.
- [16] I. M. Pateli, A. P. Abbott, G. R. T. Jenkin, and J. M. Hartley, “Electrochemical oxidation as alternative for dissolution of metal oxides in deep eutectic solvents,” *Green Chemistry*, vol. 22, no. 23, pp. 8360–8368, Dec. 2020, doi: 10.1039/D0GC03491F.
- [17] A. P. Abbott, R. C. Harris, F. Holyoak, G. Frisch, J. Hartley, and G. R. T. Jenkin, “Electrocatalytic recovery of elements from complex mixtures using deep eutectic solvents,” *Green Chemistry*, vol. 17, no. 4, pp. 2172–2179, Apr. 2015, doi: 10.1039/C4GC02246G.
- [18] H. Wang *et al.*, “Cobalt Electrochemical Recovery from Lithium Cobalt Oxides in Deep Eutectic Choline Chloride+Urea Solvents,” *ChemSusChem*, vol. 14, no. 14, pp. 2972–2983, Jul. 2021, doi: 10.1002/CSSC.202100954;WEBSITE:WEBSITE:CHEMISTRY-EUROPE;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:1864564X;WGROU:ST RING:PUBLICATION.
- [19] J. Almeida *et al.*, “Electrodialytic removal of tungsten and arsenic from secondary mine resources-Deep eutectic solvents enhancement”.
- [20] “Precio De Fábrica D2ehpa/dehpa Como Extracción De Agente - Buy D2ehpa,Di(2-ethylhexyl)phosphoric Acid,Dehpa Product on Alibaba.com.” Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Factory-Price-D2EHPA-DEHPA-As-Extracting_60640396651.html?spm=a2700.7724857.0.0.354a643b1Tk09m
- [21] VICENTE IGNACIO VIDAL CALDERÓN, “PRODUCCIÓN DE LITIO METÁLICO MEDIANTE ELECTRODIÁLISIS REACTIVA A BAJA TEMPERATURA A PARTIR DE ELECTROLITOS DE LiCl,” 2023.
- [22] U. Geological Survey, “Mineral Commodity Summaries 2024,” 2024.
- [23] Carl S. Warren, James M. Reeve, and Jonathan E. Duchac, *Contabilidad Financiera*, 14th ed., vol. 1. 2016. Accessed: May 31, 2025. [Online]. Available: https://www.academia.edu/39120603/Conta_Financ_14ed_Warren
- [24] “Tasa interna de retorno (TIR): ¿Qué es y cómo se calcula? | Sage.” Accessed: May 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.sage.com/es-es/blog/tasa-interna-de-retorno-tir-que-es-y-como-se-calcula/>
- [25] “IPoM: El Banco Central de Chile anticipa que la inflación anual cerrará en un 4,8% este 2024 | EL PAÍS Chile.” Accessed: May 31, 2025. [Online]. Available: <https://elpais.com/chile/2024-12-18/el-banco-central-de-chile-anticipa-que-la-inflacion-anual-cerrara-en-un-48-este-2024.html>
- [26] Igssa Consultores, “Evaluación hidrogeológica del Salar de Atacama: Componente agua subterránea,” 2019.
- [27] P. Meshram, B. D. Pandey, and T. R. Mankhand, “Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review,” *Hydrometallurgy*, vol. 150, pp. 192–208, Dec. 2014, doi: 10.1016/J.HYDROMET.2014.10.012.

- [28] B. Swain, “Recovery and recycling of lithium: A review,” *Sep Purif Technol*, vol. 172, pp. 388–403, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.SEPPUR.2016.08.031.
- [29] O. Kolawole, Thammakhet-Buranachai, A. Sooksimuang, T. Elliott, and C. Karoonuthaisiri, “Evaluating the green credentials and performance of deep eutectic solvents in the extraction of antibiotics and mycotoxins in foods,” 2024, doi: 10.1080/17518253.2024.2427797.
- [30] R. G. S. Garza Ríos, “MULTIEXPERTOS DENTRO DEL PERFIL DEL INGENIERO INDUSTRIAL.” Accessed: Jul. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/3604/360433558001.pdf>
- [31] “ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO PROYECTO MINERO ROMERO”.

Anexos

Anexo 1

```
SOLUTION 1 Brine Density Estimate
pH 7| charge
density 1.17
units mg/kgw
temp 25
Na 71000
K 23000
Mg 14000
Li 1000
Cl 165000
S(6) 15000 # SO4 as sulfur in oxidation state +6
Ca 0

END
```

Figura. INPUT de simulación en Phreeqc

Anexo 2

```
-----Description of solution-----
pH = 9.186 Charge balance
pe = 4.000
Specific Conductance (uS/cm, 25oC) = 220795
Density (g/cm3) = 1.17072
Volume (L) = 1.10112
Viscosity (mPa s) = 1.65573
Activity of water = 0.846
Ionic strength (mol/kgw) = 5.376e+00
Mass of water (kg) = 1.000e+00
Total alkalinity (eq/kg) = 5.998e-03
Temperature (oC) = 25.00
Electrical balance (eq) = 3.419e-14
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 0.00
Iterations = 8
Total H = 1.110184e+02
Total O = 5.613680e+01
```

Figura 15. OUTPUT de simulación en Phreeqc

Anexo 3

Tabla 18. Balance de masa Escenario 1

		1	2	4	3	7	5	6	8	7
	Unidades	Salmuera	Organico Descargado	Organico Cargado	Salmuera Acuosa	Organico Descargado	Refino	Organico Cargado	Litio metalico	Organico Descargado
Flujo	t/año	4158848	138628	658842	3638634	36386	3580471	94549	1500	149712
Na	t/año	7.1%	296942	0	59388	237553	0	202871	34683	0
K	t/año	2.3%	96485	0	28946	67540	0	46332	21207	0
Mg	t/año	1.4%	56560	0	53732	2828	0	2828	0	0
Li	t/año	0.1%	5739	0	2296	3444	0	1171	2273	1500
Ca	t/año	0.0%	1331	0	932	399	0	399	0	0
Cl	t/año	16.5%	685794	0	342897	342897	0	342897	0	0
SO4	t/año	1.5%	64046	0	32023	32023	0	32023	0	0
H2O	t/año	71.0%	2951950	0	0	2951950	0	2951950	0	0

Anexo 4

Tabla 19. Balance de masa Escenario 2

		1	2	4	3	7	5	6	8	7
	Unidades	Salmuera	Organico Descargado	Organico Cargado	Salmuera Acuosa	Organico Descargado	Refino	Organico Cargado	Litio metalico	Organico Descargado
Flujo	t/año	2933756	97792	464764	2566784	128339	2562801	132323	1500	133306
Na	t/año	7.1%	209470	0	41894	167576	0	165900	1676	1676
K	t/año	2.3%	68063	0	20419	47644	0	47644	0.0000	0.0000
Mg	t/año	1.4%	39899	0	37904	1995	0	1995	0	0
Li	t/año	0.1%	4049	0	1619	2429	0	121	2308	1500
Ca	t/año	0.0%	939	0	657	282	0	282	0	0
Cl	t/año	16.5%	483776	0	241888	241888	0	241888	0	0
SO4	t/año	1.5%	45180	0	22590	22590	0	22590	0	0
H2O	t/año	71.0%	2082380	0	0	2082380	0	2082380	0	0

Anexo 5

SOLUTION 1 Brine Density Estimate

pH 10.3
density 1.1944
units mg/kgw
temp 25
Na 1151
K 3192
Mg 4268
Li 35426
Cl 9872
S(6) 255757
Ca 334

END

Figura 16. INPUT de simulación en Phreeqc

Anexo 6

```
-----Description of solution-----
pH = 10.300
pe = 4.000
Specific Conductance (uS/cm, 25oC) = 183667
Density (g/cm3) = 1.19440
Volume (L) = 1.09680
Viscosity (mPa s) = 1.52905
Activity of water = 0.885
Ionic strength (mol/kgw) = 5.182e+00
Mass of water (kg) = 1.000e+00
Total alkalinity (eq/kg) = 1.536e-03
Temperature (oC) = 25.00
Electrical balance (eq) = 1.042e-04
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 0.00
Iterations = 12
Total H = 1.110140e+02
Total O = 6.615719e+01
```

Figura 17. OUTPUT de simulación en Phreeqc

Anexo 7

Tabla 20. Escenario 3: Balance de masa

1			2		4	3	6	5
Unidades			Salmuera	Organico Descargado	Organico Cargado	Refino	Litio metalico	Organico Descargado
Flujo	t/año		98699	32900	35323	96276	1500	34746
Na	t/año	0.12%	114	0	17	97	0	17
K	t/año	0.32%	315	0	99	216	0	99
Mg	t/año	0.43%	421	0	0	421	0	0
Li	t/año	3.54%	3497	0	2308	1189	1500	808
Ca	t/año	0.03%	33	0	0	33	0	0
Cl	t/año	0.99%	974	0	0	974	0	0
SO4	t/año	25.58%	25243	0	0	25243	0	0
H2O	t/año	0.69	68102	0	0	68102	0	0

Anexo 8

Tabla 21. Balance de masa Escenario 4

1			2		4	3	6	5
Unidades			Salmuera	Organico Descargado	Organico Cargado	Refino	Litio metalico	Organico Descargado
Flujo	t/año		68570	22857	25167	66259	1500	24477
Na	t/año	0.12%	79	0	1	78	0	0
K	t/año	0.32%	219	0	2	217	0	2
Mg	t/año	0.43%	293	0	0	293	0	0
Li	t/año	3.54%	2429	0	2308	121	1500	808
Ca	t/año	0.03%	23	0	0	23	0	0
Cl	t/año	0.99%	677	0	0	677	0	0
SO4	t/año	25.58%	17537	0	0	17537	0	0
H2O	t/año	0.69	47313	0	0	47313	0	0

Anexo 9

Tabla 22.Estado de Resultado Escenario 1 (Parte 1)

Tasa de inflación promedio			4.8%		4.8%		4.8%		4.8%		4.8%		4.8%	
0			1		2		3		4		5		6	
Precio [USD/ton]	\$	14,000	\$	14,672.0	\$	15,376.3	\$	16,114.3	\$	16,887.8	\$	17,698.4		
Producción [ton]		1500		1500		1500		1500		1500		1500		
Ingresos	\$	21,000,000	\$	22,008,000	\$	23,064,384	\$	24,171,474	\$	25,331,705	\$	26,547,627		
OPEX	-\$	19,616,555	-\$	20,558,149.1	-\$	21,544,940.3	-\$	22,579,097.4	-\$	23,662,894.1	-\$	24,798,713.0		
Depreciación	-\$	120,779	-\$	120,779	-\$	120,779	-\$	120,779	-\$	120,779	-\$	120,779		
Utilidad antes de impuesto	\$	1,262,667	\$	1,329,072	\$	1,398,665	\$	1,471,598	\$	1,548,032	\$	1,628,135		
Impuesto a la renta [25%]	\$	315,667	\$	332,268	\$	349,666	\$	367,900	\$	387,008	\$	407,034		
Royalty [8%]	\$	101,013	\$	106,326	\$	111,893	\$	117,728	\$	123,843	\$	130,251		
Utilidad despues de impuesto	\$	1,679,347	\$	1,767,666	\$	1,860,224	\$	1,957,225	\$	2,058,883	\$	2,165,420		
Depreciación	\$	120,779	\$	120,779	\$	120,779	\$	120,779	\$	120,779	\$	120,779		
Resultado operacional	\$	1,800,125	\$	1,888,445	\$	1,981,003	\$	2,078,004	\$	2,179,662	\$	2,286,199		
inversión	-\$	3,607,456												
Flujo de caja	-\$	3,607,456	\$	1,800,125	\$	1,888,445	\$	1,981,003	\$	2,078,004	\$	2,179,662	\$	2,286,199
Margen bruto	\$		\$	1,383,445	\$	1,449,851	\$	1,519,444	\$	1,592,377	\$	1,668,811	\$	1,748,914
VAN		\$18,422,502.69												
TIR		54%												

EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA EXTRACCIÓN SELECTIVA DE LITIO MEDIANTE SOLVENTES EUTÉCTICOS PROFUNDOS.

Tabla 23. Estado de Resultado Escenario 1 (Parte 2)

4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%
7	8	9	10	11	12	13	14	15
\$ 18,547.9	\$ 19,438.2	\$ 20,371.3	\$ 21,349.1	\$ 22,373.9	\$ 23,447.8	\$ 24,573.3	\$ 25,752.8	\$ 26,989.0
1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
\$ 27,821,913	\$ 29,157,365	\$ 30,556,919	\$ 32,023,651	\$ 33,560,786	\$ 35,171,704	\$ 36,859,945	\$ 38,629,223	\$ 40,483,425
-\$ 25,989,051.2	-\$ 27,236,525.7	-\$ 28,543,878.9	-\$ 29,913,985.1	-\$ 31,349,856.4	-\$ 32,854,649.5	-\$ 34,431,672.7	-\$ 36,084,393.0	-\$ 37,816,443.8
-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779
\$ 1,712,083	\$ 1,800,060	\$ 1,892,261	\$ 1,988,887	\$ 2,090,150	\$ 2,196,275	\$ 2,307,494	\$ 2,424,051	\$ 2,546,203
\$ 428,021	\$ 450,015	\$ 473,065	\$ 497,222	\$ 522,538	\$ 549,069	\$ 576,873	\$ 606,013	\$ 636,551
\$ 136,967	\$ 144,005	\$ 151,381	\$ 159,111	\$ 167,212	\$ 175,702	\$ 184,599	\$ 193,924	\$ 203,696
\$ 2,277,070	\$ 2,394,080	\$ 2,516,707	\$ 2,645,219	\$ 2,779,900	\$ 2,921,046	\$ 3,068,967	\$ 3,223,988	\$ 3,386,449
\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779
\$ 2,397,849	\$ 2,514,859	\$ 2,637,486	\$ 2,765,998	\$ 2,900,679	\$ 3,041,825	\$ 3,189,746	\$ 3,344,766	\$ 3,507,228

\$ 2,397,849	\$ 2,514,859	\$ 2,637,486	\$ 2,765,998	\$ 2,900,679	\$ 3,041,825	\$ 3,189,746	\$ 3,344,766	\$ 3,507,228
\$ 1,832,862	\$ 1,920,839	\$ 2,013,040	\$ 2,109,665	\$ 2,210,929	\$ 2,317,054	\$ 2,428,273	\$ 2,544,830	\$ 2,666,982

Anexo 10

Tabla 24. Estado de Resultado Escenario 2 (Parte 1)

Tasa de inflación promedio	0	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%
		1	2	3	4	5	6
Precio [USD/ton]		\$ 14,000	\$ 14,672.0	\$ 15,376.3	\$ 16,114.3	\$ 16,887.8	\$ 17,698.4
Producción [ton]		1500	1500	1500	1500	1500	1500
Ingresos		\$ 21,000,000	\$ 22,008,000	\$ 23,064,384	\$ 24,171,474	\$ 25,331,705	\$ 26,547,627
OPEX	-\$	351,723,456	-\$ 368,606,182.1	-\$ 386,299,278.8	-\$ 404,841,644.2	-\$ 424,274,043.1	-\$ 444,639,197.2
Depreciación	-\$	120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779
Utilidad antes de impuesto		\$ -330,844,235	\$ -346,718,961	\$ -363,355,674	\$ -380,790,949	\$ -399,063,117	\$ -418,212,349
Impuesto a la renta [25%]		\$ -82,711,059	\$ -86,679,740	\$ -90,838,918	\$ -95,197,737	\$ -99,765,779	\$ -104,553,087
Royalty [8%]		\$ -26,467,539	\$ -27,737,517	\$ -29,068,454	\$ -30,463,276	\$ -31,925,049	\$ -33,456,988
Utilidad despues de impuesto		\$ -440,022,833	\$ -461,136,218	\$ -483,263,046	\$ -506,451,962	\$ -530,753,945	\$ -556,222,424
Depreciación		\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779
Resultado operacional		\$ -439,902,054	\$ -461,015,439	\$ -483,142,267	\$ -506,331,183	\$ -530,633,166	\$ -556,101,645
inversión	-\$	3,607,456					
Flujo de caja	-\$	3,607,456	-\$ 439,902,054	-\$ 461,015,439	-\$ 483,142,267	-\$ 506,331,183	-\$ 530,633,166
Margen bruto		\$ -330,723,456	\$ -346,598,182	\$ -363,234,895	\$ -380,670,170	\$ -398,942,338	\$ -418,091,570
VAN		-\$5,357,185,666.16					
TIR		#¡NUM!					

Tabla 25. Estado de Resultado Escenario 2 (Parte 2)

4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%
7	8	9	10	11	12	13	14	15
\$ 18,547.9	\$ 19,438.2	\$ 20,371.3	\$ 21,349.1	\$ 22,373.9	\$ 23,447.8	\$ 24,573.3	\$ 25,752.8	\$ 26,989.0
1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
\$ 27,821,913	\$ 29,157,365	\$ 30,556,919	\$ 32,023,651	\$ 33,560,786	\$ 35,171,704	\$ 36,859,945	\$ 38,629,223	\$ 40,483,425
-\$ 465,981,878.6	-\$ 488,349,008.8	-\$ 511,789,761.2	-\$ 536,355,669.8	-\$ 562,100,741.9	-\$ 589,081,577.5	-\$ 617,357,493.3	-\$ 646,990,652.9	-\$ 678,046,204.3
-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779	-\$ 120,779
\$ -438,280,744	\$ -459,312,423	\$ -481,353,622	\$ -504,452,798	\$ -528,660,735	\$ -554,030,653	\$ -580,618,327	\$ -608,482,209	\$ -637,683,558
\$ -109,570,186	\$ -114,828,106	\$ -120,338,405	\$ -126,113,200	\$ -132,165,184	\$ -138,507,663	\$ -145,154,582	\$ -152,120,552	\$ -159,420,889
\$ -35,062,460	\$ -36,744,994	\$ -38,508,290	\$ -40,356,224	\$ -42,292,859	\$ -44,322,452	\$ -46,449,466	\$ -48,678,577	\$ -51,014,685
\$ -582,913,390	\$ -610,885,522	\$ -640,200,317	\$ -670,922,221	\$ -703,118,778	\$ -736,860,768	\$ -772,222,375	\$ -809,281,338	\$ -848,119,132
\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779	\$ 120,779
\$ -582,792,611	\$ -610,764,743	\$ -640,079,538	\$ -670,801,443	\$ -702,997,999	\$ -736,739,989	\$ -772,101,596	\$ -809,160,559	\$ -847,998,353
\$ -582,792,611	\$ -610,764,743	\$ -640,079,538	\$ -670,801,443	\$ -702,997,999	\$ -736,739,989	\$ -772,101,596	\$ -809,160,559	\$ -847,998,353
\$ -438,159,965	\$ -459,191,644	\$ -481,232,843	\$ -504,332,019	\$ -528,539,956	\$ -553,909,874	\$ -580,497,548	\$ -608,361,430	\$ -637,562,779

Anexo 11

Tabla 26. Estado de Resultado Escenario 3 (Parte 1)

Tasa de inflación promedio	0	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%
	0	1	2	3	4	5	6
Precio [USD/ton]		\$ 14,000	\$ 14,672.0	\$ 15,376.3	\$ 16,114.3	\$ 16,887.8	\$ 17,698.4
Producción [ton]		1500	1500	1500	1500	1500	1500
Ingresos		\$ 21,000,000	\$ 22,008,000	\$ 23,064,384	\$ 24,171,474	\$ 25,331,705	\$ 26,547,627
OPEX		-\$ 20,390,000	-\$ 21,368,719.6	-\$ 22,394,418.1	-\$ 23,469,350.2	-\$ 24,595,879.0	-\$ 25,776,481.2
Depreciación		-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963
Utilidad antes de impuesto		\$ 494,038	\$ 523,318	\$ 554,003	\$ 586,162	\$ 619,864	\$ 655,183
Impuesto a la renta [25%]		\$ 123,509	\$ 130,829	\$ 138,501	\$ 146,540	\$ 154,966	\$ 163,796
Royalty [8%]		\$ 39,523	\$ 41,865	\$ 44,320	\$ 46,893	\$ 49,589	\$ 52,415
Utilidad despues de impuesto		\$ 657,070	\$ 696,013	\$ 736,824	\$ 779,595	\$ 824,419	\$ 871,394
Depreciación		\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963
Resultado operacional		\$ 773,033	\$ 811,975	\$ 852,787	\$ 895,558	\$ 940,381	\$ 987,356
inversión	-\$ 2,762,456						
Flujo de caja	-\$ 2,762,456	\$ 773,033	\$ 811,975	\$ 852,787	\$ 895,558	\$ 940,381	\$ 987,356
Margen bruto		\$ 610,000	\$ 639,280	\$ 669,966	\$ 702,124	\$ 735,826	\$ 771,146
VAN	\$6,762,703.43						
TIR	30%						

Tabla 27. Estado de Resultado Escenario 3 (Parte 2)

4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%
7	8	9	10	11	12	13	14	15
\$ 18,547.9	\$ 19,438.2	\$ 20,371.3	\$ 21,349.1	\$ 22,373.9	\$ 23,447.8	\$ 24,573.3	\$ 25,752.8	\$ 26,989.0
1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
\$ 27,821,913	\$ 29,157,365	\$ 30,556,919	\$ 32,023,651	\$ 33,560,786	\$ 35,171,704	\$ 36,859,945	\$ 38,629,223	\$ 40,483,425
-\$ 27,013,752.3	-\$ 28,310,412.4	-\$ 29,669,312.2	-\$ 31,093,439.2	-\$ 32,585,924.2	-\$ 34,150,048.6	-\$ 35,789,250.9	-\$ 37,507,135.0	-\$ 39,307,477.5
-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963
\$ 692,198	\$ 730,990	\$ 771,644	\$ 814,249	\$ 858,899	\$ 905,692	\$ 954,732	\$ 1,006,125	\$ 1,059,985
\$ 173,050	\$ 182,747	\$ 192,911	\$ 203,562	\$ 214,725	\$ 226,423	\$ 238,683	\$ 251,531	\$ 264,996
\$ 55,376	\$ 58,479	\$ 61,731	\$ 65,140	\$ 68,712	\$ 72,455	\$ 76,379	\$ 80,490	\$ 84,799
\$ 920,624	\$ 972,217	\$ 1,026,286	\$ 1,082,951	\$ 1,142,336	\$ 1,204,571	\$ 1,269,793	\$ 1,338,146	\$ 1,409,780
\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963
\$ 1,036,586	\$ 1,088,179	\$ 1,142,249	\$ 1,198,914	\$ 1,258,298	\$ 1,320,533	\$ 1,385,756	\$ 1,454,109	\$ 1,525,743
\$ 1,036,586	\$ 1,088,179	\$ 1,142,249	\$ 1,198,914	\$ 1,258,298	\$ 1,320,533	\$ 1,385,756	\$ 1,454,109	\$ 1,525,743
\$ 808,161	\$ 846,953	\$ 887,606	\$ 930,211	\$ 974,862	\$ 1,021,655	\$ 1,070,694	\$ 1,122,088	\$ 1,175,948

Anexo 12

Tabla 28. Estado de Resultado Escenario 4 (Parte 1)

Tasa de inflación promedio	0	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%
	0	1	2	3	4	5	6
Precio [USD/ton]		\$ 14,000	\$ 14,672.0	\$ 15,376.3	\$ 16,114.3	\$ 16,887.8	\$ 17,698.4
Producción [ton]		1500	1500	1500	1500	1500	1500
Ingresos		\$ 21,000,000	\$ 22,008,000	\$ 23,064,384	\$ 24,171,474	\$ 25,331,705	\$ 26,547,627
OPEX		-\$ 60,912,441	-\$ 63,836,238.0	-\$ 66,900,377.5	-\$ 70,111,595.6	-\$ 73,476,952.2	-\$ 77,003,845.9
Depreciación		-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963
Utilidad antes de impuesto		\$ -40,028,403	\$ -41,944,201	\$ -43,951,956	\$ -46,056,084	\$ -48,261,210	\$ -50,572,181
Impuesto a la renta [25%]		\$ -10,007,101	\$ -10,486,050	\$ -10,987,989	\$ -11,514,021	\$ -12,065,302	\$ -12,643,045
Royalty [8%]		\$ -3,202,272	\$ -3,355,536	\$ -3,516,156	\$ -3,684,487	\$ -3,860,897	\$ -4,045,775
Utilidad despues de impuesto		\$ -53,237,777	\$ -55,785,787	\$ -58,456,102	\$ -61,254,591	\$ -64,187,409	\$ -67,261,001
Depreciación		\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963
Resultado operacional		\$ -53,121,814	\$ -55,669,824	\$ -58,340,139	\$ -61,138,629	\$ -64,071,446	\$ -67,145,039
inversión	-\$ 2,762,456						
Flujo de caja	-\$ 2,762,456	\$ -53,121,814	\$ -55,669,824	\$ -58,340,139	\$ -61,138,629	\$ -64,071,446	\$ -67,145,039
Margen bruto		\$ -39,912,441	\$ -41,828,238	\$ -43,835,993	\$ -45,940,121	\$ -48,145,247	\$ -50,456,219
VAN	-\$649,148,887.90						
TIR	#¡NUM!						

EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA EXTRACCIÓN SELECTIVA DE LITIO MEDIANTE SOLVENTES EUTÉCTICOS PROFUNDOS.

Tabla 29. Estado de Resultado Escenario 4 (Parte 2)

4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%
7	8	9	10	11	12	13	14	15
\$ 18,547.9	\$ 19,438.2	\$ 20,371.3	\$ 21,349.1	\$ 22,373.9	\$ 23,447.8	\$ 24,573.3	\$ 25,752.8	\$ 26,989.0
1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
\$ 27,821,913	\$ 29,157,365	\$ 30,556,919	\$ 32,023,651	\$ 33,560,786	\$ 35,171,704	\$ 36,859,945	\$ 38,629,223	\$ 40,483,425
-\$ 80,700,030.5	-\$ 84,573,631.9	-\$ 88,633,166.3	-\$ 92,887,558.2	-\$ 97,346,161.0	-\$ 102,018,776.8	-\$ 106,915,678.0	-\$ 112,047,630.6	-\$ 117,425,916.9
-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963	-\$ 115,963
\$ -52,994,080	\$ -55,532,230	\$ -58,192,210	\$ -60,979,870	\$ -63,901,338	\$ -66,963,036	\$ -70,171,695	\$ -73,534,371	\$ -77,058,454
\$ -13,248,520	\$ -13,883,057	\$ -14,548,053	\$ -15,244,968	\$ -15,975,334	\$ -16,740,759	\$ -17,542,924	\$ -18,383,593	\$ -19,264,614
\$ -4,239,526	\$ -4,442,578	\$ -4,655,377	\$ -4,878,390	\$ -5,112,107	\$ -5,357,043	\$ -5,613,736	\$ -5,882,750	\$ -6,164,676
\$ -70,482,126	\$ -73,857,865	\$ -77,395,640	\$ -81,103,227	\$ -84,988,779	\$ -89,060,838	\$ -93,328,355	\$ -97,800,713	\$ -102,487,744
\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963	\$ 115,963
\$ -70,366,164	\$ -73,741,903	\$ -77,279,677	\$ -80,987,265	\$ -84,872,817	\$ -88,944,875	\$ -93,212,392	\$ -97,684,750	\$ -102,371,781
\$ -70,366,164	\$ -73,741,903	\$ -77,279,677	\$ -80,987,265	\$ -84,872,817	\$ -88,944,875	\$ -93,212,392	\$ -97,684,750	\$ -102,371,781
\$ -52,878,117	\$ -55,416,267	\$ -58,076,248	\$ -60,863,908	\$ -63,785,375	\$ -66,847,073	\$ -70,055,733	\$ -73,418,408	\$ -76,942,491