



El litio y sus tecnologías de procesamiento

DIRECCIÓN DE ESTUDIOS Y POLÍTICAS PÚBLICAS
DEPP 09/2024

Registro Propiedad Intelectual N° 2024-A-8158



Agradecemos al Dr. Humberto Estay, investigador full time de AMTC, el cual es un centro con financiamiento basal de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID - código de proyecto ANID es el AFB230001-), dependiente del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación y, asimismo, un centro de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile, quien generosamente colaboró con sus conocimientos y comentarios en la revisión del presente informe.



RESUMEN EJECUTIVO

El presente informe corresponde a una descripción técnica de las tecnologías de procesamiento para la extracción de litio, incluyendo procesos de evaporación y métodos DLE, además se comenta de la extracción desde minerales. Por otro lado, se muestran los proyectos en desarrollo asociados a tecnologías de extracción directa en la zona geográfica denominada “Triángulo del Litio”. El trabajo también incorpora revisión de aspectos medioambientales, con respectivas ventajas y limitantes de los procesos mencionados.

La transición energética ha impulsado los nuevos enfoques de tecnologías de procesamiento para la obtención de litio, los que surgen en un escenario de alta demanda de baterías de ion-litio (aumento del 51% entre 2015 - 2023) y en respuesta a las limitaciones de los procesos extractivos convencionales.

Chile representa un 24% de la producción mundial donde la evaporación para concentrar salmueras con litio ha sido la vía tradicional de procesamiento. Esta se sustenta sobre las propiedades químicas de la salmuera en el núcleo del salar (ya que las especies precipitan en orden respecto a su solubilidad) y las condiciones climáticas áridas características de los salares alto andinos.

Este método extractivo utiliza piscinas para depositar la salmuera, la que va siendo traspasada a otras mientras la concentración de litio aumenta. Las especies químicas que contienen el litio son las últimas en concentrarse por lo que el proceso puede durar entre 12 a 24 meses, para obtener una recuperación de entre 40 - 50%. La principal preocupación de este método es la enorme cantidad de agua que se pierde desde la salmuera mediante la evaporación.

La extracción directa de litio es el nuevo enfoque tecnológico, correspondiente a un conjunto de procesos que utilizan diferentes principios de operación y materiales para ser selectivos en la extracción de litio. Se agrupan como DLE (Direct Lithium Extraction) y LBC (Lithium Brine Concentration). En ciertos casos, para que estos procesos sean viables requieren una pre-concentración de la salmuera y/o un post tratamiento.

Estos métodos están en el centro de la discusión debido a que las investigaciones muestran mejores eficiencias (mayores a 90%) y alta selectividad al ion litio respecto a la extracción convencional, tiempos de procesamiento entorno a horas, la proporción Mg/Li puede no ser relevante, menor uso directo de suelo, entre otros. Sin embargo, también presenta desafíos en términos que no todas las tecnologías DLE están estudiadas ampliamente a escala comercial, limitaciones en algunos de los materiales de extracción de litio los que pueden requerir el uso de reactivos, necesidad de modificar el pH de la salmuera o aumentar la temperatura de la misma, entre otros.

Uno de los aspectos de mayor preocupación medioambiental de estos métodos, es la reinyección ya que existiría incertidumbre de los efectos que tendría sobre el salar la reinyección de la salmuera agotada posterior al procesamiento. Estos métodos requieren necesariamente de la reinyección ya que de lo contrario se tendría el mismo problema de pérdida de agua por evaporación y el enfoque de valor entonces sería la mejor eficiencia del proceso pero no la pérdida de agua. Proyectos tales como Centenario-Ratones, Fénix (Hombre Muerto) y Cauchari-Olaroz están en operación con tecnología DLE ubicados, principalmente, en Argentina con el uso de adsorción selectiva y extracción por solventes.



ABSTRACT

This report is a technical description of the processing technologies for lithium extraction, including evaporation processes and DLE methods, and also discusses extraction from minerals. On the other hand, the projects in development associated with direct extraction technologies in the geographical area known as the “Lithium Triangle” are shown. The work also includes a review of environmental aspects, with respective advantages and limitations of the aforementioned processes.

The energy transition has driven new approaches to processing technologies for obtaining lithium, which arise in a scenario of high demand for lithium-ion batteries (increase of 51% between 2015 - 2023) and in response to the limitations of conventional extraction processes.

Chile represents 24% of world production where evaporation to concentrate lithium brines has been the traditional processing route. This is based on the chemical properties of the brine in the core of the salt flat (since the species precipitate in order of their solubility) and the arid climatic conditions characteristic of the high Andean salt flats.

This extraction method uses pools to deposit the brine, which is transferred to others as the lithium concentration increases. The chemical species that contain lithium are the last to concentrate, so the process can last between 12 to 24 months, to obtain a recovery of between 40 - 50%. The main concern of this method is the enormous amount of water that is lost from the brine through evaporation.

Direct lithium extraction is the new technological approach, corresponding to a set of processes that use different operating principles and materials to be selective in the extraction of lithium. They are grouped as DLE (Direct Lithium Extraction) and LBC (Lithium Brine Concentration). In certain cases, for these processes to be viable, they require a pre-concentration of the brine and/or post-treatment.

These methods are at the center of the discussion because research shows better efficiencies (greater than 90%) and high selectivity to lithium ion compared to conventional extraction, processing times around hours, the Mg/Li ratio may not be relevant, less direct use of land, among others. However, it also presents challenges in terms of the fact that not all DLE technologies are widely studied on a commercial scale, limitations in some of the lithium extraction materials which may require the use of reagents, the need to modify the pH of the brine or increase its temperature, among others.

One of the aspects of greatest environmental concern of these methods is reinjection, since there would be uncertainty about the effects that reinjection of the exhausted brine after processing would have on the salt flat. These methods necessarily require reinjection, otherwise the same problem of water loss through evaporation would arise and the value approach would then be the best process efficiency but not the water loss. Projects such as Centenario-Ratones, Fénix (Hombre muerto) and Cauchari-Olaroz are in operation with DLE technology, located mainly in Argentina using Selective Adsorption and Solvent Extraction.



ÍNDICE

CONTENIDO

Resumen Ejecutivo	3
Índice.....	5
Contenido.....	5
Figuras.....	5
Tablas	6
1. Introducción	7
2. Tecnologías de procesamiento	9
2.1. Procesos de extracción a partir de salmueras	11
2.1.1. Extracción de litio desde salmueras mediante evaporación.....	13
2.1.2. Tecnologías de extracción directa de litio (DLE)	15
2.1.3. Tecnologías de concentración de salmuera (LBC).....	23
2.2. Procesos de extracción a partir de minerales de litio	26
2.3. Ventajas y limitaciones de los procesos extractivos de litio	29
3. Proyectos de extracción de litio	33
4. Aspectos Medioambientales	35
5. Comentarios finales.....	39
6. Bibliografía	41
7. Anexo	45

FIGURAS

Figura 1: Demanda de litio desglosada por tipo de uso final	7
Figura 2: Cadena de valor del Litio	10
Figura 3: Modelo Hidrogeológico conceptual de los salares alto andinos.....	12
Figura 4: Proceso convencional de concentración y purificación de litio desde salar mediante piscinas de evaporación	14
Figura 5: Diagrama simplificado proceso de extracción directa de litio	16
Figura 6: Diagrama del proceso DLE de adsorción para procesar litio	17
Figura 7: Proceso DLE de extracción para la recuperación de litio mediante resinas de intercambio iónico, también conocidas como tamices iónicos.	19
Figura 8: Proceso DLE para concentrar litio a través de extracción por solventes	21
Figura 9: Diagrama del proceso DLE de extracción de litio por precipitación.	22
Figura 10: Diagrama proceso electroquímico donde el litio se concentra en el cátodo.....	23



Figura 11: Estructuras cristalinas de los polimorfos espodumeno- α (a) y espodumeno- β (b)	27
Figura 12: Diagrama de flujo para el método de tostado de sulfato	28
Figura 13: Consumo directo e indirecto de agua en m ³ /ton LCE (a la izquierda) y huella hídrica en m ³ eq/ kg LCE utilizando el método AWARE (a la derecha)	35
Figura 14: Comparación del uso directo e indirecto del suelo para 4 fuentes diferentes de litio con tres escenarios para fuentes de energía en el proyecto DLE, Espodumeno australiano (con producción en China), Atacama: Salar de Atacama en Chile, y Cauchari: Salar de Cauchari en Argentina.....	36

TABLAS

Tabla 1: Clasificación de los recursos de Litio.	9
Tabla 2: Composición característica salmuera del Salar de Atacama	15
Tabla 3: Materiales con capacidad de extracción de litio.....	18
Tabla 4: Sistemas de extracción sinérgicos con β -dicetona y ligandos neutros en extracción por solventes para la extracción de litio.	20
Tabla 5: Procesos tecnológicos de concentración de salmueras para acondicionarlas a DLE	24
Tabla 6: Contenido de Litio en las principales menas de espodumeno.....	26
Tabla 7: Composición mineralógica típica de una muestra mineral de espodumeno	26
Tabla 8: Resumen de ventajas y limitaciones por tecnologías de extracción de litio	31
Tabla 9: Proyectos con Extracción Directa de Litio en el "Triángulo del Litio"	33
Tabla 10: Insumos del ciclo de vida modelados para la producción de 1 kg de Li ₂ CO ₃ (grado de batería) en salares seleccionados.....	37



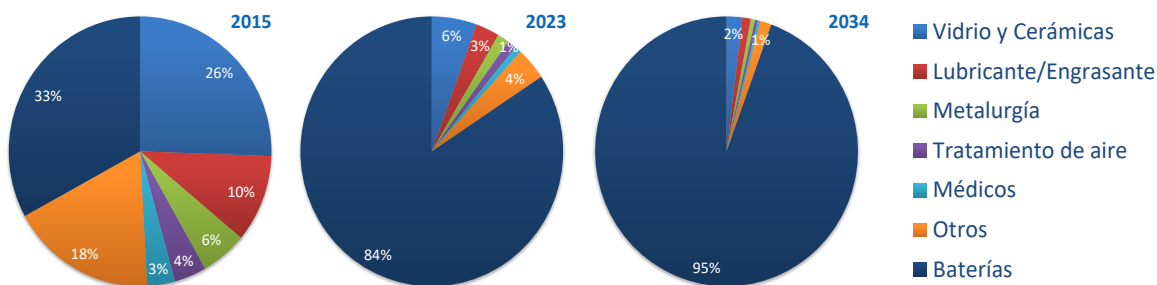
1. INTRODUCCIÓN

El litio es un metal alcalino ubicado en el tercer lugar de la tabla periódica dada su pequeña masa atómica (6,9 u). En la superficie de la corteza terrestre se concentra en menos de un 0,1% respecto al total de minerales, porcentaje que se ha distribuido en formaciones geológicas tipo roca, salmueras o fuentes geotérmicas.

La importancia del litio ha ido en aumento en la última década, debido a que es considerado un elemento crítico para el avance en la transición energética, la que pretende cambiar la matriz energética actual en base a combustible fósil a una más limpia y sostenible medioambientalmente donde la electromovilidad juega un papel clave hacia 2030 - 2040, para lograr dicho objetivo.

Las baterías de ion-litio son de alta demanda en el escenario de la transición energética, la cual se proyecta creciente, ya que el litio es el principal componente de ellas. Dichas baterías son ampliamente utilizadas en autos eléctricos, sistemas de almacenamiento energético y artículos electrónicos. Una segunda categoría de los usos del litio se puede mencionar los tradicionales, que incluyen vidrios y cerámicas, grasas y lubricantes, sistemas de aire acondicionado y productos farmacéuticos, entre otros. La Figura 1 muestra la evolución de la demanda de litio desglosada por tipo de uso final, se observa cómo la utilización de baterías creció un 53% entre 2015 y 2024, mientras que para 2034 se proyecta supere el 90%, donde los autos eléctricos son el principal driver con un 87%.

Figura 1: Demanda de litio desglosada por tipo de uso final



Fuente: Cochilco en base a Lithium forecast Report Q1 2024 Benchmark Mineral Intelligence (Benchmark Intelligence, 2024)

Chile, actualmente, tiene una posición privilegiada en la industria extractiva del litio debido a que representa un 24% de la producción mundial, lo que equivale a 44.000 toneladas de litio contenido. Lo anterior posiciona al país solo por debajo de Australia, que aproximadamente cuenta con un 47% de la producción global, equivalente a 86.000 toneladas de litio al año (U.S. Geological Survey, 2024). También es importante señalar que el Salar de Atacama tiene una de las reservas más importantes a nivel mundial con un total de 24,3 Mt estimadas de litio contenido a finales del año 2022, lo que lo convierte en el segundo yacimiento más grande del mundo, después del salar de Uyuni que se estima tiene aproximadamente 39 Mt de Litio.

El contexto actual de mayor demanda de este metal crítico tiene por consecuencia la necesidad de producir más litio, por lo tanto, extraer más, lo que requiere mejorar los procesos productivos

actuales o implementar nuevas tecnologías más eficientes. Tradicionalmente la extracción de litio en Chile ha sido a través de la evaporación de salmueras, mientras que en otros lugares del mundo también se realiza desde roca dura. Sin embargo, estas vías de procesamiento presentan desafíos ambientales y técnicos, limitados a las características únicas de cada salar o depósito mineral de litio.

Es por lo anterior que nuevas tecnologías y métodos han surgido en respuesta a las limitaciones de la extracción convencional, las cuales buscan extraer litio selectivamente desde salmueras logrando mejores recuperaciones, menores tiempos de procesamiento y menores impactos medioambientales. El conjunto de estas tecnologías se ha denominado DLE (Direct Lithium Extraction). Además del paso clave DLE, existen tecnologías complementarias para un pre o post tratamiento de la salmuera, las que se denominan LBC (Lithium Brine Concentration).

Objetivo

El objetivo del presente trabajo es levantar información técnica acerca de las tecnologías desarrolladas para la obtención de litio según su origen, dando énfasis en la extracción directa de litio, considerando la recuperación de litio hasta alcanzar un producto de valor comercial.

Se espera contar con una actualización de la información cada 2-3 años para hacer seguimiento de posibles avances en dichas tecnologías; ya sea en nuevas propuestas tecnológicas o nuevos proyectos donde se implementen con éxito.

El informe se estructura en 3 secciones principalmente, en la primera se aborda la descripción de las tecnologías de extracción de litio desde salmuera, roca dura y DLE; la segunda sección menciona los proyectos o estudios en desarrollo para extraer litio en el triángulo comprendido entre Chile, Argentina y Bolivia; y la tercera parte corresponde a reflexiones medioambientales de los impactos que tiene la extracción de litio, junto a comentarios finales.



2. TECNOLOGÍAS DE PROCESAMIENTO

Históricamente el Litio ha sido utilizado en medicina para el tratamiento de ciertas condiciones del sistema nervioso central y en la industria, mediante el cloruro de Litio para la producción de cerámicas y vidrio. Sin embargo, no fue hasta el año 1970 en que Stanley Whittingham, importante químico e ingeniero desarrolló la primera batería de ion litio para almacenar energía; lo que le daría al Litio la importancia que tiene actualmente.

El origen del Litio en la naturaleza ocurre por medio de cuatro tipos de depósitos (Balaram et al., 2024) que se resumen en la Tabla 1 a continuación.

Tabla 1: Clasificación de los recursos de Litio.

TIPO	TIPOS DE DEPÓSITOS	PARTICIPACIÓN A NIVEL MUNDIAL	ESTADO NATURAL	UBICACIÓN DE MAYORES DEPÓSITOS
Depósitos magmáticos	Pegmatitas, Espodumeno, petalitas, lepidolitas, amblogonita y eucryptita	26%	Roca dura (a partir de magma cristalizado bajo la superficie terrestre)	Australia, Estados Unidos, República del Congo, Canadá
Salmueras	Continental (salares), geotermales, petroleros, agua subterránea en cuencas sedimentarias, agua de mar.	64%	Salmueras (arenas, agua y sales minerales)	Triángulo del litio (Chile, Argentina, y el Estado Plurinacional de Bolivia)
Depósitos sedimentarios	Depósitos terrestres: sedimentos volcánicos, arcillas ricas en Li, bauxitas, Jadar, lutitas negras. Recursos Oceánicos: nódulos, costras, volcanes de lodo de ferromanganeso submarinos o de aguas profundas.	9%	Rocas minerales de esmectita (arcilla) jadarita (evaporita lacustre) nódulos	Estados Unidos, México, Serbia (Jadar), Perú (Falchani)
Fuentes no convencionales	Reciclaje, desecho de la industria minera de litio-cobalto, depósitos de boratos, entre otros.	1%	-	-

Fuente: Lithium: A review of applications, occurrence, exploration, extraction, recycling, analysis, and environmental impact. (Balaram et al., 2024)

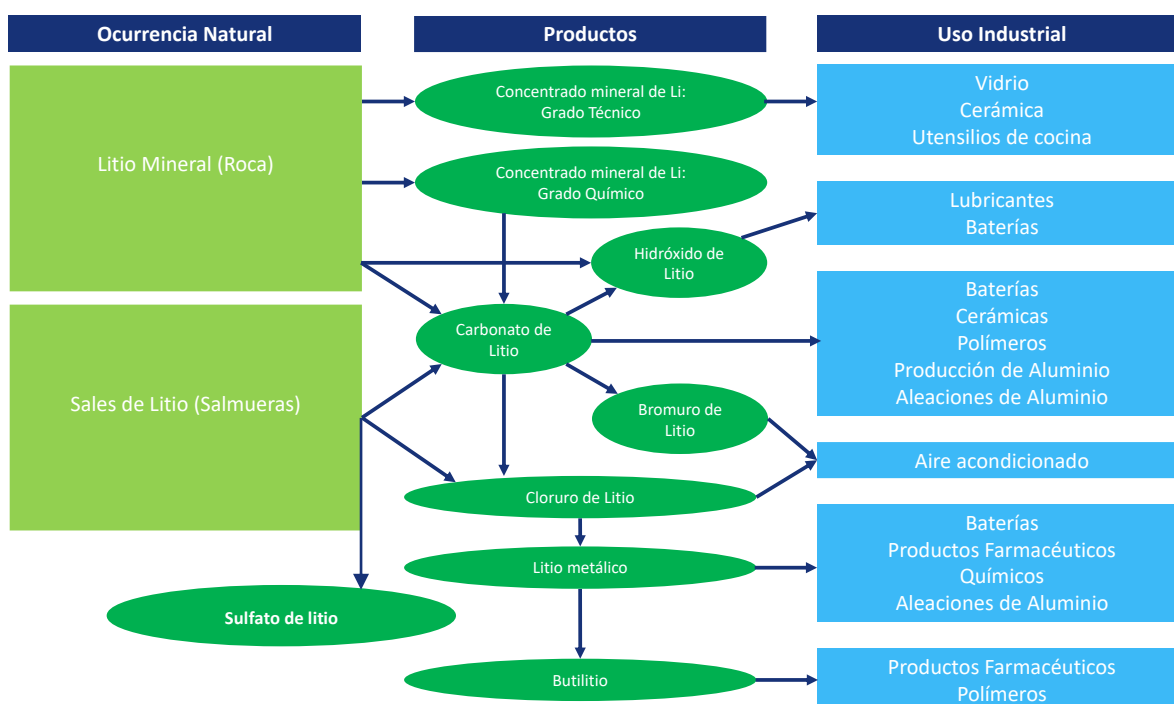
El presente informe considera dentro de su alcance únicamente las salmueras continentales en salares y las pegmatitas en roca, debido a que las concentraciones de litio de estos tipos de yacimiento son mayores y también debido a que son los modos de ocurrencia más comunes.

Desde **minerales de litio** es posible producir concentrado mineral de litio de grado técnico, concentrado de litio de grado químico, hidróxido de litio y carbonato de litio. En cambio, desde **salmuera de litio** se puede producir carbonato de litio y cloruro de litio para la producción de litio metálico, es decir, desde litio mineral se puede conseguir directamente hidróxido de litio o carbonato de litio, pero en el caso de las salmueras el producto menos costoso de producir es el

carbonato. Además, cabe mencionar que los procesos existentes a escala comercial para obtener hidróxido necesariamente utilizan carbonato como input. Este contexto puede cambiar a futuro de acuerdo a las tecnologías en estudio ya que el producir hidróxido a partir de carbonato desde salmueras es algo práctico y no está limitado por restricciones químicas o termodinámicas.

Los productos comercializables principalmente son el hidróxido de litio y carbonato de litio. Sin embargo, existe una variedad más amplia de productos comercializables que se presentan en la Figura 2 de la página siguiente. La medida estándar para medir la cantidad de producto resultante es LCE (Carbonato de Litio Equivalente o del inglés Lithium Carbonate Equivalent).

Figura 2: Cadena de valor del Litio



Fuente: Elaboración propia en base a (Novo Litio Corporate, 2017).

Existen distintos tipos de cátodos, para las baterías de ion-litio donde el más utilizado o producido actualmente es el de ion litio-cobalto el que destaca por sus ventajas tales como, la alta energía específica y rendimiento. Mientras que como desventaja, su baja resistencia y estabilidad ante altas temperaturas, vulnerable a la fluctuación de los precios de cobalto y los posibles impactos ambientales negativos si la batería no es reciclada adecuadamente (CEPAL Obaya & Céspedes, 2021).

La tecnología de extracción y procesamiento de litio se ve determinada por el tipo de depósito mineral que contiene el metal, los cuales tienen características únicas. En particular, se pueden diferenciar entre sí en función de su tamaño, altura cordillerana a la que se ubica, las tasas de carga y descarga de las soluciones del salar, hidrogeología de la cuenca, heterogeneidad de leyes en la química de la salmuera, las granulometrías, las concentraciones de otras especies minerales o impurezas que acompañan al mineral de interés, entre otros.



Lo anterior dado que diferentes procesos geológicos o hidrogeológicos intervinieron en la formación de los depósitos, procesos que son relevantes en la influencia que tienen sobre la química del salar. Es por lo anterior que el litio se puede extraer desde depósitos minerales de roca dura donde la minería desarrollada es similar al proceso extractivo del cobre, mientras que por otro lado también se puede extraer desde salares continentales donde los minerales están concentrados en salmueras en el centro o núcleo de la cuenca del salar.

A continuación, se describen los procesos que permiten la extracción del litio, desde roca y salar con tecnologías tradicionales y los nuevos enfoques para el caso de salares.

2.1. Procesos de extracción a partir de salmueras

De acuerdo con la geología en la que se emplazan los andes centrales, emergen las condiciones de estructura para que se desarrollen diversas cuencas que poseen aguas superficiales circulantes. El volcanismo activo en el sector altiplánico da origen a la formación de depresiones o pequeñas cuencas intra-montañas a alturas cercanas a los 4.000 msnm. Las cuencas se generan bajo condiciones de clima árido con gruesas acumulaciones evaporíticas y salinas (Vargas, 2023).

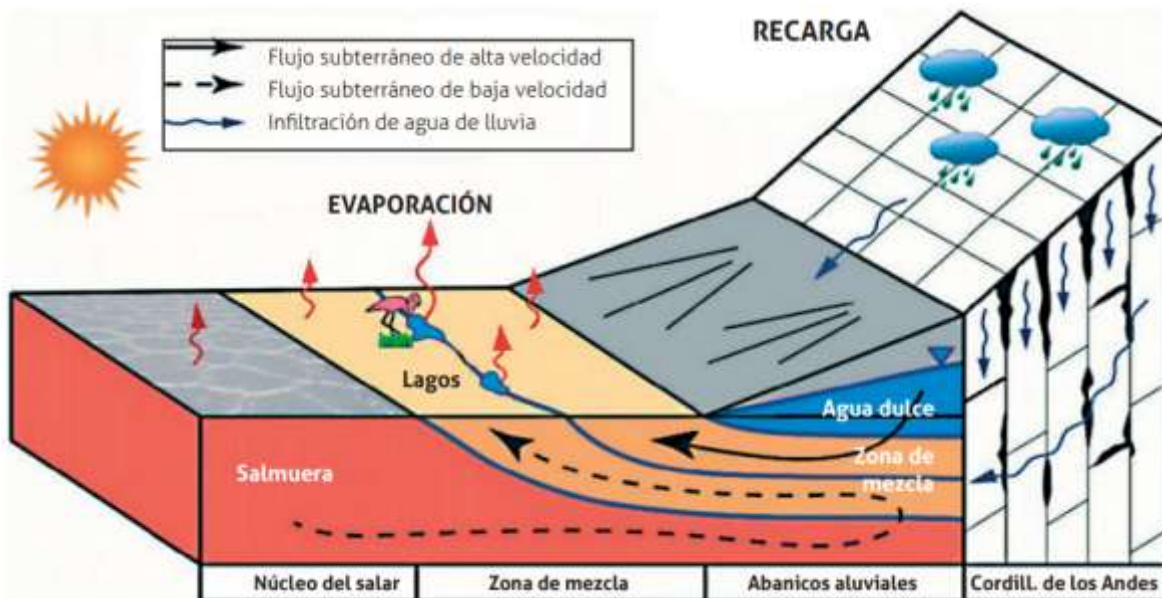
Los salares son un rasgo hidrográfico presente en gran parte de las cuencas endorreicas, ubicados en el punto topográfico más bajo de la superficie de esta. Existe un modelo hidrogeológico aplicable para el general de las cuencas altoandinas que es propuesto por (Rosen, 1994) que las denomina playa y las define como cuencas intracontinentales que presentan balance hídrico negativo, es decir, que la descarga por evaporación en el largo plazo es mayor que la recarga por precipitación y además corresponden a una franja capilar suficientemente somera como para que se produzca el fenómeno de evaporación desde la superficie freática¹.

La **Figura 3** muestra un diagrama de la distribución por zonas del salar, primero se distingue el núcleo del salar donde ocurre la evaporación, la zona de mezcla donde interactúa la salmuera y el agua dulce, abanicos aluviales por donde transita el agua que entra a la cuenca desde los cordones serranos y la cordillera donde ocurren las precipitaciones.

¹ Se corresponde con la distancia entre la superficie de un terreno y un acuífero subterráneo, además se define también como el lugar donde la presión del agua es igual a la de la presión atmosférica.



Figura 3: Modelo Hidrogeológico conceptual de los salares alto andinos.



Fuente: Impactos ambientales de la explotación de litio en los humedales y recursos hídricos del Altiplano (Sticco et al., 2021)

Luego, los salares se conforman de manera local por una fracción líquida que corresponde a salmueras, una fracción salina formada por el depósito de diferentes sales que se trasladan en solución hacia la cuenca y una fracción sólida constituida por variedades de arena, limo y arcilla. Las sales predominantes son cloruros, sulfatos, nitratos, boratos, entre otros (Vargas, 2023).

Debido a la predominancia del fenómeno de evaporación por sobre las precipitaciones, se genera la ocurrencia de depósitos minerales múltiples, en la solución del agua en la cuenca. Solución en la que también se encuentran altas concentraciones de Litio, cuya existencia se propicia debido a las condiciones del medio tanto geológico como medioambiental. Entre estos componentes se tiene el **tectónico** que permite la formación de cordones montañosos que dan origen a cuencas cerradas; el **volcanismo** de siglos pasados que aporta componentes químicos, los que son transportados a las zonas más profundas de la cuenca debido a la circulación de fluidos infiltrados que lixivian rocas volcánicas y el **clima hiper-árido** que propicia altas tasas de evaporación y bajos niveles de precipitaciones que son requeridos para la precipitación de sales (Risacher, 1999).

En el norte de Chile se pueden diferenciar tipos de salares de dos categorías principalmente, que responden a la cantidad de mm/año de precipitaciones y la tasa de evaporación (potencial entre 1.000-2.500 mm/año) que varía en función de la altura. Debido al gradiente de aridez se tienen: **Salares de la costa y el Valle central** donde se encuentran salares inactivos, fósiles, con costras de sales muy secas. En esta zona se encuentran los depósitos de nitratos y yodo; **Salares de la Cordillera de los Andes** los que están activos recibiendo aportes de agua de su cuenca de drenaje concentradas por evaporación en lagunas superficiales donde precipitan sales evaporíticas (Risacher, 1999).

Desde los salares de la cordillera se distinguen además salares activos **tipo costra** y **tipo playa**. Los primeros son costras de sales porosas y permeables con sales intersticiales en contraste a las costras secas del valle central. Se componen de halita (NaCl) o de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y se ubican en la



precordillera a alturas inferiores a 3.500 m ejemplos de ellos son los salares de Atacama, Punta Negra, Pedernales. Los tipo playa se constituyen de sedimentos salinos finos y casi impermeables sobre los cuales se extienden lagunas someras de extensión muy variable, dentro de los sedimentos existe una napa de salmuera sin conexión con las lagunas superficiales, se encuentran en el altiplano o alta cordillera. Algunos salares son combinaciones complejas de estos dos tipos como el de Atacama que se constituye de un núcleo de halita rodeada por una zona de limos salinos.

En la sección Anexos se muestran las ubicaciones por región de los salares y/o lagunas salinas del norte de Chile.

2.1.1. Extracción de litio desde salmueras mediante evaporación

La extracción de litio desde salmueras a través del proceso convencional ha sido mediante la evaporación de la salmuera y agregado de cal-soda. La operación inicia con el bombeo de la salmuera desde la profundidad del salar, la que es dispuesta en piscinas de evaporación y además en la medida que transcurre el tiempo de proceso va siendo traspasada a piscinas con mayores concentraciones de litio hasta que se alcanza la concentración deseada alrededor de 6% wt. Estas pozas o piscinas de precipitación son de enorme extensión y poca profundidad, en ellas se dispone carpetas de polietileno para evitar la infiltración a capas de suelo inferiores. El periodo para concentrar una salmuera que alcance la concentración objetivo y pase a la planta de carbonato de litio puede ser 12, 18 o 24 meses bajo la radiación solar (Calvo, 2022) (G. Liu et al., 2019).

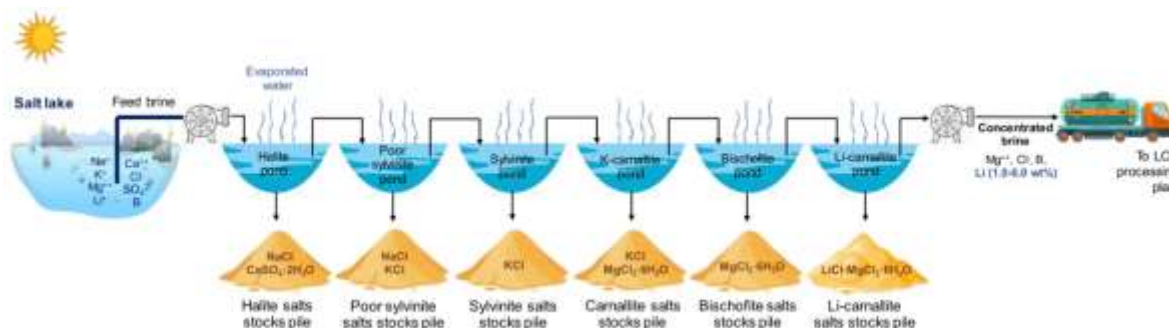
El proceso de evaporación y la química del salar están relacionados directamente, ya que hay algunas especies minerales que precipitan antes que otras. El modelo de evolución de la composición química de las aguas a raíz de la evaporación fue establecido por (HARDIE LA & EUGSTER HP, 1970) quienes mencionaron que cuando el agua se evapora, sus componentes disueltos se concentran y precipitan una secuencia de minerales según un orden que responde a las solubilidades crecientes, por lo tanto, primero precipitan los minerales con menor solubilidad y más hacia el centro precipitan los minerales con mayores solubilidades. Es por esta razón que los salares presentan zonaciones características, donde los primeros minerales en precipitar son los carbonatos, luego los sulfatos y finalmente los cloruros, los cuales tienen las mayores solubilidades (Vargas, 2023).

El orden de evaporación es el siguiente y se puede observar en el diagrama de la Figura 4:

1. La Halita (NaCl) y el Sulfato de Calcio (CaSO_4)
2. Silvinita pobre ($\text{NaCl} \cdot \text{KCl}$) (Contiene mucha halita)
3. Silvinita rica (KCl) (Contiene muy poca halita)
4. Carnalita ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
5. Bischofita ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
6. Carnalita de Litio ($\text{LiCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)



Figura 4: Proceso convencional de concentración y purificación de litio desde salar mediante piscinas de evaporación



Fuente: *Technological tendencies for lithium production from salt lake brines: Progress and research gaps to move towards more sustainable processes* (Fuentelba et al., 2023)

Las sales residuales que van quedando en cada etapa de concentración de la salmuera mediante la evaporación pueden alojar cantidades significativas de litio, por ejemplo, en base húmeda la Bischofita puede tener una ley de litio alrededor de 0.16%, mientras que la Carnalita puede rondar en valores de 2-2.5%, 4-5.5% de litio, en función de la química del salar. Es decir, luego de la cosecha queda un material remanente de descarte, pilas de sales con un contenido de litio considerable, pero el cual no se vuelve a procesar debido a que generalmente las compañías no contemplan como rentable su reprocesamiento.

Por otro lado, las especies o iones disueltos en la salmuera afectan la recuperación de litio en este método tradicional en particular el magnesio. Salares con alta concentración de magnesio debe ser una señal de alerta si se quiere usar evaporación ya que aproximadamente un 50% del litio se perdería en las últimas piscinas con magnesio disminuyendo la recuperación. Una relación Mg/Li de entre 10-12 es significativa para bajar el rendimiento de la evaporación para concentrar litio (Mohr et al., 2012).

Existen factores claves que determinan la viabilidad de extracción de litio a partir de salmueras mencionados a continuación (Schwarz & Pérez, 2013).

- Concentración de litio: Decide sobre la cantidad de sales recuperables de litio.
- Superficie del salar: La extensión de un salar determina la cantidad de salmueras disponibles.
- Concentración de potasio: El potasio es un co-producto de la extracción de litio y aumenta el margen de ganancias, bajando los costos operacionales.
- Relación entre magnesio y litio: Una mayor concentración de magnesio aumenta el consumo de cal para precipitar Mg, promueve la formación de Carnalita de Li y también puede encarecer la recuperación de litio al requerirse una mayor superficie de evaporación solar para concentrar las sales de magnesio y separarlas por cristalización.
- Clima: Se requiere un clima árido para el uso de la evaporación solar como método extractivo; es decir, la tasa de precipitación debe ser muy inferior y la tasa de evaporación mayor.

En este proceso convencional de extracción de litio la pérdida de agua por evaporación contenida en la salmuera representa entre un 85 a 95% (Cerde et al., 2021). Esto representa una desventaja significativa de este método de extracción ya que el agua perdida de las salmueras, considerando la producción chilena de LCE y un balance hídrico general, la cantidad varía entre 18.000 y 60.000 m³/día (200 - 1.400 m³ de agua por tonelada de Li contenida en la salmuera extraída) dependiendo de la concentración inicial de litio (Cerde et al., 2021), la que generalmente en Atacama es alrededor de entre 0,04% a 0,2%.

La salmuera tiene una composición variada de elementos disueltos como potasio, sodio, calcio, magnesio, boro, cloro, nitratos, cloruros, sulfatos y carbonatos. La Tabla 2 muestra la concentración de especies presentes en una muestra de salmuera típica del salar de Atacama.

Tabla 2: Composición característica salmuera del Salar de Atacama

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (%)
Li	0.17
Mg	1.03
K	2.18
Na	7.26
Ca	0.04
Cl	14.72
B	0.05

Fuente: (An et al., 2012; Grosjean et al., 2012; British Geological Survey, 2016)

2.1.2. Tecnologías de extracción directa de litio (DLE)

La extracción directa de Litio es el conjunto de tecnologías que surgen impulsadas por el aumento de la demanda del metal y también en respuesta a las limitaciones del proceso de evaporación convencional para recuperar litio desde salares.

Estas tecnologías buscan capturar el ion litio selectiva y eficientemente desde una matriz acuosa con otros componentes ya sea salmuera de salar, geotermal o agua de mar (Estay, 2023); logrando mayores recuperaciones del metal en menores tiempos de procesamiento para la producción de carbonato o hidróxido de litio.

La Figura 5 muestra un diagrama simplificado general de las operaciones unitarias por las que transita la salmuera para la obtención de un producto comercial de litio. Cabe mencionar que la extracción de cloruro de litio puede requerir pretratamiento de la salmuera dependiendo de la tecnología a utilizar.



Figura 5: Diagrama simplificado proceso de extracción directa de litio



Fuente: Elaboración propia en base a curso MI 7009 Minería de Litio (Estay, 2023)

i. Adsorción

El proceso de adsorción se define como una operación que tiene la capacidad de extraer o retener selectivamente al Li^+ en una estructura sólida con ciertas características químicas. La adsorción es la adhesión de átomos, iones o moléculas en una superficie sólida, desde un líquido o gas disuelto. Esto genera una capa del material adsorbido en la superficie del material adsorbente. Una de las variables relevantes para definir el adsorbente es el área específica de contacto (Estay, 2023).

La tecnología de adsorción para la extracción directa de litio es de las más desarrolladas globalmente con uso a escala comercial en varios proyectos. En este proceso de extracción, las moléculas de cloruro de litio (LiCl) de la salmuera infiltran hacia la superficie de las capas atómicas de un adsorbente. Una vez que el LiCl llena las capas intersticiales del adsorbente este es removido con una solución, generalmente agua templada o caliente. Luego con el sorbente cargado con el cloruro de litio, este lavado con una solución diluida de cloruro de litio para remover iones no deseados, para posteriormente generar un nuevo lavado donde se descarga el cloruro de litio concentrado. (Goldman Sachs, 2023)

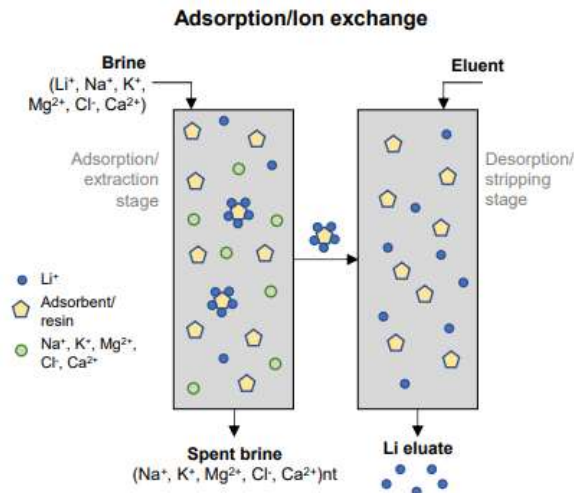
Este tipo de extracción directa se basa en el uso de adsorbentes inorgánicos, que pueden ser hidróxidos (de Al) u óxidos de metales de transición (Al, Mn, Ti) que tienen la capacidad de interactuar selectivamente con el Cloruro de Litio (Park et al., 2016). Esto se basa en que son los mismos materiales que tienen las baterías de ión-litio. Los investigadores observaron que el óxido de manganeso puede contener al Litio, por lo que también podría contener al cloruro de Litio (Nishihama & Onishi, 2013). Los compuestos adsorbentes suelen ser polvos por lo que se necesita de un soporte, los que pueden ser gránulos, esponjas o membranas (Xu et al., 2021)

La primera solución de lavado es una solución que no tiene Litio. Esta solución de descarga requiere incorporar agua fresca, por lo que este proceso puede tener un uso exhaustivo de recursos hídricos (Zhang et al., 2007)

La Figura 6 muestra un diagrama del proceso de adsorción donde el litio se adhiere al adsorbente para luego ser eludido en una etapa de lavado y descarga de la solución del litio concentrado.



Figura 6: Diagrama del proceso DLE de adsorción para procesar litio



Fuente: (Fuentealba et al., 2023)

ii. Intercambio Iónico

El proceso de intercambio iónico corresponde a una operación donde se sustituye uno o varios iones de una disolución por otros que conforman en un principio, parte de la estructura de un sólido, denominada resina de intercambio iónico, dependiendo si intercambian aniones o cationes pueden ser resinas catiónicas o aniónicas (Estay, 2023). Se puede considerar una variante similar al principio de funcionamiento de la adsorción, pero con resinas como medio de extracción de Li. Conforme la salmuera pasa por el lecho de resina ocurre un intercambio iónico donde los iones inocuos de la resina reemplazan a los iones que se desea eliminar o extraer de la salmuera. La adsorción por intercambio iónico se basa en el desarrollo químico de una tecnología denominada *ion-sieve* o tamices iónicos, así este se caracteriza por usar un material capaz de intercambiar un ion desde su estructura, generalmente un protón H^+ , por un ion Li^+ (G. Liu et al., 2019). En la Figura 7 se observa un diagrama de este proceso.

La selectividad del litio sobre otros cationes (iones positivos) contenidos en la salmuera tales como Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , es debido al pequeño tamaño del ion litio y a la cavidad que los recibe en el adsorbente anfitrión. Si bien los radios iónicos de los iones hidratados de litio y magnesio son similares (0,74nm vs 0,72 nm) lo que permite la selectividad está relacionado con la energía de hidratación que liga al catión con las moléculas de agua circundantes, la cual es mucho mayor para el Mg^{2+} que para el Li^+ (1.900 vs 475 kJ/mol). El ion litio hidratado necesita perder el agua de hidratación que lo rodea en el medio acuoso, para incorporarse al óxido absorbente por lo que el proceso es lento, superior a 24 horas (Calvo, 2022).

En un estudio se identificaron 4 óxidos principales: Li_2MnO_3 , $\text{Li}_4\text{Mn}_5\text{O}_{12}$, $\text{Li}_7\text{Ti}_{11}\text{O}_{24}$, Li_3VO_4 ; que pueden intercambiar litio por hidrogeno, siendo estables en soluciones acuosas de salmueras. La recuperación de cloruro de litio ocurre mediante la incorporación de ácido clorhídrico e intercalando nuevamente el hidrógeno en el óxido.

La Tabla 3 a continuación, contiene estudios recientes sobre la capacidad de ciertos materiales para la extracción selectiva de litio, tales como sorbentes basados en aluminio y de manganeso o titanio

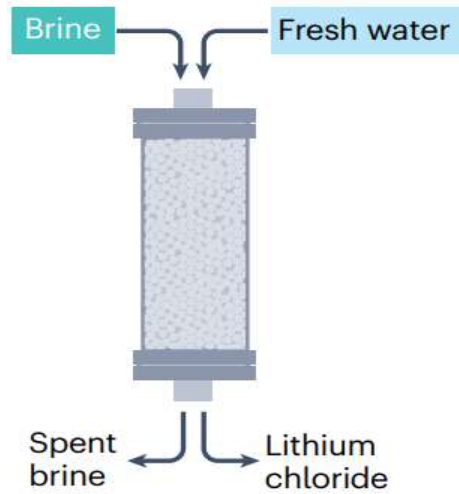
los que involucran intercambio iónico. Estos estudios se realizaron para diferentes condiciones operativas, incluida la concentración inicial de litio, la temperatura, el pH y la dosis de adsorbente.

Tabla 3: Materiales con capacidad de extracción de litio

SORBENTE	OPERATING CONDITIONS			Dosis de Sorbente (g/L)	CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE LITIO (mg/g)	TIEMPO DE EQUILIBRO (h)
	Concentración de Litio inicial (mg/L)	Temperatura K	pH			
Granulated Li/Al-LDHs	1400	298	8	80	14.5	4
Li/Al-LDHs	399	303	7	–	7.3	2
Al(OH) ₃	1150	295	4.5	1.15	8.0	4.5
Magnetic LiAl-LDHs	397.14	298	–	33.33	5.7	4
Magnetic LiAl-LDHs	397.14	298	–	33.3	5.8	4
Granulated LiAl-LDHs-SLS	300	298	7	10	8.5	0.66
Granulated LiAl-LDHs-SLS	1000	298	7	60	11.8	3
Granulated LiAl-LDHs	500	298	6	10	9.7	3
Li _{1.6} Mn _{1.6} O ₄ – 4%Al	600	–	12.4	1	46.8	–
Li _{1.6} Mn _{1.6} O ₄ – 4%Mg	600	–	12.4	1	45.8	–
Li ₄ Mn ₅ O ₁₂ powder	300	298	6.5–7	1	37.9	28
Granular epoxy and Li ₄ Mn ₅ O ₁₂	300	298	6.5–7	1	30.2	28
Branched rod-like Li _{1.6} Mn _{1.6} O ₄	150	298	11	1	43.8	24
Normal rod-like Li _{1.6} Mn _{1.6} O ₄ -	150	298	11	1	35.3	24
Li _{1.6} Mn _{1.6} O ₄	41.6	298	12	1	25.9	48
Optimized LiAl _{0.1} Mn _{1.9} O ₄	50	298	8	1.25	32.4	12
LiMn ₂ O ₄	50	298	8	1.25	27.7	12
Al-doped Li _{1.6} Mn _{1.6} O ₄	347	298	–	5	32.6	24
Undoped Li _{1.6} Mn _{1.6} O ₄	347	298	–	5	27.6	24
RGO/Ni ₃ -doped MnO ₂	50	303	12	0.4	63.0	10
Cross-linked chitosan/ Li ₄ Mn ₅ O ₁₂	25.78	313	12	5	8.9	24
Fe-doped Li ₂ TiO ₃	1800	298	12	5	53.3	20
Undoped Li ₂ TiO ₃	1800	298	12	5	50.5	20
Li ₂ TiO ₃	694	298	9.5	1	40.0	24
H ₂ TiO ₃ @ carbon aerogel	100	298	8	1	30.3	24
Yolk-shell structured- TiO ₂	–	298	13.1	5	28.5	2
LiTi ₂ O ₄	100	298	7	1	9.5	24
H _x TiO ₃	1560	303	8.8	5	36.3	24
Porous H ₄ Ti ₅ O ₁₂ nanofibers	300	298	11	1	59.1	0.5
Fe-doped H ₂ TiO ₃	1560	298	8.8	5	34.8	24

Fuente: (Farahbakhsh et al., 2024)

Figura 7: Proceso DLE de extracción para la recuperación de litio mediante resinas de intercambio iónico, también conocidas como tamices iónicos.



Fuente: (Vera et al., 2023a)

iii. Extracción por solventes

Este proceso se define como una operación con la capacidad de extraer selectivamente al Li^+ a través del uso de un reactivo generalmente orgánico, a través de una reacción química. Técnicamente es una transferencia selectiva que permite concentrar iones desde una fase acuosa impura a otra fase acuosa donde el medio de transporte utilizado es una fase orgánica (Estay, 2023). En la Figura 8 se muestra un diagrama del proceso en una etapa contracorriente, en la práctica suelen ser varias etapas.

La salmuera es puesta en contacto con el extractante, en varias etapas para la remoción del magnesio, obteniendo un refinado cargado de litio con bajo contenido de Mg desde donde el Li precipita a carbonato de litio. La fase orgánica cuando está cargada con litio se limpia o descarga con agua (etapa de stripping o desorción) (Li et al., 2019), mientras que en la fase acuosa quedan grandes cantidades de iones que no son de interés. La retro extracción de la fase orgánica, generalmente con soluciones ácidas, puede transferir este ion nuevamente al agua, permitiendo aislar la sal metálica de litio pura de los componentes orgánicos del proceso de extracción (Kanagasundaram et al., 2024).

La cantidad de extractante depende directamente de la concentración de Litio en la salmuera, lo que implicaría eventualmente, dependiendo del yacimiento que también sería necesario la utilización de piscinas de evaporación u otras opciones de pre-concentración para concentrar previamente las soluciones antes de su paso por planta. Los extractantes orgánicos son varios y muchas veces no se utiliza un único extractante, se puede utilizar una mezcla de ellos, líquidos iónicos y membranas para separar las fases (Kanagasundaram et al., 2024).

La eficiencia y éxito de extraer el litio mediante esta tecnología se determina por la eficiencia de extracción (EE), este coeficiente se define como el porcentaje de iones metálicos que se reparten



en la fase orgánica y se determina a partir de la concentración del metal en la fase acuosa después de la extracción.

En la extracción líquido- líquido, un tipo de extractante son los calixarenos, los cuales poseen cavidades hidrofóbicas que pueden albergar moléculas dependiendo del tamaño ion que se requiera extraer. El orgánico tiene que estar disuelto en un solvente orgánico, que no se mezcle con agua, y además tenga afinidad hacia el Litio. Por lo tanto, es clave que el extractante orgánico recoja únicamente al Li^+ y no al Mg^{+2} , que son muy similares en tamaño (Rajpurohit et al., 2024).

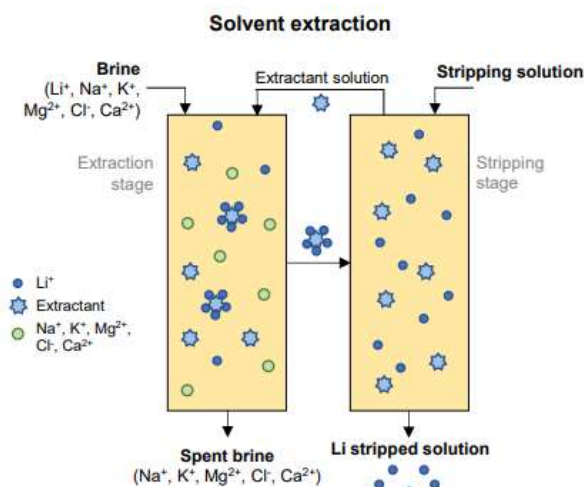
Según estudios mencionados en (G. Liu et al., 2019), generalmente el sistema de extracción por solventes con β -dicetona y ligando neutro tiene un excelente rendimiento para la extracción y separación de Li de iones de metales alcalinos. La Tabla 4 a continuación muestra algunos sistemas sinérgicos de extracción de esta configuración.

Tabla 4: Sistemas de extracción sinérgicos con β -dicetona y ligandos neutros en extracción por solventes para la extracción de litio.

EXTRACTANTE β -DIKETONE	LIGANDO	SOLVENTE	CHARACTERISTICAS	ESPECIE EXTRAÍDA	REFERENCIA
LIX54(HA)	Cyanex923	ShellSol D70	Selecciona Li^+ sobre Na^+	Li(A)(Cyanex923)	Pranolo et al.,(2015)
LIX54(HA)	TOPO	Kerosene	Selecciona Li^+ sobre Na^+	$\text{Li(A)(TOPO)}_{1.3}$	Kinugasa et al.,(1994)
LIX51(HA)	TOPO	Kerosene	Metales Alcalinos	$\text{Li(A)(TOPO)}_{1.3}$	Kinugasa et al.,(1994)
HTTA(HA)	TOPO	m-xylene	Metales Alcalinos	Li(A)(TOPO)_2	Kim et al.,(2003)
HTTA(HA)	DMP	Clorobenceno	Metales Alcalinos	Li(A)(PHEN)	Ishimori et al.,(2002)
TTA(HA)	L=TOPO/TBP/DBA/TPPO/EHA/NM	Benceno	Metales Alcalinos	Li(A)(L)_2	Healy,(1968,1969)
TTA(HA)	TOPO	Keroseno	Agua de mar	Li(A)(TOPO)_2	Harvianto et al., (2014)
DBM	TOPO	p-xylene	Metales Alcalinos	Li(DBM)_2 (TOPO) Li_2 (DBM) $_2$ (HDBM) $_2$ (TOPO) $_4$	Lee et al.,(1968)
1,3-diphenyl-1,3-propanedione) (HA)	TOPO	Dodecano	Metales alcalinotérreos	Li(A)(TOPO)_2	Seeley and Baldwin (1976)
1-phenyl-3-methyl-4-acyl-pyrazol-5-one(HA)	TOPO	Benceno/ciclohexano	Metales alcalinotérreos	Li(A)(TOPO)_2	Umetani et al.,(1982)
4-acyl-5-pyrazolones (HA)	TOPO	Benceno	Metales Alcalinos	Li(A)(TOPO)_2	Mukai et al.,(1989)
1-Phenyl-3-methyl-4-benzoylpyrazol-5-one(HA)	TOPO	Benceno/ciclohexano	Metales alcalinotérreos	Li(A)(TOPO)_2	Bukowsky and Uhlemann (1992)

Fuente: (G. Liu et al., 2019)

Figura 8: Proceso DLE para concentrar litio a través de extracción por solventes



Fuente: (Fuentealba et al., 2023)

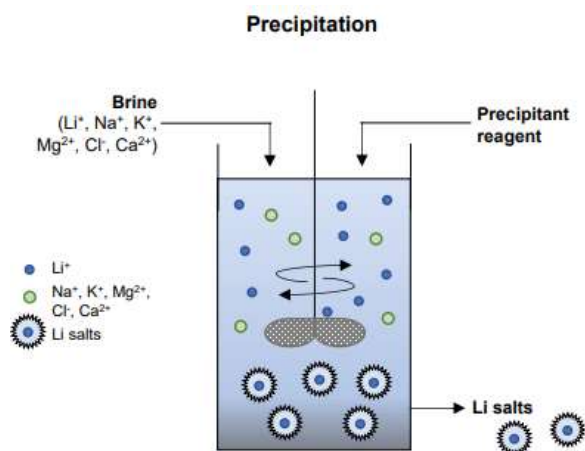
iv. Precipitación

La precipitación química es una operación que se basa en la generación de un producto con baja solubilidad en estado sólido, mediante una reacción química de un ion presente en una solución y un reactivo. Posteriormente el compuesto precipitado es recuperado de la solución con etapas de separación sólido-líquido como la filtración o centrifugación. La Figura 9 muestra un diagrama de este proceso donde se utiliza un reactivo precipitante para obtener sales concentradas de litio.

Además, este proceso tecnológico puede incorporar un agente modificador de la solubilidad de especies disueltas o modificaciones de pH. La precipitación se ha utilizado en general para la eliminación de impurezas desde soluciones en circunstancias operacionales controladas, ya sea para mantener un elemento de interés en solución o recuperar metales de valor desde una fase con varias impurezas.

Un ejemplo, de esta DLE es, en el cual se utiliza la precipitación de fosfato de litio previo a una etapa de electrodiálisis. Dado que la solubilidad el fosfato de litio es menor que la del carbonato se propuso precipitar el fosfato de litio desde salmuera con ácido fosfórico en medio alcalino luego de eliminar cationes Mg²⁺ y Ca²⁺. Luego el producto resultante se electroliza para obtener un hidróxido de litio y recuperar el ácido fosfórico (Calvo, 2022).

Figura 9: Diagrama del proceso DLE de extracción de litio por precipitación.



Fuente: (Fuentelba et al., 2023)

Otra tecnología para la extracción de iones de litio de las salmueras es la SuperLig: Molecular Recognition Technology (MRT), desarrollada por la empresa estadounidense IBC Advanced Technologies Inc. (Izatt et al., 2010). Esta tecnología se basa en el reconocimiento molecular específico mediante moléculas macrocíclicas disueltas en un solvente orgánico no miscible con agua. Estas moléculas presentan cavidades del tamaño del ion Li^+ cuando está libre de otras especies, cavidades que actúan como anfitrionas para este ion huésped, a través de interacciones con átomos de oxígeno. Actualmente, esta tecnología está siendo evaluada en una planta piloto ubicada en Tierra Amarilla para el proyecto del Salar de Maricunga, Chile, y se afirma que no requiere etapas separativas previas. El proceso continuo promete una alta velocidad de recuperación del litio y una gran capacidad de extracción (Calvo, 2022).

v. Electroquímicos

Las tecnologías basadas en fenómenos electroquímicos hacen uso de un potencial eléctrico externo para promover la migración de iones hacia un cátodo que posee un material adsorbente selectivo, también llamado bombas electroquímicas de iones. Se denomina proceso de electro membranas cuando se utiliza una membrana selectiva (Estay, 2023). En la Figura 10 se observa un diagrama de la extracción de litio mediante método electroquímico.

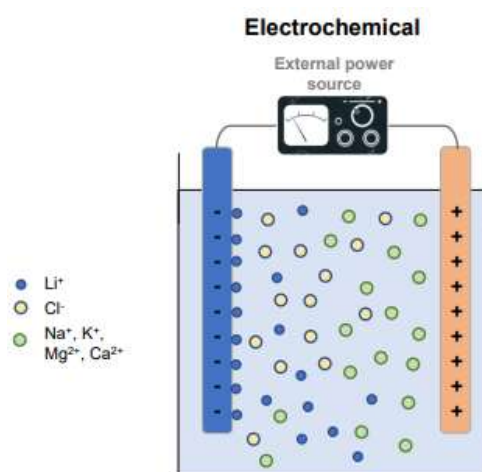
En los 90 se introdujeron materiales de intercalación de litio usados en baterías de ion litio tales como el LiMn_2O_4 para la recuperación selectiva de litio desde agua de mar. Luego en 2012 investigadores propusieron un sistema electroquímico para la recuperación de litio desde salmuera artificial (creada en laboratorio) el que combina un cátodo de intercalación reversible a litio y un ánodo de plata que absorbe iones cloruros al pasar una corriente eléctrica por la celda de electrolisis.

Existen dos variantes del método electroquímico para el bombeo de iones de litio: el intercambio iónico y la captura iónica. En el caso del primero, se utilizan dos electrodos tridimensionales porosos de LiMn_2O_4 con variados contenidos de litio, separados por una membrana semipermeable a iones negativos (como los cloruros). El electrodo con menor contenido de litio, al estar en contacto con la salmuera natural, extrae iones de litio por intercalación, mientras que los cloruros migran a través de la membrana hacia el otro compartimento. En este compartimento, los iones de litio en el



electrodo con mayor contenido se liberan a la solución de recuperación, lo que resulta en un aumento en la concentración de cloruro de litio. En la variante de captura iónica, un electrodo poroso de LiMn_2O_4 extrae litio de la salmuera, mientras que un electrodo de polipirrol capta iones cloruro en una celda sin divisiones ni membranas. Posteriormente, al invertir la corriente aplicada, se producen los procesos inversos, permitiendo la recuperación de cloruro de litio de alta pureza (Calvo, 2022).

Figura 10: Diagrama proceso electroquímico donde el litio se concentra en el cátodo.



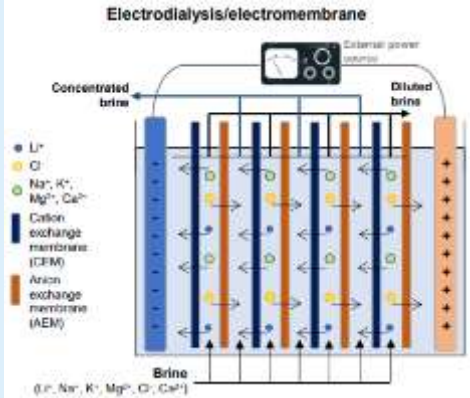
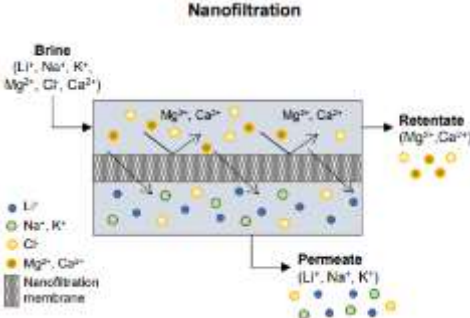
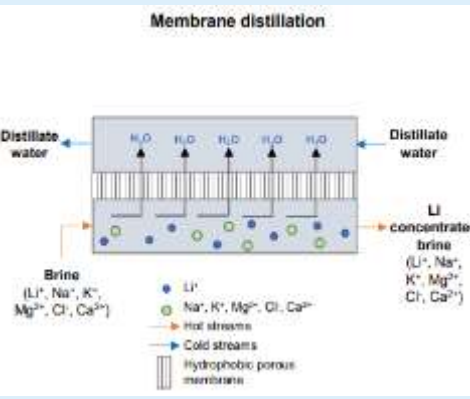
Fuente: (Fuentealba et al., 2023)

2.1.3. Tecnologías de concentración de salmuera (LBC)

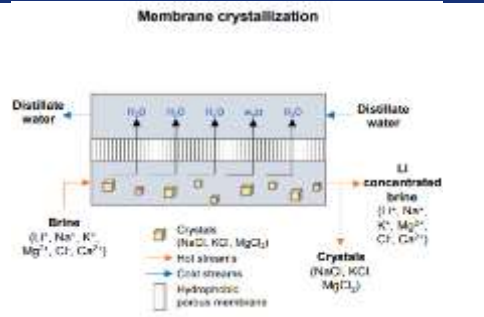
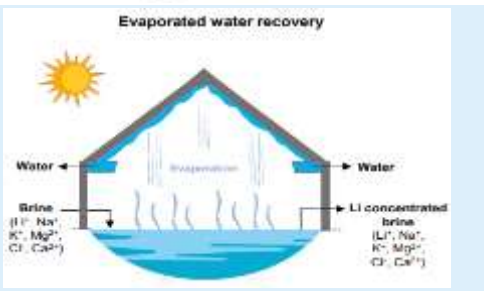
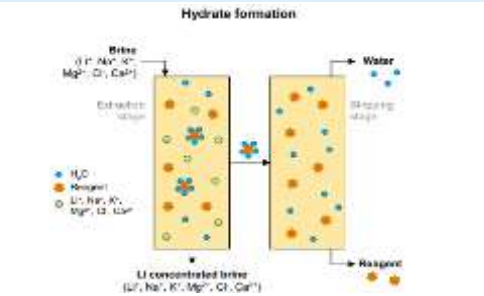
Los procesos para concentrar salmueras corresponden al conjunto de operaciones que permiten concentrar al litio en el medio acuoso de la salmuera, fluido termal o agua de mar donde este metal se encuentra disuelto. Lo anterior ocurre mediante la remoción de agua, la separación o mezcla de la misma salmuera (Estay, 2023). La salmuera concentrada podría pasar directamente a la producción de carbonato o hidróxido de litio o ser una etapa previa de preprocesamiento de la salmuera para minimizar impurezas antes de entrar a un proceso de extracción directa o también podría ser una combinación de estos procesos unitarios conformando un proceso de planta incluyendo las DLE de la sección anterior como un paso clave para la extracción directa de litio.

Entre las tecnologías usadas para la concentración de salmueras de litio se tiene: electrodiálisis, nanofiltración, destilación por membranas, cristalización por membranas, recuperación de agua evaporada, formación de hidratos (Fuentealba et al., 2023). La Tabla 5 presenta un resumen de estas tecnologías de concentración de su principio de operación y sus diagramas respectivos.

Tabla 5: Procesos tecnológicos de concentración de salmueras para acondicionarlas a DLE

TECNOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	DIAGRAMA
Electrodiálisis /Electromembrana	<p>Se utiliza un gradiente de potencial eléctrico para promover la transferencia de cationes y aniones a los electrodos. Se utilizan membranas de intercambio iónico para separar cationes y aniones para generar una salmuera de Li purificada. Este sistema también ha sido estudiado, integrándose con precipitación para eliminar las impurezas de la salmuera.</p>	 <p>The diagram illustrates an electrodialysis stack. It consists of a series of alternating cation exchange membranes (CEM) and anion exchange membranes (AEM). Brine containing Li^+, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Cl^-, and Ca^{2+} is fed into the compartments. Under the influence of an external power source, Li^+ and Na^+ cations migrate towards the cathode, while Cl^- and Ca^{2+} anions migrate towards the anode. This process results in a concentrated brine stream and a diluted brine stream.</p>
Nanofiltración	<p>Se utiliza una membrana hidrófila polimérica que separa iones monovalentes y divalentes para producir un permeado concentrado de salmuera de Li. La fuerza impulsora de este proceso es la presión transmembrana. Este proceso ha sido estudiado para separar Li^+ de Mg^{2+}.</p>	 <p>The diagram shows a nanofiltration membrane separating brine. The feed brine contains Li^+, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Cl^-, and Ca^{2+}. The membrane allows monovalent ions (Li^+, Na^+, K^+) to pass through as permeate, while divalent ions (Mg^{2+}, Ca^{2+}) are retained as retentate.</p>
Destilación por membranas	<p>Una membrana hidrofóbica polimérica separa la salmuera de Li de una fase acuosa o aire. El calor de la salmuera a temperaturas superiores a 35 °C permite la transferencia de agua en forma de vapor a la otra fase a través de los poros de la membrana, recuperando el agua y concentrando la salmuera. La fuerza impulsora de este proceso es el gradiente de presión parcial del agua.</p>	 <p>The diagram depicts a membrane distillation process. Brine containing Li^+, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Cl^-, and Ca^{2+} is heated. Water vapor (H_2O) passes through a hydrophobic porous membrane to a cooler side, where it condenses as distillate water. The remaining brine is concentrated into Li concentrated brine.</p>



TECNOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	DIAGRAMA
Cristalización por membranas	Como la destilación por membrana, pero incluye la posibilidad de concentrar la salmuera hasta una condición de sobresaturación, donde se forman cristales en el lado de la salmuera. La velocidad del flujo permite la eliminación continua de cristales.	 <p>The diagram illustrates the membrane crystallization process. It shows a feed stream of brine (containing Li^+, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Cl^-, and Ca^{2+}) entering a system with hydrophobic porous membranes. On one side of the membrane, the brine is concentrated, leading to the formation of crystals ($NaCl$, KCl, $MgCl_2$). On the other side, distillate water is produced. A legend identifies the components: Crystals ($NaCl$, KCl, $MgCl_2$), Not shown, Colloid streams, Hydrophobic porous membrane, and Crystals ($NaCl$, KCl, $MgCl_2$).</p>
Recuperación agua evaporada	Un sistema diseñado específicamente para recuperar el agua evaporada de las piscinas de evaporación solar como condensado, por ejemplo, un sistema de destilación solar de doble pendiente.	 <p>The diagram shows a solar evaporated water recovery system. It features a double-sloped roof structure over a pool of brine. The sun's rays cause evaporation of water from the brine. The evaporated water is collected on the roof and then condensed into a collection tray. The condensed water is then directed to a storage tank. The remaining brine in the pool is labeled as 'LI concentrated brine' containing Li^+, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Cl^-, and Ca^{2+}.</p>
Formación de Hidratos	Se utiliza un reactivo que puede hidratarse con agua para concentrar la salmuera de Li mediante el vínculo entre el agua y el reactivo específico, por ejemplo, ciclopentano.	 <p>The diagram illustrates the hydrate formation process. It shows two stages: 'Extraction stage' and 'Stripping stage'. In the extraction stage, brine (containing Li^+, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Cl^-, and Ca^{2+}) is mixed with a reagent (represented by orange circles) and water (H_2O, represented by blue circles). This results in 'LI concentrated brine' containing Li^+, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Cl^-, and Ca^{2+}. In the stripping stage, the concentrated brine is mixed with water, and the reagent is removed, resulting in 'Water' and 'Reagent'.</p>

Fuente: (Fuentealba et al., 2023)



2.2. Procesos de extracción a partir de minerales de litio

Los minerales de Litio representan un 26% de los recursos globales de los yacimientos que contienen Litio (U.S. Geological Survey, 2024), se pueden encontrar generalmente asociados en pegmatitas como aluminosilicatos. Los principales minerales de Litio, su contenido teórico según su composición química molar y el rango aproximado en que se encuentran en las menas se encuentran en la Tabla 6 a continuación.

Tabla 6: Contenido de Litio en las principales menas de espodumeno

MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA	CONTENIDO TEÓRICO DE LITIO SEGÚN COMPOSICIÓN QUÍMICA MOLAR (% WT)	RANGO APROXIMADO DE LITIO EN LA MENA (%WT)
Espodumeno	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$	3.73	2.6 - 3.0
Lepidolita	$\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$	3.51	1.4 - 1.9
Ambligonita	$\text{LiAlPO}_4(\text{F},\text{OH})$	4.42	3.7 - 4.2
Petalita	$\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$	2.09	1.4 - 2.2
Zinnwaldita	$\text{KLiFe}^{+2}\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$	1.42	*
Arcilla Hectorita	$\text{Na}_{0.3}(\text{Mg},\text{Li}_3)\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	2.02	*
Arcilla Montmorillonita	$(\text{Na},\text{Ca})_{0.33}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Variable	*

(*): Sin información

Fuente: (Crocker et al., 1987)

El proceso de extracción de los minerales de Litio corresponde a una explotación mineral convencional, cuyas etapas incluye desde la prospección y exploración donde se consigue reconocer el yacimiento general e indagar detalladamente en su composición, a través de diversos métodos tales como la fotogrametría o la perforación de sondajes. Una vez que los recursos y reservas de este yacimiento son considerados económicamente rentables, se continúa con las fases de construcción, puesta en marcha y operación de la faena, que generalmente suele ser de mediante minería a cielo abierto. La operación se realiza por etapas de perforación, tronadura, y transporte, donde al finalizar cada una de estas etapas se tritura el mineral mediante fuerzas mecánicas en Chancado y/o Molienda.

Entre los minerales de Litio, aquel que ha sido más explotado de modo comercial y procesado alrededor del mundo es el espodumeno. Este mineral es un aluminio-silicato del grupo de los piroxenos, la composición mineralógica típica se puede observar en la Tabla 7.

Tabla 7: Composición mineralógica típica de una muestra mineral de espodumeno

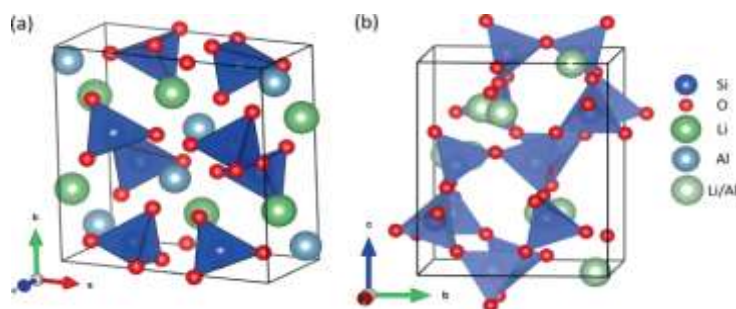
MINERAL	PORCENTAJE (%)
SiO_2	61.31
Al_2O_3	20.79
Fe_2O_3	4.29
Li_2O	2.14
CaO	1.72
MgO	1.30
K_2O	1.26

MINERAL	PORCENTAJE (%)
Na ₂ O	1.14
P ₂ O ₅	0.33
MnO	0.32
SO ₃	0.15
TiO ₂	0.10
Cr ₂ O ₃	0.03

Fuente: (Fosu et al., 2020)

El espodumeno concentrado después de la flotación se encuentra con una estructura cristalina monoclinica denominada fase α o también llamada espodumeno- α , que se caracteriza por ser compacta, es decir que los átomos de Litio están rodeados por aluminosilicatos, lo cual dificulta su lixiviación. Es por esto, que el espodumeno generalmente se somete a un proceso de transición de fase a alta temperatura, entre los 950°C a 1100°C, que varían dependiendo de la cantidad de impurezas que contenga el mineral, este proceso cambia la estructura cristalina a una tetragonal, que es llamada fase β , o bien espodumeno- β , lo cual incrementa la movilidad de los átomos de Litio, que se vuelven más fácilmente al tratamiento con soluciones acuosas lixiviantes.

Figura 11: Estructuras cristalinas de los polimorfos espodumeno- α (a) y espodumeno- β (b)

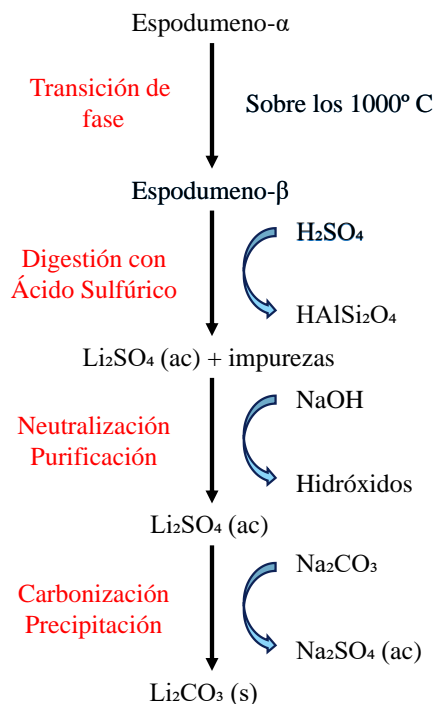


Fuente: (Del Rose et al., 2024)

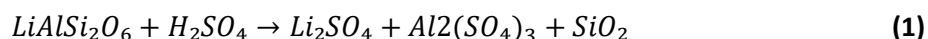
Entre los métodos de tostado, actualmente el método más reconocido y comercializado es el del ácido sulfúrico, el cual se resume en la Figura 12, para llevarlo a cabo el espodumeno transformado se somete a molienda para que el tamaño de las partículas esté por debajo de 74 μm , y se mezcla con ácido sulfúrico a una temperatura entre los 200°C y los 300°C, y siempre por debajo de los 327°C para evitar la evaporación del ácido. La reacción química es mostrada en la **Ecuación 1**, donde se forma sulfato de Litio soluble en agua y aluminosilicatos hidratados no solubles en agua.



Figura 12: Diagrama de flujo para el método de tostado de sulfato



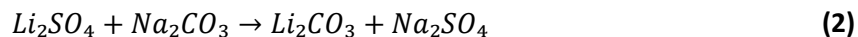
Fuente: (Y. Liu et al., 2023)



Al producto de la reacción entre el espodumeno y el ácido sulfúrico posterior de la cristalización se le lixivia con agua entre 50 a 90°C, para formar una solución acuosa de sulfato de Litio. Luego se filtra, para eliminar los aluminosilicatos hidratados y otros residuos.

Para aumentar la pureza de la solución acuosa de sulfato de litio se agrega carbonato de sodio para precipitar y eliminar impurezas, como lo son el hierro, el magnesio y el calcio. También se emplea el hidróxido de sodio para llevar esta reacción a un pH más básico.

Una vez eliminadas las impurezas, se obtiene Carbonato de Litio sólido, esto se logra con la adición de Carbonato de Sodio a la solución y se precipita Carbonato de Litio, como se muestra en la **Ecuación 2**. Luego se debe realizar el proceso físico de filtrado y secado.

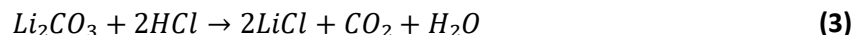


Recuperación de Litio Metálico

Es posible hacer que el Carbonato de Litio pase a Cloruro de Litio, mediante la adición de ácido clorhídrico, como se indica en la **Ecuación 3**. Luego el agua se evapora y se obtiene Cloruro de Litio



sólido, el cual se muele para tener partículas de tamaños específicos y que puede ser dirigido para transformarse en Litio metálico.



La recuperación de Litio metálico se lleva a cabo mediante un proceso de electrólisis, donde el Cloruro de Litio se lleva a una celda electrolítica de 3m², con cátodos de acero y ánodos de grafito, el electrolito es una sal eutéctica de 60% mol Cloruro de Litio y 40% mol Cloruro de Potasio, el contenedor de la sal fundida es de acero, el refractario debe ser de carbono en la base de la celda donde se tienen elementos resistivos para calentar la sal. Todo está envuelto por ladrillo para mantener la energía calorífica, el litio metálico flota por encima de la sal fundida, para ser puesto en lingoteras. La temperatura de operación es de unos 500 °C y el Cloro gaseoso sale por la parte superior de la cuba electrolítica.

El cloruro de Litio se debe de alimentar seco y el contacto entre cloro gaseoso y Litio metálico debe ser evitado, debido a que puede ocasionar una explosión. Cada kilogramo de Litio producido es acompañado con 5 kg de Cloro y la generación de Cloro gaseoso es nocivo tanto para el medioambiente como para los operadores (Fosu et al., 2020).

2.3. Ventajas y limitaciones de los procesos extractivos de litio

Evaporación:

La principal ventaja del método convencional de concentración por evaporación es en términos de sus menores costos operativos ya que el proceso utiliza la energía solar para la evaporación de las pozas. Una limitante de este método tradicional es la química del salar cuando existe presencia significativa de magnesio por que disminuye la eficiencia del proceso. La recuperación del metal puede estar entre un 45-55% dado que se pierde litio en las piscinas más concentradas, donde precipita como un compuesto con magnesio por ello la relación Mg/Li afecta la eficiencia, entre mayor es, más magnesio precipita y por ende más litio se pierde.

Desventajas del proceso de evaporación contemplan las pérdidas significativas de agua desde la salmuera debido a la evaporación (la cual no se recupera), uso de agua fresca que se utiliza en los procesos posterior a la evaporación con consumos directos e indirectos (Lagos et al., 2024), los químicos utilizados en los procesos de concentración del litio, la generación de pilas de salmuera residual libre de litio y la generación de otros residuos del proceso.

Otro aspecto por mencionar es que la solución producida desde la evaporación puede producir carbonato de litio, pero le resulta más caro la generación de hidróxido de litio que es de mayor pureza, mientras que en contraste con la extracción desde roca dura se puede obtener hidróxido de Litio directamente desde el concentrado de espodumeno (Piedmont Lithium Limited, 2019).

DLE:

Las tecnologías de extracción directa de litio (DEL) son un conjunto de tecnologías que actualmente pueden considerarse competitivas ya sea comercialmente o en investigaciones científicas tales como Adsorción Selectiva, Intercambio Iónico, Extracción por solventes, Precipitación, y métodos



electroquímicos. Por otro lado, también se encuentran las tecnologías de concentración de salmuera (LBC) como complemento a las DLE, entre ellas está la Nanofiltración, Electro membrana /Electrodialisis, Destilación, Cristalización, entre otras.

Entre las ventajas de las operaciones por DLE conlleva un menor uso suelo, ya que no requiere de piscinas de evaporación para concentrar el Litio, de acuerdo con el estudio de Seyedkamal Mousavinezhad et al., 2024, la tecnología DLE utilizada en Clayton Valley, la cual combina resinas de intercambio iónico, procesos térmicos asistidos y métodos electroquímicos contempla 16m² por tonelada de LCE, en cambio en Atacama, donde el salar cuenta con un alto grado inicial de litio, el uso de tierra es de 357 m² por tonelada de Carbonato de Litio Equivalente (LCE).

Una ventaja importante de estos métodos que cabe destacar es la mayor eficiencia con respecto a la evaporación, la que en función del proceso a utilizar puede superar el 90%.

La adsorción presenta ventajas para aquellos salares donde la razón Mg/Li es muy alta debido que no es relevante la concentración elevada del magnesio dado que la extracción opera selectivamente hacia el litio aprovechando parámetros químicos. Otra ventaja es que no usa ácido u otros productos químicos para el lavado y algunos sorbentes desarrollados pueden recuperar entorno al 90% del litio en la salmuera. Una limitante de la adsorción es que hay riesgo de que puedan quedar impurezas en la solución cargada de litio, lo que está asociado a la estabilidad de los materiales sorbentes.

Cabe mencionar que estos procesos de DLE son un conjunto de operaciones unitarias donde una de ellas usa alguna de las tecnologías DLE; mientras que la salmuera puede requerir pasar por una etapa de pre-tratado y post-tratado para acondicionar la salmuera y así tener una mejor recuperación de litio.

Desventaja de extracción por solvente, es el arrastre químico potencial con impurezas en la solución de litio, disminuyendo su pureza. También en la etapa de intercambio acuoso-orgánico, puede haber arrastre potencial de impurezas en solución, tales como sodio, potasio, magnesio e ion cloro. Arrastre físico en intercambio de fase orgánico-acuoso facilitando el arrastre potencial de orgánico en las etapas de purificación, reactivo que se podría ir en la salmuera agotada con las impurezas o también en la solución donde se concentra el litio por tanto disminuye la pureza.

Otra limitante de la extracción por solvente es que para aplicar estos métodos en operaciones a gran escala con miles de toneladas de salmueras debe ser considerado el costo energético de recuperación del solvente y los enormes volúmenes de solventes involucrados los que en general no son amigables con el medio ambiente.

Ventajas del proceso de extracción electroquímico son menores tiempos de proceso del orden de horas, el no uso de sustancias químicas generalmente (en algunos casos puede requerir ácido para la etapa de elusión o stripping dependiendo del material del electrodo), la generación de menor cantidad de residuos ya que los electrones juegan el papel de “reactivos”, ha sido un método exitoso en la selectividad al litio respecto del magnesio y se han estudiado con salmueras de Atacama, Uyuni, Hombre muerto, Cauchari-Olaroz y Clayton Valley.

Es importante considerar en los proyectos las relaciones de magnesio/litio y sulfato/litio. Debido a que cuanto mayor sea la relación de magnesio/litio y de sulfato/litio menor será la recuperación de



Li en el proceso, porque existirá un mayor arrastre de Litio en los productos de evaporación, cristalización, como también en la etapa de precipitación.

Roca Dura: La extracción de litio desde fuentes minerales en general presenta mayores leyes del metal, que las concentraciones que puede tener la salmuera, tampoco tiene una dependencia climática con la cantidad de energía solar recibida para los procesos ya que no utiliza pozas de evaporación para concentrar el Litio y también por eso tiene una producción de menores tiempos.

En cambio, sus desventajas son los mayores costos de energía que requiere, debido a que, por ejemplo, en los procesos de tostado de espodumeno se requiere de aproximadamente 1100° C para modificar su estructura cristalina. Con lo anterior, también se puede incluir el alto impacto ambiental que genera la minería tradicional, la generación de botaderos de lastre, la necesidad de abastecimiento de recursos hídricos y energéticos.

Un resumen de las ventajas y limitaciones de las tecnologías para extraer litio se presenta en la Tabla 8 a continuación.

Tabla 8: Resumen de ventajas y limitaciones por tecnologías de extracción de litio

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	LIMITACIONES
Evaporación	Menor costo operativo Uso de energía renovable <i>Know How</i> de lo que funciona	Baja recuperación de litio (40-55%) Eficiencia depende relación Mg/Li Pérdida del agua contenida en la salmuera entre 85-95% Elevados tiempos de proceso entre 12 - 24 meses Generación de salmuera agotada con grandes concentraciones de litio que no se utiliza.
DLE	Selectivas al ion litio. Menor tiempo de procesamiento para extraer litio (4 - 48 hrs). La concentración de magnesio puede no ser relevante. Menor uso de suelo. Recuperación alrededor de 90%. En la adsorción no se usan reactivos para el lavado del material adsorbente, cuando este material está basado en hidróxido de aluminio.	En la tecnología de extracción por solventes puede haber arrastre de reactivos hacia la solución concentrada de litio, además la utilización de grandes volúmenes de solvente, corrosión de equipos. En el caso de la adsorción se hace uso intensivo de agua fresca en la etapa de lavado para descargar el litio concentrado, además de disolución del material adsorbente. En nanofiltración bajo rendimiento de separación por taponamiento de membranas, además de pérdida de Li en el retenido para altas separaciones de Mg. Modificaciones del pH de la salmuera y/o aumento de temperatura previo a la etapa DLE.



TECNOLOGÍA	VENTAJAS	LIMITACIONES
Roca Dura	<p>Minerales de litio desde roca dura presentan mejores leyes de litio.</p> <p>No depende del clima</p> <p>Menor tiempo de producción</p> <p>Menor costo para producir hidróxido de litio que desde salmueras.</p>	<p>Uso de etapas de pre y post tratamiento de la salmuera además de la DLE. Puede requerir usar piscinas de evaporación.</p> <p>Incertidumbre de los efectos de la reinyección de la salmuera agotada.</p> <p>Limitaciones para escala comercial.</p> <p>Mayores costos de energía por requerir aumento de temperatura al procesar el espodumeno</p> <p>Generación de botaderos de lastre</p> <p>Uso de recurso hídrico</p> <p>Impactos medioambientales de un proceso minero convencional, mayor huella de carbono</p>



3. PROYECTOS DE EXTRACCIÓN DE LITIO

A continuación, en la Tabla 9 se presentan los principales proyectos que incluirían tecnologías de Extracción Directa de Litio (DLE) en el “Triángulo del Litio”. Se puede observar que de acuerdo con la información recopilada hasta la fecha solo el proyecto Fénix (Salar Hombre Muerto) en Argentina y Laguna Verde en Chile están contemplando la posibilidad de realizar reinyección de las salmueras agotadas de Litio dentro del Salar. También cabe señalar que muchos de los proyectos de la Tabla 9 incorporan la Extracción Selectiva del Boro dentro de los procesos para purificar los productos de Litio comprometidos. Lo indicado anteriormente deja manifiesto el modo versátil en que se pueden emplear las tecnologías DLE, ya que pueden adaptarse y modificarse de acuerdo a las condiciones de concentración de impurezas y metal de interés presente en los depósitos salinos.

Tabla 9: Proyectos con Extracción Directa de Litio en el "Triángulo del Litio"

PROYECTO	COMPAÑÍA	PAÍS	ETAPA DEL PROYECTO	PROVEEDOR DLE	TECNOLOGÍA DLE	COMENTARIOS	ORIGEN DE LA TECNOLOGÍA	AÑO
Centenario-Ratones	Eramet Tsingshan	Argentina	Operación	IFPEN Seprosys	Adsorción Selectiva	Sorbente en base de Aluminio Infiltración	Francia	2024
Fénix (Hombre Muerto)	Arcadium Lithium	Argentina	Producción	Propietario ILIAD	Adsorción Selectiva	Reinyección	USA	1998
Rincón	Argosy Minerals	Argentina	PEA	Propietario	Extracción por solventes	Extracción Selectiva del Boro	-	2024
Kachi	Lake Resources	Argentina	Factibilidad	Lilac Solutions	Intercambio Iónico	-	USA	2024
Solaroz Lithium	Lithium Energy	Argentina	Prefactibilidad	Xi'an Lanshen New Material Technology	Intercambio Iónico	-	China	
Sal de los Ángeles	Revotech Asia Tibet Summit Resources Leading Resources Global	Argentina	Factibilidad	-	Adsorción Selectiva o Intercambio Iónico (TBD)	Sorbente en base de Aluminio	-	2024
Amanecer	Eon Lithium	Argentina	Target Outline	Eon Minerals LLC	Adsorción Selectiva		Argentina	
Sal de Oro	POSCO Holdings	Argentina	Construcción	EnergyX	Precipitación	Fosfato de Litio	USA	2024
Tres Quebradas	Zijin Mining Group	Argentina	Construcción	-	Extracción por solventes	Extracción Selectiva del Boro		
Sal de Vida	Arcadium Lithium	Argentina	Construcción	Galaxy-Jiangsu	TBD		China	
Pastos Grandes	Lithium Americas	Argentina	Factibilidad	-	Extracción por Solventes Intercambio Iónico	Extracción Selectiva del Boro		

PROYECTO	COMPAÑÍA	PAÍS	ETAPA DEL PROYECTO	PROVEEDOR DLE	TECNOLOGÍA DLE	COMENTARIOS	ORIGEN DE LA TECNOLOGÍA	AÑO
Cauchari-Olaroz	Ganfeng Lithium Group, Lithium Americas Jujuy Energia y Minería, Grupo Minero Los Boros	Argentina	Producción	-	Extracción por solventes	Extracción Selectiva del Boro		
Atacama	Albemarle	Chile	Piloto	Propietario LiET Lilac	Extracción por Solventes Intercambio Iónico	Extracción Selectiva del Boro	TBD	2025
Atacama	SQM	Chile	Piloto	Adionics	Extracción por solventes	Líquido – Líquido	Francia	2024
Laguna Verde	CleanTech Lithium	Chile	Perfil	TBD	Extracción por Solventes Intercambio Iónico IX-Reinjection	Reinyección	TBD	2026
Producción de Sales Maricunga	SIMCO	Chile	Construcción Pospuesta por Consulta Indígena	IBC Advanced Technologies	Extracción por solventes	Tecnología de reconocimiento molecular (MRT)	China	2025
Salares Alto Andinos	ENAMI	Chile	PEA	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD
Francisco Basin	CleanTech Lithium	Chile	Perfil	TBD	TBD	-	TBD	
Salar de Uyuni	Yacimientos de Litio Bolivianos	Bolivia	PEA	TBD	TBD	TBD	China	2025

TBD: Por ser definido (“To be defined” en inglés)

PEA: Evaluación Económica Preliminar (“Preliminary Economic Assessment” en inglés)

Fuente: Elaboración de COCHILCO en base a Goldman & Sach’s y S&P Global, entre otras.



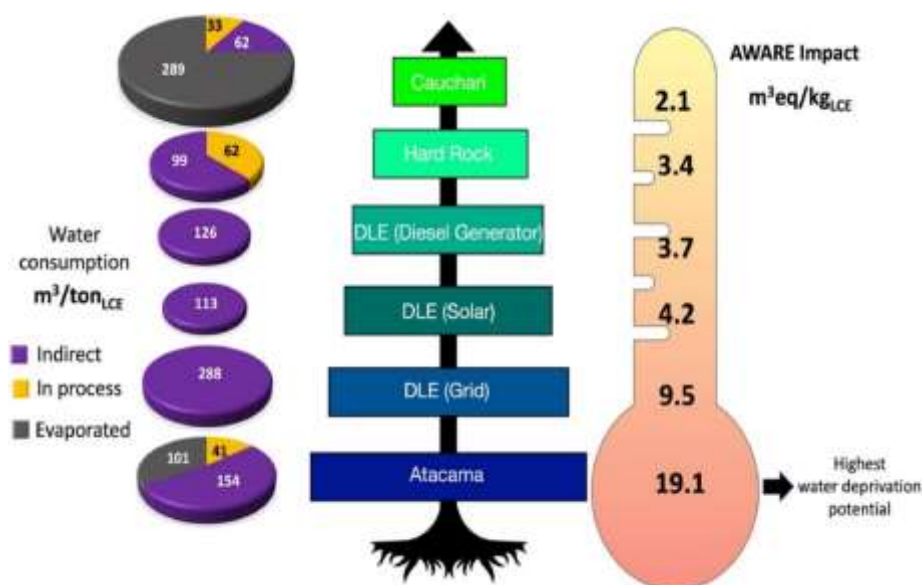
4. ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES

De acuerdo con lo descrito en el estudio de (Moran et al., 2024), los recursos hídricos de los Andes áridos son dos partes distintas que reaccionan distinto frente al cambio ambiental y la intervención humana, estas dos partes corresponden a aguas antiguas y aguas jóvenes, las cuales se desacoplan, se comportan de un modo distinto e interactúan por medio de conductos (unidades lacustres y/o evaporitas de grano fino lateralmente extensas y arroyos perennes) que se conectan con descargas de aguas subterráneas. Es de esta forma, que el correcto transporte de las aguas modernas o “contemporáneas” (semanas o años) por medio de estos conductos comunican las variaciones hidroclimáticas con los acuíferos y representan un rol fundamental en el sostenimiento de las aguas superficiales, pese a representar una pequeño porcentaje de los recursos de las cuencas.

Lo señalado anteriormente vuelve crucial la gestión responsable y sostenible de los recursos hídricos de aquellos proyectos que involucren bombeo, evaporación y/o reinyección de salmueras en salares, debido a que las aguas de los Andes áridos presentan equilibrios hidrogeológicos muy sensibles en su recargas, considerando que los acuíferos presentan un alto porcentaje de aguas antiguas pero que se ven recargados por aguas modernas que solo representan un bajo porcentaje.

Estudios como los de (Mousavinezhad et al., 2024) muestran el uso indirecto (purificación, pre o post tratamiento de salmuera) y el uso directo (evaporación) de los recursos hídricos, energéticos y de suelo entre otros, utilizando el caso de un proyecto de DLE en Nevada, USA. Por ejemplo, como se muestra en la Figura 13, en el caso de los métodos por evaporación por cada tonelada de LCE se utilizan al menos 296m³ (Atacama) a 384m³ (Cauchari) de agua total, de los cuales 101m³ a 289m³ corresponden a agua evaporada. Sin embargo, en los métodos con DLE se podría llegar a un rango 113m³ a 126m³ que corresponde a consumo de agua indirecta en el proceso.

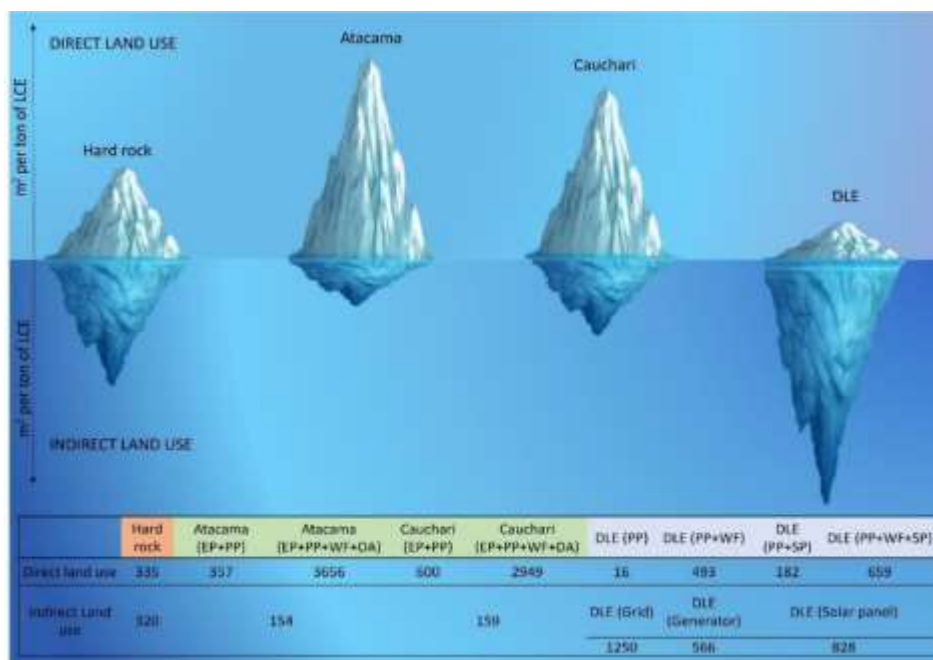
Figura 13: Consumo directo e indirecto de agua en m³/ton LCE (a la izquierda) y huella hídrica en m³ eq/ kg LCE utilizando el método AWARE (a la derecha)



Fuente: (Mousavinezhad et al., 2024)

Por otro lado, el estudio también expone que los métodos de evaporación no requieren de un abastecimiento energético tan extensivo como sí lo requieren los métodos por DLE que necesitan utilizar plantas de generación de electricidad para el tratamiento de las salmueras extraídas. Lo anterior se traduce en que un proyecto de DLE conlleva un uso indirecto debido a las plantas de generación necesarias para el tratamiento de las salmueras. En la Figura 14 se muestra el uso de suelo directo e indirecto en m² por tonelada de LCE y también el uso de electricidad indirecta que sería más intensiva en DLE.

Figura 14: Comparación del uso directo e indirecto del suelo para 4 fuentes diferentes de litio con tres escenarios para fuentes de energía en el proyecto DLE, Espodumeno australiano (con producción en China), Atacama: Salar de Atacama en Chile, y Cauchari: Salar de Cauchari en Argentina.



EP: estanques de evaporación, PP: planta de procesamiento, WF: zona de pozos, DA: zona de eliminación, SP: el panel solar es la fuente del 90 % de la electricidad y el 10 % de la red.

Fuente: (Mousavinezhad et al., 2024)

Por otro lado, un estudio denominado “Evaluación regionalizada del ciclo de vida de la producción actual y futura de litio para baterías de iones de litio” menciona los insumos demandados por tonelada de carbonato de litio producido para diferentes salares operativos en Chile, Argentina y un caso de China, estos valores consideran el proceso productivo desde piscinas de evaporación y los procesos posteriores de purificación, remoción de impurezas y precipitación de carbonato de litio. La Tabla 10, muestra los insumos para el ciclo de vida modelados, mencionados anteriormente.



Tabla 10: Insumos del ciclo de vida modelados para la producción de 1 kg de Li_2CO_3 (grado de batería) en salares seleccionados

INPUT DEMAND / KG Li_2CO_3	SALAR DE ATACAMA	SALAR DE OLAROS	SALAR DE CAUCHARI-OLAROS	SALAR DEL HOMBRE MUERTO	CHAERHAN SALT LAKE
Electricity [kWh]	0.4	1.5	0.7	0.8	28
Heat [MJ]	19	19	28	14	298
Water [kg]	38	219	46	43	474
Quicklime [kg]	0.04	4.1	2.7	3.1	–
Sodium hydroxide [kg]	0.06	–	0.35	0.08	–
Organic solvent [kg]	0.04	–	0.1	0.7	–
Hydrochloric acid [kg]	0.1	–	0.5	0.9	–
Soda ash [kg]	1.9	1.6	2.1	1.6	1.6

Fuente: Regionalized life cycle assessment of present and future lithium production for Li-ion batteries (Schenker et al., 2022)

Impactos medio ambientales documentados e identificados se describen en el estudio de Wetlands International, en el marco del Programa Conservando los Humedales Alto-Andinos para la Gente y la Naturaleza desarrollado en la Universidad de Buenos aires (Sticco et al., 2021). Algunos de los impactos mencionados que serían provenientes de la extracción de litio desde salares mediante evaporación se enuncian a continuación:

- Salinización de suelos y humedales
- Contaminación de suelos con residuos peligrosos
- Modificación del flujo natural superficial del agua
- Alteración del ciclo de precipitación de sales
- Alteración del balance hídrico
- Pasivo ambiental
- Operaciones de eliminación no aceptables
- Riesgo de rotura de piletas de evaporación por flujos torrenciales y/o terremotos
- Salinización de humedales y suelos con sales exóticas
- Salinización de reservas hídricas subterráneas de agua dulce en abanico Archibarca de Jujuy
- Afectación flora autóctona
- Alteración de sistema lacustre/humedal
- Aumento del 90% de la salinidad y acidez de los suelos
- Aumento de temperatura en superficie del salar, descenso del nivel freático salar Atacama

En este estudio se hace mención esta temática en casos estudios en Argentina, Bolivia y Chile, enfatizando en los grandes volúmenes de agua extraídos que implica esta actividad minera. Luego el principal riesgo para los humedales de una cuenca es la alteración total o parcial del ciclo hidrogeológico que les da vida.

La etapa de producción del proyecto sería la que tiene más impacto dentro del salar, en primer lugar, **los pozos y acueductos** desde donde se bombea el agua producen un cono de depresión en el acuífero, si ocurre un mal manejo del bombeo puede ocurrir una alteración de la red de flujo subterráneo lo que impacta en la alteración de humedales, salinización de reservas de agua dulce, disminución o cese de la evaporación y también salinización del suelo en caso de derrames de la salmuera al ser transportada. Otro aspecto de la etapa productiva que tiene impacto son las **pozas de evaporación** que hacen uso intensivo de la superficie natural del salar, estas deben ser emplazadas adecuadamente para no intervenir la red de flujo superficial o impedir la infiltración de agua dulce de recarga. La **planta de producción** de carbonato de litio y las **obras de infraestructura** afectan también en la generación de residuos y posibles movimientos de suelo.

Este estudio documenta malas prácticas ocurridas en Sales de Jujuy cuya actividad se desarrolla en los salares de Olaroz-Cauchari que han repercutido en los impactos mencionados anteriormente. En el caso de Chile se menciona el salar de Atacama, el que evidenciaría un descenso de la capa freática a nivel de cuenca, observado desde los datos de monitoreo de las propias empresas. La explotación continua y el intensivo bombeo de agua desde la cuenca serían las razones.

Por otro lado, los métodos de extracción directa DLE auspician mejor rendimiento que la tecnología tradicional de evaporación, debido a una mejor eficiencia ya que para una misma tasa de producción de Li se puede procesar menos salmuera apuntando a tiempos acotados de proceso. A su vez estos métodos para evitar la evaporación con pérdidas significativas de agua necesariamente requieren de la reinyección de la salmuera ya que en otro caso surge el mismo problema entorno a las piscinas de evaporación. Según investigaciones desarrolladas respecto de estas nuevas tecnologías, existirá evidencia que los consumos de agua fresca y consumos de energía serán mayores en DLE. Además, en el escenario de producir carbonato de litio, la huella de carbono asociada a procesos DLE es más alta. (Schenker et al., 2022)

Reinyección de Salmuera

El tema en controversia de estos métodos es que plantean reinyectar la salmuera agotada de litio al salar de manera de reincorporar agua y especies minerales a la cuenca, además de evitar la evaporación. Esta posible reinyección constituye un gran desafío, en principio porque no hay conocimiento o experiencia de una operación a escala comercial-industrial que opere en Chile incorporando este desafío, también porque no se ha documentado los efectos que tendrían esta reinyección dentro de la cuenca del salar o cuales serían las mejores ubicaciones que deberían tener los pozos de reinyección. En el proceso de evaporación actual se reinyecta al salar entre un 15 a 20% de la salmuera que no se utilizó en el proceso productivo contemplando una reinyección directa donde se descarga sobre la costra salina y una indirecta que es por infiltración en las tortas de acopio de sales de descarte (Igsa Consultores, 2006), sin embargo, ningún estudio respalda la suposición de que los procesos DLE tienen la viabilidad técnica de devolver el 100% de la salmuera gastada (Flexer et al., 2018)

La química del salar de podría ver afectada al incorporar una salmuera agotada con restos de especies químicas que no son parte de los componentes de una salmuera natural, por lo que sería necesario incorporar una limpieza de la salmuera para eliminar reactivos o el residuo de extractante orgánico proveniente de SX, lo que implicaría agregar una etapa (o varias) al circuito de planta DLE lo que impacta en mayores costos. Otro aspecto relevante es el arrastre que puede ocurrir a través



de la red de aguas que circulan dentro del salar llevando esta salmuera agotada de un punto a otro dentro del salar afectando la concentración del litio.

Del estudio de (Moran et al., 2024) que analiza los flujos y las edades de los recursos hídricos de los Andes, se puede concluir que los impactos que podría generar la reinyección de salmuera agotada de Litio pueden ser entre otros los siguientes: Modificación de la composición química del Acuífero, Impacto en la Hidrodinámica del Acuífero, Posible contaminación de recursos Hídricos Frescos, Efectos de la disponibilidad del litio. La reinyección de salmuera agotada en el salar aún no cuenta con estudios que evidencien un daño cero.

Otro estudio respecto a impactos medio ambientales de la extracción directa de litio desde salares es el que se desarrolló en *nature reviews earth & environment* (Vera et al., 2023a), donde el foco fueron los requerimientos de agua de estos métodos, reactivos, consumo de energía y generación de residuos, incluyendo las salmueras gastadas.

Se recopilaron fuentes de información de investigaciones científicas entre los años 2017 a 2022 donde observaron que hay tecnologías DLE que alcanzan una recuperación alrededor de 95%, una tasa de separación del ion litio del magnesio sobre 100 y un enfoque de cero químicos.

Cabe mencionar que estos estudios se desarrollaron en gran parte con salmueras simuladas, solo un 30% utilizó salmueras reales provenientes de salares, por lo tanto, los resultados de dichos estudios tendrían más sesgo.

Así como hay tecnologías DLE que tienen resultados prometedores en la extracción del litio, existen otras variantes donde se requieren cambios de pH en la salmuera o elevar la temperatura sobre 80°C para mejorar la recuperación de litio, lo que tiene un mayor requerimiento energético, de consumo de agua y reactivos. Lo anterior debe ser considerado en las evaluaciones de impacto ambiental.

La Tabla mostrada en la sección Anexos corresponde a la información resumen de estos estudios donde se observan los parámetros evaluados y principales resultados obtenidos.

5. COMENTARIOS FINALES

El análisis desarrollado acerca de las tecnologías de procesamiento de litio revela la evolución e importancia de estos métodos para proporcionar metales que sostienen la modernidad. En particular el litio se ha convertido en un metal clave para la descarbonización de la matriz energética, transitando de ser un recurso utilizado en medicina y cerámicas principalmente, a ser un componente fundamental de alta demanda en las baterías ion-litio.

Desde una mirada geológica, Chile es privilegiado dado que cuenta con diversidad y abundancia de depósitos salinos, los cuales se distinguen entre sí por sus ubicaciones geográficas y su composición química. Por lo que la tecnología a implementar debe ser diferenciada, ya que la elección de la misma está determinada por las características únicas de cada salar, en consecuencia, la innovación y desarrollo tecnológico ha sido impulsado para extraer el litio de una manera más eficiente al proceso convencional de evaporación. El nuevo enfoque denominado “extracción directa” por la selectividad que tienen al ion litio auspician menores tiempos de procesamiento para obtener un



producto concentrado de litio, mayor capacidad de recuperación y en algunos casos oportunidades para minimizar los impactos ambientales asociados a la extracción.

El procesamiento clásico de la salmuera continental mediante pozas de evaporación para la producción de litio demandado actualmente no ha cumplido del todo con las expectativas, por sus largos tiempos de concentración de la salmuera de 12 a 24 meses para pasar de una concentración inicial de 0,2% de litio a una de 6% reflejando dependencia del clima árido y el intensivo uso de suelo en las áreas de evaporación. Dado que la precipitación de las sales minerales dentro de las piscinas ocurre de acuerdo a sus solubilidades, en el transcurso de una piscina a otra se pierde litio, alrededor de un 50% ya que el cloruro de litio es de mayor solubilidad por ende precipita al último quedando asociado a otros compuestos cristalizados en etapas previas. La química del salar también afecta a la evaporación, en particular la relación que hay con el magnesio donde a una mayor concentración, mayor cantidad de litio se pierde en el proceso. Considerando la preocupación que existe por optimizar el recurso hídrico, el proceso de evaporación no supe esta necesidad puesto que ocurre una pérdida significativa de agua desde la salmuera con valores entre un 85-95%.

En contraste, los métodos de extracción directa de litio desde salmueras son variados con diversos principios operativos y un mismo fin, capturar la mayor cantidad de litio de manera selectiva evitando impurezas. Entre ellos se encuentra la adsorción el que utiliza un material o medio sorbente poroso donde el ion litio se adhiere, esto puede ocurrir con o sin intercambio de iones. El intercambio iónico es una variante de la adsorción que puede utilizar resinas, bombas iónicas y tamices iónicos. La adsorción es la variante con mayor desarrollo a escala comercial, pero presenta desafíos en el uso de recursos debido a requerimientos de grandes volúmenes de agua fresca para lavar el material adsorbente y remover el litio. También se encuentra extracción por solventes, precipitación y métodos electroquímicos, este último tendría mayor aceptación medioambiental ya que no utilizaría reactivos. Si bien estos métodos presentan desafíos ya que todos se encuentran en puntos diferentes de desarrollo e investigación de sus efectos o impactos, constituyen sin duda una alternativa prometedora para acelerar el proceso productivo que se requiere para suplir la demanda creciente de litio por baterías.

Cabe mencionar que para la elección de una de las tecnologías de extracción directa que se ajuste a la planta de procesos óptima para cada salar es necesario considerar aspectos de la química del salar, es decir las especies disueltas, la recuperación, el tiempo de proceso, el uso de agua fresca utilizada por tonelada de LCE producido, el consumo de energía, la relación Mg/Li, el costo de operación, los g/l de Litio inicial contenido en la salmuera, requerimientos de aumentar o no la temperatura y el pH de la salmuera y por su puesto considerar los posibles impactos medios ambientales, sobre todo levantando información a través de estudios que aumenten la certeza acerca de posibles efectos debido a la reinyección de la salmuera agotada que estos métodos proponen. Considerando el desafío que significa en materia de políticas públicas definir la evaluación de impacto ambiental de estas tecnologías, debido a que aún no es claro cómo se evaluará la reinyección o si se requerirán normativas, es fundamental contar con estudios que sustenten estas decisiones.

Por lo tanto, es esencial continuar desarrollando y adoptando prácticas más sostenibles en la industria minera, con un enfoque en la mitigación de los impactos ambientales y la rehabilitación de los sitios mineros.



6. BIBLIOGRAFÍA

- An, J. W., Kang, D. J., Tran, K. T., Kim, M. J., Lim, T., & Tran, T. (2012). Recovery of lithium from Uyuni salar brine. *Hydrometallurgy*, 117–118, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.02.008>
- Balaram, V., Santosh, M., Satyanarayanan, M., Srinivas, N., & Gupta, H. (2024). Lithium: A review of applications, occurrence, exploration, extraction, recycling, analysis, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 15(5), 101868. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2024.101868>
- Calvo, E. J. (2022). Nuevos métodos de extracción directa de litio Impacto en la explotación sustentable de los salares de la puna. *CONICET Digital*, 30, 51–59.
- Cerda, A., Quilaqueo, M., Barros, L., Seriche, G., Gim-Krumm, M., Santoro, S., Avci, A. H., Romero, J., Curcio, E., & Estay, H. (2021). Recovering water from lithium-rich brines by a fractionation process based on membrane distillation-crystallization. *Journal of Water Process Engineering*, 41(February 2021), 102063. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102063>
- Corporate, N. L. (2017). *Cadena de valor del Litio*.
- Crocker, L., Lien, R., & Others. (1987). *Lithium and Its Recovery From Low-Grade Nevada Clays*.
- Del Rose, T., Li, Y., Qi, L., & Hlova, I. (2024). Mechanochemical Extraction of Lithium from α -Spodumene at Low Temperatures. In *Rare Metal Technology 2024, The Minerals, Metals & Materials Series*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50236-1_15
- Estay, H. (2023). *Descripción de procesos de extracción directa de litio (DLE) curso de Minería de Litio, Semestre 2, Magíster de Minería*. Universidad de Chile.
- Farahbakhsh, J., Arshadi, F., Mofidi, Z., Mohseni-dargah, M., Boroumand, Y., Presser, V., & Razmjou, A. (2024). Direct lithium extraction : A new paradigm for lithium production and resource utilization. 575(December 2023). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117249>
- Flexer, V., Baspineiro, C. F., & Galli, C. I. (2018). Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of the Total Environment*, 639, 1188–1204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>
- Fosu, A., Kanari, N., Vaughan, J., Chagnes, A., Fosu, A., Kanari, N., Vaughan, J., Chagnes, A., & Review, L. (2020). *Literature Review and Thermodynamic Modelling of Spodumene*. <https://doi.org/10.3390/met10101312>
- Fuentealba, D., Flores-Fernández, C., Troncoso, E., & Estay, H. (2023). Technological tendencies for lithium production from salt lake brines: Progress and research gaps to move towards more sustainable processes. *Resources Policy*, 83(January). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103572>
- Goldman Sachs, G. (2023). Direct Lithium Extraction : A potential game changing technology. *Global Metals & Mining*, April.
- Grosjean, C., Herrera Miranda, P., Perrin, M., & Poggi, P. (2012). Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1735–

1744. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.023>

HARDIE LA, & EUGSTER HP. (1970). Evolution of Closed-Basin Brines. *Mineralogical Society of America*, 290, 273–290.

http://www.minsocam.org/MSA/OpenAccess_Publications/MSA_SP_3/MSA_SP3_273-290.pdf

Igsa Consultores. (2006). *Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama/Resumen ejecutivo*. 32.

http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/6240/CONAMA-HUM0114_v1.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Intelligence, B. M. (2024). Lithium forecast. *Benchmark Mineral Intelligence*, 1–64.

Izatt, R., Izatt, S., Izatt, N., Bruening, R., & Krakowiak, K. (2010). Green Chemistry Molecular Recognition Processes Applied to Metal Separations in Ore Beneficiation, Element Recycling, Metal Remediation, and Elemental Analysis. In *Handbook of Green Chemistry: Online* (pp. 189–240). <https://doi.org/10.1002/9783527628698.hgc121>

Kanagasundaram, T., Murphy, O., Haji, M. N., & Wilson, J. J. (2024). The recovery and separation of lithium by using solvent extraction methods. *Coordination Chemistry Reviews*, 509(December 2023), 215727. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215727>

Lagos, G., Cifuentes, L., Peters, D., Castro, L., & Vald, M. (2024). *Carbon footprint and water inventory of the production of lithium in the Atacama Salt Flat , Chile*. 16(August 2023). <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100962>

Li, Z., Mercken, J., Li, X., & Binnemans, K. (2019). *Efficient and Sustainable Removal of Magnesium from Brines for Lithium/Magnesium Separation Using Binary Extractants*. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b05436>

Liu, G., Zhao, Z., & Ghahreman, A. (2019). Novel approaches for lithium extraction from salt-lake brines: A review. *Hydrometallurgy*, 187(May), 81–100. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.05.005>

Liu, Y., Ma, B., Lü, Y., Wang, C., & Chen, Y. (2023). *A review of lithium extraction from natural resources*. 30(2).

Mohr, S. H., Mudd, G. M., & Giurco, D. (2012). Lithium resources and production: Critical assessment and global projections. *Minerals*, 2(1), 65–84. <https://doi.org/10.3390/min2010065>

Moran, B. J., Boutt, D. F., Munk, L. A., & Fisher, J. D. (2024). *Contemporary and relic waters strongly decoupled in arid alpine environments*. 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000191>

Mousavinezhad, S., Nili, S., Fahimi, A., & Vahidi, E. (2024). Resources , Conservation & Recycling Environmental impact assessment of direct lithium extraction from brine resources : Global warming potential , land use , water consumption , and charting sustainable scenarios. *Resources, Conservation & Recycling*, 205(March), 107583. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107583>

Nishihama, S., & Onishi, K. (2013). *Solvent Extraction and Ion Exchange Selective Recovery Process*



of Lithium from Seawater Using Integrated Ion Exchange Methods. July, 37–41.
<https://doi.org/10.1080/07366299.2011.573435>

Obaya, M., & Céspedes, M. (2021). Análisis de las redes globales de producción de baterías de ion de litio. *CEPAL*, 145.

Park, M., Nisola, G. M., Vivas, E. L., Limjoco, L. A., Lawagon, C. P., Gil, J., Kim, H., Kyong, H., & Chung, W. (2016). Mixed matrix nano fiber as a flow-through membrane adsorber for continuous Li⁺ recovery from seawater. *Journal of Membrane Science*, 510, 141–154.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.02.062>

Piedmont Lithium Limited. (2019). *Low-Cost Lithium Hydroxide in the USA*.

Rajpurohit, D., Sharma, P., Bathvar, H., Syed, S., & Shrivastav, S. (2024). Lithium selective receptors. *Coordination Chemistry Reviews*, 515(January), 215968.
<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215968>

Risacher, F. (1999). *Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III regiones - Chile*. DGA. División de Estudios y Planificación.
<https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/32750>

Rosen, M. R. (1994). The importance of groundwater in playas: A review of playa classifications and the sedimentology and hydrology of playas. In M. R. Rosen (Ed.), *Paleoclimate and Basin Evolution of Playa Systems* (Vol. 289, p. 0). Geological Society of America.
<https://doi.org/10.1130/SPE289-p1>

Schenker, V., Oberschelp, C., & Pfister, S. (2022). Regionalized life cycle assessment of present and future lithium production for Li-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 187(July), 106611. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106611>

Schwarz, S., & Pérez, V. (2013). *Mercado Internacional del Litio* (Vol. 1, Issue 2).
<http://www.eldis.org/vfile/upload/1/document/0708/DOC23587.pdf>
<http://socserv2.socsci.mcmaster.ca/~econ/ugcm/3ll3/michels/polipart.pdf>
<https://www.theatlantic.com/magazine/archive/1994/02/the-coming-anarchy/304670/>
<https://scholar.google.it/scholar?>

Sticco, M., Guerra, G., Kwaterka, V., & Valdés, S. (2021). *Impactos ambientales de la explotación de litio en los humedales y recursos hídricos del Altiplano*. *Impactos ambientales de la explotación de litio en los humedales y recursos hídricos del Altiplano*.

Survey, B. G. (2016). *Commodity Profiles Lithium*. www.MineralsUK.com

U.S. Geological Survey. (2024). Mineral Commodity Summaries: Lithium. *Mineral Commodity Summaries*, 1, 110–111. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/>

Vargas, F. J. M. (2023). *Geología, hidrogeología e hidroquímica en los salares del altiplano, provincia de El Loa, Región de Antofagasta, Chile*. [UNIVERSIDAD NACIONAL ANDRÉS BELLO].
<https://altiplano.travel/library/GEOLOGIA-HIDROGEOLOGIA-E-HIDROQUIMICA-EN-LOS-SALARES-DEL-ALTIPLANO-PROVINCIA-DE-EL-LOA-REGION-DE-ANTOFAGASTA-CHILE.pdf>

Vera, M. L., Torres, W. R., Galli, C. I., Chagnes, A., & Flexer, V. (2023a). Environmental impact of direct lithium extraction from brines. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(March).
<https://doi.org/10.1038/s43017-022-00387-5>

Vera, M. L., Torres, W. R., Galli, C. I., Chagnes, A., & Flexer, V. (2023b). SUPPORTING



INFORMATION for Environmental impact of direct lithium extraction from brines, unedited. *Nature Reviews Earth and Environment*, 4(3), 149–165. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00387-5>

Xu, P., Hong, J., Qian, X., Xu, Z., Xia, H., Tao, X., Xu, Z., & Ni, Q.-Q. (2021). Materials for lithium recovery from salt lake brine. *Journal of Materials Science*, 56(1), 16–63. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05019-1>

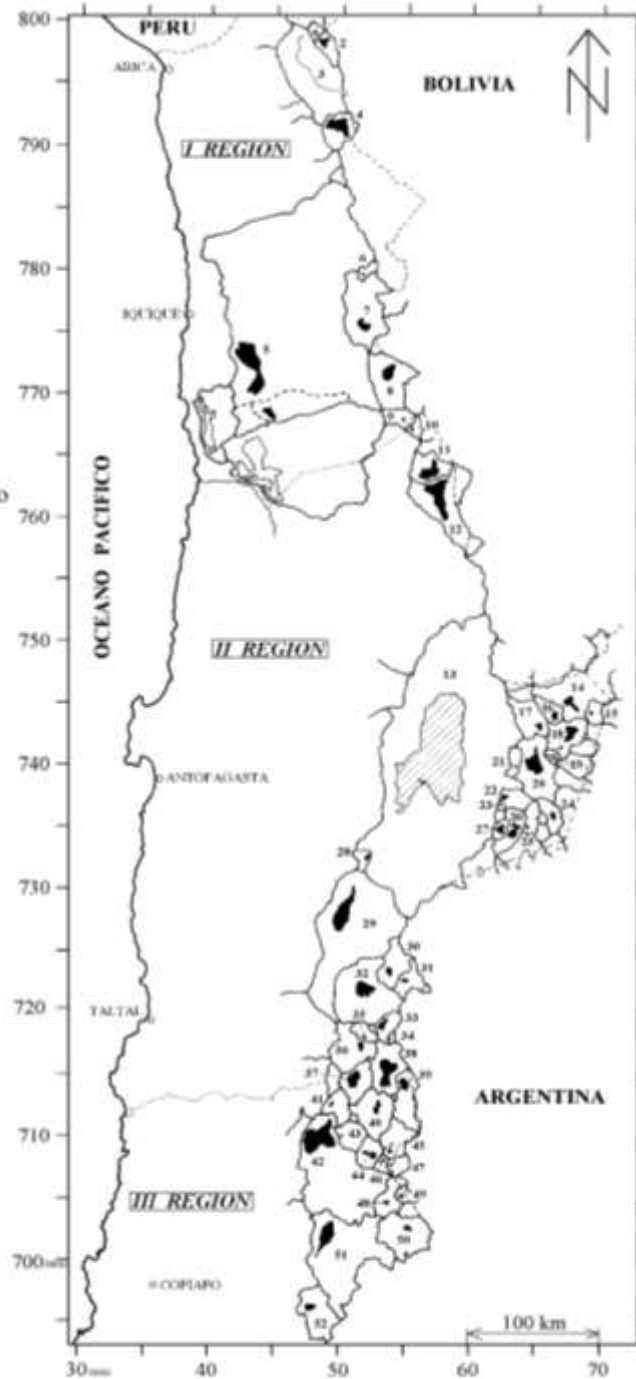
Zhang, Q., Sun, S., Li, S., Jiang, H., & Yu, J. (2007). Adsorption of lithium ions on novel nanocrystal *MnO* 2. 62, 4869–4874. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.01.016>



7. ANEXO

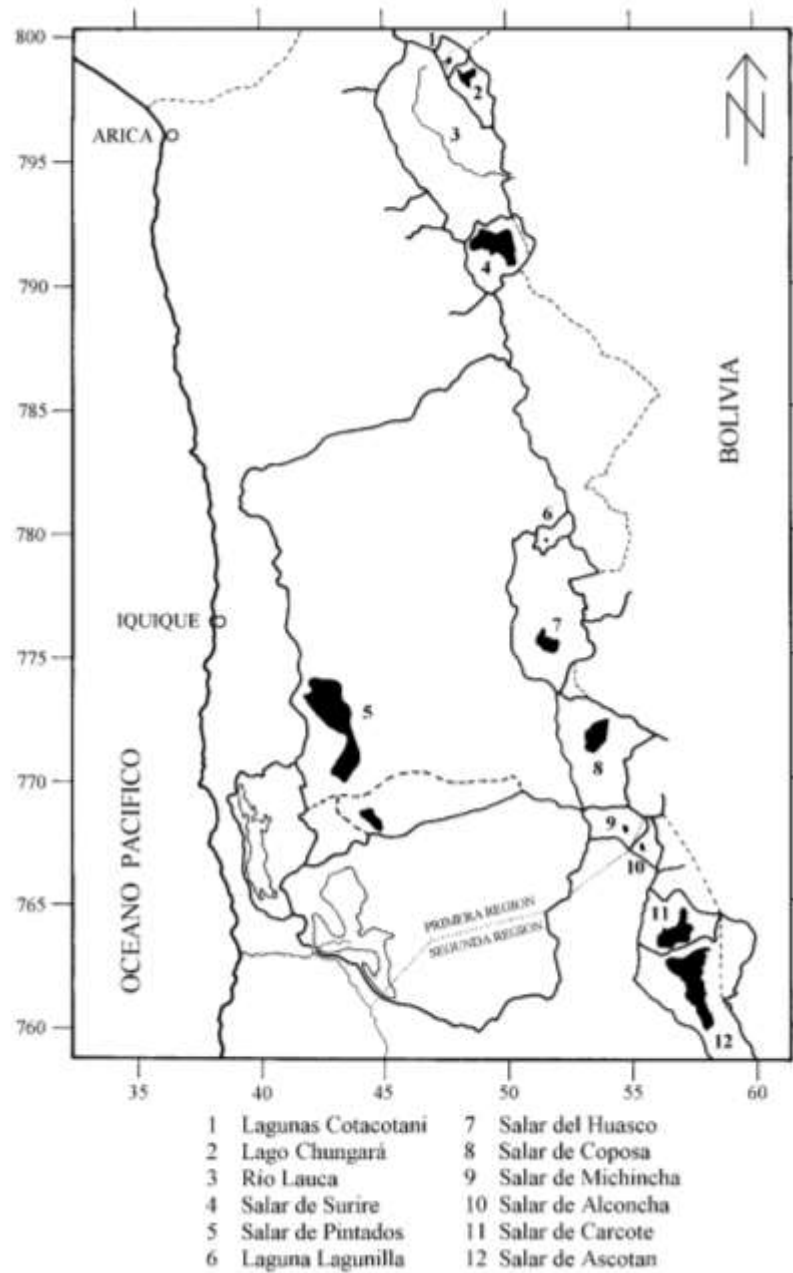
Cuencas cerradas del Norte de Chile

- 1 Lagunas Cotacotani
- 2 Lago Chungará
- 3 Río Lauca
- 4 Salar de Surire
- 5 Salar de Pintados
- 6 Laguna Lagunilla
- 7 Salar del Huasco
- 8 Salar de Coposa
- 9 Salar de Michincha
- 10 Salar de Alconcha
- 11 Salar de Carcote
- 12 Salar de Ascotan
- 13 Salar de Atacama
- 14 Salar de Tara
- 15 Laguna Helada
- 16 Salar de Aguas Calientes 1
- 17 Salar de Pujsa
- 18 Salar de Loyoques
- 19 Lag. Trinchera / Chivato Muerto
- 20 Salar de Aguas Calientes 2
- 21 Laguna Lejía
- 22 Laguna Miscanti
- 23 Laguna Miñiques
- 24 Salar del Lago
- 25 Laguna Tuyajto
- 26 Salar de Aguas Calientes 3
- 27 Salar de Capur
- 28 Salar de Imilac
- 29 Salar de Punta Negra
- 30 Salar de Aguas Calientes 4
- 31 Laguna de la Azufrera
- 32 Salar de Pajonales
- 33 Salar de Gorbea
- 34 Salar Ignorado
- 35 Salar de la Azufrera
- 36 Salar de Agua Amarga
- 37 Salar de Aguilar
- 38 Salar de La Isla
- 39 Salar de las Parinas
- 40 Salar Grande
- 41 Salar de los Infieles
- 42 Salar de Pedernales
- 43 Salar de la Laguna
- 44 Salar de Piedra Parada
- 45 Lagunas Bravas
- 46 Lagunas del Jilguero
- 47 Laguna del Bayo
- 48 Salar de Wheelwright
- 49 Laguna Escondida
- 50 Laguna Verde
- 51 Salar de Maricunga
- 52 Laguna del Negro Francisco



Fuente: Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III regiones - Chile. DGA (Risacher, 1999)

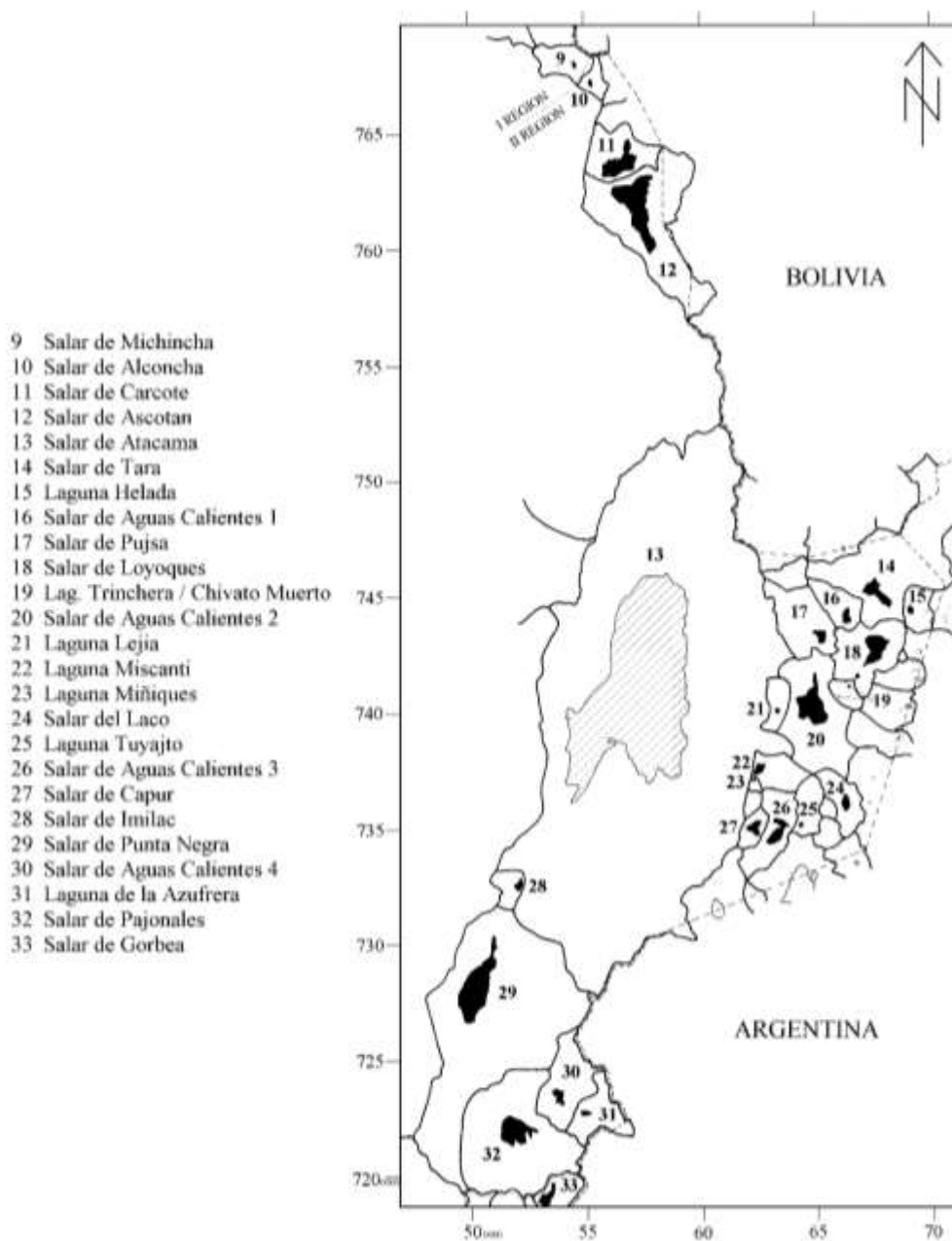
Cuencas de la Primera Región



Fuente: Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III regiones - Chile. DGA (Risacher, 1999)



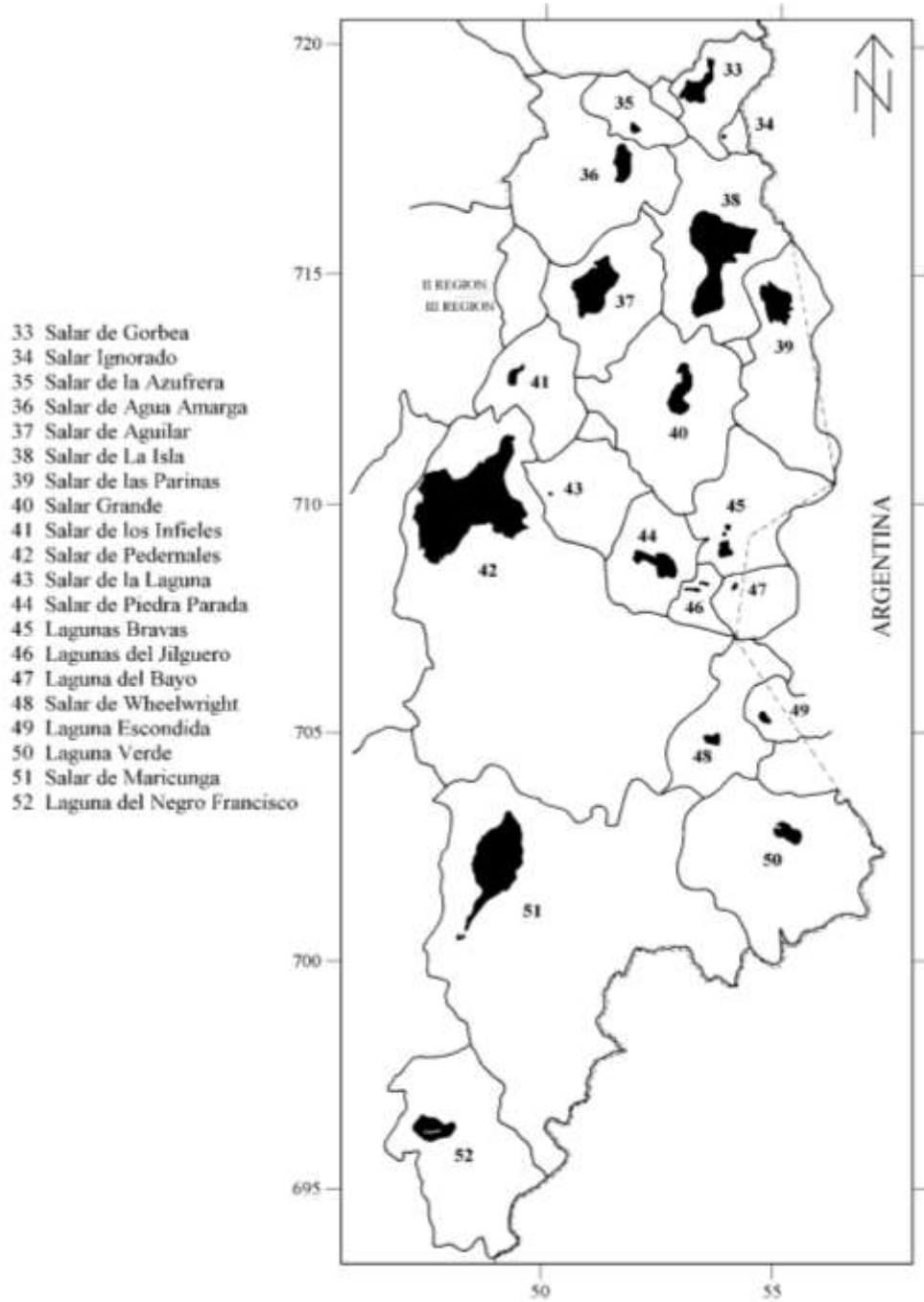
Cuencas de la Segunda Región



Fuente: Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III regiones - Chile. DGA (Risacher, 1999)



Cuencas de la Tercera Región



Fuente: Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III regiones - Chile. DGA (Risacher, 1999)



Tabla de estudios de las diferentes tecnologías DLE estudiadas por efectos medioambientales.

Summary of reported data for selected articles in the period 2017-2022. The selection criteria for compiled articles are: it should have been published in English, in a SCOPUS listed journal, and it should include enough experimental data to plot no less than 3 of the performance indicators

Fuente: (Vera et al., 2023b)

TECHNIQUE	NOVELTY	BRINE	EFFICIENCY	[Mg]/[Li](0)	[Mg]/[Li](F)	Li ⁺ RECOVERY	ESTIMATION OF ENERGY OR WATER CONSUMPTION - ANALYSIS OF SCALABILITY - CIRCULAR PRODUCTION
Ion pumping	Improve electrode performance	Simulated	Reported as ion exchange capacity= 35.2 mg/g	NR	NR	29%	NR
Ion pumping	Improve energy consumption	Simulated	Reported as ion exchange capacity= 34.8mg/g	NR	NR	NR	Distilled water is used for washing step
Ion pumping	A compressive study on the competitive effect of other ions on lithium adsorption	Simulated	Reported as ion exchange capacity= 13.88 mg/g	1	0.008	20%	Distilled water is used for washing step
Ion pumping	MOFs is tested as a new ION PUMPING film for Li uptake from dilute solutions	Simulated	Reported as ion exchange capacity= 37.55 mg/g	1	0.006	NR	NR
Ion pumping	Self-electrical energy recuperation (almost the system is not self-sufficiency)	Simulated	Reported as Li ⁺ uptake capacity = 10.88 mg/g	NR	NR	44%	Reported energy consumption= 1.007 Wh/mol.
Ion pumping	N-doping carbon encapsulated LMO film electrode for efficient Li electrosorption	Simulated	Reported as Li ⁺ uptake capacity = 37.14 mg/g. With a charge capacity of 79.58% and discharge of 82.38% after 50 cycles	3.75	NR	NR	NR
Ion pumping	An electrochemical flow reactor for the extraction of LiCl was designed and tested (part II)	Real brine from Olaroz, Argentina	Extraction efficiencies achieved up to 36 mg/g	0.65	NR	NR	For washing, 2.5- 3L of fresh water is needed for 0.03L of brine
Ion pumping	A flow-by sustainable electrochemical reactor was assessed for extraction of Li from brine	Real brine, from Hombre Muerto, Argentina	Maximum extraction capacity= 38.2mg/g	0.66	NR	4.9% (limited by the mass of the Li ₂ xMn ₂ O ₄ cathode)	Current efficiency= 85%. Specific energy consumption= 2.16 Wh/mol Li. 1L of fresh water is needed for each 1L of brine
Ion pumping	Redox-mediated lithium recovery system is proposed for continuous lithium recovery	Simulated	Li uptake capacity= 3.1 mg/g	1.82	0.25	NR	1.05L of fresh water is needed for each 1L of brine. Charge efficiencies of approximately 83-100% and energy consumption of 133-141 kJ/mol
Ion pumping	A fast, energy-saving, and environment-friendly process is proposed	Simulated	Reported as the LiCl production rates= 50–60 mmol Li/ m ² h	0.42	0.01	Final Li concentration= 23.3mM with a purity= 95%	Average freshwater production rate can reach around 12.6 kg/ m ² h. Average energy consumption= 4.83 Wh/mol Li. Current efficiency >90%
Electromembrane	A new liquid carrier with high Li ⁺ selectivity for an ED process	West Taijinair salt lake brine	A reduction equal to 99.5% is reached for Mg/Li ratio	3.09	0.054	NR	Current efficiency= 65%. Specific energy consumption= 16 Wh/g
Electromembrane	A new methodology for greatly reduce the Na/Li ratio from real brines precipitating a pure Na salt	Real, from the north of Argentina	Coulombic efficiency= 95%	0	0	NR	Energy consumption= 331.3 kWh for the lowest I applied. High purity by-product and desalinated water are obtained
Electromembrane	Membrane electrolysis is used for the removal of Ca ⁺² and Mg ⁺² from brines	Real, from the north of Argentina	Coulombic efficiency= 95.5%	6.96/ 13.03/ 19.7	0	100%	62 kWh/m ³ for brine with 3090 ppm of Mg ⁺² . High purity by-products are obtained. No waste is generated
Electromembrane	An EM process is proposed as a new technology to	Simulated	Coulombic efficiency= 99.7%. Purity of	NA	NA	90%	Energy consumption= 70.6 kWh.m ³ . Low

TECHNIQUE	NOVELTY	BRINE	EFFICIENCY	[Mg]/[Li](0)	[Mg]/[Li](F)	LI ⁺ RECOVERY	ESTIMATION OF ENERGY OR WATER CONSUMPTION - ANALYSIS OF SCALABILITY - CIRCULAR PRODUCTION
	crystallize Li ₂ CO ₃ without water evaporation		obtained Li ₂ CO ₃ = 97.5%				salinity water is recovered
Electromembrane	Prototype of a solar-powered electrodialyser	Seawater	NR	NR	NR	NR	For lithium release a washing step is needed
Electromembrane	Propose a clean production process for the utilization of concentrated seawater/salt lake brine	Seawater concentrate	Reductions equal to 88.9%; 83.2% and 76.7% are reached for Mg/Li ratio for different brines	35.18/ 54.3/ 72.72	3.91/ 9.13/ 16.97	76.5%	Optimal condition for Tajinar Brine: 0.66 kWh/(mol Li). Circular production schematized, target product: Li ₂ CO ₃ , by products will be NaCl, KCl, MgCl ₂ and Mg ₂ SO ₄
Electromembrane	A study on Li ⁺ /Mg ²⁺ separation performance	Simulated	Mg/Li ratio decreased 21.8 times	43.81	≤5	90%	Reported energy consumption= 0.0019 kWh/gL, at 5.9 A/m ²
Electromembrane	An study on Li ⁺ /Mg ²⁺ separation performance for simulated real brines by a selective ED process	Simulated	Li ⁺ is concentrated by a factor of 1.4 with a reduction equal to 88.3% on Mg/Li ratio	NR	NR	72.4%	At optimal voltage of 5 V, reported current efficient= 8.68%
Electromembrane	Simultaneously recovery of lithium and boron	Single or binary mixture	99.6% for Li separation and 72.3% for boron	NR	NR	83.6%	NR
Electromembrane	Reduction of heat requirements to obtain LiOH from brines with high LiCl concentration	Simulated	Produced LiOH with a purity between 96.0 – 95.4%	NR	NR	NR	Specific electricity consumption: 7.57 and 9.45 kWh per kilogram of LiOH
Electromembrane	A novel method based on electro-electrodialysis to produce LiOH	Single or binary mixture	Li ⁺ is concentrated by a factor of 3.9 times and LiOH is produced with a purity of 95.3%	NR	NR	NR	\$USD 2.56/ Kg LiOH
Electromembrane	S-ED is employed to desorb lithium from LMO sieves, instead of acid treatment	Simulated	Desorption time is reduced by 180 minutes compared to conventional treatment	NR	NR	70%	NR
Electromembrane	Focus on competitive effect of K ⁺ and Na ⁺ respect to Li ⁺ migration	Simulated	The efficiency of Mg-Li separation decreases by 79% with increasing Na ⁺ /Li ⁺ and by 74.4% with increasing K ⁺ /Li ⁺	NR	NR	67.6%	Energy consumption at optimized voltage (6V): 0.17 – 0.23 kWh/mol Li
Electromembrane	An ED process is validated with real brine. Focus is on improvement of efficiency and reduce energy cost	Real brine	A reduction of 90% on Mg/Li ratio	20	2.07	90.5%	Reported energy consumption 0.0045 kWh/g Li (20 V)
Electromembrane	Two different ED stacks were compared for separation of B and Li simultaneously	Single or binary mixture	62-69% for B removal and 93% for Li removal from feed solution	NR	NR	60-70%	NR
Membrane development	A new synthesis strategy to obtain a selective membrane with enhance properties	Single or binary mixture	Reported as Li ⁺ uptake capacity= 50.87 mg/g; 43.94 mg/g after 4 cycles	NR	NR	NR	NR
Membrane development	Synthesis of an ion imprinted membrane with enhanced hydrophilicity and stability	Single or binary mixture	Reported as Li ⁺ uptake capacity= 21.55 mg/g	NR	NR	70%	NR
Electromembrane-Ion pumping	Monovalent cation exchange membrane integrated with MCDI system to enhance the separation of Li from Mg	Single or Binary mixture	38.4% for Li removal and 19.2% for Mg removal in large module	1	0.39	NR	Energy consumption of large module= 0.0018 kWh mol ⁻¹ . Freshwater is used for Li recovery
Electromembrane-Ion pumping	LMO is employed as electrode for MCD system, improving adsorption capacity	Single or Binary mixture	NR	NR	NR	NR	Freshwater is used for washing and desorption steps
Electromembrane-Ion pumping	An electro-enhanced lithium ion recovery system is proposed	Simulated	NR	0.1/ 1	0.057/ 0.1	NR	Energy consumption: Wads and Wdes were 4.4 Wh/g-Li and 23.3 Wh/g-Li. Freshwater used for washing and desorption steps.
Electromembrane-Ion pumping	LMO is coated with a thin film of carbon to improve material capacity and process time	Single or Binary mixture	Reported as electrode capacity for Li uptake= 61%	NR	NR	NR	Freshwater used for washing and desorption steps
Nanofiltration	A higher separation factor for LiCl/MgCl ₂ was gotten after membrane modification with EDTA	Simulated	A reduction of 89.1% is reached for Mg/Li ratio	6.8	0.74	NR	NR

TECHNIQUE	NOVELTY	BRINE	EFFICIENCY	[Mg]/[Li](O)	[Mg]/[Li](F)	LI+ RECOVERY	ESTIMATION OF ENERGY OR WATER CONSUMPTION - ANALYSIS OF SCALABILITY - CIRCULAR PRODUCTION
Nanofiltration	Evaluation of NF process over different operational parameters	Simulated	A reduction of 99.2% is reached for Mg/Li ratio; negatively affect by monovalent cations and negatively by divalent ones	9.91	0.031	95%	NR
Nanofiltration	Exceedingly high permselectivity	Single or Binary mixture	Reported as Mg-Li separation factor= 71; decreases to 47 with increasing TDS of feed solution. Na-Li separation is deficient	5.57/ 14.44/ 17.17	0.079/ 0.18/ 0.23	NR	NR
Nanofiltration	High Li rejection due to the coupling strategy, NF + reverse electric field	Single or Binary mixture	Reported as Li+ rejection of 97.01%	NR	NR	92.5%	The energy consumption of the RENF process only has a 0.17% increase as compared with the NF process, an order of magnitude lower than that of the RO process
Nanofiltration	Different polymers were studied to enhance Li recovery	Single or Binary mixture	Reported as Li removal efficiency= 80%; decreases to 40% with the addition of Na+ or K+ and to 20% with the addition of Mg ²⁺	NR	NR	NR	A washing step is needed for Li recovery
Nanofiltration	Enhancement in salt permeation and selectivity by NF membrane functionalization	Single or Binary mixture	A reduction of 97.5% is reached for Mg/Li ratio	20.82	0.53	NR	NR
Membrane distillation + Nanofiltration	An hybrid system for lithium concentration	Simulated	Li+ is concentrated by a factor of 12	0.28	0.014	NR	The membrane process represents about 14% of the capital cost of solar evaporation. On the other hand, the operating costs are higher due to thermal energy and membrane replacement costs
Nanofiltration + electromembrane	Combine: NF (to separate magnesium from salt lake brine) + RO-CED (to enrich NF permeates) + BMED (to produce Lithium hydroxide)	North-Western of Qinghai province, China	LiOH·H ₂ O is produced with a purity of 99.6% was produced	0.06	0.001	92%	Under optimized conditions, current efficiency and energy consumption were 36.05% and 6.20 kWh/kg LiOH, respectively. Employs freshwater for BMED test
Ion exchange resins	A superior Li+ adsorption is reached	Simulated	Reported as ion adsorption capacity= 59.1 mg/g	NR	NR	NR	0.76 L of fresh water is needed for each 1 L of brine
Ion exchange resins	The process of Li+ uptake from a real brine is studied	Real, Qinghai West Taijinar Salt Lake	Reported as ion adsorption capacity= 19.22 mg/g	NR	NR	NR	1.04 L of fresh water is needed for each 1 L of brine
Ion exchange resins	Synthesis of an aluminium-doped ion-sieve with enhanced adsorption performance	Single or Binary mixture	Reported as ion adsorption capacity= 32.6 mg/g	NA	NA	37.6%	2.5 L of fresh water is needed for each 1 L of brine
Ion exchange resins	Porous fiber-supported HTO was prepared to improve Li recovery	Real, from a Geothermal Power Plant, Tibet	Reported as ion adsorption capacity= 24.67 mg/g	NR	NR	96.6%	0.1L of fresh water is needed for each 1 L of brine
Ion exchange resins	Spherical PVB-HTO composites having excellent Li extraction performance were synthesized	Simulated	Reported as ion adsorption capacity= 12 mg/g	1	0	85.5%	1L of fresh water is needed for each 1 L of brine
Ion exchange resins	A novel hierarchical cubic Li ₂ TiO ₃ -based hollow Li-ion sieve is constructed	Real brine, from Qinghai Province, China	Reported as ion adsorption capacity= 6.9 mg/g	56	NR	NR	NR
Ion exchange resins	α-A ₂ O ₃ supported membranes are prepared for Li extraction	Single or Binary mixture	Reported as ion adsorption capacity=9.74 mg/g	NA	NA	38.6%	0.62L of fresh water is needed for each 1 L of brine
Ion exchange resins	A novel lithium-ion sieve is synthesized	Real brine from Qaidam Basin	Reported as ion adsorption capacity=13.32 mg/g	225	15	99.98%	1.4L of fresh water is needed for each 1 L of brine

TECHNIQUE	NOVELTY	BRINE	EFFICIENCY	[Mg]/[Li](O)	[Mg]/[Li](F)	LI ⁺ RECOVERY	ESTIMATION OF ENERGY OR WATER CONSUMPTION - ANALYSIS OF SCALABILITY - CIRCULAR PRODUCTION
Ion exchange resins	A Cr-Doped Lithium Ion Sieve is synthesized and characterized	Real brine	Reported as ion adsorption capacity=28.35 mg/g	135.7	NR	81.7%	0.3L of fresh water is needed for each 1 L of brine
Ion exchange resins	A Fe3O4-doped magnetic lithium ion-sieve is prepared for Li extraction	Simulated	Reported as ion adsorption capacity=29.33 mg/g	NA	NA	NR	0.07L of fresh water is needed for each 1 L of brine
Ion exchange resins	Different TiO ₂ precursors are employed to control the ion sieve wettability	Simulated	Reported as ion adsorption capacity=30.11 mg/g	NA	NA	NR	0.1L of fresh water is needed for each 1 L of brine
Ion exchange resins	A novel composite lithium ion-sieve is synthesized and proved	Geothermal water from Tibet	Reported as ion adsorption capacity=11.35 mg/g	NA	NA	79.13%	0.01L of fresh water is needed for each 1 L of brine
Ion exchange resins	A superior lithium adsorption capacity is reached	Simulated	Reported as ion adsorption capacity=15.5 mg/g	0.2	0	NR	NR
Ion exchange resins	A novel synthetic method is employed to improve Li recovery	Geothermal water from Tibet	Reported as ion adsorption capacity=11.4 mg/g	NA	NA	88.42%	0.2L of fresh water is needed for each 1 L of brine
Selective precipitation	A new precipitation method is proposed to extract Li from salt lake brines	Real brine from West Tajinar	A reduction of 98.5% is reached for Mg/Li ratio	14.04	0.05	93.2%	Precipitating reagents can be recycled
Selective precipitation	Significant reduction of precipitation temperature by using seed induction process	Simulated	Li ₃ PO ₄ is obtained with a purity of 99.15%.	NR	NR	84%	Freshwater for wash the obtained Li ₃ PO ₄
Selective precipitation	High Li ⁺ enrichment from a complex brine, Dead Sea	Real brine from Dead sea	Lithium enrichment from 30 –40 mg/L in the EB to 1000 – 1700 mg/kg in the obtained solid precipitate	NR	NR	40%	Fresh water for washing step
Selective precipitation	Enhance divalent separation and Li recovery as Li ₂ CO ₃ by a co-precipitation process	Industrial refined brine from Albemarle industrial plant "La Negra"	Li ₂ CO ₃ with Mg concentrations from 1% to 3% was obtained with yields >85%	0.35	0.16	NR	Employs hot water, for wash
Selective precipitation	A closed loop process is proposed to prepare Li ₂ CO ₃ battery grade	Arizzaro Salt Lake, Argentina	Almost 90% for each step	0.93	0	74.9%	Cost estimation= 1700 \$/ton(Li ₂ CO ₃); employs freshwater for anolyte
Liquid-liquid extraction	Li was recovered by centrifugal extraction	Simulated	NR	NR	NR	NR	No freshwater needed
Ion pumping	A novel redox reagent is employed for fast lithium sequestration reactions	Simulated	Reported as Li uptake capacity of host material= 45 mg/g	5/ 6.5	0.01/ 0.01	NR	NR
Ion pumping	A chemical redox method to direct lithium extraction	Simulated	Absorption 90%, desorption 90%.	73.71	0.007	91.11%	NR
Ion pumping	Improve the cell design in order to solve the problem of mass transfer in diluted lithium solutions	Simulated	60%	NR	NR	37%	6.1 Wh/mol, 30% pumping; 5ml freshwater/1.35L brine; No circular production
Ion pumping	A pilot scale demonstration	Seawater concentrate	An enrichment in Li concentration of 1800 times	2028	0.048	NR	A 1m ³ tank is proposed at pilot scale for the distilled water needed for the process.
Immobilized solvent for Li⁺ extraction	Focus on Na/Li ratio, from a composite lithium membrane	Single or Binary mixture	NR	NR	NR	22.1%, after 27 days	Freshwater for membrane rinse.
Electrocoagulation	An alternative for chemical precipitation	Single or Binary mixture	95%	NR	NR	95%, by continuous mode	Operating cost per gram of Li= 0.023 US\$
Liquid-liquid extraction	Enhancement in Li ⁺ stripping with HCl	Single or Binary mixture	70%	40	1.79	63%	Water consumption = 3/10 of brine volume
Liquid-liquid extraction	A novel ionic liquid as co-extractant in a green process	Simulated	99.47% after a 4 stages of a cross flow process	274	0	100%	Water consumption = 7/6 of brine volume
Liquid-liquid extraction	A new co-extractant (NaBP _n) to enhance Li ⁺ recovery	Simulated	99.84% after 5 stages of a cross flow process	80	0	87%	Water consumption = 6/5 of brine volume
Liquid-liquid extraction	A mixed ternary solvent extraction system is validated with real brine	Real brine, East Tajinar Salt Lake	87%	21.5	1.06	0.54	Water consumption = 9/10 of brine volume
Liquid-liquid extraction	A functionalized ionic liquid is employed to improve Li extraction efficiency	Single or Binary mixture	83.3%	NR	NR	8.33	Water consumption = brine volume
Liquid-liquid extraction	A new separation process to extract lithium ions from salt lake brines is developed	Simulated	58.9%	77.88	NR	5.89	Water consumption = 0.2 brine volume

TECHNIQUE	NOVELTY	BRINE	EFFICIENCY	[Mg]/[Li](O)	[Mg]/[Li](F)	LI ⁺ RECOVERY	ESTIMATION OF ENERGY OR WATER CONSUMPTION - ANALYSIS OF SCALABILITY - CIRCULAR PRODUCTION
Liquid-liquid extraction	Li recovery from South America salt lakes by LLE is first proposed	Salt lake brine from South America	99.6%	1.05	0.001	9.96	Water consumption = 0.17 brine volume
Liquid-liquid extraction	A novel synergistic extraction with hydrophobic deep eutectic solvents is proposed	Simulated	95.7%	NR	NR	9.57	Water consumption = brine volume
Liquid-liquid extraction	A more stable and efficient extraction system is proposed	Real brine from West Tajinar	96.7%	18.17	0	967	Water consumption = 0.25 brine volume
Liquid-liquid extraction	A novel application of HBTA-TOPO-kerosene extraction system is proposed	Real, from lithium carbonate precipitation	96%	0	0	0.96	Water consumption = 0.9 brine volume
Liquid-liquid extraction	A novel ternary synergistic solvent extraction system is proposed	Single or Binary mixture	48.4%	NR	NR	4.84	Water consumption = 0.08 brine volume
Liquid-liquid extraction	A novel fluoride-free ionic liquid is synthesized and used as co-extractant	Simulated	99.2% after 5 stages of a cross flow process	NR	NR	0.99	Water consumption = 7/24 of brine volume



Informe elaborado por la Comisión Chilena del Cobre:

Analista

Ada Contreras Pinto

Con la colaboración de:

Jaime Moreno Rojas

Directora de Estudios y Políticas Públicas

Patricia Gamboa Lagos

Agosto 2024

Copyright by Cochilco, todos los derechos reservados

Se autoriza la reproducción total o parcial de este Informe, siempre que la fuente “Comisión Chilena del Cobre” y/o “Cochilco” sea citada, salvo que se indique lo contrario.

