

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS**

**MODELO DE EVALUACIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE  
TECNOLOGÍAS DE EXTRACCIÓN DIRECTA DE LITIO (DLE) EN  
PROYECTOS MINEROS DE LITIO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL**

**AUTOR**

**Francisca Paz Cortez Salinas**

**PROFESOR GUÍA**

**Dra. Maria Pilar Gárate**

**PROFESOR CO-REFERENTE**

**Juan Pablo Mena**

**SANTIAGO DE CHILE, 23 DE AGOSTO 2024**

## Tabla de contenido

<b>1. Resumen Ejecutivo.....</b>	<b>5</b>
<b>2. Introducción .....</b>	<b>6</b>
<b>3. Problema de Investigación .....</b>	<b>8</b>
<b>4. Objetivos .....</b>	<b>11</b>
4.1. Objetivo General.....	11
4.2. Objetivos Específicos .....	11
<b>Marco Teórico .....</b>	<b>12</b>
4.3. Litio: ¿Qué es y para qué sirve?.....	12
4.3.1. Aplicaciones del litio en diversas industrias .....	12
4.3.2. Impacto del litio en la transición hacia la energía limpia y la movilidad eléctrica .....	13
4.4. Tendencias en el mercado global del litio .....	14
4.4.1. Proyecciones de demanda y oferta .....	15
4.5. Reservas de litio y métodos de extracción actuales: ¿Dónde está el litio y cómo lo estamos extrayendo? .....	16



---

4.5.1.	Extracción de minerales de pegmatita .....	17
4.5.2.	Extracción de salmuera .....	18
4.6.	Contexto político: La guerra por el litio .....	19
4.6.1.	Chile .....	19
4.6.2.	Argentina.....	20
4.6.3.	Bolivia .....	21
4.6.4.	Estados Unidos .....	22
4.6.5.	Unión Europea.....	22
4.6.6.	China .....	23
4.7.	Tecnologías de Extracción Directa de Litio (DLE): Un nuevo enfoque .....	24
4.7.1.	Adsorción .....	26
4.7.2.	Intercambio Iónico (IX).....	26
4.7.3.	Extracción por Solvente (SX).....	27
<b>5.</b>	<b>Metodología .....</b>	<b>29</b>
5.1.	Descripción del modelo .....	30
5.1.1.	Selección de variables y recolección de datos.....	30
5.1.2.	Análisis preliminar de factores de exclusión.....	31
5.1.3.	Estandarización de variables .....	31
5.1.4.	Asignación de pesos a las variables.....	31
5.1.5.	Cálculo de la calificación de las tecnologías .....	31



---

<b>6. Análisis y Resultados .....</b>	<b>34</b>
6.1. Metodología del Análisis .....	34
6.1.1. Definición de variables y recopilación de datos.....	34
6.1.1.1. Variables Cualitativas.....	35
6.1.1.1.1. Factibilidad técnica.....	35
6.1.1.1.2. Impacto ambiental .....	39
6.1.1.1.3. Comunidades aledañas .....	40
6.1.2. Submodelo evaluación económica .....	42
6.1.2.1. Estimación CAPEX y OPEX .....	42
6.1.2.2. Proyecciones de Ingresos .....	44
6.1.2.3. Impuestos .....	45
6.1.2.4. Flujo de caja e indicadores .....	46
6.1.3. Análisis preliminar de factores de exclusión.....	49
6.1.4. Estandarización de variables .....	49
6.1.5. Asignación de pesos a las variables.....	51
6.1.6. Método estadístico.....	53
6.1.7. Resultados del modelo.....	57
6.2. Caso de Estudio .....	58
6.1.2. Contexto .....	59
6.1.3. Aplicación del modelo.....	61
6.2.1.1. Definición de variables y recopilación de datos.....	61
6.2.1.2. Evaluación económica.....	62



---

6.2.1.3.	Análisis preliminar de factores de exclusión.....	63
6.2.1.4.	Estandarización, ponderación y aplicación del método estadístico.....	63
6.1.4.	Resultados y discusión .....	67
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>69</b>
<b>8.</b>	<b>Limitaciones.....</b>	<b>74</b>
<b>9.</b>	<b>Trabajos Futuros .....</b>	<b>75</b>
<b>10.</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>77</b>
<b>11.</b>	<b>Tabla de Figuras .....</b>	<b>79</b>
<b>12.</b>	<b>Tabla de Tablas .....</b>	<b>80</b>

## 1. Resumen Ejecutivo

Las nuevas tecnologías de Extracción Directa de Litio (DLE, por sus siglas en inglés) surgen en respuesta a la creciente demanda de litio, impulsada por su papel crucial en la fabricación de vehículos eléctricos y el almacenamiento de energía, sectores en pleno auge. Estas innovadoras tecnologías de extracción tienen el potencial de aumentar la eficiencia del proceso de obtención de litio desde salmuera, mediante métodos sustancialmente más rápidos y sostenibles.

Sin embargo, las empresas que optan por adoptar estas nuevas tecnologías se enfrentan al desafío de seleccionar la opción más adecuada para sus proyectos entre las diversas alternativas disponibles en el mercado.

En este contexto, el presente trabajo se enfoca en analizar las tres principales ramas de la DLE: adsorción, intercambio iónico y extracción por solvente, evaluándolas según cuatro criterios fundamentales: viabilidad económica, factibilidad técnica, impacto ambiental e impacto en las comunidades locales cercanas a los potenciales proyectos.

El objetivo de esta memoria es desarrollar una metodología que integre variables clave, tanto cuantitativas como cualitativas, para el proceso de toma de decisiones, considerando la estrategia empresarial, los objetivos operativos y el contexto político que rodea al proyecto.

Para ello, se ha creado un modelo de evaluación multicriterio que, a través de juicio experto, estandariza las variables, calificándolas del 1 al 5, y luego las pondera según su importancia relativa, permitiendo comparar las tecnologías. El modelo ha sido validado mediante la aplicación de un caso de estudio, demostrando su capacidad para generar resultados consistentes y relevantes.

Con este estudio, se espera haber proporcionado un marco de trabajo sólido que simplifique el proceso de evaluación de tecnologías DLE, considerando no solo los aspectos cuantitativos, sino también los matices de cada tecnología y su impacto en el entorno.

## 2. Introducción

La creciente demanda de litio de los últimos años, impulsada por su rol crucial en la fabricación de baterías para dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos, ha puesto de manifiesto la necesidad de optimizar los procesos de extracción de este valioso recurso. En un contexto global donde la sostenibilidad y la eficiencia energética son primordiales, la selección adecuada de tecnologías para la extracción de litio se ha convertido en un desafío estratégico para las empresas mineras y los gobiernos.

Entre las diversas metodologías para la extracción de litio, la Extracción Directa de Litio (DLE, por sus siglas en inglés) ha emergido como una tecnología prometedora debido a sus ventajas en términos de eficiencia y menor impacto ambiental en comparación con los métodos tradicionales. Las tecnologías DLE permiten extraer litio de salmueras de manera más rápida y con una menor huella ecológica, respondiendo así a las exigencias de sostenibilidad y responsabilidad ambiental.

Este trabajo de memoria propone el desarrollo de un modelo orientativo que facilite la toma de decisiones en la elección de tecnologías DLE para proyectos de extracción de litio. El modelo integrará un conjunto de criterios técnicos, económicos y ambientales, proporcionando una herramienta analítica que permita a los stakeholders identificar la opción más adecuada para cada proyecto.

La metodología de este estudio se basa en un análisis exhaustivo de las tecnologías DLE disponibles y la aplicación de técnicas de modelado para evaluar su viabilidad en diferentes escenarios. Además, se llevará a cabo un caso de estudio para validar la efectividad del modelo en situaciones reales, ofreciendo así una perspectiva práctica de su aplicabilidad.

El objetivo final es proporcionar una guía robusta y sistemática que contribuya a la optimización de los proyectos de extracción de litio mediante DLE, minimizando los riesgos



asociados y promoviendo prácticas sostenibles. A través de este enfoque, se espera no solo mejorar la eficiencia operativa de las empresas mineras, sino también apoyar el desarrollo sostenible del sector y su integración en la economía verde global.

### 3. Problema de Investigación

Tradicionalmente, el litio ha sido un elemento ampliamente utilizado en diversas aplicaciones que van desde productos farmacéuticos, hasta la fabricación de cerámicos, vidrios y adhesivos especiales. Actualmente, la extracción de este commodity proviene exclusivamente de minerales de roca dura y salmueras continentales, donde los recursos de salmuera en reservorios acuíferos potencialmente explotables representan alrededor de un 60% de la participación mundial (Cochilco, 2023).

En los últimos años, la demanda de litio ha experimentado un notable aumento basado en el mercado de las baterías recargables de ion litio. Estas baterías se emplean tanto en mercados maduros, como celulares, tablets, y notebooks, como en productos emergentes, tales como drones, micro electromovilidad (scooters), sistemas de almacenamiento energéticos y vehículos eléctricos.

Es en esta última categoría donde yace el motor de la demanda. Impulsado por objetivos medioambientales y consideraciones geopolíticas, el mercado de la electromovilidad presenta altas proyecciones y volúmenes futuros prometedores. De hecho, en los últimos años, las ventas de vehículos eléctricos livianos han experimentado un crecimiento prácticamente exponencial. En 2012, se vendieron 131 mil unidades, lo que representó menos del 0,1% de las ventas totales de vehículos nuevos, y para el año 2021, esta cifra ascendió a 6,8 millones de unidades, lo que equivale a 6,8% de las ventas de la industria; para ilustrar la magnitud de este cambio, en una semana promedio de 2021 se vendió la misma cantidad de vehículos eléctricos que en todo el año 2012 (Cochilco, 2023). Es así como se proyecta superar los 73 millones de ventas anuales de vehículos eléctricos al año 2040, siendo su principal mercado, en términos de ventas de automóviles eléctricos de pasajeros enchufable, Europa (Goldman Sachs Research, 2023).

Este auge global de la electromovilidad aumenta notablemente las proyecciones de demanda de litio, donde se estima que este mercado pasará de representar un 60% del consumo

---

agregado de litio en 2021 a un 83% en 2035.

No obstante, se anticipa que, manteniendo los niveles actuales de producción, la oferta global de litio enfrentaría un déficit del 55% para lograr satisfacer la demanda proyectada (McKinsey & Company, 2023).

El proceso tradicional de extracción de litio de la salmuera es a través de estanques de evaporación. La salmuera se bombea a la superficie del yacimiento para ser evaporada, y con cada transferencia a un nuevo estanque se consigue una mayor pureza, hasta que el litio puede ser extraído y procesado completamente. Este procedimiento requiere de un gran espacio físico, debido a las pozas, y es intrínsecamente lento, tardando de 12 a 18 meses.

Este proceso presenta una rigidez que no permite responder a cambios de corto plazo en la demanda, como el caso actual que enfrenta la industria. Además, conlleva impactos medioambientales irreversibles y significativos, como la pérdida del hábitat de la fauna y el desplazamiento de comunidades. Por ello, surge la necesidad de desarrollar prácticas mineras más sostenibles y responsables.

Consecuentemente, se han desarrollado nuevas tecnologías de Extracción Directa de Litio, las cuales representan un enfoque prometedor para mejorar la eficiencia de la producción de litio, permitiendo el procesamiento de salmueras continentales y otras más diluidas, evitando las piscinas de evaporación. Este innovador método no solo reduce el tiempo del proceso, si no también añade beneficios en materia de sustentabilidad (Farahbakhsh et al., 2024).

Los tres principales métodos de Extracción Directa de Litio son adsorción (AD), intercambio iónico (IX) y extracción por solvente (SX, por sus siglas en inglés), aunque existen otras tecnologías en etapas tempranas de desarrollo como membranas.

Considerando que cada salmuera posee diferentes concentraciones de litio e impurezas, y que los proyectos tienen distintas metas operativas, es poco probable que exista una solución única óptima para todos los casos. A raíz de esto, nace la necesidad de abordar las siguientes preguntas:



¿Qué variables, cualitativas y cuantitativas, son relevantes para evaluar las distintas tecnologías DLE?, ¿Cómo impactan estas variables en la elección de una tecnología DLE?, ¿Cómo se podrían modelar las variables con la finalidad de sistematizar la elección de tecnología?

Entender estas interrogantes es esencial para desarrollar un proyecto de extracción de litio en el actual entorno industrial. En el presente trabajo se examinarán las tres principales ramas de tecnologías DLE mencionadas previamente, llevando a cabo un análisis detallado de las variables, tanto cuantitativas como cualitativas, que influyen en la elección de la tecnología más adecuada según las condiciones operativas, con el fin de establecer un marco de trabajo adaptable a diversos casos.

## 4. Objetivos

### 4.1. Objetivo General

Desarrollar un modelo para orientar la evaluación y selección de tecnologías en proyectos de Extracción Directa de Litio (DLE, por sus siglas en inglés) desde salmuera, mediante el análisis y la comparación de variables, tanto cuantitativas como cualitativas, relevantes para el proceso de toma de decisión.

### 4.2. Objetivos Específicos

- Recopilar información relacionada a la implementación y operación de proyectos con las distintas tecnologías DLE.
- Definir un submodelo que permita la evaluación económica para las distintas tecnologías de Extracción Directa de Litio, incluyendo el gasto de capital (CAPEX) y el gasto operativo (OPEX) de cada alternativa.
- Identificar las variables cualitativas relevantes para la implementación de las distintas tecnologías DLE, tales como, impacto ambiental, factibilidad técnica, comunidades aledañas, etc.
- Definir un modelo que simplifique la comparación y análisis de las distintas tecnologías DLE para diferentes casos de proyecto, basándose en las variables mencionadas, con el objetivo de orientar la toma de decisiones.
- Realizar un análisis de sensibilización del modelo, testeándolo con variables reales.

## Marco Teórico

### 4.3. Litio: ¿Qué es y para qué sirve?

El litio (Li) es un elemento químico alcalino de rápida oxidación en aire o agua. En su forma pura es un metal blando, de color blanco plateado y sumamente ligero, que no se encuentra en estado libre en la naturaleza, sino solamente en compuestos. El litio presenta el calor específico más alto de todos los elementos sólidos, lo que permite formar aleaciones con cobre, manganeso, aluminio y cadmio.

Este metal, que se comercializa principalmente en forma de carbonato de litio, y en menor medida, como cloruro de litio, ha cobrado una sorprendente relevancia en el último tiempo debido al rol que juega en la transición hacia la energía renovable y la movilidad eléctrica, su precio se ha disparado gracias a la exponencial demanda existente, dando paso a la innovación en el proceso de extracción en la búsqueda de aumentar el ritmo de producción para cumplir con las nuevas demandas que espera el mercado global.

#### 4.3.1. Aplicaciones del litio en diversas industrias

Podemos agrupar las principales aplicaciones del litio en cuatro categorías: industriales, artículos electrónicos, almacenamiento energético y otras baterías, y baterías para vehículos eléctricos.

Con relación a los industriales y derivados, el litio es usado como aditivo para mejora de performance en productos industriales como cerámicas, grasas, vidrio, aluminio, sistemas de aire acondicionado, productos farmacéuticos, entre otros. Este mercado es considerado estable y maduro, por lo que su proyección de crecimiento es mínima.

Otra aplicación de este metal es en el mercado de artículos electrónicos. El litio es usado para las baterías en mercados maduros como celulares, notebooks, tabletas y herramientas electrónicas. Al ser mercados ya establecidos tampoco presentan una proyección riesgosa.

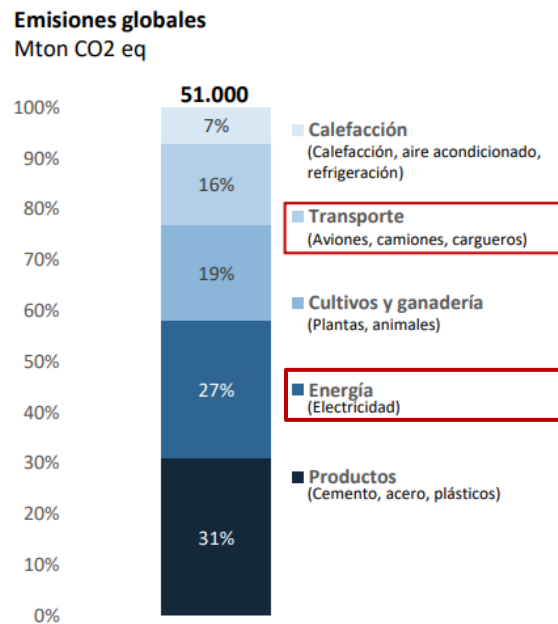
Con respecto al mercado del almacenamiento energético y otras baterías, tales como baterías de ion-litio para drones o electromovilidad (scooters), este puede presentar mayor volatilidad, sin embargo, aunque se espera que los sistemas de almacenamiento energético presenten un crecimiento relativamente alto, es posible que se vea amenazado en el mediano plazo por tecnologías que atenúen significativamente, o incluso eliminen el uso de litio.

Finalmente, se encuentra el mercado de baterías para vehículos eléctricos (EV). Este mercado, empujado por metas medioambientales y geopolíticas, presenta la principal fuente de demanda de litio actualmente y se espera que continúe su crecimiento (Cochilco, 2023).

#### **4.3.2. Impacto del litio en la transición hacia la energía limpia y la movilidad eléctrica**

El litio es el metal más liviano y el elemento sólido de menor densidad, contando con el mayor potencial electroquímico entre todos los metales (Althaus et al., 2009). Esto permite que las baterías de ion-litio tengan una alta densidad energética, es decir, que pueden almacenar una mayor cantidad de energía en un sistema relativamente pequeño y liviano. De igual forma, cuentan con el mayor ratio carga/peso, el cual es un atributo deseable para el diseño de los medios de transporte. Como consecuencia, estas baterías se han convertido progresivamente en la batería preferida del mercado (Rapier, 2019).

De esta manera, el litio, como componente principal de las baterías para la electromovilidad y el almacenamiento de energía, desempeña un papel fundamental en la transición hacia las energías renovables y la movilidad eléctrica. Esto se debe a que aborda dos importantes fuentes de emisiones globales de CO<sub>2</sub>: el transporte y la energía, según el Ministerio de Economía de Chile, como se muestra en la **Figura 1**.



**Figura 1:** Fuentes de emisiones globales de CO<sub>2</sub>. Ministerio de Minería, Cochilco, 2022.

#### 4.4. Tendencias en el mercado global del litio

Actualmente, el mercado global del litio está experimentando transformaciones significativas. Innovaciones tecnológicas, fluctuaciones en la oferta y demanda, cambios en políticas gubernamentales y enfoques en sostenibilidad están redefiniendo su dinámica.

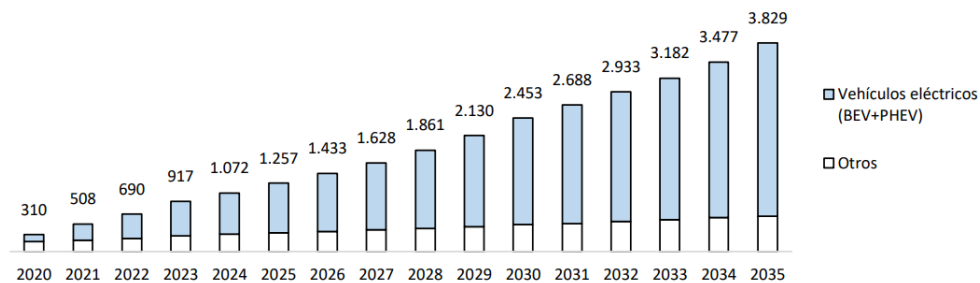
La creciente demanda de vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos ha disparado la necesidad de litio, mientras que la oferta intenta mantenerse al ritmo de esta expansión. Estas dinámicas están generando fluctuaciones en los precios del litio, afectando a toda la cadena de suministro.

En esta sección se presentan las principales proyecciones de demanda y oferta que moldean el futuro del mercado del litio. Basándose en el crecimiento exponencial que ha tenido la electromovilidad, se busca proporcionar una visión económica y cuantitativa del escenario futuro, destacando cómo estas tendencias influirán en la dinámica de este mineral.

#### 4.4.1. Proyecciones de demanda y oferta

Como se mencionó anteriormente, la principal fuente de demanda de litio de los últimos años ha provenído de los vehículos eléctricos, y se espera que esta tendencia continúe creciendo progresivamente.

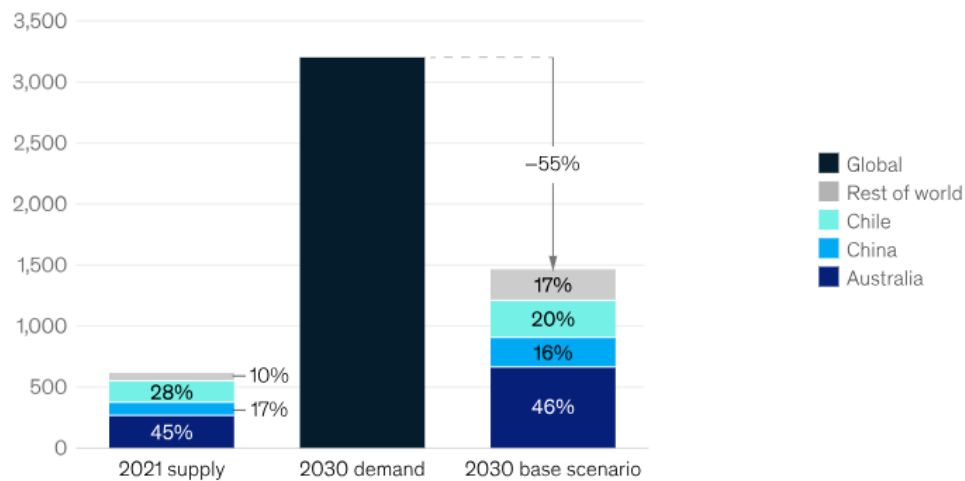
Las proyecciones muestran que la demanda de litio crecería desde 508 kt LCE (carbonato de litio equivalente) en 2021 hasta 3.829 kt LCE al 2035, como se ve en la **Figura 2**. Esto supone un crecimiento anual compuesto de 15,5%, donde se espera que el segmento de vehículos eléctricos pase de representar el 60% del consumo agregado de litio en 2021, a un 83% en 2035.



**Figura 2:** Proyección de demanda agregada de litio (kt LCE). Cochilco, 2023.

Sin embargo, el problema viene dado por la capacidad de producción de litio mundial actual. Las proyecciones del mercado muestran que se presentará una extrema falta de oferta si no se desarrollan nuevos proyectos.

La **Figura 3** muestra claramente como, según las proyecciones de producción de litio actuales, se estima una falta de abastecimiento global de, aproximadamente, 55%, lo que induce un creciente interés en el mercado por innovar para aumentar la tasa de producción y aprovechar así esta ventana.



**Figura 3:** Oferta de litio en 2021, y demanda y oferta de litio proyectada a 2030 por país (kt LCE). McKinsey & Company, 2023.

#### 4.5. Reservas de litio y métodos de extracción actuales: ¿Dónde está el litio y cómo lo estamos extrayendo?

El litio es un mineral abundante en la corteza terrestre y en océanos, sin embargo, en general, se suelen distinguir cinco fuentes posiblemente rentables de explotación: a partir de mineral de roca o pegmatitas (comúnmente en la forma de espodumeno), salmueras en reservorios acuosos continentales (sales), salmueras en depósitos geotérmicos, arcillas y zeolitas. Actualmente, sólo se extrae litio de las dos primeras fuentes mencionadas: pegmatitas y sales.

A continuación, la **Tabla 1** presenta la clasificación de los recursos de litio en estado natural potencialmente explotables, según tipo de depósito, participación de los recursos a nivel mundial, estado natural en que se encuentran, y las ubicaciones de los mayores depósitos.

**Tabla 1:** Clasificación de los recursos de litio en estado natural potencialmente explotables

Tipo	Tipos de depósitos	Part. mundial	Estado natural	Ubicación mayores depósitos
Pegmatitas	Espodumeno, petalitas, lepidolitas, amblygonita y eucryptita, mica	27%	Roca dura (a partir de magma cristalizado bajo la superficie terrestre)	Australia, EE.UU., RDC, Canadá
Salmueras en reservorios acuíferos	Salares y lagunas continentales	60%	Salmueras (arenas, agua y sales minerales)	Triángulo del litio (Chile, Argentina, Bolivia), Zabuye (China)
Salmueras en depósitos geotérmicos	Acuíferos formados por la circulación de aguas calientes a partir de fracturas terrestres	3%	Solución salina disuelta a altas temperaturas junto a otros minerales	Frontera California-México, Alemania (Rhine Graben), norte de Chile
Arcillas	Arcillas, toba volcánica, rocas evaporitas lacustres	7%	Arcillas minerales de esmectita (arcilla)	EE.UU. (Nevada), México (Sonora), Chile (Llamará)
Zeolitas	Capas de jadarita, mineral de silicato de la familia de las zeolitas	3%	jadarita (evaporita lacustre)	Serbia (Jadar)

Fuente: Bradley et al., 2017.

De estas reservas, los depósitos de salmueras en reservorios acuíferos son los más abundantes a nivel mundial. Estos se concentran en el denominado “triángulo del litio”, que comprende el noreste de Chile, el noreste de Argentina y el sur de Bolivia, donde se encuentran algunos de los salares más prominentes del mundo, como el Salar de Hombre Muerto en Argentina, el Salar de Atacama en Chile, y el Salar de Uyuni en Bolivia.

De las reservas de salmuera, Chile está a la cabecera, abarcando casi dos tercios con 9.300.000 kt, representando un 36% de las reservas mundiales (USCG, 2023).

A continuación, se detallarán los procesos de extracción de litio desde pegmatita y desde salmuera.

#### 4.5.1. Extracción de minerales de pegmatita

El 27% de los recursos disponibles de litio se encuentra dentro de rocas duras llamadas pegmatitas, las cuales se forman a partir de magma volcánico cristalizado en el interior de la tierra.

Este proceso de extracción demora dos meses aproximadamente, y se realiza a través de técnicas convencionales de minería de superficie. Las pegmatitas mineralizadas se trituran, se muelen y se separan los minerales identificados para obtener litio.

La producción de litio a partir de pegmatitas, con relación a la de salmueras, se ve favorecida por dos factores. Primero, un tiempo promedio de producción notablemente inferior, y

segundo, del espodumeno (componente mineral de la pegmatita que contiene litio) es posible pasar directamente a la producción de hidróxido, sin necesidad de producir carbonato primero, como ocurre en los depósitos de salmuera.

El 2021, un 51% del litio producido mundialmente fue extraído utilizando este método, del cual un 84% provino de Australia (BMI, 2022).

#### **4.5.2. Extracción de salmuera**

Este método de extracción de litio consiste en extraer la salmuera desde el salar y bombearla hacia grandes piscinas en las que, mediante etapas sucesivas, se evaporan a cielo abierto las sales no deseadas, tales como potasio, boro y magnesio, concentrando el litio en la solución, obteniendo finalmente cloruro de litio.

Posteriormente, esta salmuera concentrada de litio se procesa en una planta química para obtener como productos finales carbonato e hidróxido de litio, ambos fundamentales para la fabricación de baterías de ion litio, entre otros productos.

El proceso de concentración de litio en las pozas de evaporación tarda entre 12 y 18 meses, dependiendo de diversos factores como las condiciones climáticas y los objetivos de producción.

Desde las sales precipitadas del proceso se obtienen subproductos tales como sulfato de litio, cloruro de potasio, entre otros.

Si bien una ventaja que tiene este método es que es menos costoso en comparación con el tratamiento clásicamente minero de las pegmatitas (que involucra extracción, chanchado, molienda, flotación, calentamiento y lixiviación con ácido sulfúrico), este proceso es altamente ineficiente al requerir mucho tiempo para lograr la concentración en la solución y un gran espacio físico para las piscinas de evaporación. Esto se traduce en una menor flexibilidad para adaptar la producción a una mayor escala en respuesta a un aumento repentino en la demanda, como el que se está experimentando actualmente.

## **4.6. Contexto político: La guerra por el litio**

El litio, conocido como el “oro blanco”, ha emergido como un recurso estratégico en la era moderna. Su papel crucial en la fabricación de baterías para vehículos eléctricos, dispositivos electrónicos y almacenamiento de energía renovable lo convierte en un elemento codiciado a nivel global. Sin embargo, la extracción de litio no es solo una cuestión técnica o económica; está profundamente relacionada con la política, la soberanía y el desarrollo sostenible.

Los proyectos de extracción de litio, que anteriormente operaban en el trasfondo de la minería, ahora se sitúan en el epicentro de complejas relaciones internacionales, donde factores como las reservas geológicas, políticas energéticas nacionales y las tecnologías de extracción se entrelazan con la competencia geopolítica y las preocupaciones ambientales.

Esto lleva a los gobiernos de los distintos países a enfrentar decisiones cruciales con respecto a la soberanía y control del recurso, las negociaciones contractuales entre empresas privadas y gobiernos, las responsabilidades ambientales y sociales, entre otras.

A continuación, se expone el panorama actual en el que se encuentra el mundo, destacando las estrategias y medidas que están adoptando los distintos gobiernos para asegurar este codiciado commodity y maximizar sus beneficios.

### **4.6.1. Chile**

En el caso de Chile, el 2023, el presidente Gabriel Boric anunció la Estrategia Nacional del Litio, creada para aprovechar el potencial que tiene el mineral en el país, con la finalidad de aumentar la riqueza y el desarrollo nacional.

El plan consta de cinco ejes, destacando la participación del Estado en todo el ciclo productivo del metal, para lo que se creará una Empresa Nacional del Litio. Sin embargo, de momento, el Estado será representado por Codelco para explotar el Salar de Atacama, en conjunto con la Sociedad Química Minera (SQM).

De la mano del desarrollo buscado, el gobierno planea avanzar en el uso de nuevas tecnologías de extracción de litio, por lo que propone la creación de un instituto tecnológico y de investigación público para la generación e internalización de conocimientos en torno al litio y los salares, incluyendo la cadena de valor asociada al mineral. Este tendrá como objetivo central la generación de conocimiento y tecnologías que permitan, por ejemplo, mejorar los procesos de extracción, producción, agregación de valor, aplicaciones y reciclaje.

Así mismo, la Estrategia Nacional plantea la creación de una red de sistemas de salares protegidos, cumpliendo el compromiso de proteger al menos un 30% de los ecosistemas al 2030, en línea con las obligaciones internacionales establecidas en la Convención Marco de Biodiversidad; además, en aquellos salares en régimen de explotación, se exigirá la implementación de tecnologías que minimicen el impacto ambiental en la recuperación del litio, y la reducción de consumo de agua fresca (Gobierno de Chile, 2023).

#### **4.6.2. Argentina**

Argentina, que conforma el triángulo del litio en conjunto con Chile y Bolivia, presenta un marco normativo muy distinto a ambos países. En Argentina, la administración del litio se encuentra sujeta al marco normativo general, es decir, no cuenta con un marco legal propio. Así mismo, las provincias argentinas tienen el dominio de los recursos y son las únicas que pueden concesionar la explotación de los salares que se encuentran en su territorio, a diferencia de Chile y Bolivia, donde el litio tiene una gestión unitaria: el Estado (Obaya, 2023).

Con respecto a las regalías que se cobra a las empresas en Argentina, que es la principal fuente de ingresos fiscales para las provincias, es de aproximadamente un 3% del “valor boca de mina”, que corresponde al costo del mineral extraído previo a cualquier proceso de transformación, luego de restarle los costos de producción. Para comparar este valor, en Chile existe una política de regalías móviles, que aumentan en función del precio internacional del litio, y que va del 6,8% al 40%, según los compuestos del mineral. En Bolivia, al igual que en Argentina, las regalías se

establecieron en un máximo de 3%.

Así, actualmente en Argentina se discuten leyes que proponen declarar el litio como un recurso natural estratégico y de interés público nacional, con el objetivo de mejorar la gestión por parte del gobierno y obtener mayores beneficios (Giménez, 2023).

#### **4.6.3. Bolivia**

En 2008, el gobierno de Evo Morales apostó porque el estado manejara toda la cadena productiva del litio sin intervención de empresas extranjeras, nacionalizando el mineral, con la promesa de que Bolivia crearía fábricas de baterías y hasta autos eléctricos. Pero no fue así.

Bolivia, a pesar de sus vastos recursos de litio, concentrados principalmente en el Salar de Uyuni, produce sólo alrededor de 500 toneladas al año de litio, una cantidad considerada muy baja como para consolidarse en el mercado mundial.

Según Juan Carlos Zuleta, analista de la economía del litio y consultor internacional, la estrategia de Morales falló, no funcionó porque faltaban los recursos humanos calificados, la tecnología, la estrategia y la voluntad política (Zuleta, 2022).

Ahora, el presidente boliviano Luis Arce ha trazado un nuevo plan para concretar alianzas estratégicas con empresas privadas extranjeras que ofrecen la tecnología necesaria para que despegue el negocio.

Mediante la empresa estatal Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB, por sus siglas), el gobierno ha impulsado el desarrollo y puesto en marcha nuevas plantas de Extracción Directa de Litio. Las empresas con permiso para explotar los salares de Uyuni, Coipasa y Pastos grandes en Bolivia corresponden a Lilac Solutions (EE. UU.), Uranium One Group (Rusia), y 4 empresas de China (CATL Brunp & CMOC, CITIC Guoan, Fusion Eneritech y TBEA Group).

Así, Bolivia sigue el objetivo de convertirse en uno de los productores más importantes de litio a nivel mundial para el 2025.

#### **4.6.4. Estados Unidos**

Desde 2023 está en vigor la Ley de Reducción de la Inflación (IRA, por sus siglas en inglés), la cual corresponde a la mayor inversión climática del país a la fecha.

IRA se trata de grandes subsidios, exenciones tributarias, y ayudas creadas con la finalidad de que EE. UU pueda transformar su matriz energética en una más sustentable y amigable con el medioambiente. Dentro de las medidas de la ley se incluyen incentivos tanto para los consumidores como para las empresas.

Las empresas que inviertan en nuevas fuentes de energía, almacenamiento, electrificación y electromovilidad recibirán importantes beneficios, ya que, por ejemplo, el subsidio para la adquisición de vehículos eléctricos alcanzará varios miles de dólares por unidad, lo que hará que esta opción sea mucho más competitiva en el país. Además, cabe mencionar que países como Chile se verían beneficiados por dos formas. Primero, gracias a los incentivos para los consumidores, se espera que aumente la demanda de autos eléctricos, y, por ende, la necesidad de litio. Segundo, para tener acceso al subsidio, el litio de la batería y sus componentes deben ser hechos en Estados Unidos o en los países con los que tiene un tratado de libre comercio (como Chile), convirtiendo al país en socio estratégico y no sólo comercial (Barroilhet, 2023).

#### **4.6.5. Unión Europea**

Desde otra arista, con la Ley de Materias Primas Fundamentales, la UE busca garantizar un suministro seguro y sostenible de materias primas fundamentales para la industria europea. Estas materias primas incluyen el litio, cobalto, níquel, galio, titanio, wolframio y boro.

Para lograr esto, la ley se fundamenta en varios pilares clave. Uno de ellos es el desarrollo de las capacidades europeas, con el objetivo de fortalecer la cadena de valor de las materias primas, abarcando desde la minería hasta el refinado, pasando por la transformación y el reciclado. Además, se busca mejorar la resiliencia y promover una economía de las materias primas más sostenible y circular, contribuyendo a la creación de un mercado secundario robusto.

Para lograr garantizar el suministro del litio, la UE ha forjado varias asociaciones comerciales con países que tienen producción de litio o reservas identificadas. Entre ellos figuran Argentina, Chile, Canadá, Groenlandia, Noruega, la República Democrática del Congo, Ruanda y Namibia.

En el caso del acuerdo con Chile, este brinda beneficios mutuos, ya que la Unión Europea se ve favorecida al obtener materias primas críticas estratégicas para la transición ecológica, que de manera clave ayudará a que no dependan únicamente de países como China, a la vez que Chile se beneficiará de las nuevas inversiones desde Europa que impulsarán la economía (Diario UChile, 2023).

#### **4.6.6. China**

China por su parte, ha desempeñado un papel significativo en el mercado mundial el litio en los últimos años. Este país corresponde al mayor consumidor de litio en el mundo debido al auge de los sectores de la electrónica y los vehículos eléctricos. Casi dos tercios de las baterías de iones de litio del mundo se fabrican en China. Además, China también es uno de los principales productores del metal, aunque no tenga grandes reservas naturales en comparación con países como Chile, Argentina, Australia o EE. UU.

El éxito actual de China, con respecto a la producción y manejo de litio, se debe a que el país empezó a trabajar en la industria de las baterías desde muy pronto, y eso le dio una ventaja cuando el resto del mundo no estaba interesado.

China no solo se centró en los vehículos eléctricos, o en la minería, o en los productos químicos, sino que se centró en todo: producción de componentes, de baterías, productos químicos para la batería, materias primas... Empezaron a estar activos en todas estas industrias. Y de esta manera, se convirtieron en un verdadero gigante de las baterías (Bednarski, 2024).

Sin embargo, pese a su rol en la producción mundial, estos volúmenes no son suficientes

para abastecer a su colosal industria de baterías. Por lo tanto, en busca de asegurar el acceso constante al litio, el gigante asiático invierte en proyectos mineros de la región de América Latina y Australia, por lo que depende de las importaciones de sus socios para mantener su liderazgo en la fabricación de coches y baterías.

Desde una mirada nacional, China tiene presencia en Chile al ser dueños del 24% de la firma chilena SQM, la segunda empresa productora de litio más grande del mundo por capital de mercado. De la misma manera, en 2022 la minera china BYD se adjudicó una licitación para explotar 80.000 toneladas de litio en territorio chileno por siete años, por la cual ofertó 61 millones de dólares.

En conclusión, China está activamente involucrada en el mercado del litio, desde la producción hasta la cadena de suministro, por lo que su influencia seguirá siendo relevante a medida que la demanda de baterías de litio continúe creciendo.

Dado este escenario mundial, se puede concluir que los incentivos políticos se vuelven una pieza clave para las estrategias de producción del mineral, catalizando el avance de las tecnologías DLE y su integración en el modelo actual de extracción de litio, ya que representan una solución eficaz, sostenible e innovadora, transformando no sólo la industria, sino también la política global. Bienvenidos al mundo del litio, donde los minerales se entrelazan con las decisiones gubernamentales y las aspiraciones de una sociedad en busca de un desarrollo más equitativo y sostenible.

#### **4.7. Tecnologías de Extracción Directa de Litio (DLE): Un nuevo enfoque**

Si bien muchos piensan que habrá una posible escasez de litio debido a las proyecciones, hay que considerar el avance de la tecnología. Similar a lo que ocurrió con el petróleo, antes no había forma de obtener crudo, económicamente rentable, de depósitos de esquisto

bituminoso o de arenas bituminosas, sin embargo, ahora se extrae porque la tecnología mejoró. Lo mismo ocurrirá con el litio, la tecnología mejorará y se tendrá acceso a más depósitos y a procesos más eficientes (Bednarski, 2024).

Como se menciona anteriormente, el proceso de extracción de litio mediante las piscinas de evaporación solar es un proceso altamente ineficiente, pero hasta hace poco tiempo, no existía presión para cambiar. Sin embargo, hoy, con la revolución de los vehículos eléctricos y sus crecientes objetivos de producción, existe un creciente interés en innovar.

Con las tecnologías de Extracción Directa de Litio (DLE, por sus siglas en inglés), la salmuera se extrae del acuífero de la cuenca y se bombea a una unidad de procesamiento donde se utiliza una resina o material de adsorción para extraer únicamente litio, mientras que la salmuera restante se reinyecta en los acuíferos.

Los beneficios que presentan estas tecnologías, en comparación con el método tradicional, abarcan aspectos económicos, ambientales y de eficiencia. Para poder contrastar ambos métodos, se presenta la **Tabla 2**.

**Tabla 2:** Método tradicional vs. Tecnologías DLE

	Método tradicional de evaporación	Tecnologías DLE
Tiempo de producción	Meses - años	Horas - días
Tasas de recuperación	~40-60%	~70-90%
Costos	Bajo	Bajo - medio
CAPEX	~23-34,000 USD/tpa LCE	~26-34,000 USD/tpa LCE
OPEX	~3,300-4,900 USD/t LCE	~2,800 - 3,600/t LCE
Área requerida	Alto	Bajo
Dependencia del clima	Si	No
Consumo de agua	Medio - alto	Bajo - medio (reinyección)
Consumo de energía	Bajo	Medio

*Fuente: Elaboración propia, en base a información de Goldman Sachs Global Investment Research, 2023.*

A continuación, se describen los tres principales métodos de DLE que se están probando y aplicando en el mundo.

#### **4.7.1. Adsorción**

En este proceso, las moléculas de cloruro de litio de la salmuera se adsorben en las capas de la resina, es decir, se adhieren superficialmente. Luego de que el sorbente se carga, las moléculas se separan con un agente precipitante, generalmente agua tibia-caliente.

Uno de los pros que tiene este método es que, dado que se utiliza agua para recuperar el cloruro de litio, no requiere reactivos, a diferencia de los métodos de intercambio iónico y extracción por solvente.

Por otro lado, existen resinas que pueden ser usadas para salmueras con distintas concentraciones de litio, por lo que el impacto de la composición de la salmuera disminuye, haciéndola una opción altamente adaptable.

Potencialmente, la eficiencia de esta tecnología de extracción directa es superior al 90%, y generalmente hay una producción de cloruro de litio de alta calidad.

Sin embargo, una desventaja del método es que, según las condiciones, podría requerir pasos adicionales para procesar el litio hasta que llegue a ser el producto esperado. Además, el equipamiento para la adsorción suele ser costoso, por lo que la inversión puede llegar a ser considerable.

Cabe destacar que esta tecnología es la más desarrollada mundialmente, con la mayoría de los proyectos DLE utilizándola, aunque sea parcialmente. Por ejemplo, en el proyecto Fénix (Salar del Hombre Muerto) en Argentina, la salmuera es tratada en una planta de adsorción selectiva automatizada que extrae el litio y retorna el resto de la salmuera al salar, y posteriormente, se utiliza el método tradicional de concentrar en pozas de evaporación el cloruro de litio (Goldman Sachs, 2023).

#### **4.7.2. Intercambio Iónico (IX)**

El intercambio iónico consiste en un proceso bastante similar al descrito anteriormente, con la diferencia de que, en este sistema, las moléculas de cloruro de litio son capturadas por las resinas

mediante enlaces químicos, más potentes que en el caso de la adsorción.

Esencialmente, los iones de litio de la salmuera se absorben en material iónico sólido, el cual sólo permite el paso de iones de litio e hidrógeno. Luego, para la recuperación, el material iónico, que actúa como un tamiz, es lavado con una solución ácida para promover el reemplazo de los iones de litio con iones de hidrógeno, intercambiándolos.

Los investigadores creen que este método puede tener una recuperación de un 90% aproximadamente (Goldman Sachs, 2023).

Este proceso es simple, ajustable a salmueras con diversas concentraciones de litio, y minimiza el riesgo de contaminación por impurezas en el producto. Sin embargo, implica grandes gastos operativos debido a las cantidades de insumos de bases y ácidos necesarios para la operación. Además, se debe considerar que algunos materiales de intercambio iónico tienen la probabilidad no nula de degradación en condiciones ácidas.

Actualmente, los proyectos que aplican esta tecnología se encuentran, mayoritariamente, en estado piloto en los países de Estados Unidos, Canadá y Argentina, de la mano de empresas como Lilac Solutions (EE. UU.) y Conductive Energy (Canadá) (Goldman Sachs, 2023).

#### **4.7.3. Extracción por Solvente (SX)**

Este método de separación utiliza una solución orgánica para extraer el litio desde la salmuera, química o físicamente, y lo transforma en cloruro de litio. Esta solución, generalmente, utiliza como solvente kerosene y un extractante que presenta alta selectividad hacia el litio sobre el sodio y el magnesio.

Dentro de las ventajas de la extracción por solvente están la eficiencia del método y los bajos costos de operación, además, a diferencia de los dos métodos presentados anteriormente, no requiere un paso extra para lograr concentrar la solución.

No obstante, es potencialmente menos aplicable a salmueras con altas concentraciones de impurezas como calcio y magnesio. Además, el considerable impacto ambiental de los solventes

utilizados representa una desventaja significativa del método.

Cabe mencionar que la reinyección de salmuera es un tema que requiere un estudio detenido. Aunque esta práctica promete tener un efecto positivo en los procesos de Extracción Directa de Litio, es crucial considerar que el uso de agentes químicos en dichos procesos podría implicar la reinyección de estos en el acuífero, dañando el ecosistema.

Reconociendo la importancia del litio en la actualidad como un motor clave en la transformación hacia una industria más limpia y renovable, y con el respaldo de incentivos políticos que impulsan este cambio, se hace evidente que hay poderosas razones para invertir en la producción de este valioso recurso. ¿Pero, de dónde surge todo este impulso? De los consumidores. Los compradores de vehículos eléctricos buscan asegurarse de que sus inversiones contribuyan genuinamente a la protección del medio ambiente. Esta demanda, inspirada por una visión de un futuro más sostenible, está motivando a la industria a innovar y actuar, haciendo realidad el sueño de un mundo más verde y limpio.

Ahora, desde la perspectiva de una empresa que opta por implementar tecnologías DLE para la extracción de salmuera, es esencial que esta se adapte a la composición de la salmuera, las condiciones operativas, las metas de producción y el entorno político del proyecto, entre otras variables. Por ello, se propone a continuación una metodología diseñada para facilitar la toma de decisiones, abordando los ejes considerados relevantes. Este modelo no solo busca optimizar la elección tecnológica, sino también impulsar a las empresas hacia un futuro más eficiente y sostenible, demostrando que, con la visión y herramientas adecuadas, podemos liderar la transición hacia una industria más verde y responsable.

## 5. Metodología

En el contexto de la búsqueda de la transformación energética mundial, y la llegada de las tecnologías de Extracción Directa de Litio (DLE) como una alternativa más eficiente y sostenible en el mundo de la minería del litio, las empresas que deciden sumarse a este cambio se enfrentan al desafío de elegir una de las opciones de tecnología DLE disponibles dentro de un amplio abanico de posibilidades que están en desarrollo actualmente. Considerando la composición de la salmuera y los objetivos operacionales, la meta es encontrar la alternativa tecnológica que mejor se adapte a las necesidades de cada empresa y proyecto.

Como práctica estándar en la industria, antes de implementar una nueva tecnología, se realizan pruebas de laboratorio y piloto para evaluar su viabilidad. Estas pruebas demandan mucho tiempo y recursos, lo que hace inviable probar todas las tecnologías DLE disponibles, especialmente cuando existen múltiples proveedores con diferentes propuestas dentro de las tres ramas principales de tecnologías DLE.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo que permita determinar preliminarmente las tecnologías DLE que mejor se adapten a un proyecto específico, reduciendo así los tiempos y costos de evaluación. Para lograr el objetivo, el modelo se basa en la comparación de aspectos claves a considerar en un proyecto de Extracción Directa de Litio, estudiando el comportamiento de cada alternativa tecnológica.

El modelo propuesto se estructura en un marco sistemático que utiliza un método estadístico para relacionar y comparar todas las variables pertinentes. La idea principal es definir variables relevantes, estudiar el comportamiento de cada tecnología en relación con estas, y utilizar métodos de análisis matemático para relacionar los resultados y determinar cuáles tecnologías ofrecen un mejor desempeño según las necesidades de la empresa y el proyecto.

El valor de este modelo radica en la rapidez con la que permite evaluar distintas tecnologías

DLE y en su capacidad de adaptación y flexibilidad ante la información disponible y los criterios aplicados. Esto lo convierte en una herramienta poderosa y sencilla para la selección preliminar de tecnologías DLE.

A continuación, se presenta detalladamente la metodología propuesta.

## **5.1. Descripción del modelo**

El modelo consiste en la aplicación de un método similar al multicriterio, sobre variables cualitativas y cuantitativas, estandarizadas y ponderadas según su importancia relativa para el proyecto. La idea principal es lograr comparar el comportamiento de cada alternativa en función de criterios clave, con la finalidad de determinar las tecnologías que mejor se adaptan.

El paso a paso de la metodología es el siguiente.

### **5.1.1. Selección de variables y recolección de datos**

Para que el modelo sea aplicable y exitoso, debe contemplar una evaluación efectiva y precisa de las distintas tecnologías de extracción directa. Por consiguiente, las variables a incluir en el modelo juegan un rol clave, ya que establecen los criterios de evaluación.

La selección de estas variables debe basarse en fuentes confiables como análisis de mercado de la industria y el criterio de expertos, asegurando una perspectiva fiable y relevante sobre los aspectos a comparar. Las variables seleccionadas deben reflejar tanto aspectos técnicos como económicos, políticos y ambientales. Una vez definidas las variables relevantes, se procede a la recolección de datos necesarios.

Uno de los factores imprescindibles en cualquier evaluación de proyecto, y que por consiguiente no puede faltar en el análisis y comparación de las tecnologías DLE, es la evaluación económica. Para esto, se propone un submodelo que permita, en función del CAPEX y OPEX, el cálculo de indicadores económicos como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Payback. Estos indicadores resultantes se deben integrar como variables en el modelo de evaluación de tecnologías.

### **5.1.2. Análisis preliminar de factores de exclusión**

Antes de aplicar el modelo, se realizará un análisis preliminar para identificar factores de exclusión ("*knockout factors*") que podrían descartar una tecnología debido a sus implicancias. Estos factores podrían incluir incompatibilidades con el marco normativo del país, conflictos significativos con las comunidades locales, impactos adversos importantes en la biodiversidad o complejidades políticas excesivas.

### **5.1.3. Estandarización de variables**

Debido a que las variables pueden tener distintas magnitudes y naturalezas, se vuelve crucial estandarizarlas para poder compararlas de forma correcta. En función de esto, se propone utilizar una escala de calificación que permita convertir las variables a una nota representativa del efecto de cada variable en el proyecto, indicando si es conveniente para el desarrollo, o dificulta el proceso/operación.

### **5.1.4. Asignación de pesos a las variables**

Siguiendo la misma línea, debido a que no todas las variables representan repercusiones de igual magnitud para el proyecto, es necesario poder representar matemáticamente la significancia relativa de cada una para el análisis. Esto se puede lograr definiendo “pesos” para cada variable, los cuales se deben definir según el criterio de expertos, y reflejarán la importancia de cada variable en función de la estrategia, contexto interno y objetivo operacional.

### **5.1.5. Cálculo de la calificación de las tecnologías**

Después de definir las variables, recolectar datos, realizar la evaluación económica, descartar *knockout factors*, estandarizar las variables, y ponderarlas, el modelo busca relacionar las variables de cada tecnología mediante un método matemático que permita calcular una calificación global para cada tecnología DLE.

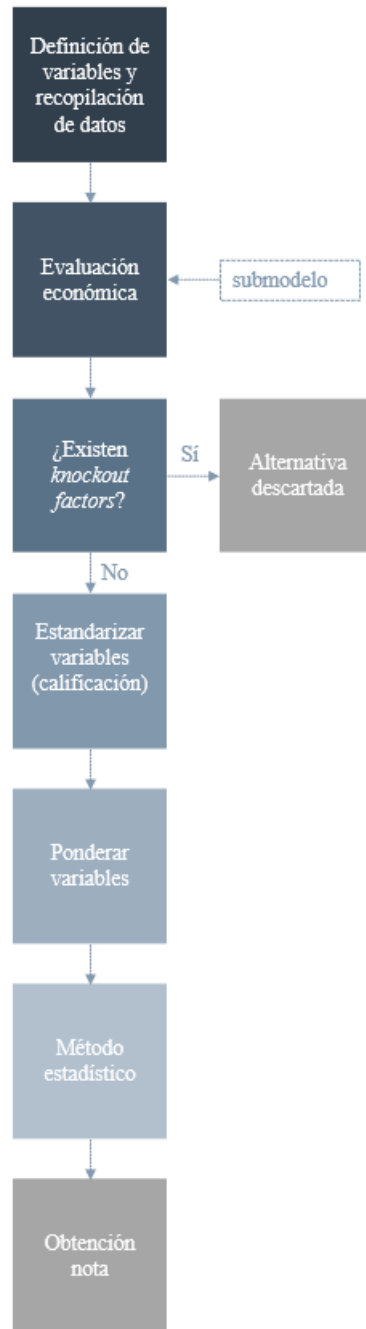
En base a las calificaciones obtenidas para cada alternativa tecnológica, se obtendrá un ranking de las opciones, entendiéndose que las alternativas con las mejores calificaciones son las



que mejor se adaptan al proyecto. Este ranking ayudará a simplificar la toma de decisiones respecto a qué tecnologías probar en mayor detalle.

Para verificar que el modelo propuesto sea aplicable en la industria, en el siguiente capítulo se testea mediante la aplicación de un caso de estudio real, donde se compara el resultado obtenido utilizando el modelo con la realidad.

La **Figura 4** ilustra el procedimiento a seguir para evaluar cada tecnología DLE, detallando los pasos mencionados anteriormente.



**Figura 4:** Modelo propuesto para la evaluación de las distintas tecnologías DLE.

*Nota: Este modelo se debe aplicar a cada tecnología a evaluar, con el objetivo de comparar las calificaciones finales.*

## 6. Análisis y Resultados

En este capítulo se presenta el análisis y los resultados obtenidos de la aplicación del modelo descrito en el capítulo anterior. También, se incluye un caso de estudio real para validar la propuesta, así como una discusión sobre las limitaciones del estudio y las implicancias prácticas de los resultados. Para recordar, el modelo tiene como objetivo simplificar la selección de tecnologías a probar para proyectos de Extracción Directa de Litio (DLE), basándose en criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales.

El análisis de datos en el trabajo sigue un enfoque sistemático que incluye la estandarización de variables, la asignación de pesos relativos a cada indicador, y la aplicación de un método matemático para calcular una calificación global que representa cómo se adapta cada tecnología al proyecto. Este proceso permite comparar de manera efectiva las distintas alternativas tecnológicas y determinar cuáles se ajustan mejor a los requisitos del proyecto y de la empresa a cargo.

A continuación, se detallarán los criterios de selección de las variables, el proceso de construcción del modelo, y se expondrán los resultados del análisis y su interpretación.

### 6.1. Metodología del Análisis

En función de la estructura del modelo propuesto en el capítulo anterior (ver **Figura 4**), a continuación, se detallan métodos de recopilación de información e implementación del modelo:

#### 6.1.1. Definición de variables y recopilación de datos

Para aplicar el modelo, el primer paso es definir las variables a incluir. Estas variables deben ser indicadores relevantes en la industria, identificados a través del criterio de expertos o un exhaustivo análisis de mercado. La adaptabilidad del modelo permite agregar o eliminar variables según la disponibilidad de información y el contexto específico del proyecto.

A lo largo del desarrollo de este trabajo, se han recopilado y procesado datos técnicos, económicos y ambientales que influyen en la selección de tecnologías DLE. A continuación, se

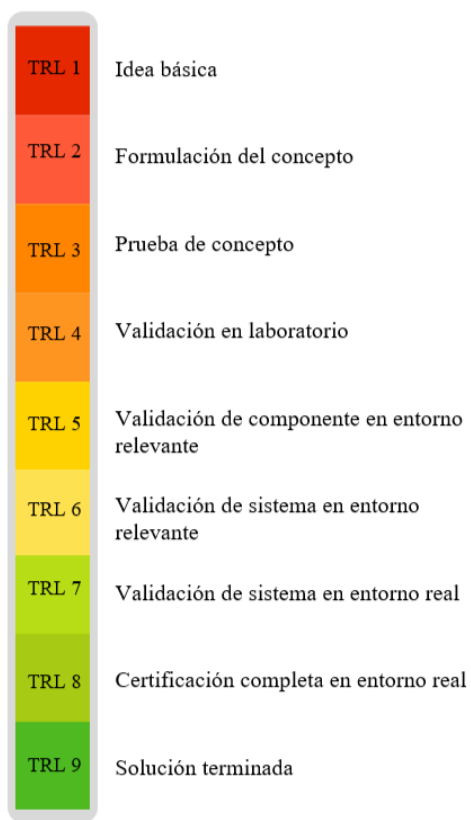
sugieren variables cualitativas imprescindibles a incorporar para una evaluación integral de las diferentes alternativas tecnológicas DLE, con una breve descripción y posibles fuentes de información.

Posteriormente, en la siguiente subsección, se propone un submodelo para la evaluación económica de las distintas alternativas tecnológicas, cuyos indicadores resultantes corresponderán a las variables cuantitativas a incluir en el modelo. Así, se ofrece al usuario una guía completa para la aplicación del modelo.

#### **6.1.1.1. Variables Cualitativas**

##### **6.1.1.1.1. Factibilidad técnica**

Con la finalidad de evaluar la dificultad de implementación y el desempeño técnico de las distintas alternativas tecnológicas, se propone analizar la factibilidad técnica de las tecnologías mediante una serie de indicadores clave. Estos indicadores incluyen el porcentaje de recuperación de litio en el proceso, la cantidad de proveedores disponibles, la pureza del producto final (considerando posibles impurezas), pasos extra de concentración requeridos para el proceso (*pre* o *post-treatment*), riesgos asociados a la operación, efectos de los reactivos utilizados en los equipos y su vida útil, y el *Technology Readiness Levels* (TRL, por sus siglas). Este último indicador, que surge en la NASA, estima la madurez de las tecnologías en una escala de 9 niveles, que va desde una tecnología en principios básicos (TRL 1) a una lista para salir al mercado (TRL 9) (ver **Figura 5**).



**Figura 5:** Technology Readiness Level. Elaboración propia en base a Universidad Técnica Federico Santa María, Consultado en 2024.

Para complementar estas sugerencias, se ha desarrollado la **Tabla 3**, que presenta una comparación de las tres ramas principales de DLE, adsorción, extracción por solvente e intercambio iónico, según los indicadores mencionados anteriormente.

**Tabla 3:** Evaluación comparativa factibilidad técnica de tecnologías DLE

		Adsorción	Extracción por solvente	Intercambio iónico
Factibilidad Técnica	TRL	9	7	8
	% Recuperación	>90%	~90%	~90%
	Proveedores disponibles	13	4	8
	<i>Stage commercial</i> (*)	2	1	2
	Pureza del producto	Excelente selectividad, aún en salmuera de baja concentración de Li	Potencialmente menos aplicable en salmueras con mayores impurezas	Alta selectividad y reducido riesgo de contaminación con impurezas en el producto
	<i>Pre o post-treatment</i> requerido	Puede necesitar <i>post-treatment</i> para purificar el producto y reciclar agua	Puede necesitar un <i>pre-treatment</i> si tiene un ratio muy alto de impurezas. La salmuera residual puede necesitar <i>post-treatment</i> para remover los restos de solvente. No necesita purificar el producto	Puede necesitar <i>post-treatment</i> para purificar el producto
	Riesgos en la operación	No	Riesgo elevado de incendios. Solventes potencialmente difíciles de llevar al sitio	Riesgo en el suministro del ácido al sitio
Efectos de reactivos en equipos	No	Posible corrosión por los aditivos y solventes utilizados	Algunos materiales de intercambio iónico tienen la probabilidad de degradación en condiciones ácidas	

(\*) Se refiere a los proveedores cuyas tecnologías están en etapa comercial, es decir, implementadas en un proyecto.

Fuente: Elaboración propia en base a Farahbakhsh, 2024; Mojid et al., 2024; Boroumand y Razmjou, 2024; entre otros.

La **Tabla 4** presenta en detalle los proveedores disponibles para cada tecnología referenciados en la **Tabla 3**, incluyendo el país de origen de la empresa y la etapa de desarrollo en la que se encuentra la tecnología ofrecida. El país del proveedor es información relevante para el modelo ya que permite considerar posibles riesgos geopolíticos que podrían asociarse a relaciones contractuales.

**Tabla 4:** Proveedores de tecnologías DLE

Proveedor de DLE	País	Tecnología	Etapa
SunResin	China	Adsorción	Comercial
Livent (*)	EE.UU.	Adsorción	Comercial
Summit Nanotech	Canadá	Adsorción	Demo
International Battery Metals (IBAT)	EE.UU.	Adsorción	Demo
Koch Technology Solutions	EE.UU.	Adsorción	Demo
Eramet /Tsingshan (*)	Argentina	Adsorción	Demo
Xi'an Lanshen New Material Technology	China	Adsorción	Demo
Energy Source Minerals	EE.UU.	Adsorción	Piloto
Rio Tinto	Argentina	Adsorción	Piloto
Exsorbition	EE.UU.	Adsorción	Piloto
Berkshire Hathaway (*)	EE.UU.	Adsorción	Piloto
Vulcan Energy (*)	Alemania	Adsorción	Piloto
Eon Minerals (*)	Argentina	Adsorción	Piloto
Xinghua Lithium	China	Extracción por solvente	Comercial
Solvay	Bélgica	Extracción por solvente	Demo
Adionics	Francia	Extracción por solvente	Demo
Tenova	Italia	Extracción por solvente	Demo
Lilac Solutions	EE.UU.	Intercambio iónico	Comercial
E3 Lithium	Canadá	Intercambio iónico	Demo
Geolith	Francia	Intercambio iónico	Demo
Chemionex Inc	Canadá	Intercambio iónico	Demo
Standard Lithium	EE.UU.	Intercambio iónico	Demo
Conductive Energy	Canadá	Intercambio iónico	Piloto
XtraLit	Israel	Intercambio iónico	Piloto
Arizona Lithium	Australia	Intercambio iónico	Comercial

(\*) *Empresas operarias del proyecto y propietarias de tecnología DLE.*

*Fuente: Elaboración propia en base a Goldman Sachs, 2023; Farahbakhsh, 2024; entre otros.*

En la **Tabla 4**, etapa comercial se refiere a que existen proyectos operando actualmente bajo estas tecnologías, la etapa demo significa que el sistema está completo y certificado a través de pruebas y demostraciones, y la etapa piloto significa que se están realizando pruebas para demostrar el prototipo en un entorno real. Como se menciona anteriormente, antes de implementar una nueva tecnología, éstas se prueban en plantas piloto para analizar su desempeño con la salmuera del yacimiento.

Es importante señalar que la lista de proveedores presentada no es exhaustiva. Existen numerosos proveedores que ofrecen distintas variaciones de las tres ramas principales mencionadas, así como otras tecnologías emergentes tales como membranas, reconocimiento molecular, entre otras. Además, considerando el contexto actual de la industria del litio, el número

de empresas que investigan métodos innovadores para la extracción directa está creciendo exponencialmente. Adicionalmente, se excluyeron de la lista a las empresas cuyos proyectos se encuentran en etapa de pruebas de laboratorio, ya que aún no son lo suficientemente maduras para considerarse opciones viables.

#### **6.1.1.1.2. Impacto ambiental**

Considerando la creciente conciencia ambiental actual, que influye tanto en la reputación corporativa como en las normativas legales que rigen los proyectos, es fundamental integrar en la evaluación de un proyecto el análisis del impacto ambiental que conlleva la implementación de una tecnología. Este enfoque adquiere aún mayor relevancia cuando el proyecto está vinculado a un tema tan debatido en la actualidad como lo es la explotación del litio, que conlleva conflictos con las comunidades y disputas políticas.

Para medir el impacto ambiental, uno de los factores que se sugiere encarecidamente considerar son los efectos de la reinyección en los salares, debido a la relevancia que ha cobrado dentro de las conversaciones relacionadas a la extracción del litio. Si bien reinyectar la salmuera al salar al final del proceso es una posibilidad innovadora que ofrecen las tecnologías DLE, es importante considerar que, debido a que el proceso de extracción, en algunos casos, utiliza reactivos químicos, la salmuera reinyectada podría contener trazas de estos compuestos, por lo que es necesario evaluar si las trazas resultantes son nocivas para la flora y fauna, y comprender cómo afecta a la diversidad biológica de los salares, abarcando microorganismos, vegetación y fauna. Ahora, si bien esto puede comprender un exhaustivo estudio, la presencia de reactivos y otros químicos disruptivos en el proceso operacional puede ser un primer indicador de posible contaminación en la salmuera a reinyectar.

Otros aspectos significativos que considerar en el estudio son el consumo de agua, la eficiencia de su uso durante el proceso, la generación y gestión de residuos durante la operación, y el consumo de energía.

Para guiar este análisis, se presenta la **Tabla 5** con las características de las tecnologías estudiadas según los factores descritos.

**Tabla 5:** Evaluación comparativa impacto ambiental de tecnologías DLE

		Adsorción	Extracción por solvente	Intercambio iónico
<b>Impacto Ambiental</b>	Consumo de energía	Mínimo	Medio	Bajo
	Consumo de agua	Alto	Bajo	Bajo
	Contaminación en salmuera de rechazo (para reinyección)	Probable, pero al no tener reactivos es menos dañino	Probable, potencialmente dañino por los reactivos	Probable, potencialmente dañino por los reactivos
	Generación de residuos	Bajo	Alto	Alto

*Fuente: Elaboración propia en base a Goldman Sachs, 2023; Boroumand, 2024; Razmjou, 2024; entre otros.*

Cabe mencionar que, con respecto a la contaminación en salmuera de rechazo (la salmuera que se reinyectaría en el salar), se clasifica en todas las tecnologías como “probable”, sin embargo, el análisis se enfoca en las posibles fuentes de contaminación y su gravedad, es decir, los reactivos utilizados, ya que estos pueden tener un impacto muy agresivo en caso de ser reinyectados.

En este breve análisis no se incluye la legislación ambiental ya que es propia de cada país y suele estar principalmente ligada a limitaciones para la extracción de salmuera, no obstante, corresponde a una variable importante ya que podría constituir un *knockout factor* y hacer de una tecnología una opción inviable.

### 6.1.1.1.3. Comunidades aledañas

Un enfoque que ha cobrado gran relevancia en el último tiempo es la consideración de la opinión de las comunidades aledañas, ya que estas son afectadas directamente por la implementación de un proyecto. En las operaciones mineras, la contaminación que se genera puede llegar a afectar gravemente la salud de la población, generando así conflictos sociales tanto con la empresa operadora como con el gobierno. Por esta razón, es fundamental comprender las opiniones y preocupaciones de las comunidades al diseñar una estrategia, recordando que escucharlas es parte de la responsabilidad social corporativa.

Para medir el impacto del proyecto en las comunidades cercanas, se sugiere analizar el consumo de agua, dado que la sostenibilidad de este recurso es crucial. Es imperativo garantizar que el proyecto no agote los recursos hídricos de la zona y que no afecte la disponibilidad de agua para las comunidades locales.

Otro factor importante que considerar es la huella física de cada tecnología, es decir, el impacto de las instalaciones necesarias para la operación. Es esencial evaluar la generación de contaminación en aire, agua, suelo y ruido, ya que estos factores afectan directamente la calidad de vida de las comunidades cercanas. Además, la huella física está ligada a la posible interrupción de importantes paisajes turísticos, como los salares.

En la **Tabla 6** se presentan las características de las tres ramas de DLE estudiadas según los indicadores propuestos.

**Tabla 6:** Evaluación comparativa impacto en las comunidades aledañas de tecnologías DLE

		Adsorción	Extracción por solvente	Intercambio iónico
Comunidades Aledañas	Consumo de agua	Alto	Bajo	Bajo
	Huella física	Media, debido a que puede necesitar un <i>post-treatment</i> para purificar (pozas)	Baja	Media, debido a que puede necesitar un <i>post-treatment</i> para purificar (pozas)

*Fuente: Elaboración propia en base a Goldman Sachs, 2023; Boroumand, 2024; entre otros.*

Con respecto al *post-treatment* mencionado en la **Tabla 6**, este es necesario cuando la operación logra concentrar la salmuera, pero no alcanza el objetivo operacional debido a la presencia de trazas u otros minerales no deseados, por lo que se debe aplicar una etapa extra para purificar el producto. Para esta etapa, se suelen utilizar pozas de evaporación solar, es decir, las kilométricas piscinas empleadas en el método convencional de extracción de litio. Si bien, su uso para *post-treatment*, al ser en menor medida no tiene el mismo impacto en la huella física que el utilizar derechamente el método convencional, podría no ser despreciable.

Estas variables cualitativas proporcionan una visión integral de las características principales de las distintas tecnologías, facilitando una eficiente evaluación comparativa entre ellas. Sin embargo, es importante recordar que las tecnologías DLE aún no corresponden a un mercado maduro, por lo que, sumado al gran interés actual en el rubro, se están actualizando rápidamente, así, es crucial estar al día con la información al momento de aplicar el modelo propuesto o las variables sugeridas, ya que están sujetas a cambios.

Como se menciona anteriormente, a continuación, se presenta el submodelo propuesto para la evaluación económica de cada alternativa tecnológica.

### **6.1.2. Submodelo evaluación económica**

La evaluación económica es una parte fundamental del análisis previo a cualquier proyecto. Para ello, se ha desarrollado un submodelo que permite calcular el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), la inversión inicial requerida y el Payback de cada alternativa tecnológica, tomando en cuenta los costos de capital (CAPEX) y los costos operativos (OPEX). Este submodelo proporciona indicadores de rentabilidad económica para cada tecnología, que constituyen factores relevantes para el modelo general.

A continuación, se detalla el submodelo para la evaluación económica.

#### **6.1.2.1. Estimación CAPEX y OPEX**

Considerando la etapa preliminar del proyecto en la que se sitúa el modelo, se debe realizar una estimación del CAPEX (gastos de capital) y OPEX (gastos operacionales) para evaluar la viabilidad económica de cada alternativa DLE. Para esto, se propone utilizar datos de referencia de proyectos similares en la industria (benchmarking). Los datos utilizados deben provenir de fuentes industriales confiables para garantizar un punto de referencia fiable.

Como guía, la **Tabla 7** presenta la base de datos recopilados sobre proyectos DLE. Cabe mencionar que, debido a la naturaleza confidencial de esta información, los nombres de las compañías operadoras y los proyectos han sido ocultos.

**Tabla 7:** Benchmark CAPEX y OPEX

Proyecto	Compañía	Tecnología	País	OPEX (US\$/t LCE)	CAPEX (US\$ M)	Intensidad de capital (*) (US\$/t LCE)	Volumen de producción (tpa LCE)
A	Confidencial	Adsorción	Argentina	3.815	736	30.656	24.000
B	Confidencial	Adsorción	Argentina	3.706	1.553	31.065	50.000
C	Confidencial	Adsorción	USA	4.234	1.008	30.841	32.680
D	Confidencial	Adsorción con aluminio	-	5.500	1.600	80.000	20.000
E	Confidencial	Adsorción con aluminio	-	3.830	661	33.050	20.000
F	Confidencial	Adsorción con aluminio	-	3.925	889	44.450	20.000
G	Confidencial	Adsorción con aluminio	-	3.209	583	29.150	20.000
H	Confidencial	Adsorción con aluminio	-	10.000	182	9.100	20.000
I	Confidencial	Extracción por solvente	-	3.900	535	26.750	20.000
J	Confidencial	Intercambio iónico	Argentina	4.554	2.726	54.516	50.000
K	Confidencial	Intercambio iónico	USA	3.275	870	32.053	27.139
L	Confidencial	Intercambio iónico	USA	9.450	243	43.587	5.575
M	Confidencial	Intercambio iónico	Canadá	3.985	602	34.011	17.700
N	Confidencial	Intercambio iónico	Chile	5.267	1.049	41.971	25.000
O	Confidencial	Intercambio iónico	Chile	4.344	813	32.508	25.000
P	Confidencial	Intercambio iónico	-	5.915	782	39.100	20.000
Q	Confidencial	Intercambio iónico	-	6.785	548	27.400	20.000
R	Confidencial	Reconocimiento Molecular	-	4.063	530	26.500	20.000
<b>Promedio</b>				<b>4.986</b>	<b>884</b>	<b>35.928</b>	<b>24.283</b>

(\*) La intensidad de capital se calcula como el CAPEX dividido por el volumen de producción, así, se obtiene el capital necesario por cada tonelada de LCE.

*Fuente: Comunicación personal, Junio 2024.*

A partir de este benchmark, se calcula el promedio de CAPEX y OPEX por tecnología, proporcionando una estimación confiable para cada alternativa. Los valores en la **Tabla 7** corresponden al año 2023, por lo que, para actualizarlos, se aplica una inflación de 3,4% (US Bureau of Labor Statistics, 2023). Los valores actualizados se presentan en la **Tabla 8**.

**Tabla 8:** CAPEX, OPEX e intensidad de capital estimada, por tecnología DLE

Tecnología	Opex (US\$/t LCE)	Capex (US\$ M)	Intensidad de capital (US\$/t LCE)
Adsorción	4.940	932	37.264
Extracción por solvente	4.033	553	27.660
Intercambio iónico	5.632	987	39.440

Para la evaluación económica, se sugiere trabajar con la intensidad de capital y OPEX, ya que estos representan los costos asociados por tonelada a producir de las diferentes tecnologías DLE. Es importante señalar que estos valores y el método de estimación se entregan como sugerencia y pueden ajustarse según las necesidades específicas del proyecto.

Al utilizar este enfoque de benchmarking se busca proporcionar una estimación sólida y

basada en datos reales de la industria, lo que aumenta la precisión y fiabilidad de la evaluación económica.

Por otro lado, es recomendable realizar un análisis de sensibilidad para entender cómo variaciones en el CAPEX y OPEX podrían afectar la rentabilidad del proyecto. Esta práctica ayuda a anticipar posibles desafíos financieros y a desarrollar estrategias de mitigación adecuadas.

### 6.1.2.2. Proyecciones de Ingresos

Para estimar los ingresos asociados a cada tecnología, es necesario evaluar los precios proyectados del producto final. Según la información recolectada a lo largo de este trabajo, la **Tabla 9** presenta las proyecciones de dos entidades financieras importantes: S&P Capital IQ y Goldman Sachs. Además, se incluye el promedio de ambas proyecciones, el cual se utilizará para la evaluación económica.

**Tabla 9:** Proyecciones de precios para carbonato de litio

Año	Precio S&P Capital IQ (US\$/t)	Precio Goldman Sachs (US\$/t)	Promedio Precio (US\$/t)
2023	\$ 40.579	\$ 32.694	\$ 36.637
2024	\$ 14.419	\$ 11.106	\$ 12.762
2025	\$ 15.272	\$ 11.000	\$ 13.136
2026	\$ 15.699	\$ 13.323	\$ 14.511
2027	\$ 16.022	\$ 15.646	\$ 15.834
2028	\$ 19.470	\$ 15.500	\$ 17.485

*Fuente: elaboración propia en base a Goldman Sachs, 2024, y S&P Capital IQ, 2024.*

Las proyecciones de precios proporcionadas por S&P Capital IQ y Goldman Sachs ofrecen una visión informada y respaldada por análisis financieros detallados, lo que permite una evaluación más precisa y confiable de los posibles ingresos del proyecto. Utilizar el promedio de estas proyecciones reduce la influencia de posibles sesgos individuales y proporciona una estimación balanceada.

Es crucial tener en cuenta que los precios del litio están sujetos a fluctuaciones basadas en diversos factores, incluyendo la oferta y demanda global, las políticas gubernamentales, y el avance

tecnológico en el sector. Por lo tanto, es recomendable realizar un análisis de sensibilidad para entender cómo las variaciones en los precios del carbonato de litio podrían afectar los ingresos y, en última instancia, la viabilidad económica del proyecto.

Por último, aunque este análisis se centra en el carbonato de litio, sería valioso considerar el mercado del hidróxido de litio, ya que su demanda está en aumento, especialmente en la fabricación de baterías de alto rendimiento. Evaluar la posibilidad de producir hidróxido de litio como alternativa o complemento podría ofrecer ventajas económicas y estratégicas adicionales.

### **6.1.2.3. Impuestos**

Al momento de iniciar un proyecto, especialmente en el sector minero, los impuestos y royalties son una parte importante que considerar, ya que, dependiendo del país, pueden significar un porcentaje importante de los costos. Además, con el auge del litio, los países están comenzando a implementar distintas medidas económicas que pueden tanto beneficiar como complicar el aspecto financiero.

En el caso de Chile, los impuestos y pagos fiscales a considerar en un proyecto de litio incluyen el pago por proceso de licitación, el impuesto a la renta, el impuesto por comunidades y gobiernos, la patente minera, y el impuesto específico a la minería.

Dada la confidencialidad de algunos de estos impuestos, que dependen del contrato que la empresa establezca al adquirir los derechos de explotación, la evaluación económica se centrará en el impuesto a la renta, que corresponde al 27% de las ganancias, y el impuesto de comunidades y gobiernos, que es del 3,5%.

Es importante mencionar que en Chile existen regalías con una tasa de comisión escalonada, progresiva y marginal que varía según el precio del carbonato e hidróxido de litio, fluctuando entre el 6,8% y el 40%. Sin embargo, estas regalías se aplican únicamente a las empresas que operan en el Salar de Atacama debido a la alta ley de litio del yacimiento. Actualmente, las compañías que pagan estas regalías son Albemarle y Sociedad Química Minera de Chile (SQM). La **Tabla 10**

detalla la tasa de comisión según el precio del carbonato e hidróxido de litio.

**Tabla 10:** Regalías según el precio de litio para empresas que operan en Salar de Atacama

Precio de venta Carbonato de Litio (USD/t)	Precio de venta Hidróxido de Litio (USD/t)	Tasa de comisión escalonada, progresiva y marginal
0 a 4000	0 a 5000	6,8%
Sobre 4000 a 5000	Sobre 5000 a 6000	8%
Sobre 5000 a 6000	Sobre 6000 a 7000	10%
Sobre 6000 a 7000	Sobre 7000 a 10000	17%
Sobre 7000 a 10000	Sobre 10000 a 12000	25%
Sobre 10000	Sobre 12000	40%

*Fuente: Elaboración propia en base a García, 2021.*

Es recomendable estar al tanto de posibles cambios en las políticas fiscales y económicas del país, ya que pueden afectar significativamente los márgenes de beneficio y la sostenibilidad a largo plazo del proyecto.

Finalmente, es importante considerar los beneficios fiscales que algunos países pueden ofrecer para incentivar la inversión en minería sostenible. Estos beneficios pueden incluir deducciones fiscales, exenciones de impuestos específicos y subsidios para proyectos que cumplan con ciertos criterios ambientales y sociales. Evaluar y aprovechar estas oportunidades puede mejorar considerablemente la economía del proyecto.

Con la información recopilada se procede a elaborar un flujo de caja que permita calcular los indicadores propuestos, es decir, VAN, TIR, inversión inicial y Payback.

#### **6.1.2.4. Flujo de caja e indicadores**

Para ejemplificar la metodología propuesta y servir de guía para el lector, a continuación, se presenta un flujo de caja en base a los puntos mencionados anteriormente: OPEX, intensidad de capital, precios proyectados e impuestos chilenos, con sus respectivos datos entregados.

En la elaboración del flujo de caja, se aplica una tasa de descuento del 15%, ya que, al tratarse de un proyecto con tecnología muy nueva, se opta por una estrategia más conservadora. Por

otro lado, los cálculos se realizan estimando un volumen de producción de 20.000 toneladas de LCE (carbonato de litio equivalente) por año. Se evalúa en un horizonte de 21 años, comenzando en 2024 (inversión inicial), asumiendo un año para la instalación y 20 años de operación.

Se asume que la producción se limita a carbonato de litio y toda la producción es vendida. No se considera reinversión ni depreciación. Todos los valores están ajustados al año 2024.

Cabe mencionar que la proyección de precios está estimada hasta el 2028 (ver **Tabla 9**), por lo que se asume que el precio 2028 se mantiene constante hasta el 2045. Este supuesto se realiza en base a que no existen mayores proyecciones confiables, y para nada implica que el análisis posterior no pueda cambiar. Actualmente, el mercado del litio, al estar en auge, presenta variaciones difíciles de proyectar, por lo que los cambios a futuro podrían ser importantes.

Con el flujo de caja, se proceden a calcular los indicadores financieros.

Las **Tablas 11, 12 y 13** muestran los resultados para cada tecnología DLE. En estas tablas sólo se presenta el flujo de caja hasta el año 2030, sin embargo, la evaluación económica se extiende hasta el 2045. Dado que los gastos operacionales son considerados constantes, al igual que los ingresos desde el 2028, el flujo de caja en el período 2028-2045 se mantiene igual.

**Tabla 11:** Evaluación económica para la tecnología de adsorción

<u>Adsorción</u>							
	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Precio		\$13.136	\$14.511	\$15.834	\$17.485	\$17.485	\$17.485
Ingresos	-	\$262.724.000	\$290.222.400	\$316.684.900	\$349.699.300	\$349.699.300	\$349.699.300
Inversión	(\$745.287.967)						
Costos operacionales	-	(\$98.794.978)	(\$98.794.978)	(\$98.794.978)	(\$98.794.978)	(\$98.794.978)	(\$98.794.978)
EBITDA	(\$745.287.967)	\$163.929.022	\$191.427.422	\$217.889.922	\$250.904.322	\$250.904.322	\$250.904.322
Impuesto a la renta	-	(\$44.260.836)	(\$51.685.404)	(\$58.830.279)	(\$67.744.167)	(\$67.744.167)	(\$67.744.167)
Impuesto comunidades y gobiernos	-	(\$5.737.516)	(\$6.699.960)	(\$7.626.147)	(\$8.781.651)	(\$8.781.651)	(\$8.781.651)
TOTAL	(\$745.287.967)	\$113.930.671	\$133.042.059	\$151.433.496	\$174.378.504	\$174.378.504	\$174.378.504

VAN	\$256.563.400
-----	---------------

TIR	20%
-----	-----

Payback	5° año
---------	--------

**Tabla 12:** Evaluación económica para la tecnología de extracción por solvente

**Extracción por solvente**

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Precio		\$13.136	\$14.511	\$15.834	\$17.485	\$17.485	\$17.485
Ingresos	-	\$262.724.000	\$290.222.400	\$316.684.900	\$349.699.300	\$349.699.300	\$349.699.300
Inversión	(\$553.190.000)						
Costos operacionales	-	(\$80.652.000)	(\$80.652.000)	(\$80.652.000)	(\$80.652.000)	(\$80.652.000)	(\$80.652.000)
EBITDA	(\$553.190.000)	\$182.072.000	\$209.570.400	\$236.032.900	\$269.047.300	\$269.047.300	\$269.047.300
Impuesto a la renta	-	(\$49.159.440)	(\$56.584.008)	(\$63.728.883)	(\$72.642.771)	(\$72.642.771)	(\$72.642.771)
Impuesto comunidades y gobiernos	-	(\$6.372.520)	(\$7.334.964)	(\$8.261.152)	(\$9.416.656)	(\$9.416.656)	(\$9.416.656)
TOTAL	(\$553.190.000)	\$126.540.040	\$145.651.428	\$164.042.866	\$186.987.874	\$186.987.874	\$186.987.874

VAN	\$528.257.534
TIR	29%
Payback	4° año

**Tabla 13:** Evaluación económica para la tecnología de intercambio iónico

**Intercambio iónico**

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Precio		\$13.136	\$14.511	\$15.834	\$17.485	\$17.485	\$17.485
Ingresos	-	\$262.724.000	\$290.222.400	\$316.684.900	\$349.699.300	\$349.699.300	\$349.699.300
Inversión	(\$788.805.020)						
Costos operacionales	-	(\$112.640.858)	(\$112.640.858)	(\$112.640.858)	(\$112.640.858)	(\$112.640.858)	(\$112.640.858)
EBITDA	(\$788.805.020)	\$150.083.142	\$177.581.542	\$204.044.042	\$237.058.442	\$237.058.442	\$237.058.442
Impuesto a la renta	-	(\$40.522.448)	(\$47.947.016)	(\$55.091.891)	(\$64.005.779)	(\$64.005.779)	(\$64.005.779)
Impuesto comunidades y gobiernos	-	(\$5.252.910)	(\$6.215.354)	(\$7.141.541)	(\$8.297.045)	(\$8.297.045)	(\$8.297.045)
TOTAL	(\$788.805.020)	\$104.307.784	\$123.419.172	\$141.810.609	\$164.755.617	\$164.755.617	\$164.755.617

VAN	\$152.302.237
TIR	18%
Payback	6° año

Como resumen de los indicadores mostrados, a continuación, se presenta la **Tabla 14**.

**Tabla 14:** Resumen evaluación económica de tecnologías DLE

		Adsorción	Extracción por solvente	Intercambio iónico
Evaluación Económica	VAN	\$256.563.400	\$528.257.534	\$152.302.237
	Inversión inicial	\$745.287.967	\$553.190.000	\$788.805.020
	TIR	20%	29%	18%
	Payback	5° año	4° año	6° año

Es de suma relevancia destacar que todos los valores entregados tienen el objetivo de comparar las tecnologías, y en ningún caso deben ser interpretados como valores absolutos.

Una vez calculados los indicadores, estos se pueden incorporar al modelo principal, constituyendo variables cruciales para la comparación entre alternativas tecnológicas.

### 6.1.3. Análisis preliminar de factores de exclusión

Después de definir las variables a comparar y recolectar los datos correspondientes para cada tecnología, es necesario realizar un análisis preliminar para identificar factores de exclusión (“*knockout factors*”) que podrían descartar una alternativa antes de un análisis más profundo.

Para esto, es necesario analizar con detención las variables de cada tecnología, con la sugerencia de poner especial énfasis en el marco normativo del país, conflictos significativos con comunidades, y evaluación económica, ya que estos factores tienen mayor potencial de detener el desarrollo de un proyecto. En este análisis, es importante contar con expertos que puedan proporcionar su opinión para tener una visión fiable antes de descartar (o no) totalmente una alternativa.

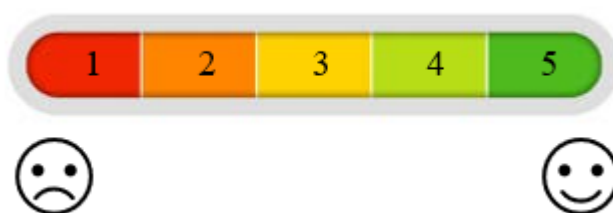
Si se confirma que no existen *knockout factors* para una tecnología, se avanza con el siguiente paso del modelo: la estandarización de variables.

### 6.1.4. Estandarización de variables

Como se menciona en el capítulo de Metodología, la necesidad de estandarizar las variables proviene de las distintas magnitudes y naturalezas que estas poseen. Es crucial estandarizarlas para permitir una comparación adecuada, y una correcta inclusión en el método estadístico que se planea

aplicar.

En función de esto, se propone emplear una escala de calificación que convierta las variables en una nota representativa del efecto de cada variable en el proyecto. Esta calificación debe reflejar si es conveniente para el desarrollo, o bien dificulta el proceso o la operación. La escala propuesta va del 1 al 5, donde 1 indica un efecto indeseable en el proyecto, mientras que 5 implica que el resultado de la variable se comporta de manera óptima con respecto a lo esperado (ver **Figura 6**).



**Figura 6:** Escala de calificación propuesta para la estandarización de variables.

En términos sencillos, se busca calificar el resultado de las variables del 1 al 5, según criterio de expertos, en conjunto con las apreciaciones, objetivos y estrategias de la empresa que aplica el modelo.

Como guía, y asumiendo que ninguno de los datos presentados anteriormente para las tres ramas DLE son factores decisivos para descartar una tecnología, en la **Tabla 15** se presentan las calificaciones asignadas a cada tecnología según los indicadores mencionados y sus datos recopilados.

Estas calificaciones fueron determinadas por un panel de expertos conformado por Màiik Irrazàbal, Ingeniero Civil Químico con máster y PhD en Ingeniería Química, y más de 15 años de experiencia en proyectos de litio, José Espejo, Ingeniero Civil Químico con 5 años de experiencia en procesos de litio desde salmuera, y Juan Pablo Mena, Ingeniero Civil Industrial con mención en Minería, Project Manager con 10 años de experiencia en el rubro, y co-referente en este trabajo.

**Tabla 15:** Calificaciones determinadas para los indicadores, por tecnología DLE

<b>Calificaciones</b>							
<b>Calificaciones Evaluación Económica</b>							
Opciones	VAN	Inversión	TIR	Payback			
Adsorción	3	3	4	4			
Extracción por solvente	5	5	5	4			
Intercambio iónico	2	2	3	3			

<b>Calificaciones Factibilidad Técnica</b>							
Opciones	TRL	% Recuperación	Proveedores disponibles	Pureza del producto	Pre o post treatment	Riesgos en la operación	Efectos de reactivos en los equipos
Adsorción	5	4	5	3	1	3	3
Extracción por solvente	5	5	5	3	1	4	4
Intercambio iónico	5	4	5	3	1	3	2

<b>Calificaciones Impacto Ambiental</b>				
Opciones	Consumo de energía	Consumo de agua	Contaminación salmuera	Generación de residuos
Adsorción	4	1	4	3
Extracción por solvente	4	4	1	3
Intercambio iónico	4	3	3	3

<b>Calificaciones Comunidades Aledañas</b>		
Opciones	Consumo de agua	Huella física
Adsorción	1	3
Extracción por solvente	4	4
Intercambio iónico	4	3

Es importante recordar que estas calificaciones son subjetivas y dependerán de la estrategia de la empresa y el criterio del experto a cargo de la evaluación. Además, son determinadas en un contexto de comparación, por lo que no deben ser interpretadas como valores absolutos.

Una vez determinadas estas calificaciones, el siguiente paso de la metodología es definir pesos asociados a cada indicador. Estos pesos reflejarán la importancia relativa de cada variable en el contexto del proyecto, permitiendo una evaluación ponderada que facilite la identificación de la mejor alternativa tecnológica.

#### 6.1.5. Asignación de pesos a las variables

Siguiendo la misma línea, dado que las variables representan repercusiones de distintas magnitudes, es necesario representar matemáticamente la significancia relativa de cada una para la

evaluación. Esto se puede lograr definiendo un “peso” para cada indicador, los cuales deben ser definidos por juicio experto. De esta forma, se refleja la importancia de los efectos de cada variable según la estrategia, contexto interno y objetivo operacional de la empresa.

El valor de estos pesos es arbitrario, sin embargo, se recomienda utilizar porcentajes cuya suma total sea 100%.

A continuación, la **Tabla 16** presenta los pesos asociados a los indicadores propuestos. Estos pesos han sido determinados por el mismo panel de expertos que definieron las calificaciones, y para esto, se han basado en una estrategia neutra, según su experiencia en la evaluación de proyectos similares.

**Tabla 16:** Pesos determinados para los distintos indicadores

Pesos Evaluación Económica		Pesos Factibilidad Técnica		Pesos Impacto Ambiental		Pesos Comunidades Aledañas	
Indicador	Peso	Indicador	Peso	Indicador	Peso	Indicador	Peso
VAN	55%	TRL	30%	Consumo de energía	20%	Consumo de agua	80%
Inversión	35%	% Recuperación	20%	Consumo de agua	20%	Huella física	20%
TIR	5%	Proveedores disponibles	5%	Contaminación salmuera	50%		100%
Payback	5%	Pureza del producto	10%	Generación de residuos	10%		
	100%	Pre o post treatment	20%		100%		
		Riesgos en la operación	10%				
		Efectos de reactivos en los equipos	5%				
			100%				

Para la evaluación económica, se observa un mayor énfasis en el indicador VAN y en la inversión inicial, ya que, según los expertos, estos suelen ser los indicadores más relevantes para los inversionistas al momento de evaluar proyectos. Este enfoque se justifica en la necesidad de asegurar un retorno de inversión atractivo y una gestión eficiente de los recursos financieros desde el inicio del proyecto.

En cuanto a la factibilidad técnica, el 30% del peso se asocia al *Technology Readiness Level* (TRL), factor determinante en la evaluación al ser la Extracción Directa de Litio una tecnología

relativamente nueva en el mercado. Por otro lado, el porcentaje de recuperación también es un indicador relevante en la implementación de una operación, ya que está directamente ligado con la productividad del proceso. Asimismo, la necesidad de *pre o post treatment* es significativa dado que implica instalaciones y subprocesos adicionales para alcanzar los objetivos operacionales.

Para evaluar el impacto ambiental de las tecnologías, la contaminación en la salmuera es el indicador al que se le asocia un mayor peso. Esto con relación a que la posibilidad de reinyección de la salmuera al final del proceso es uno de los fuertes que tiene para ofrecer la Extracción Directa de Litio, por lo que asegurar que se realice sin aumentar el daño al ecosistema es crucial.

Con respecto al impacto en las comunidades aledañas, el consumo de agua es el indicador más relevante según los expertos. La escasez de agua a nivel global hace que este tema sea de extremo cuidado para las comunidades cercanas, y por consiguiente tiene el potencial de generar conflicto con las operaciones, especialmente mineras, que utilizan grandes volúmenes de agua.

La correcta asignación de pesos y calificaciones asegura que el modelo sea robusto y adaptable a diferentes escenarios y condiciones específicas del proyecto, lo que mejora la precisión y utilidad del análisis comparativo.

Una vez definidos estos pesos, se debe aplicar un método estadístico que permita organizar e interpretar los datos para obtener información significativa y útil.

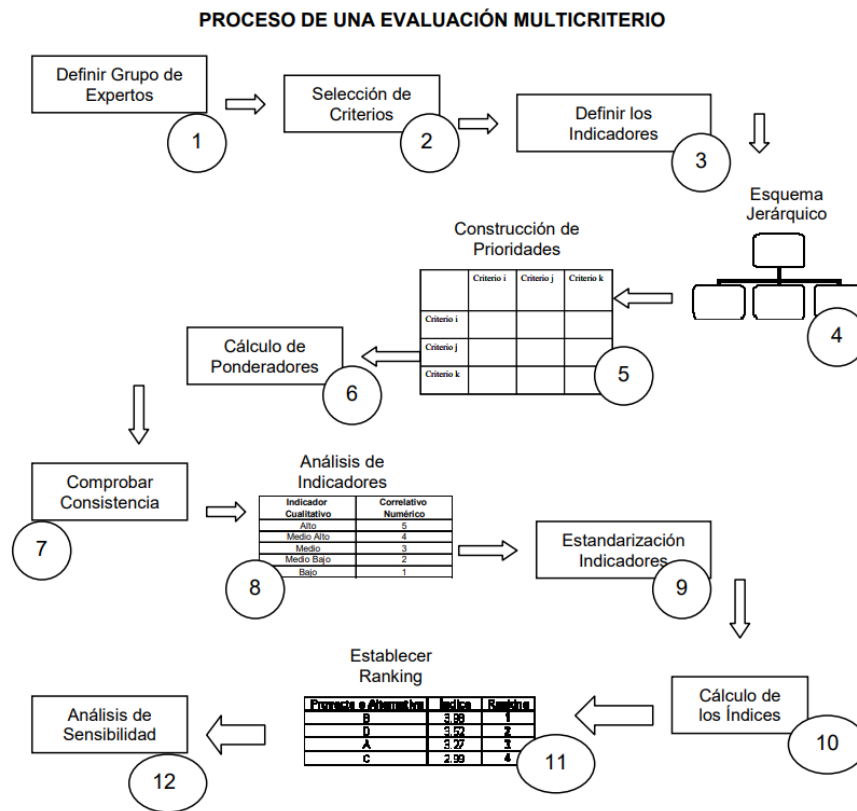
#### **6.1.6. Método estadístico**

Para procesar los datos obtenidos y simplificar su análisis, existen diversas técnicas estadísticas disponibles. No obstante, en este trabajo se propone utilizar un método basado en el análisis multicriterio. Esta metodología, también conocida como análisis multiobjetivo, es ampliamente utilizada para la evaluación y toma de decisiones en proyectos que requieren considerar múltiples criterios o variables, ya sean cualitativos o cuantitativos, permitiendo integrar factores de diferentes naturalezas, como costos, impactos ambientales, y beneficios sociales, entre otros.

El análisis multicriterio facilita la evaluación de distintas alternativas, priorizándolas según su rendimiento global en función de todos los criterios considerados. Su carácter sistemático y transparente refuerza la claridad en la toma de decisiones, lo que lo hace especialmente útil en contextos variados, como la evaluación de opciones de uso de suelo, infraestructura, manejo de recursos naturales, proyectos de inversión, y políticas públicas.

Por consiguiente, el análisis multicriterio ofrece una herramienta integral para la evaluación de proyectos, brindando un enfoque sólido y estructurado para la toma de decisiones en situaciones que implican múltiples factores. Esto lo convierte en una alternativa adecuada para el modelo desarrollado.

La **Figura 7** muestra el proceso de una evaluación multicriterio.



**Figura 7:** Proceso de una evaluación multicriterio. Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES), 2008.

Adaptando la metodología a las necesidades del modelo desarrollado en este trabajo, se

propone ponderar las calificaciones previamente establecidas por los pesos determinados por el grupo de expertos para así obtener una calificación representativa de cada criterio aplicado, es decir, una calificación para la evaluación económica (basada en VAN, TIR, etc.), una calificación para la factibilidad técnica (basada en TRL, porcentaje de recuperación de litio, etc.), una calificación para el impacto ambiental y para las comunidades aledañas. El cálculo de estas calificaciones se expresa matemáticamente en la **Ecuación 1**.

$$\text{calificación} = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

**Ecuación 1:** Función para el cálculo de calificaciones

Donde  $X_1, X_2, \dots, X_n$  son las calificaciones de los indicadores, y  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  son los pesos asignados a cada una.

A su vez, al ponderar las calificaciones obtenidas con la Ecuación 1 por los pesos asignados a cada criterio, se obtiene la calificación global para cada tecnología. Estas calificaciones permiten establecer el ranking que determinará la mejor opción para el proyecto. La calificación global se calcula según la **Ecuación 2**.

$$\text{calificación}_{global} = \sum^c \alpha_1 * \text{calificación}_1 + \alpha_2 * \text{calificación}_2 + \dots + \alpha_c * \text{calificación}_c$$

**Ecuación 2:** Función para el cálculo de la calificación global

Donde  $\text{calificación}_1, \text{calificación}_2, \dots, \text{calificación}_c$  son las calificaciones de los distintos criterios (calculadas utilizando la **Ecuación 1**),  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_c$  son los pesos respectivos, y  $c$  es la cantidad de criterios definidos.

Junto con estos cálculos, y siguiendo la metodología multicriterio, se sugiere aplicar un análisis de sensibilidad con la finalidad de evaluar cómo cambios en las ponderaciones o en los valores de los criterios afectan los resultados finales. Este proceso ayudaría a robustecer la decisión final.

Aunque el modelo tiene limitaciones debido a su subjetividad, que está completamente

ligada a la percepción y juicio de los expertos, representa un punto de partida sólido para la evaluación de alternativas DLE que puede complementarse con otros métodos o complejidades adicionales en los datos.

Siguiendo con los datos presentados en forma de guía, aplicando la **Ecuación 1**, y ponderando las calificaciones de la **Tabla 15** por los pesos establecidos en la **Tabla 16**, se obtienen los siguientes resultados, presentados en la **Tabla 17**.

**Tabla 17:** Calificaciones ponderadas para las tecnologías DLE

Calificaciones Ponderadas				
	Evaluación Económica	Factibilidad Técnica	Impacto ambiental	Comunidades aledañas
Adsorción	3,10	3,50	3,30	1,40
Extracción por solvente	4,95	3,85	2,40	4,00
Intercambio iónico	2,10	3,45	3,20	3,80

Bajo el análisis de la evaluación económica, la extracción por solvente obtiene la mejor calificación, debido a sus buenos resultados en los indicadores calculados. Esta tecnología presenta el VAN más alto, mejor TIR, menor inversión inicial y más rápido Payback, lo que la convierte en la mejor alternativa. De la misma forma, la extracción por solvente presenta el mejor comportamiento con respecto a la factibilidad técnica, según el panel de expertos.

En cambio, con respecto al impacto ambiental, la tecnología de adsorción obtiene la mayor calificación, destacando al ser la única alternativa que no utiliza reactivos en su operación. Por el lado de las comunidades aledañas, la extracción por solvente, nuevamente, obtiene la mejor calificación, ya que presenta bajo consumo de agua y no genera una gran huella física, en comparación con las otras tecnologías, al no requerir pasos extra de concentración, y, por consiguiente, no necesitar piscinas de evaporación.

Para el cálculo de la calificación global de cada tecnología, se definen los pesos que se

asociarán a los distintos criterios. Cabe mencionar que esta etapa depende totalmente de la estrategia que aplique la empresa, es decir, si se dará mayor énfasis al impacto ambiental, a los resultados económicos, etc.

La **Tabla 18** presenta las calificaciones obtenidas al ponderar cada criterio por los pesos dictados por los expertos. En la estrategia aplicada se considera un mayor enfoque en la factibilidad técnica y el resultado económico. Juan Pablo explica que esta decisión se basa en que, al tratarse de tecnologías tan nuevas en la industria, la factibilidad técnica debe ser una de las aristas más relevantes en el análisis, mientras que la evaluación económica siempre será un tópico determinante si se trata de inversionistas.

**Tabla 18:** Calificaciones globales para las tecnologías DLE

Calificaciones Globales					
Pesos	40%	40%	15%	5%	
	Evaluación Económica	Factibilidad Técnica	Impacto ambiental	Comunidades aledañas	Calificación Global
Adsorción	3,10	3,50	3,30	1,40	3,21
Extracción por solvente	4,95	3,85	2,40	4,00	4,08
Intercambio iónico	2,10	3,45	3,20	3,80	2,89

Finalmente, con las calificaciones entregadas, se procede a definir el resultado del modelo, permitiendo una comparación clara y cuantitativa entre las diferentes alternativas tecnológicas.

### 6.1.7. Resultados del modelo

Para cumplir con el objetivo del modelo y determinar la tecnología que mejor se adapte a las características buscadas, las calificaciones globales obtenidas se deben ordenar de forma descendente, creando un ranking. Este ranking facilita la identificación de las opciones más convenientes para realizar pruebas de laboratorio y piloto, ya que los primeros puestos (mayores puntajes) representan las tecnologías más prometedoras para el proyecto.

Dentro de las ventajas más importantes que ofrece el modelo, destaca la gran flexibilidad

que presenta, ya que, si bien es simple, puede manejar un mayor nivel de detalle según las variables introducidas, lo que permite obtener resultados más precisos.

Según las calificaciones presentadas en la **Tabla 18**, se observa que la tecnología mejor evaluada es la extracción por solvente, seguida por la adsorción, y finalmente, el intercambio iónico.

Considerando que la evaluación realizada en forma de guía se basa en impuestos chilenos, los resultados del modelo parecen coherentes con la realidad, ya que, en Chile, SQM, gigante del litio, actualmente está realizando pruebas de extracción por solvente en Atacama con el proveedor Adionics (Adionics, 2024), mientras que CleanTech Lithium, que opera en Laguna Verde, está aplicando pruebas con la tecnología de adsorción en conjunto con el proveedor SunResin (Goldman Sachs, 2023).

En la siguiente sección se presenta la aplicación práctica del modelo desarrollado mediante un caso de estudio aplicado.

## 6.2. Caso de Estudio

En esta subsección, se presenta un caso de estudio real con el propósito de validar el modelo desarrollado para la selección de tecnologías de Extracción Directa de Litio (DLE). El objetivo de este caso de estudio es proporcionar una aplicación práctica del modelo, demostrando su efectividad y utilidad en un entorno real.

El proyecto seleccionado para este caso de estudio es la explotación de litio en el Salar del Hombre Muerto, en la provincia de Catamarca, Argentina. Este salar corresponde a una de las reservas más importantes del mundo, siendo parte del Triángulo del Litio, junto con el Salar de Uyuni en Bolivia, y el Salar de Atacama en Chile. Este proyecto fue seleccionado para probar el modelo ya que opera con tecnología DLE desde hace años.

La estructura de esta subsección se divide en varias secciones. Primero, se describirá el

contexto del proyecto, incluyendo detalles sobre la ubicación geográfica, las condiciones del yacimiento y los desafíos específicos que enfrenta. Esta información proporcionará una base sólida para comprender las variables consideradas en el análisis.

A continuación, se aplicará el modelo de selección de tecnologías DLE utilizando los datos disponibles del proyecto. Este proceso incluirá la recopilación y normalización de datos, la aplicación de la metodología de ponderación de variables y la generación de un ranking de tecnologías DLE.

Finalmente, se realizará un análisis detallado de los resultados obtenidos. Se discutirá la coherencia de estos resultados con la realidad actual del proyecto y se evaluarán las implicancias para la toma de decisiones. Además, se considerarán posibles ajustes y mejoras al modelo basados en las lecciones aprendidas durante el caso de estudio.

Este caso de estudio no sólo tiene como objetivo validar la robustez del modelo, sino que también pretende ofrecer una guía práctica para empresas y profesionales de la industria del litio. Al demostrar cómo el modelo puede ser utilizado para seleccionar de manera efectiva y sostenible las tecnologías DLE más adecuadas, se espera contribuir al desarrollo de proyectos de extracción de litio más eficientes y responsables.

### **6.1.2. Contexto**

El Salar del Hombre Muerto se ubica en la provincia de Catamarca, Argentina, a 4.000 metros sobre el nivel del mar y cerca del límite con la provincia de Salta (ver **Figura 8**). Abarca una superficie de casi 600 kilómetros cuadrados y es considerada una de las reservas de litio más importantes de la región. Sobre el origen del nombre, Hombre Muerto, se dice que alude a una tumba hallada a comienzos del siglo XX en el lugar.



**Figura 8:** Ubicación Salar del Hombre Muerto. Google Maps.

En el enorme salar operan varias compañías mineras como Posco, Lithium South, Galan Lithium, y Arcadium Lithium (anteriormente Livent). Para este caso de estudio nos centraremos en el Proyecto Fénix, localizado en la sección oeste del Salar, y operado por Arcadium Lithium, quienes utilizan la adsorción como tecnología de Extracción Directa de Litio.

La salmuera de este yacimiento es altamente valiosa debido a su alta concentración de litio y bajo nivel de impurezas, con alrededor de 736 miligramos de litio por cada litro de salmuera, y una proporción de magnesio a litio de 3,27 a uno, siendo el magnesio el principal contaminante que se debe remover en la operación. Los recursos actuales del lugar se estiman en 1,58 millones de toneladas de LCE (Lithium South, Consultado en 2024).

El Proyecto Fénix tiene una capacidad instalada de producción de 18.000 toneladas por año de LCE, con planes de expansión en curso. El litio extraído se exporta en un 100%. El acceso al sitio es relativamente fácil gracias a la carretera provincial que conecta la región (Arcadium Lithium, Consultado en 2024).

En cuanto al marco normativo argentino, este deja en manos de las provincias la administración de los recursos mineros, sin embargo, actualmente se discute la posibilidad de declarar el litio como un “recurso natural estratégico” y de “interés público”, lo que podría llevar a

un eventual control de los recursos por parte del Gobierno nacional.

La Ley de Inversiones Mineras en Argentina, pone a las regalías un tope máximo del 3% del “Valor boca de mina”, que hace referencia al costo del mineral extraído previo a cualquier proceso de transformación, luego de restarle los costos de producción. En Catamarca, la provincia recibe un 3,5% de regalías sobre el valor de facturación total. Ese porcentaje incluye las regalías propiamente dichas y otros cargos, como el canon y las tasas provinciales (Giménez, 2023).

El clima en esta zona altiplánica es árido y a veces pueden pasar años sin lluvia. El agua, ya escasa en el territorio, está desapareciendo rápidamente. Casi toda el agua que usan los habitantes del lugar proviene de las cuencas subterráneas, las mismas que Arcadium Lithium tiene permiso para utilizar en la extracción de litio. Las operaciones mineras en el territorio ya han secado un río de la zona, el río Trapiche. El principal afluente actual del Salar es el río los Patos.

Las comunidades locales llevan mucho tiempo alzando su voz para proteger sus territorios, a través de asambleas colectivas, campañas y actividades de concienciación sobre la importancia de proteger los ríos locales y defender sus derechos al agua. Sobre la ruta provincial 43, camino a la localidad de Antofagasta de la Sierra, llama la atención un puñado de carteles escritos a mano en contra de las mineras. Uno de ellos se destaca: “El río los Patos no se toca” (Parodi, 2022).

### **6.1.3. Aplicación del modelo**

A continuación, se aplica el modelo desarrollado considerando las características mencionadas anteriormente. De esta forma, se comprobará si el resultado obtenido con el modelo coincide con la realidad operativa del proyecto Fénix.

#### **6.2.1.1. Definición de variables y recopilación de datos**

En esta evaluación, se utilizarán las mismas variables definidas previamente, comparando las tres principales tecnologías de Extracción Directa de Litio (DLE): adsorción, extracción por solvente e intercambio iónico.

El análisis se basará en la información recopilada y presentada sobre factibilidad técnica,

impacto ambiental e impacto en las comunidades aledañas, reflejada en las **Tablas 3, 5 y 6** respectivamente.

Para la evaluación económica, se recalcularán los indicadores considerando los impuestos argentinos. A continuación, se detallan los aspectos específicos que se incluyen.

### 6.2.1.2. Evaluación económica

Tal y como se menciona en la subsección de contexto del caso de estudio, los impuestos a los que se enfrenta un proyecto de extracción de litio en la provincia de Catamarca, Argentina, corresponden a 3,5% sobre el valor de la facturación total, contemplando regalías y otros cargos como el canon y las tasas provinciales. Cabe destacar lo considerablemente menor que es este porcentaje al exigido por el gobierno de Chile, lo que hace de Argentina una alternativa económicamente llamativa para los inversionistas, sin embargo, se contrarresta con su inestabilidad política de los últimos años.

Para la evaluación económica, a excepción de los impuestos aplicados, el resto de las variables permanece constante a las mencionadas en la subsección 6.1.2. Es decir, se mantienen los ingresos, CAPEX y OPEX, la tasa de descuento, el horizonte temporal, y los supuestos. No obstante, se ajusta el volumen de producción a 18.000 toneladas por año de LCE, que corresponde a la capacidad instalada del proyecto estudiado.

De esta forma, la **Tabla 19** presenta los resultados obtenidos para la evaluación económica del caso de estudio.

**Tabla 19:** Evaluación económica para las tecnologías DLE, según caso de estudio

		Adsorción	Extracción por solvente	Intercambio iónico
Evaluación Económica	VAN	\$581.194.660	\$853.549.408	\$466.121.026
	Inversión	\$670.759.170	\$497.871.000	\$709.924.518
	TIR	28%	40%	25%
	Retorno	5° año	4° año	6° año

Así, se prosigue con el modelo, evaluando posibles factores de exclusión.

### 6.2.1.3. Análisis preliminar de factores de exclusión

Para este caso de estudio, y con el objetivo de seguir considerando las tres alternativas, se asume que no existen factores de exclusión que descarten una tecnología específica, sin embargo, es importante recordar que esto dependerá de la estrategia adoptada por el usuario del modelo.

Por ejemplo, si la estrategia se centra en abordar los problemas de sequía de la zona, donde la minería del litio ya ha secado un río, se debería descartar utilizar la tecnología de adsorción debido a su alto consumo de agua, a menos de que se estudien adecuadamente los efectos y la posibilidad de reinyección y reciclaje del agua utilizada.

A continuación, se presenta la estandarización de los indicadores para continuar con la aplicación del modelo.

### 6.2.1.4. Estandarización, ponderación y aplicación del método estadístico

Siguiendo la metodología planteada, se califican los distintos indicadores y se determinan los pesos asociados. Luego, aplicando la función matemática (**Ecuación 1**), se obtienen las calificaciones.

A continuación, la **Tabla 20** presenta las calificaciones y pesos definidos por el panel de expertos para los distintos indicadores, siguiendo una estrategia que considera las características del proyecto Fénix. Además, se muestra la calificación resultante de la aplicación del método estadístico.

**Tabla 20:** Calificaciones y pesos de indicadores para las tecnologías DLE, según caso de estudio

Calificaciones								
Calificaciones Evaluación Económica								
Pesos	55%	35%	5%	5%				
Opciones	VAN	Inversión	TIR	Payback				Calificación
Adsorción	4	4	4	4				3,95
Extracción por solvente	5	5	5	4				4,95
Intercambio iónico	3	3	3	3				3,00

Calificaciones Factibilidad Técnica								
Pesos	30%	20%	5%	10%	20%	10%	5%	
Opciones	TRL	% Recuperación	Proveedores disponibles	Pureza del producto	Pre o post treatment	Riesgos en la operación	Efectos de reactivos en los equipos	Calificación
Adsorción	5	5	5	5	3	5	5	4,60
Extracción por solvente	3	5	3	2	3	1	2	3,05
Intercambio iónico	4	5	4	4	3	4	2	3,90

Calificaciones Impacto Ambiental					
Pesos	20%	25%	45%	10%	
Opciones	Consumo de energía	Consumo de agua	Contaminación salmuera	Generación de residuos	Calificación
Adsorción	4	1	5	5	3,80
Extracción por solvente	4	4	1	3	2,55
Intercambio iónico	4	3	3	3	3,20

Calificaciones Comunidades Aledañas			
Pesos	90%	10%	
Opciones	Consumo de agua	Huella física	Calificación
Adsorción	1	3	1,40
Extracción por solvente	4	4	4,00
Intercambio iónico	4	3	3,80

Con respecto a la evaluación económica, los pesos asignados permanecen iguales a los presentados en el capítulo anterior, destacando el Valor Actual Neto (VAN) y la inversión como los indicadores más relevantes. En términos de calificaciones, las tecnologías de adsorción e intercambio iónico obtienen una mejora significativa ya que, al disminuir los impuestos aplicados, en comparación con los chilenos, los indicadores suben, convirtiendo a las alternativas en opciones más atractivas para inversionistas. La tecnología de extracción por solvente, por su parte, no presenta cambios relevantes ya que originalmente contaba con un buen desempeño. Así, la mejor alternativa en términos económicos sigue siendo la extracción por solvente, seguida de la adsorción, y finalmente, el intercambio iónico.

En cuanto a la factibilidad técnica, la adsorción mejora su calificación, en comparación a los resultados anteriores, al ser menos crítico para el caso de estudio su rendimiento con respecto a la necesidad de *pre o post treatment*, dadas las condiciones casi ideales de la salmuera del yacimiento. Por la misma razón, su desempeño con respecto a la recuperación de litio también es mejor evaluado. Así mismo, el intercambio iónico también mejora su calificación con respecto a la recuperación de litio en el proceso, la pureza del producto, y la necesidad de *pre o post treatment*. De esa forma, la adsorción se convierte en la alternativa con mejor desempeño en factibilidad técnica, seguida por el intercambio iónico y la extracción por solvente. Esto responde a que la adsorción presenta el nivel de madurez tecnológica (TRL) más alto, un buen porcentaje de recuperación, amplia disponibilidad de proveedores y bajos riesgos operativos, ya que no utiliza reactivos.

En lo que respecta al impacto ambiental, el indicador con mayor peso asignado corresponde a la contaminación en la salmuera de rechazo, ya que, como se explica anteriormente, la reinyección es uno de los mayores beneficios que ofrecen las tecnologías de Extracción Directa de Litio. Con respecto a las calificaciones, la adsorción recibe la mejor, a pesar de su alto consumo de agua, debido a su excelente comportamiento con respecto a la contaminación en la salmuera de rechazo. Es la única tecnología que no emplea reactivos, lo que la convierte en una alternativa más deseable para la posible reinyección. Le sigue el intercambio iónico y, finalmente, la extracción por solvente, que recibe una baja calificación debido a su alto potencial contaminante por el uso de reactivos.

En relación con las comunidades aledañas, el enfoque se encuentra en el consumo de agua. Esto debido a la sequía de la zona y la importancia que las comunidades cercanas atribuyen a proteger los ríos locales y defender sus derechos al agua. En este ámbito, la tecnología de extracción por solvente presenta el mejor desempeño, seguida por el intercambio iónico, mientras que la adsorción obtiene una calificación notablemente menor debido a su alto consumo de agua,

sin embargo, este análisis no contempla la posibilidad de reinyección al final del proceso ni el uso de tecnologías de evaporación forzada, por lo que el desempeño de esta tecnología tiene potencial de mejora.

Siguiendo con la metodología propuesta, la **Tabla 21** presenta las calificaciones globales para las tecnologías DLE, obtenidas al ponderar los resultados de la **Tabla 20** por los pesos estimados por el grupo de expertos.

**Tabla 21:** Calificaciones globales para las tecnologías DLE, según caso de estudio

Calificaciones Globales					
Pesos	42,5%	35%	20%	2,5%	
	Evaluación Económica	Factibilidad Técnica	Impacto ambiental	Comunidades aledañas	Calificación Global
Adsorción	3,95	4,60	3,80	1,40	4,08
Extracción por solvente	4,95	3,05	2,55	4,00	3,78
Intercambio iónico	3,00	3,90	3,20	3,80	3,38

En cuanto a los pesos definidos, la evaluación económica representa el mayor porcentaje dado que los bajos impuestos en Argentina crean un escenario atractivo para el emprendedor, siendo este uno de los mayores impulsores para desarrollar un proyecto en el país, en conjunto con la alta concentración de litio y bajo nivel de impurezas en la salmuera.

Seguida de la evaluación económica, se encuentra la factibilidad técnica con un alto porcentaje. Como se menciona anteriormente, esta alta influencia en la decisión se debe, principalmente, al riesgo asociado a la implementación de una tecnología relativamente nueva en la industria, por lo que factores como el nivel de madurez tecnológica (TRL) y la disponibilidad de proveedores adquieren una especial relevancia.

El peso asignado al impacto ambiental es mayor al presentado en el capítulo anterior, debido a que la sequía de la zona implica una especial atención en el consumo de agua durante el proceso y la posible contaminación en la salmuera.

Por último, el peso otorgado a las comunidades aledañas es menor, ya que, si bien en la zona cercana existen comunidades que organizan asambleas, campañas y actividades, es una región escasamente poblada. El único paraje en la zona es Incahuasi, un pequeño caserío y antiguo pueblo minero donde se extraía oro durante la época del imperio incaico, y luego en la colonia española. (Gobierno de Argentina, Consultado en 2024).

En la siguiente subsección se discuten los resultados obtenidos para el caso de estudio, comparándolos con la realidad para evaluar la efectividad del modelo propuesto.

#### **6.1.4. Resultados y discusión**

Al observar las calificaciones globales obtenidas para cada tecnología en la **Tabla 21**, se puede concluir que la tecnología de adsorción es la más adecuada para implementar en el proyecto Fénix. Esta inferencia se basa en las características específicas del proyecto y en la valoración de los expertos en proyectos de litio, Màik Irràzabal, José Espejo y Juan Pablo Mena, quienes poseen una vasta experiencia en la industria.

Se debe recordar que la estrategia aplicada prioriza los resultados económicos y la factibilidad técnica, con especial énfasis en el consumo de agua y la protección del río Los Patos, principal afluente del proyecto, por lo que, dependiendo de la opinión de los expertos y el enfoque estratégico a aplicar, el resultado puede variar.

Aunque la adsorción no presenta resultados económicos tan favorables como la segunda opción del modelo (extracción por solvente), destaca por su operación sin el uso de reactivos o solventes potencialmente perjudiciales para el ecosistema.

Así mismo, pese a presentar un alto consumo de agua, la posibilidad de la reinyección podría mitigar su impacto en el Río. Si bien la reinyección debe ser estudiada a fondo antes de aplicarla, el no utilizar reactivos podría implicar, preliminarmente, una alternativa viable.

Ahora, comparando con la realidad, la empresa Arcadium Lithium opera en el Salar del Hombre Muerto bajo la tecnología de adsorción, por consiguiente, se logra confirmar que las



calificaciones obtenidas y las recomendaciones resultantes son coherentes con la realidad operativa del lugar, validando la capacidad comparativa del modelo, y demostrando que la metodología propuesta no solo proporciona una visión holística de las opciones disponibles, sino que también permite adaptar el modelo a diferentes contextos y estrategias empresariales.

El desarrollo de este caso de estudio también sirve como una guía práctica para el uso del modelo. A través de la aplicación detallada de cada paso de la metodología, se ofrece un ejemplo claro y comprensible de cómo implementar el modelo en situaciones reales. Esto facilita a los usuarios potenciales la comprensión y la correcta utilización del modelo en sus propios proyectos.

Durante el desarrollo y aplicación del caso de estudio, se han relevado áreas de mejora que pueden incrementar aún más la efectividad del modelo. Algunos de los posibles ajustes son refinar las variables, es decir, incorporar nuevos indicadores considerados relevantes para el análisis, o bien, obtener mayor detalle de los indicadores ya propuestos, para así poder hacer una comparación más precisa entre alternativas.

Por otro lado, se debe recordar que la información presentada está sujeta a cambio, por lo que constantemente se deben actualizar los datos entregados e ingresar nuevos aspectos relevantes para que el modelo se mantenga vigente, considerando las fluctuaciones del mercado, los cambios en las políticas económicas de los países en cuestión, los avances en las tecnologías, etc.

## 7. Conclusiones y Recomendaciones

Ante el considerable aumento en la demanda de litio, impulsado por su papel crucial en la transición energética, y la llegada al mercado de las nuevas tecnologías de Extracción Directa de Litio (DLE, por sus siglas en inglés), que prometen ser más eficientes y sostenibles que los métodos tradicionales, este trabajo se ha enfocado en estudiar dichas tecnologías, con el objetivo de desarrollar un modelo de evaluación multicriterio que sirva como herramienta de apoyo en la selección de la tecnología más adecuada para distintos proyectos de extracción de litio desde salmuera.

En el transcurso de la investigación realizada, y con el apoyo del panel de expertos que respalda este trabajo, se han logrado identificar múltiples variables clave para la evaluación de tecnologías de Extracción Directa de Litio. Estas variables, tanto cualitativas como cuantitativas, se han categorizado según 4 criterios: evaluación económica, factibilidad técnica, impacto ambiental e impacto en las comunidades aledañas al proyecto.

El objetivo al presentar estas variables es establecer un marco de trabajo representativo de las exigencias de la industria actual, que sea adaptable a distintos proyectos de extracción de litio desde salmuera. Las variables seleccionadas destacan los aspectos críticos de las tecnologías que influirán en el desempeño e impacto del proyecto. Asimismo, estas variables logran evidenciar los potenciales riesgos para los inversionistas, principalmente asociados a viabilidad económica y posibles inconvenientes legales, ligados, por ejemplo, al consumo de agua, generación de residuos o contaminación del salar.

Para el análisis de estas variables, es fundamental tener en cuenta el contexto político del país donde se desarrolla el proyecto, ya que influye directamente en el riesgo asociado a ciertos indicadores. Por ejemplo, una elevada inversión inicial puede tener implicancias diferentes en un

país con estabilidad económica y legislativa a uno con incertidumbre política, volatilidad económica o altos niveles de conflicto, debido a que estos factores aumentan la probabilidad de cambios en las exigencias técnicas, medioambientales o tributarias, haciendo que la inversión sea más arriesgada. De igual manera, al evaluar la disponibilidad de proveedores, es crucial considerar los posibles riesgos geopolíticos que podrían afectar las relaciones contractuales, y, por consiguiente, el desempeño del proyecto.

Entre los hallazgos inferidos, destaca que las tres tecnologías: adsorción, intercambio iónico y extracción por solvente, son viables económicamente, bajo los supuestos considerados. El hecho de que se compruebe la viabilidad económica de las tecnologías le da robustez a la razón de este trabajo, ya que confirma que la aplicación de Extracción Directa de Litio como método para la minería de litio es posible, y que, junto con los positivos resultados de la investigación técnica y ambiental, representa una opción más sustentable que los métodos convencionales, constituyendo una oportunidad para avanzar hacia una industria más eficiente y consciente con el entorno.

Por otro lado, los resultados económicos, tanto bajo el régimen fiscal chileno como argentino, pueden ser muy atractivos para potenciales inversionistas, al presentar un alto VAN y TIR, y un Payback que no supera los seis años. Sin embargo, considerando un volumen de producción de 20.000 ton de LCE por año, la inversión inicial puede ser significativa, superando los 490 millones de dólares para todas las tecnologías, y alcanzando más de 700 millones de dólares en el caso del intercambio iónico. Por lo tanto, la implementación de estas tecnologías demanda una considerable capacidad financiera y disposición por parte del inversionista.

Cabe también recordar que Chile y Argentina son parte del Triángulo del Litio, por lo que las características de la salmuera de los yacimientos son bastante favorables para los proyectos de extracción, lo cual, si bien no se refleja directamente en los valores obtenidos en este trabajo, implican efectos económicos convenientes, como por ejemplo, menor o nulo gasto en pre o post tratamiento de la salmuera, debido a la baja concentración de impurezas indeseables como el

magnesio, o bien, mayor rendimiento de la operación al tener alta ley de litio.

Por el lado de las evaluaciones cualitativas, se advierte que las tres tecnologías presentan un TRL mayor o igual a 7, lo que indica, según la escala de madurez tecnológica (ver **Figura 5**), que han sido validadas en un entorno real, reforzando la confianza en su potencial para los posibles inversionistas.

Continuando con el trabajo, esta memoria logra desarrollar una metodología que permite incorporar todas las variables evaluadas. El principal desafío de esta tarea consistía en relacionar variables de distinta naturaleza, sin embargo, este obstáculo se logró superar al estandarizar todos los indicadores, transformándolos en calificaciones.

Finalmente, con el objetivo de validar la propuesta presentada en este trabajo, el modelo es puesto a prueba mediante la aplicación de un caso de estudio. El proyecto seleccionado para el caso fue el Proyecto Fénix, operado por Arcadium Lithium, en el Salar del Hombre Muerto, Argentina. Para esto, el análisis se realizó bajo una estrategia que prioriza los resultados económicos y la factibilidad técnica. Esta priorización se basa en que los bajos impuestos exigidos son una de las principales atracciones para invertir en el país, junto con las cualidades casi ideales de la salmuera.

El resultado obtenido para el caso de estudio indica que la tecnología que mejor se adapta al proyecto es la adsorción, lo cual coincide con la realidad operativa, comprobando la robustez del modelo frente a variables reales, y demostrando que es capaz de proporcionar resultados consistentes y relevantes, lo que refuerza su utilidad práctica en la industria.

Del desarrollo del caso, destacan los positivos resultados económicos, los cuales son claramente más atractivos que los calculados bajo el régimen fiscal chileno, al ser los impuestos argentinos notablemente menores; sin embargo, estos se ven contrarrestados por la inestabilidad política que enfrenta actualmente Argentina, haciéndolo un país más riesgoso para una inversión.

El testeo, a su vez, revela la importancia de conocer el contexto del proyecto y el enfoque que se decide aplicar para evaluar las variables, confirmando la premisa planteada al inicio del

trabajo, que afirma que no existe una “mejor” opción predeterminada para todos los proyectos de DLE, y que la selección de tecnología dependerá totalmente de la salmuera del yacimiento a explotar, el contexto político, los objetivos operacionales y la estrategia de la empresa.

Por otro lado, debido a la subjetividad intrínseca de la metodología propuesta, se recalca el rol clave de los expertos en la aplicación del modelo, ya que, sin su juicio especializado, la robustez del modelo se ve comprometida, lo que podría conducir a resultados poco realistas. Para mitigar este riesgo, se recomienda contar con más de un experto, lo que permite generar discusiones y calibrar las evaluaciones, buscando un equilibrio entre las disciplinas involucradas en el análisis. En este trabajo, el panel de expertos fue compuesto por dos especialistas en procesos de minería, que aportaron enfoque técnico, y un tercer experto con perspectiva más económica. Este panel ajustó conjuntamente sus calificaciones y ponderaciones, con el objetivo de minimizar diferencias en la forma de evaluar y reducir la posibilidad de que una perspectiva más severa o conservadora distorsione los resultados. De esta manera, se busca también minimizar cualquier sesgo en la opinión de los expertos, evitando la subvaloración o sobrevaloración de variables que podría afectar la objetividad del análisis.

La capacidad de adaptación del modelo es especialmente necesaria en un mercado tan dinámico como lo es actualmente el del litio, donde las condiciones pueden variar significativamente entre regiones y a lo largo del tiempo. Además, esta adaptabilidad propia del modelo genera la posibilidad de utilizar la metodología para otros tipos de análisis que requieran evaluar y comparar opciones. Sin embargo, debido a que el modelo es altamente flexible y permite la adición o eliminación de variables, se recomienda cautela, ya que una selección inadecuada de variables podría comprometer la representatividad del modelo frente a la realidad del proyecto.

Con este trabajo se ha logrado desarrollar y validar un modelo integral que servirá de apoyo para la evaluación y selección de tecnologías en proyectos de Extracción Directa de Litio (DLE) desde salmuera, proporcionando una herramienta versátil y adaptable para la toma de decisiones



estratégicas en un entorno global que busca la transición energética. A través del exhaustivo análisis de variables, tanto cuantitativas como cualitativas, se ha logrado ofrecer una visión comprensiva que considera no solo los aspectos económicos y técnicos, sino también los impactos ambientales y sociales, elementos claves para el éxito a largo plazo de los proyectos mineros. De esta forma, se puede concluir que se cumple el objetivo general de esta memoria.

Con esta tesis se espera haber contribuido a simplificar la toma de decisiones de las empresas que buscan aplicar estas innovadoras tecnologías, demostrando que, con las herramientas adecuadas, podemos liderar el cambio a una industria más responsable.

## 8. Limitaciones

A lo largo todo el trabajo, se han nombrado múltiples limitaciones que enfrenta la investigación y como estas podrían afectar a los resultados del modelo. Entre estas limitaciones destacan, principalmente, la dependencia de la calidad de los datos y la disponibilidad de información. El modelo desarrollado se basa en la precisión del análisis que se realiza en función de las variables, por lo que, si los datos no se encuentran completos o actualizados, las evaluaciones podrían estar sesgadas o ser inexactas. Por consiguiente, se vuelve a recalcar la importancia de actualizar la información antes de aplicar el modelo, debido a posibles cambios en políticas públicas, fluctuaciones del mercado, actualizaciones en tecnologías, entre otras variaciones que podrían tomar lugar.

Bajo la misma línea, la información presentada en este trabajo, especialmente la entregada en las variables cualitativas, está limitada considerablemente a estudios técnicos superficiales, sin analizar datos crudos. Por consiguiente, sería interesante obtener información más exacta para las evaluaciones, ya que permitiría obtener resultados más precisos; sin embargo, se debe considerar contar con expertos técnicos que puedan dar su valoración con respecto a tales datos, de forma que se mantenga la validación de juicio experto en las calificaciones y pesos relativos.

Como discusión sobre el modelo, existe la posibilidad de que dos o más tecnologías obtengan calificaciones iguales, o muy similares. Ante esta eventualidad, es importante recordar que el modelo es una herramienta complementaria en la toma de decisiones, y debe ser utilizada con conocimiento de sus restricciones. El modelo, más que entregar una respuesta exacta, busca orientar la toma de decisiones, levantando todos los factores que debiesen ser evaluados y reduciendo los tiempos de pruebas y análisis de las tecnologías, limitándolas sólo a las alternativas mejor evaluadas.

## 9. Trabajos Futuros

A continuación, se presentan propuestas para trabajos futuros que surgen a partir de los hallazgos y las limitaciones del presente estudio. Dada la naturaleza del modelo, son prácticamente infinitas las variaciones que se le puede aplicar a los resultados mostrados, al ser posible añadir y eliminar variables, cambiar las alternativas a evaluar, etc., sin embargo, se consideran especialmente interesantes las siguientes propuestas.

Un trabajo para futuras investigaciones es evaluar las tecnologías DLE presentadas, pero diferenciadas según los distintos desarrolladores, es decir, por ejemplo, evaluar la adsorción que ofrece Sunresin, la adsorción de Koch Technology, la extracción por solvente de Adionics, el intercambio iónico de Lilac Solutions, etc. Esto ya que las características de las tecnologías pueden variar según el proveedor. Así, se tendría una evaluación más exhaustiva, que, por consiguiente, entregaría un resultado más robusto y exacto. De la misma forma, cabe recordar que existen más tecnologías DLE en desarrollo que escapan de las ramas presentadas, como tecnología de membranas o reconocimiento molecular; estas alternativas no fueron evaluadas en el trabajo debido a que aún presentan bajos niveles de madurez tecnológica, sin embargo, podrían tener un impacto en el futuro.

Otro enfoque interesante para trabajos futuros es la integración de técnicas avanzadas de inteligencia artificial y Machine Learning. Estas herramientas podrían mejorar la capacidad del modelo para identificar patrones y realizar predicciones más precisas. Se podría explorar el uso de algoritmos de aprendizaje supervisado para optimizar la selección de tecnologías en función de múltiples escenarios y variables, adaptándose dinámicamente a cambios en el entorno operativo.

Finalmente, escapando un poco del propósito específico del modelo desarrollado, un trabajo futuro podría centrarse en la expansión del alcance del modelo a tipos de yacimiento diferentes a las salmueras de los salares, como, por ejemplo, las salmueras geotermales. Esto en base a que, una



de las promesas que presentan las nuevas tecnologías de Extracción Directa de Litio, es lograr que, en yacimientos donde no era viable la extracción, ahora si lo sea. Esta investigación constituiría un avance significativo para la industria de minería de litio, ya que, al aumentar la oferta, se estaría más cerca de suplir la alta demanda estimada, regulando el mercado.

Los trabajos futuros propuestos no solo buscan expandir y mejorar el modelo desarrollado en esta tesis, sino también contribuir a la evolución de la industria de extracción de litio hacia prácticas más sostenibles, eficientes y socialmente responsables. A través de estas investigaciones, se podrá continuar desarrollando herramientas y métodos que apoyen la toma de decisiones informadas y estratégicas en un entorno cada vez más dinámico y complejo.

## 10. Referencias

- Adionics. (2024). *adionics.com*. Obtenido de <https://www.adionics.com/adionics-completes-successful-1500-hours-of-direct-lithium-extraction-testing-at-sqms-atacama-salar-premises/>
- Althaus, H.-J. N. (2009). Life cycle assessment of a Lithium-ion battery for applications in electric vehicles. *Environ Sci Technol*.
- Arcadium Lithium. (Consultado en 2024). *arcadiumlithium.com*. Obtenido de [https://arcadiumlithium.com/operations\\_projects/](https://arcadiumlithium.com/operations_projects/)
- Barroilhet, J. (2023). ¿Y si aprovechamos el IRA de Estados Unidos para el litio? *Ex-Ante*.
- Bednarski, L. (2024). El gurú de 'la guerra de las baterías', Lukasz Bednarski: "El litio hará que el mundo sea más justo". *El Español*.
- BMI. (2022). *ithium Forecast Q3*. Benchmark Mineral Intelligence.
- Boroumand, Y. R. (2024). Adsorption-type aluminium-based direct lithium extraction: The effect of heat, salinity and lithium content. *Desalination*.
- Bradley, D. C. (2017). Lithium. *Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*. Obtenido de <https://pubs.usgs.gov/pp/1802/k/pp1802k.pdf>
- Cochilco. (Mayo de 2023). *El Mercado del litio: desarrollo reciente y proyecciones al 2030*. Cochilco technical report. Obtenido de [https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Mercado%20del%20Litio%20-%20Proyecciones%20al%202035%20-%20actualizacion%20mayo%202023%2006.06.2023%20con%20RPI%20%20rev%20CRL%20\(002\).pdf](https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Mercado%20del%20Litio%20-%20Proyecciones%20al%202035%20-%20actualizacion%20mayo%202023%2006.06.2023%20con%20RPI%20%20rev%20CRL%20(002).pdf)
- Diario UChile. (2023). La Unión Europea y Chile firman acuerdo por la obtención del litio y cobre a cambio de inversiones en la economía. *Diario UChile*.

---

Farahbakhsh, J. A.-D. (2024). Direct lithium extraction: A new paradigm for lithium production and resource utilization. *Desalination, Volume 575*. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117249>

García, N. (2021). *Contratos de explotación del Litio en Chile*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

Giménez, J. (2023). Litio: ¿cuánto pagan las mineras y qué pasa en Chile y Bolivia? *Chequeado*.

Gobierno de Argentina. (Consultado en 2024). *argentina.gob.ar*. Obtenido de

<https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/educacion-y-formacion-masiva/materiales-educativos/salar-del-hombre-muerto-catamarca-argentina-landsat-8-oli-15-de-septiembre-de-2014>

Gobierno de Chile. (2023). *Estrategia Nacional del Litio - Por Chile y su Gente*.

Goldman Sachs. (2023). *Direct Lithium Extraction: A potential game changing technology*. The Goldman Sachs Group, Inc.

Goldman Sachs. (2024). *Lithium price forecast*.

Goldman Sachs Research. (2023). Electric vehicles are forecast to be half of global car sales by 2035. *IHS Global Insight*.

Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES). (2008).

*Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.

Lithium South. (Consultado en 2024). *lithiumsouth.com*. Obtenido de

<https://www.lithiumsouth.com/projects/>

McKinsey & Company. (2023). *Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular*.

Ministerio de Minería, Cochilco. (2022). *Litio en Chile*. Ministerio de Minería.

Mojid, M. L. (2024). A review on advances in direct lithium extraction from continental brines:

Ion-sieve adsorption and electrochemical methods for varied Mg/Li ratios. *Sustainable*

Obaya, M. (2023). ¿Cómo se administra el litio en otros países, como Chile y Bolivia? *Chequeado*.

Parodi, C. (2022). *climatetrackerlatam.org*. Obtenido de

<https://climatetrackerlatam.org/historias/antofagasta-de-la-sierra-entre-la-transicion-energetica-y-la-vida-en-un-territorio-minado/>

Rapier, R. (2019). Why China Is Dominating Lithium-Ion Battery Production. *Forbes*.

Razmjou, A. (2024). *An introduction to DLE*. International Lithium Association.

S&P Capital IQ. (2024). *Lithium price forecast*.

Universidad Técnica Federico Santa María. (Consultado en 2024). *¿Sabes que es el TLR?* Obtenido de [desafio tecnologicos.usm.cl](https://desafio tecnologicos.usm.cl): <https://desafio tecnologicos.usm.cl/trl>

US Bureau of Labor Statistics. (2023). *US annual inflation rose in December*.

USCG. (2023). *Mineral Commodity Summaries. Lithium*. Annual Publications. Obtenido de <http://bcn.cl/3c9we>

Zuleta, J. C. (2022). Qué resultados tuvo la nacionalización del litio en Bolivia (y por qué AMLO pidió su asesoría para hacerlo en México). *BBC News Mundo*.

## 11. Tabla de Figuras

<b>Figura 1:</b> Fuentes de emisiones globales de CO <sub>2</sub> . Ministerio de Minería, Cochilco, 2022.....	14
<b>Figura 2:</b> Proyección de demanda agregada de litio (kt LCE). Cochilco, 2023.....	15
<b>Figura 3:</b> Oferta de litio en 2021, y demanda y oferta de litio proyectada a 2030 por país (kt LCE). McKinsey & Company, 2023.....	16
<b>Figura 4:</b> Modelo propuesto para la evaluación de las distintas tecnologías DLE.....	33
<b>Figura 5:</b> Technology Readiness Level. Elaboración propia en base a Universidad Técnica Federico Santa María, Consultado en 2024.....	36

<b>Figura 6:</b> Escala de calificación propuesta para la estandarización de variables. ....	50
<b>Figura 7:</b> Proceso de una evaluación multicriterio. Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES), 2008. ....	54
<b>Figura 8:</b> Ubicación Salar del Hombre Muerto. Google Maps.....	60

## 12. Tabla de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Clasificación de los recursos de litio en estado natural potencialmente explotables .....	17
<b>Tabla 2:</b> Método tradicional vs. Tecnologías DLE.....	25
<b>Tabla 3:</b> Evaluación comparativa factibilidad técnica de tecnologías DLE .....	37
<b>Tabla 4:</b> Proveedores de tecnologías DLE.....	38
<b>Tabla 5:</b> Evaluación comparativa impacto ambiental de tecnologías DLE .....	40
<b>Tabla 6:</b> Evaluación comparativa impacto en las comunidades aledañas de tecnologías DLE.....	41
<b>Tabla 7:</b> Benchmark CAPEX y OPEX .....	43
<b>Tabla 8:</b> CAPEX, OPEX e intensidad de capital estimada, por tecnología DLE .....	43
<b>Tabla 9:</b> Proyecciones de precios para carbonato de litio.....	44
<b>Tabla 10:</b> Regalías según el precio de litio para empresas que operan en Salar de Atacama.....	46
<b>Tabla 11:</b> Evaluación económica para la tecnología de adsorción .....	47
<b>Tabla 12:</b> Evaluación económica para la tecnología de extracción por solvente .....	48
<b>Tabla 13:</b> Evaluación económica para la tecnología de intercambio iónico.....	48
<b>Tabla 14:</b> Resumen evaluación económica de tecnologías DLE.....	49
<b>Tabla 15:</b> Calificaciones determinadas para los indicadores, por tecnología DLE .....	51
<b>Tabla 16:</b> Pesos determinados para los distintos indicadores .....	52
<b>Tabla 17:</b> Calificaciones ponderadas para las tecnologías DLE.....	56
<b>Tabla 18:</b> Calificaciones globales para las tecnologías DLE.....	57
<b>Tabla 19:</b> Evaluación económica para las tecnologías DLE, según caso de estudio.....	62



---

**Tabla 20:** Calificaciones y pesos de indicadores para las tecnologías DLE, según caso de estudio 64

**Tabla 21:** Calificaciones globales para las tecnologías DLE, según caso de estudio ..... 66