

Introducción a las Tecnologías Directas de Extracción de Litio



AUTORES

Sebastián Gallegos

Ingeniero Analista Centro de
Energía UC

Proyecto EULAC FOR ENERGY
TRANSITION

René Rojas

Profesor Titular Facultad de Química y de
Farmacia UC

Director del Anillo de Tecnologías de
Extracción de Litio

Alvaro Videla

Director Centro de Energía UC

Profesor Asociado Departamento de
Ingeniería de Minería UC

Investigador Principal Anillo de
Tecnologías de Extracción de Litio

Visitor Researcher Lawrence Berkeley
National Lab

TABLA DE CONTENIDOS (1/2)

1	Introducción a las Tecnologías de Extracción Directa de Litio (DLE)	3
2	Método Convencional de Extracción de Litio desde Salmueras	8
3	Descripción de las Tecnologías de DLE	12
3.1	Tecnologías de Adsorción	13
3.1.1	Proceso Arcadium Lithium	14
3.1.2	Proceso Eramet	15
3.2	Tecnologías de Intercambio Iónico	17
3.2.1	Proceso Lilac Solutions	18
3.3	Tecnologías de Extracción por Solventes	20
3.3.1	Proceso Adionics	21
3.4	Membranas y Electro Membranas	23
3.4.1	Tecnología de Electrodialisis (ED)	24
3.4.2	Tecnologías de Ósmosis Inversa (OI)	25
3.4.3	Tecnologías de Nanofiltración (NF)	26
3.4.4	Proceso ElectraLith	26
3.5	Tecnologías de Separación Electroquímica	28
3.5.1	Proceso Mangrove Lithium	29

TABLA DE CONTENIDOS (2/2)

4	Resumen Tecnologías	31
4.1	Ventajas y Desventajas Tecnologías de DLE	32
4.2	Comparación de Proyectos en Base a CAPEX y OPEX	37
4.3	Comparación Global de Tecnologías de DLE	40
4.4	Catastro Proyectos DLE	44
4.5	Consideraciones Finales para la Aplicación de Tecnologías de DLE	49
5	Referencias	50

1

Introducción a las Tecnologías de Extracción de Litio (DLE)

En las últimas décadas, el Litio ha emergido como un recurso estratégico de suma importancia en el contexto global, principalmente por su papel central en la transición hacia la electromovilidad y el cumplimiento de los compromisos internacionales de carbono neutralidad. Este mineral es un componente clave en la fabricación de baterías recargables utilizadas en vehículos eléctricos, dispositivos electrónicos y sistemas de almacenamiento energético, todos ellos indispensables para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente en el sector transporte, uno de los principales responsables de estas emisiones a nivel mundial.

A pesar de ser el trigésimo segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, con una concentración promedio de 20 partes por millón (Dye, 2023), el Litio se encuentra en concentraciones mucho menores que otros elementos como el cobre (60 partes por millón).

Las principales fuentes de Litio (Figura 1) incluyen salares (60%), pegmatitas y granitos (27%), arcillas enriquecidas (7%), salmueras geotérmicas (3%) y zeolitas enriquecidas (3%).

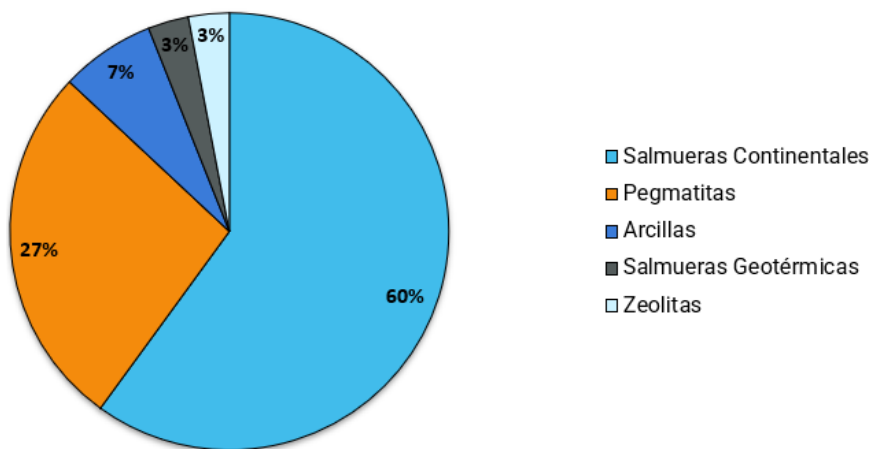


Figura 1. Distribución de fuentes naturales de Litio
Fuente: Elaboración propia a partir de COCHILCO, 2023.

Según datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2024), los recursos globales de Litio ascienden actualmente a 105 millones de toneladas. De este total, más del 50 % se concentra en el Triángulo del Litio, una región estratégica que abarca Bolivia, Argentina y Chile. Estos países, junto con Estados Unidos, Australia y China, albergan más del 80 % de los recursos mundiales (Figura 2), configurando un panorama geopolítico de gran relevancia para la industria.

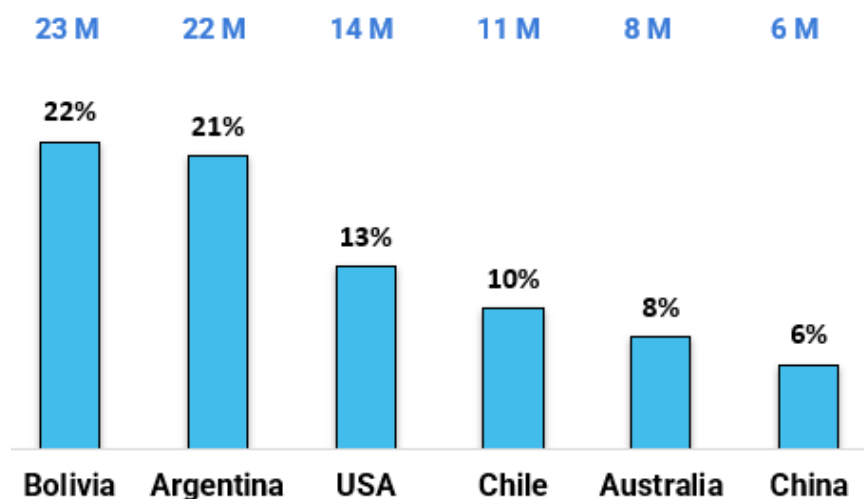


Figura 1. Distribución de recursos de Litio a nivel mundial (Millones de toneladas de Litio metálico)

Fuente: Elaboración propia a partir de USGS, 2024.

La historia de la extracción de Litio en salmueras se inició en 1966 tras la entrada en vigencia del primer método industrial de producción de sales de Litio concentradas en Silver Peak, Nevada, USA. Este método incluía un proceso de extracción de salmuera y su almacenamiento en pozas de evaporación de agua de manera de ir precipitando las sales menos solubles y concentrando la salmuera en Litio. Esta tecnología de extracción de litio fue traída a Chile en la década de 1980, convirtiéndose en el método convencional de explotación del Litio debido principalmente a su alta eficiencia en términos de costo operativo. Sin embargo, y a pesar de su importancia, presenta importantes desafíos, especialmente en lo que respecta a la pérdida de agua vía evaporación y la baja recuperación de Litio desde la salmuera.

La evaporación de agua ha generado gran preocupación en las comunidades aledañas a las operaciones de extracción del Litio, comunidades ubicadas en lugares desérticos o semidesérticos, donde el agua juega un rol vital. Por ejemplo, en el Salar de Atacama (Chile) y el Salar de Olaroz (Argentina), se ha estimado que el proceso de evaporación consume cerca 23 y 50 m³ por tonelada de Carbonato de Litio (Li₂CO₃) producido, respectivamente (Vera et al., 2018).

Mientras que en el Salar de Uyuni (Bolivia) esta cifra alcanzaría los 81 m³ por tonelada (Centro de Documentación e Información Bolivia, 2024). Estas cifras han generado presión tanto de las comunidades locales como de organismos reguladores para buscar alternativas tecnológicas más sostenibles, impulsando así en las últimas décadas el desarrollo de tecnologías de Extracción Directa de Litio (DLE).

Las tecnologías de DLE son un conjunto de soluciones que buscan permitir extraer Litio de las salmueras sin necesidad de evaporar el agua, permitiendo al mismo tiempo reinyectar la salmuera desprovista de Litio en el salar, minimizando así los impactos en los ecosistemas circundantes. Dentro de las tecnologías DLE, se encuentra tecnologías basadas en métodos de adsorción, intercambio iónico, extracción por solventes, membranas, electro membranas, y electrodiálisis, entre otros.

Las primeras tecnologías alternativas al método convencional de evaporación de salmueras de Litio datan de la década de 1970 (Figura 3). En dicho año Dow Chemical desarrolló la tecnología de adsorbentes en base de aluminio que permitirían posteriormente extraer el Litio desde salmueras, sentando las bases para el desarrollo de otras técnicas. Esta tecnología fue cedida a FMC quien en 1997 implementó el primer uso comercial de la tecnología de adsorción en el proyecto Fénix, en el Salar del Hombre Muerto en Argentina. Años después, en 2017, FMC reorganizó su negocio de litio bajo el nombre de Livent Corporation.

El mercado del Litio experimentó un auge significativo en 2022, cuando los precios del Carbonato de Litio alcanzaron los USD 80.000 por tonelada. Este hito despertó el interés de nuevos actores en la industria y provocó una serie de reestructuraciones que se materializaron en 2024. En enero de ese año, la empresa australiana Allkem y la estadounidense Livent se fusionaron para dar origen a Arcadium Lithium. Recientemente, en octubre del 2024, Rio Tinto adquirió Arcadium Lithium en una transacción valuada en 67.000 millones de dólares con lo que la transnacional se posiciona fuertemente en la creciente industria del Litio.

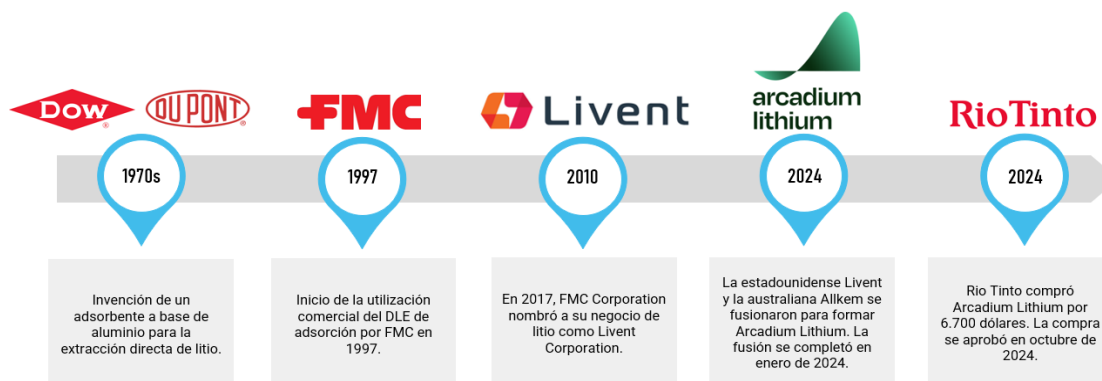


Figura 3. Origen y evolución de las tecnologías de extracción directa de Litio

Fuente: Elaboración propia a partir de Vulcan Energy, 2023.

La operación en el Salar del Hombre Muerto en Argentina representó la primera integración exitosa de la tecnología de DLE a escala comercial, con lo cual el ecosistema de innovación en tecnologías de DLE ha ganado atención y se ha transformado en un ecosistema dinámico y altamente diverso. En los últimos cinco años, más de 40 startups (Figura 4) han desarrollado nuevas soluciones basadas en distintas tecnologías las cuales están en diferentes grados de desarrollo. La mayoría de estas empresas tiene presencia o manifiestan interés de posicionarse en Chile, Argentina o Bolivia, operando plantas piloto o en fases avanzadas de construcción, lo que subraya el crecimiento acelerado del sector en la región. (Bunel, 2024).

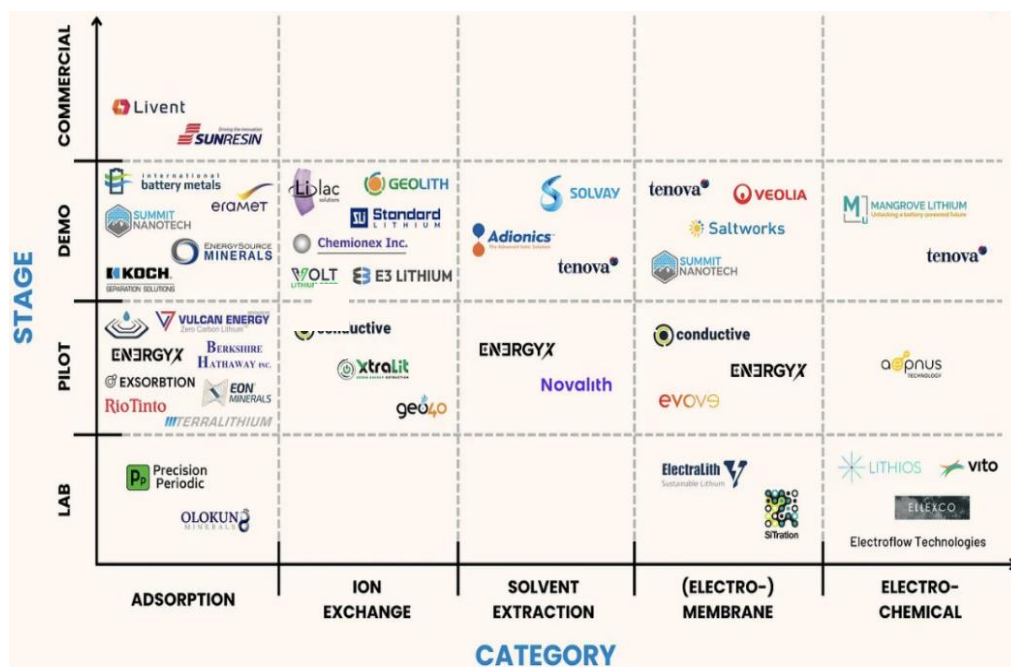


Figura 4. Catastro no exhaustivo de proveedores de tecnologías de DLE por categoría y estado de madurez
Fuente: Extantia, 2024.

La implementación exitosa de estas tecnologías aún presenta significativos desafíos cuyas soluciones están en proceso de desarrollo, siendo parte de la discusión su flexibilidad, la eficacia del proceso para las diferentes composiciones de los salares alrededor del mundo, la capacidad real de reinyectar la salmuera residual desprovista de Litio al salar sin impacto en el equilibrio del salar, y la demanda de agua fresca requerida para el funcionamiento óptimo de estas tecnologías.

Este informe tiene como objetivo proporcionar una recopilación sobre las características y el estado actual de las principales tecnologías de DLE. Este reporte está pensado para acelerar el proceso de aprendizaje y va dirigido a todos quienes desean informarse y

participar activamente en esta creciente industria. El reporte emplea un lenguaje accesible y en lo posible no técnico, con el fin de facilitar su comprensión a un público diverso. Además, se incluyen ejemplos de aplicaciones comerciales en proyectos actuales a nivel global, lo que permitirá a los lectores entender de manera clara e intuitiva el panorama actual de estas tecnologías.

El documento se estructura en tres secciones principales. En la primera, se aborda el método convencional de extracción de litio, destacando sus ventajas y desventajas. Estas últimas sirven para contextualizar la necesidad de buscar alternativas tecnológicas más sostenibles y eficientes. La segunda sección se centra en las tecnologías DLE, profundizando en cinco categorías principales: adsorción, intercambio iónico, extracción por solventes, membranas y electro-membranas, y separación electroquímica. Cada tecnología incluye una descripción del proceso, y ejemplos concretos de implementación en proyectos reales.

En la tercera sección, se presenta un análisis comparativo entre las diferentes tecnologías de DLE, evaluando sus ventajas y desventajas en función de una serie de indicadores de desempeño propuestos. Finalmente, se incluye un catastro actualizado de los proyectos DLE en desarrollo y se discuten consideraciones clave para garantizar la implementación exitosa de estas tecnologías.

2

Método Convencional de Extracción de Litio desde Salmueras

El método de extracción de Litio convencional desde salmueras para la producción de Carbonato de Litio involucra tres pasos consecutivos: extracción de salmueras por bombeo desde el salar o laguna correspondiente, pozas de evaporación de agua y precipitación de sales contaminantes, y finalmente un proceso de purificación y carbonatación para llegar a un producto comercial (Figura 5). La extracción de salmueras desde salares y/o lagunas involucra la instalación de un número importante de estaciones de bombeo desde los cuales se extrae la salmuera y que por lo tanto reducen el nivel de salmuera almacenada en el salar. Esta salmuera es transportada mediante tuberías hacia pozas de baja altura y gran extensión donde producto la radiación del sol el agua es evaporada. En la medida que el agua es evaporada la concentración de los iones aumenta en la salmuera y comienzan a precipitar aquellas sales de menor solubilidad dejando las restantes en la salmuera remanente. Una vez que la salmuera ha alcanzado una concentración de Litio alta se envía a un proceso industrial donde el Litio es precipitado de manera pura en forma de Carbonato (Li_2CO_3).

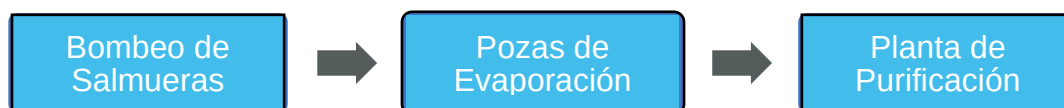


Figura 5. Esquema general del método convencional de extracción de Litio desde salmueras
Fuente: Elaboración propia.

En el caso del salar de Atacama, la salmuera extraída contiene una baja concentración inicial de Litio, cercana al 0,2% en peso, junto con altas concentraciones de otros elementos como Sodio, Magnesio, Boro y Potasio. El sistema de pozas de evaporación está diseñado para aprovechar la energía solar y facilitar tanto la concentración de Litio como la precipitación de sales no deseadas, tales como Cloruro de Sodio (NaCl), Cloruro de Potasio (KCl) y Cloruro de Magnesio (MgCl_2). La Figura 6 muestra como en la primera poza se precipitaría Halita reduciendo la presencia de Sodio en la salmuera, en la segunda poza se precipita Silvinita reduciendo el contenido de Sodio y Potasio en la salmuera, en la tercera poza se precipita Carnalita de Potasio, en la cuarta Bischofita, y finalmente Carnalita de Litio.

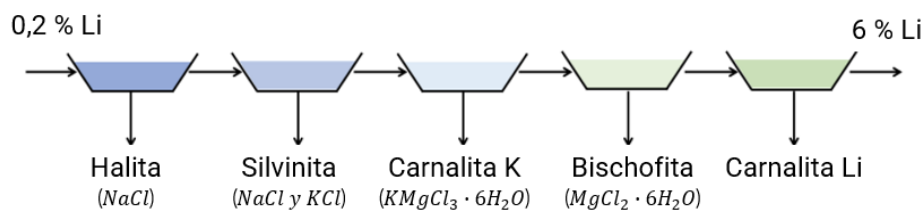


Figura 6. Diagrama esquemático de pozas de evaporación

Fuente: Lee. M, 2020.

A lo largo de un proceso continuo que se extiende entre 14 y 18 meses, la concentración de litio en la salmuera aumenta gradualmente desde el 0,2% inicial hasta aproximadamente un 6%, lo que representa un factor de concentración del Litio de 30 veces ($6/0,2$) que se logra mediante la evaporación de agua y la precipitación de los otros elementos contaminantes.

La precipitación de otros elementos en la salmuera se basa en las diferentes solubilidades de las sales presentes, lo que permite una cristalización fraccionada. En este proceso, las sales menos solubles precipitan primero, separándose de la solución, mientras que el Cloruro de Litio, al ser más soluble, permanece en solución durante el avance del proceso de evaporación. La recuperación efectiva de Litio en esta parte del proceso alcanza aproximadamente un 55% (Lee, 2020), dado que parte del Litio se pierde debido a la coprecipitación con otras sales, además de pérdidas por impregnación y arrastre de Litio en los sólidos precipitados.

Como muestra la Figura 7, una vez que la solución ha sido concentrada en Litio, la salmuera concentrada se somete a un proceso de extracción por solvente a pH bajo regulado con ácido clorhídrico (HCl) para remover el boro. Este paso es crucial ya que el boro puede contaminar los procesos posteriores de precipitación de Litio. Luego, la salmuera libre de boro se trata con Hidróxido de Calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y Carbonato de sodio (Na_2CO_3). Esto precipita el magnesio y el calcio remanente en forma de Hidróxido de Magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), Carbonato de Magnesio (MgCO_3) y Carbonato de Calcio (CaCO_3), que se eliminan del proceso como sólidos residuales. La solución resultante, que contiene principalmente cloruro de Litio con trazas de impurezas, se somete a purificación adicional mediante columnas de intercambio iónico para eliminar Ca^{+2} y Mg^{+2} de la solución dejando solo trazas de ellos en la solución. La solución final de Cloruro de Litio tiene un mínimo contenido de impurezas y está lista para precipitar Carbonato de Litio sin impurezas.

La salmuera purificada finalmente se trata con Carbonato de Sodio (Na_2CO_3) y se lleva a 80°C para precipitar el Carbonato de Litio (Li_2CO_3) el cual es separado de la solución empobrecida en Litio, rica en Cloruro y Carbonato de Sodio conocida como solución madre.

Este proceso de purificación que ocurre en la planta química a partir de la salmuera concentrada proveniente de las pozas tiene una eficiencia cercana al 90%, lo que significa que la mayor parte del Litio presente en la salmuera se recupera en forma de Carbonato de Litio.

Posteriormente, el Carbonato de Litio precipitado se filtra para separarlo del líquido restante, lavándose de ser necesario para eliminar impurezas como sales de sodio y potasio remanentes. Este proceso de lavado debe asegurar que el Carbonato de Litio tenga la pureza necesaria para calificar como Carbonato de Litio grado batería, u otras aplicaciones industriales y tecnológicas. Finalmente, el Carbonato de Litio purificado se seca y se prepara para su comercialización.

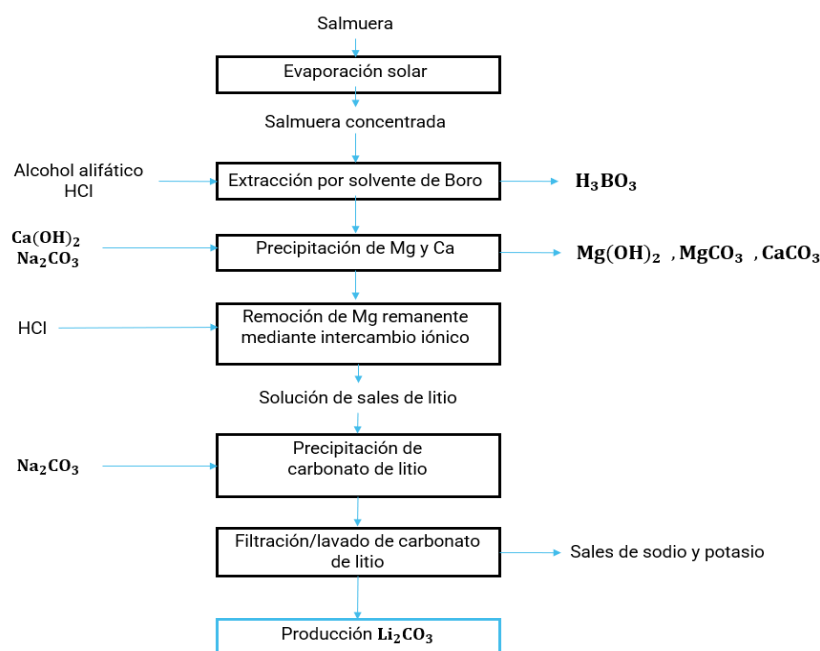


Figura 7. Diagrama de proceso de extracción de Litio desde salmueras

Fuente: Elaboración propia a partir de Pankaj et al., 2016

Recientemente, el método de extracción de Litio desde salmueras ha sido objeto de debate público debido al impacto que podría tener en el equilibrio hídrico del salar. Este impacto está relacionado con el proceso de evaporación y la precipitación fraccionada de sales, durante el cual se estima que se evaporan aproximadamente 170.000 litros de agua de salmuera por cada tonelada de carbonato de litio producida (Albemarle, 2016). Sin embargo, hay que considerar que esta agua no sería utilizable por las comunidades aledañas directamente sin un sistema previo de tratamiento de agua dada su alta salinidad.

En respuesta a estos retos, las tecnologías de DLE ofrecen una alternativa al método convencional permitiendo la extracción selectiva de Litio sin la necesidad de realizar la etapa de evaporación, pero aun requiriendo los procesos de bombeo y purificación como se observa en la Figura 8.

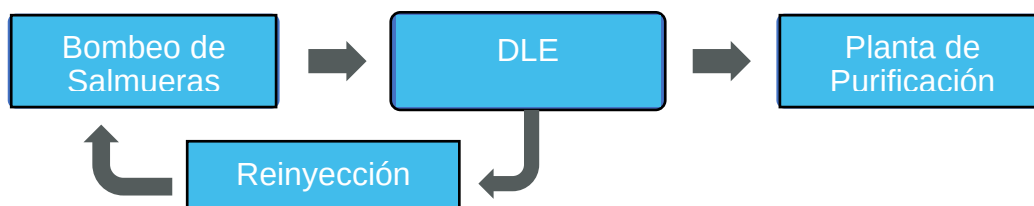


Figura 8. Esquema general del método DLE para el tratamiento de salmueras

Fuente: Elaboración propia.

3

Descripción de las Tecnologías de DLE

Aunque la extracción directa de Litio ha sido utilizada por más de dos décadas por Livent (ahora Rio Tinto) en el Salar del Hombre Muerto (Catamarca, Argentina), solo en la última década han emergido innovaciones tecnológicas significativas para procesar Litio de manera no convencional. Los primeros desarrollos tecnológicos estuvieron impulsados por el interés en aprovechar salmueras geotérmicas en los Estados Unidos. Sin embargo, en ese momento, los precios del Carbonato de Litio no justificaban las inversiones necesarias para implementar nuevas tecnologías.

Hoy la situación ha cambiado radicalmente. El aumento en la demanda de Litio ha llevado la producción global de Litio desde unas 200.000 toneladas anuales a cerca de 1,5 millones de toneladas actualmente, con proyecciones que superan los 3 millones de toneladas para el año 2035 si sigue penetrando la entrada de autos eléctricos en el mercado.

Existen diversos enfoques tecnológicos vía DLE para la extracción y recuperación de Litio a partir de salmueras (Figura 9). Entre los más desarrollados se destacan la adsorción, el intercambio iónico, la extracción por solventes, la separación mediante membranas y las metodologías electroquímicas.

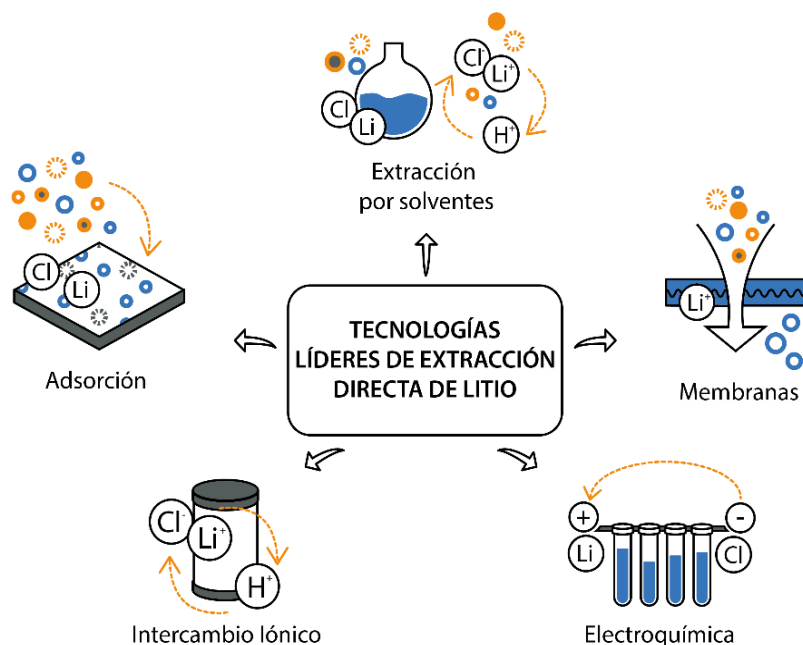


Figura 9. Principales tecnologías de DLE

Fuente: Elaboración propia a partir de Extantia, 2024.

3.1 Tecnologías de Adsorción

A finales de la década de 1970, Dow Chemical desarrolló un adsorbente inorgánico basado en hidróxido de aluminio (Figura 10) con el objetivo de capturar Litio desde salmueras enriquecidas de la región de Smackover, Arkansas. El Dr. John Burba, experto en química y física, lideró el desarrollo de esta tecnología, la cual posteriormente fue implementada por FMC (ahora Rio Tinto) en el Salar del Hombre Muerto (Argentina) en 1997. (International Battery Metals, s.f.).

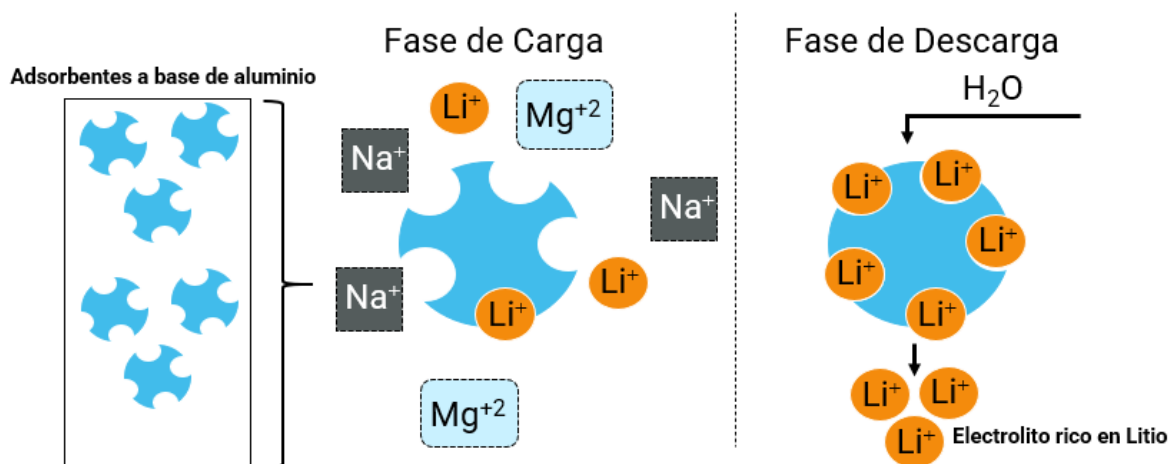


Figura 10. Mecanismo de adsorción para la recuperación de Litio, mediante adsorbentes a base de aluminio
Fuente: Elaboración propia a partir de Boroumand & Razmjou, 2024.

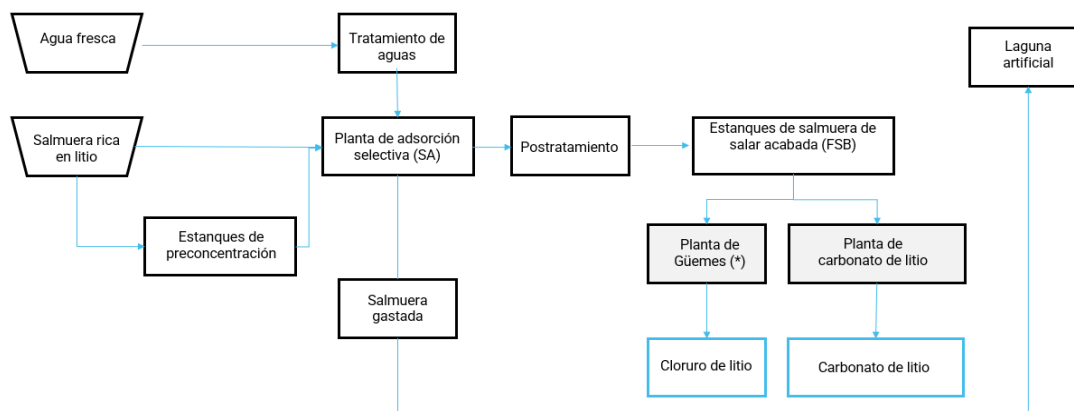
La tecnología de extracción directa de litio (DLE) basada en adsorción se fundamenta en la adherencia física de iones de Litio a la superficie de partículas sólidas compuestas por materiales adsorbentes a base de aluminio. Este proceso es reversible, ya que no implica un intercambio de electrones. Investigaciones han demostrado que los adsorbentes basados en hidróxidos de aluminio presentan una alta selectividad hacia el litio, lo que los hace particularmente eficaces para este propósito. Los iones de Litio se alojan en los huecos octaédricos de las capas cristalinas de hidróxidos de aluminio, como la gibbsita, la bayerita y nordstrandita. Estos Hidróxidos pueden formar matrices de intercalación con Litio, mientras que los hidróxidos de aluminio amorfos reaccionan con cloruro de Litio a alta temperatura para formar el compuesto cristalino $\text{LiCl} \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3$.

Los hidróxidos dobles de aluminio-litio han demostrado ser también efectivos para la recuperación de Litio desde salmueras geotérmicas, destacándose como una solución versátil para diferentes tipos de salmueras (Bunel, 2024). Esta tecnología mejora su eficiencia en salmueras en la medida que aumenta la concentración de Litio, y se eleva tanto la salinidad y la temperatura, factores que facilitan la intercalación del Litio (Vera et al., 2018).

A pesar de sus ventajas, esta tecnología aún no ha sido aplicada industrialmente con reinyección de salmuera agotada, ya que podría diluir las concentraciones de Litio de la salmuera de alimentación afectando el rendimiento del proyecto a largo plazo.

3.1.1 | Proceso Arcadium Lithium

En el Salar del Hombre Muerto, el Proyecto Fénix, operado por Arcadium Lithium (ahora Rio Tinto), ha estado en operación desde 1997. Este proyecto representa un ejemplo de DLE a escala comercial. El proceso, descrito en una patente de FMC de febrero de 1997, consiste en hacer circular salmuera a través de columnas llenas de alúmina policristalina hidratada (PHAI). Esta se prepara mediante la reacción de alúmina con Hidróxido de Litio, neutralizado posteriormente con ácido clorhídrico diluido en una solución portadora de bicarbonato de sodio. La cristalización resultante de "cloruro de Litio-hidróxido de aluminio" ($\text{LiCl} \cdot \text{Al}(\text{OH})_3$), al que se le quita el Litio mediante lavado con agua, deja el PHAI con capacidad para adsorber Cloruro de Litio en soluciones fuertemente iónicas. Como resultado, al pasar las salmueras por las columnas, el Litio disuelto en la solución de salmuera se adsorbe en la superficie del PHAI. Una vez saturadas de Litio, las columnas se retiran y el Litio se extrae del PHAI lavándolo nuevamente con agua (Figura 11). Para asegurar que se ha recuperado todo el Litio, las columnas se lavan con una solución saturada de cloruro sódico, proceso que también devuelve al PHAI su capacidad inicial de adsorber Litio desde la solución de salmuera (Roskill, 2016).



* La planta de Güemes se encuentra fuera de las instalaciones

Figura 11. Diagrama del proceso de Arcadium Lithium en proyecto Fenix (Argentina)

Fuente: Elaboración propia a partir de Arcadium Lithium, 2023.

La solución de Litio obtenida se bombea a estanques de evaporación solar para aumentar su concentración antes de ser procesado nuevamente, utilizando un proceso similar al método convencional descrito anteriormente.

Un desafío importante asociado a esta tecnología es el uso elevado de agua fresca, que alcanza los 71 m³ por tonelada de Li₂CO₃. Esto corresponde a un 200% y 50% más que el volumen unitario utilizado en el Salar de Atacama y el Salar de Olaroz, respectivamente, lo que pone de relieve que una tecnología de DLE no necesariamente podría requerir menos agua que el proceso convencional.

3.1.2 Proceso Eramet

En el último tiempo Eramet se ha posicionado como el líder en patentes relacionadas con DLE, habiendo desarrollado una tecnología versátil para diversas salmueras, especialmente aquellas ricas en iones divalentes como Calcio y Magnesio. Su proceso incluye una etapa de nanofiltración para remover calcio y magnesio antes de la etapa de DLE (Figura 12), además del reciclaje del 60% del agua utilizada empleando ósmosis inversa para concentrar la solución de LiCl y NaCl, seguida de una evaporación forzada para alcanzar las concentraciones óptimas de Cloruro de Litio necesarias para la carbonatación. Ambos efluentes (recuperación de agua proveniente de osmosis inversa y

evaporación forzada) son combinados y constituyen parte del agua que se ocupa para remover LiCl del adsorbente (Eramet, 2023).

Respecto a la reinyección, Eramet ha optado por enviar toda la salmuera agotada de Litio a pozas de evaporación solar mientras evalúa la viabilidad de la reinyección.

La producción del proyecto Centenario en Argentina comenzó a mediados de 2024, y se espera tenga un OPEX de aproximadamente 5.000 USD/t LCE, con una capacidad anual de 24.000 toneladas de Carbonato de Litio.

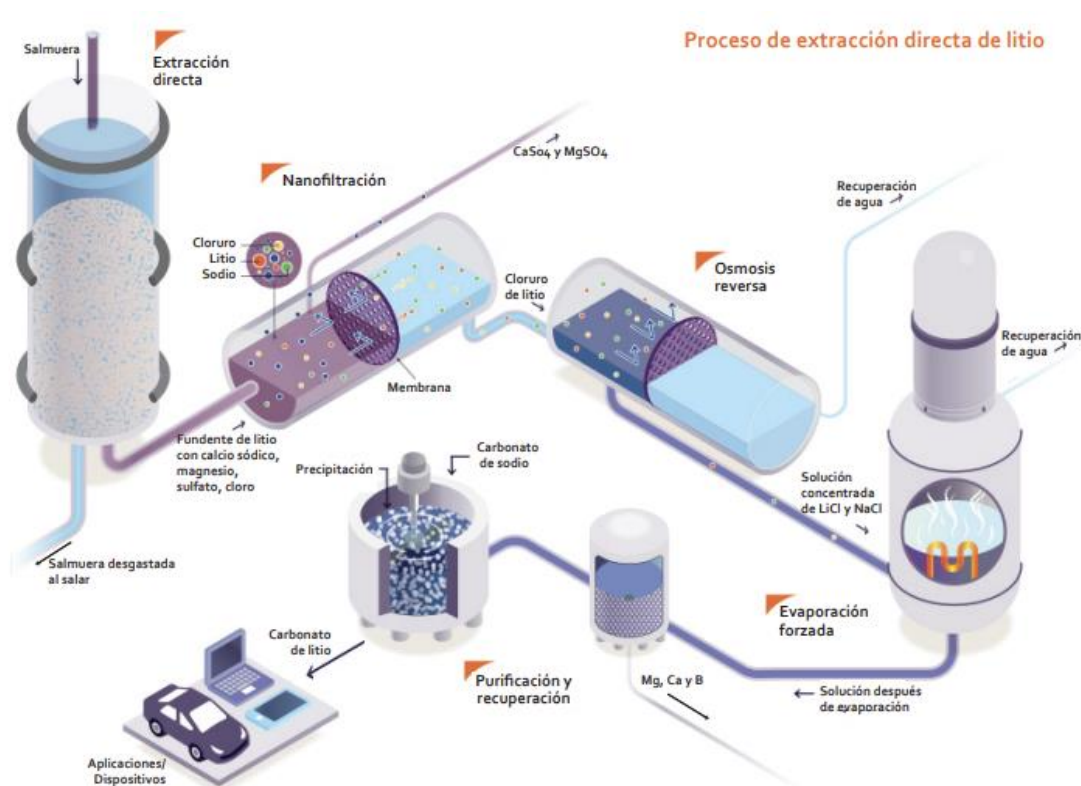


Figura 12. Diagrama del proceso de Eramet en proyecto Centenario-Ratones (Argentina)
Fuente: Eramet, 2024.

3.2 Tecnologías de Intercambio Iónico

La tecnología de intercambio iónico se remonta a mediados de la década de 1930, cuando Adams y Holmes descubrieron las propiedades de intercambio de ciertos materiales sintetizados a partir de formaldehído y fenol. Este avance impulsó el desarrollo de resinas de intercambio iónico, que hoy son ampliamente utilizadas en diversas industrias como el tratamiento de agua y la extracción de metales preciosos. La versatilidad de estas resinas fue rápidamente reconocida, lo que resultó en su aplicación en áreas como el Proyecto Manhattan (1942), donde los intercambiadores de iones sintéticos desempeñaron un papel crucial en la producción de plutonio (Lucy, 2003).

En la actualidad, se han desarrollado polímeros orgánicos capaces de extraer selectivamente Litio en presencia de otros iones metálicos. Estos polímeros son diseñados con sitios de intercambio específicamente estructurados para intercambiar cationes (ej: H^+) en la resina por ion Li^+ en solución. Esta propiedad se logra mediante procesos de síntesis química que permiten la inclusión de sitios reactivos o de quelación en estructuras específicamente dimensionadas mediante un proceso de impresión de iones para permitir la entrada selectiva de Litio, dejando fuera a los iones competidores (Figura 13).

Las resinas de intercambio iónico, en su mayoría a base de óxidos de manganeso (LMO) y titanio (LTO) presentan una alta afinidad por el ion Li^+ . Durante el proceso de intercambio, estas resinas, empaquetadas en columnas, capturan selectivamente el Litio, reemplazando un catión, como H^+ . Posteriormente, una solución ácida o agua fresca se emplea para desorber los cationes Li^+ y generar una solución concentrada de $LiCl$. Sin embargo, la elución ácida provoca pérdidas significativas de manganeso y titanio, degradando el material a lo largo del tiempo y disminuyendo su eficiencia. Para mitigar este problema, se ha investigado el dopaje de LMO con aluminio, lo cual mejoraría la estabilidad cíclica y reduciría la disolución del manganeso. Los adsorbentes basados en titanio, por su parte, no sufren una disolución apreciable, lo que permite una mayor estabilidad, aunque su durabilidad sigue siendo un desafío por el alto costo operacional (Farahbakhsh et al., 2024).

A diferencia de tecnologías de adsorción física (sin intercambio iónico), este método no se vería afectado por la dilución de la salmuera reinyectada ya que mantiene su rendimiento aún en concentraciones bajas de Litio (concentraciones de aproximadamente 10 mg/L).

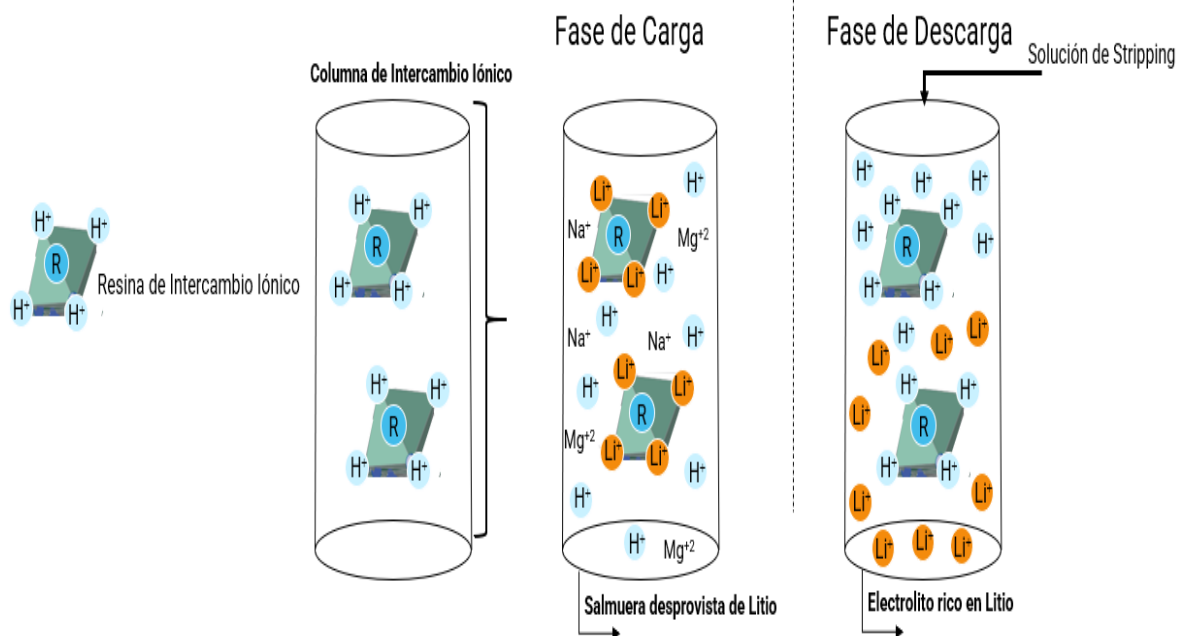


Figura 13. Mecanismo de intercambio iónico para la recuperación de Litio

Fuente: Elaboración propia a partir de Yang et al., 2024.

3.2.1 | Proceso Lilac Solutions

Lilac Solutions, fundada en 2016 por David Snyder, ha propuesto nuevas tecnologías de intercambio iónico derivadas de investigaciones doctorales en la Universidad de Northwestern, USA. Las microesferas de intercambio iónico y el sistema continuo de procesamiento de salmueras de Lilac permiten concentrar eficientemente soluciones de Litio a partir de salmueras de baja concentración generando Cloruro de Litio y una salmuera descargada en Litio que podría ser retornada al salar (Figura 14). La optimización de estas tecnologías ha permitido mejorar la estabilidad y el rendimiento de las microesferas de intercambio iónico (Lilac Solutions, 2023).

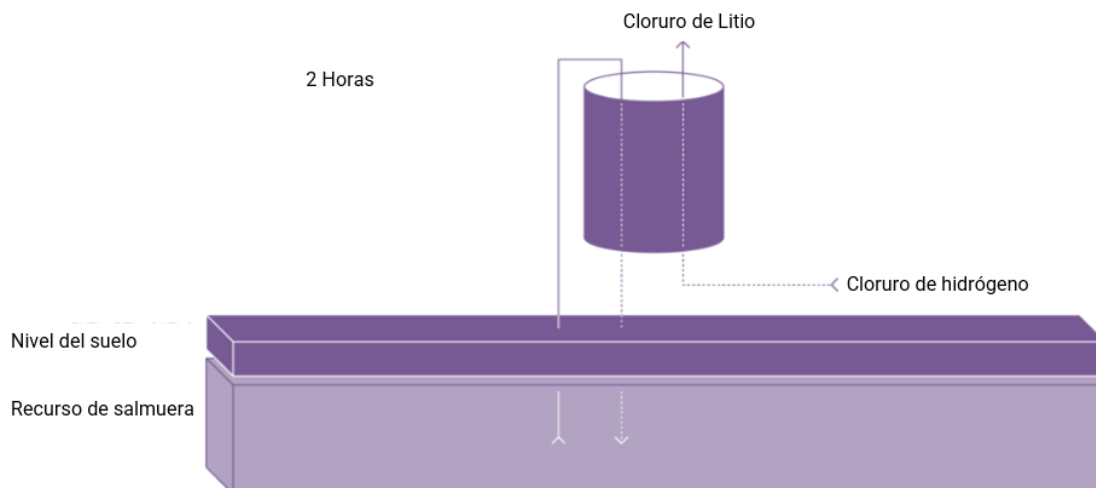


Figura 14. Diagrama del proceso de Lilac Solutions

Fuente: Lilac Solutions, 2023.

Dentro de los desafíos que ha resuelto Lilac en su tecnología se puede mencionar el desarrollo de partículas de $\text{Li}_2\text{Mn}_2\text{O}_5$ recubiertas con una capa protectora de SiO_2 , para evitar la disolución y degradación de los materiales, lo que prolongaría significativamente la vida útil de las microesferas. Las microesferas tienen un diámetro medio de 3 a 5 micrones y el espesor del recubrimiento es de aproximadamente 10 nanómetros.

La tecnología de Lilac fue recientemente seleccionada como proveedora de tecnología de DLE por Lake Resources para su proyecto Kachi en Argentina, iniciando operaciones de la planta piloto a fines de 2020. En abril de 2023, Lilac anunció que la planta de Kachi ha procesado más de 5,2 millones de litros de salmuera y ha generado más de 200.000 litros de producto de LiCl concentrado, con una tasa de recuperación de Litio del 80% y una alta tasa de rechazo de impurezas (99,9%), produciendo con éxito 2.500 kg de LCE (Lilac Solutions, 2023). Si bien el consumo de agua fresca fue de 20 toneladas de agua por cada tonelada de Li_2CO_3 , la empresa está explorando soluciones para reducir el consumo de agua mediante ósmosis inversa y evaporación forzada.

3.3 Tecnologías de Extracción por Solventes

La extracción por solventes es un proceso industrial establecido que, junto con la destilación, constituye los dos procedimientos de separación industrial más importantes en el mundo. La primera operación de extracción líquido-líquido que tuvo éxito comercial se desarrolló para la industria petrolera en 1909, cuando se empleó el proceso de Edeleanu para la eliminación de hidrocarburos aromáticos del queroseno utilizando dióxido de azufre líquido como disolvente. Desde entonces, basado en el mismo principio se han desarrollado muchos otros procesos en las industrias petrolera, química, metalúrgica, nuclear, farmacéutica y de procesamiento de alimentos (Thornton, 2008).

En el contexto de la extracción de Litio, esta tecnología es particularmente atractiva debido a su simplicidad, facilidad de control, bajo costo, alta eficiencia y selectividad. Esto la posiciona como un método prometedor para recuperar iones de Litio de salmueras con alta relación Mg/Li, como las de los lagos salados en China (Zhou et al., 2020).

En este método, se mezcla una fase líquida orgánica, compuesta por un solvente y un extractante, y una fase acuosa cargada de Litio. Ambas fases son inmiscibles, por lo cual después de mezclarse se separan como ocurre con el agua y el aceite. Durante la agitación o mezcla se produce el contacto entre ambas fases, el Litio se asocia al extractante en la formando complejos específicos de Li^+ que son retenidos dentro de la fase orgánica. Mientras los complejos formados por Li^+ pasan a la fase orgánica, por el contrario la mayoría de las impurezas permanecen en la fase acuosa (Figura 15). Luego en reposo, ambas fases se separan entregando como resultado un orgánico cargado en Litio y una fase acuosa con una concentración residual de Litio. Este proceso de carga puede realizarse tantas veces como se desee hasta alcanzar una concentración de Litio residual en la salmuera determinada según las etapas de contacto que se usen. Una vez terminada la etapa de carga del orgánico, el Li^+ es extraído o descargado desde la fase orgánica mediante el contacto de la fase orgánica con una solución ácida limpia, intercambiando Li^+ por H^+ , resultando finalmente una fase acuosa rica en Litio y una fase orgánica descargada que puede ser reciclada para su reutilización (Shi, 2017). El proceso de extracción es impulsado por el intercambio catiónico, mientras que la regeneración de la fase orgánica depende de una neutralización ácido-base (Mashtalir et al., 2018).

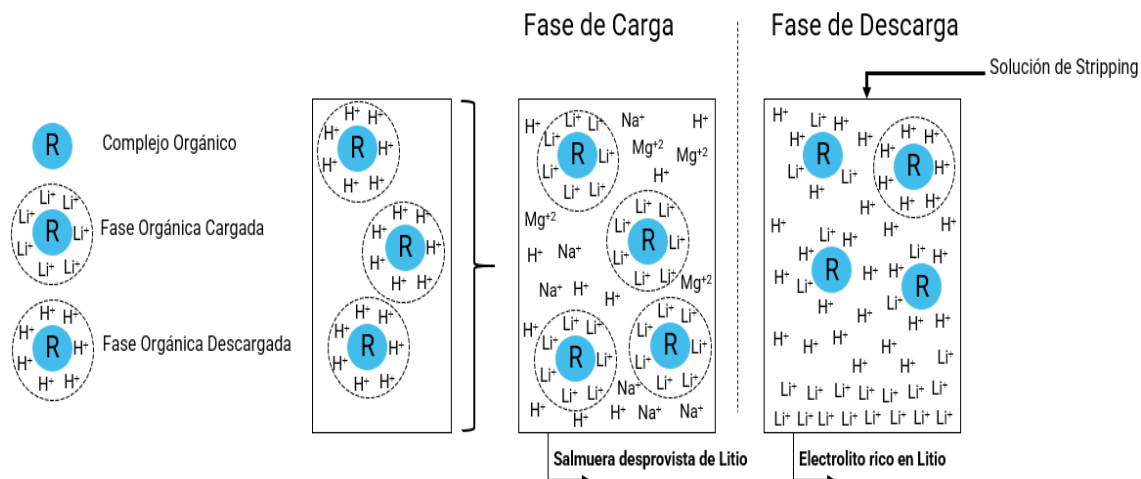


Figura 15. Mecanismo de extracción por solvente para la recuperación de Litio
Fuente: Elaboración propia a partir de Fuentealba et al., 2023.

Una ventaja importante de este método es su capacidad para concentrar Litio sin necesidad de etapas previas de concentración. Sin embargo, al igual que en otros métodos de DLE, genera residuos y presenta desafíos de sostenibilidad ambiental debido al uso de compuestos orgánicos y aditivos corrosivos, lo que limita la posibilidad de reinyectar la salmuera tratada al salar mismo a menos que exista una etapa adicional de tratamiento que garantice que no habría contaminación por arrastre. El problema con la reinyección y el costo elevado de los extractante y solventes sigue siendo un obstáculo para su aplicación en salmueras con baja concentración de Li⁺ (Vera et al., 2018; Bunel, 2024).

En cuanto al consumo de agua, este proceso requiere aproximadamente 1 m³ de agua fresca por tonelada de Carbonato de Litio producida. Si bien este consumo es significativo, resulta inferior a las pérdidas de agua vía evaporación asociadas al método convencional de extracción de Litio desde salmueras.

3.3.1 Proceso Adionics

Adionics es una empresa francesa que, tras dedicarse inicialmente a la desalinización de agua, aplicó su tecnología al sector de extracción de Litio en 2017. La tecnología desarrollada por Adionics utiliza un fluido llamado Flionex, que es una mezcla de un solvente orgánico denso y extractantes moleculares capaces de coordinar cationes y aniones de forma selectiva. Este proceso permite la extracción eficiente de Litio de

salmueras de diversas concentraciones, mediante un sistema modular y adaptable (Smolyakov et al., 2018).

Las principales ventajas de la tecnología Adionics que se mencionan incluyen:

- Recuperación de Litio hasta un 99%.
- Alta selectividad: no se extraen iones de Mg^{+2} , B^{+3} , K^{+} , SO_4^{2-} .
- Pureza de LiCl hasta un 99%.
- Menor consumo de agua.
- Proceso que no requiere reactivos químicos adicionales.

La tecnología Flionex permite extraer Litio de salmueras sin necesidad de cambios significativos en el pH o el uso de solventes corrosivos, lo que reduce el consumo de ácidos y el impacto ambiental. Los extractantes cationicos que utilizan pertenecen a la familia de los calixarenos, compuestos orgánicos que permiten una alta selectividad en la extracción de Litio (Bunel, 2024).

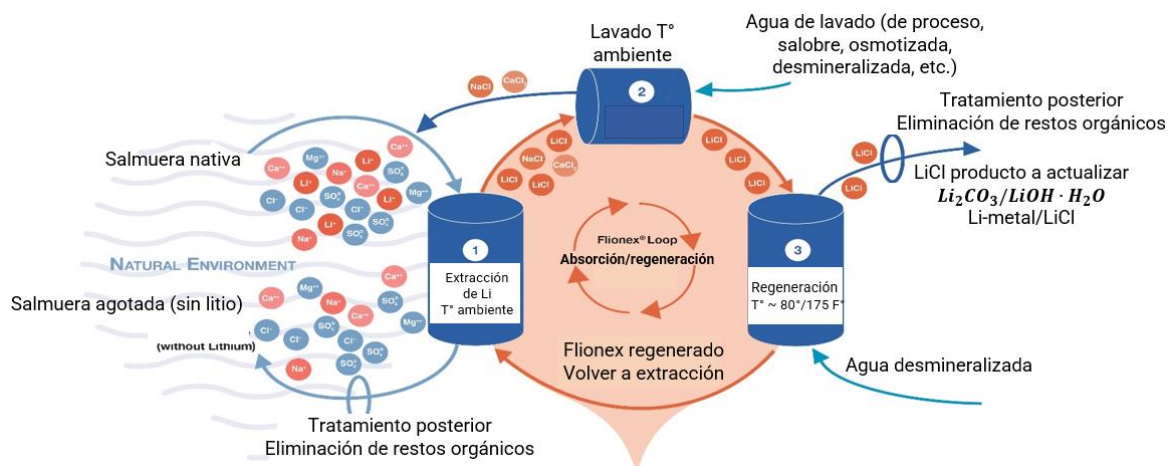


Figura 16. Diagrama del proceso de Adionics

Fuente: Adionics, 2022.

3.4 Membranas y Electro Membranas

Una membrana es un sistema con un espesor significativamente menor en comparación con su superficie, el cual, al interponerse entre dos fases líquidas permite la transferencia selectiva de materia o energía. Los procesos de separación por membranas pueden clasificarse en función de la fuerza motriz (presión o potencial eléctrico), el tipo de membrana, su configuración, o los mecanismos de separación involucrados. Entre las principales tecnologías de separación por membranas se incluyen la electrodiálisis (1955), osmosis inversa (1960), y nanofiltración (1990), las cuales tienen aplicaciones principalmente en procesos de tratamiento y desalinización de agua de mar (Solis et al., 2016).

Una característica clave de las tecnologías de membranas es la relación entre el tamaño de los poros y la presión requerida para la separación (Figura 17).

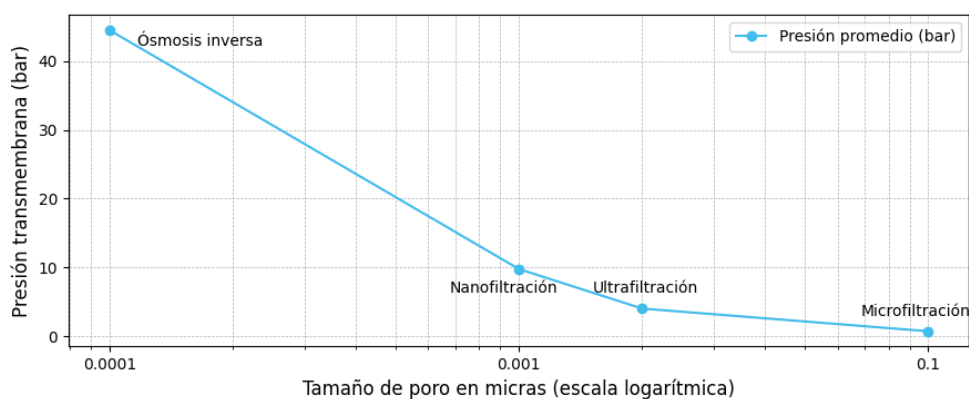


Figura 17. Presión requerida en función del tamaño de partículas para tecnologías de membranas

Fuente: Elaboración propia a partir de DuPont, 2024.

El tamaño de los poros determina la capacidad de la membrana para retener partículas, desde sedimentos hasta moléculas disueltas. Por ejemplo, tecnologías como la microfiltración trabaja con presiones bajas y es ideal para retener partículas gruesas, como sedimentos y bacterias, mientras que la ultrafiltración con tamaños de poros en el rango de 0,002 – 0,1 micras, requieren presiones moderadas (2-10 bar) y se utilizan comúnmente para retener macromoléculas como proteínas y coloides.

Por otro lado, las tecnologías de nanofiltración y ósmosis inversa, que presentan tamaños de poros inferiores a 0,001 micras, son capaces de retener solutos disueltos, incluidos iones y moléculas orgánicas de bajo peso molecular. Estas membranas operan a presiones significativamente más altas: típicamente 4-30 bar para la nanofiltración y hasta 70 bar para la ósmosis inversa en aplicaciones de desalinización de agua de mar.

La comprensión de esta relación es esencial para seleccionar la tecnología de membrana adecuada según los requerimientos del proceso.

3.4.1 Tecnología de Electrodialisis (ED)

Los sistemas de electro membranas, también conocidos como sistemas de electrodialisis (ED), utilizan una corriente eléctrica para movilizar iones a través de membranas selectivas, lo que permite la separación de Li^+ de otros cationes presentes en las salmueras, como Na^+ , K^+ , Mg^{+2} y Ca^{2+} (Figura 18).

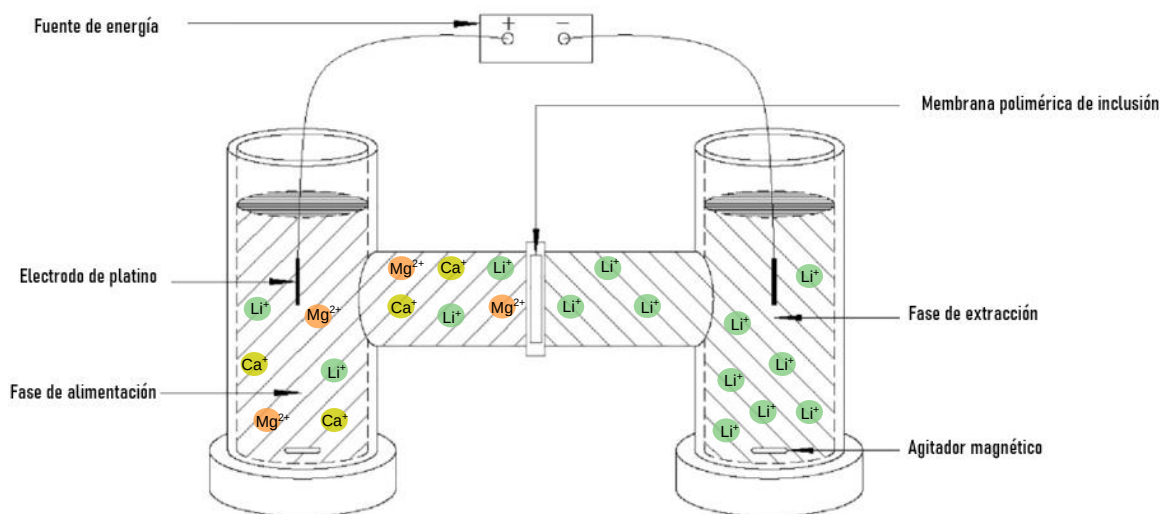


Figura 18. Mecanismo de electro membranas para la recuperación de Litio

Fuente: Meng et al., 2021.

Aunque la electrodiálisis ofrece ventajas como procesos continuos y controles relativamente simples, su implementación a escala industrial enfrenta desafíos técnicos como el *fouling* u obstrucción de las membranas, provocado por el atrapamiento de sales en la superficie y el deterioro de la membrana. Si bien tiene una baja huella de carbono si la fuente de energía eléctrica es verde, su uso se ve obstaculizado por el alto gasto de capital y costo operacional (Vera et al., 2018).

3.4.2 Tecnologías de Ósmosis Inversa (OI)

La ósmosis inversa es un proceso de separación de sales en soluciones basado en la eliminación de agua mediante membranas con poros de entre 5 y 15 Å, utilizadas principalmente para desalinización (Figura 19). Si bien la ósmosis inversa requiere un elevado consumo de energía debido a las altas presiones aplicadas, su capacidad de filtración y concentración de soluciones es altamente eficiente, destacándose en procesos de pretratamiento y recuperación de agua (Solis et al., 2016). Esta tecnología por sí sola no permite llegar a productos purificados de Litio, pero permitiría aumentar la concentración de iones en etapas iniciales de preparación de la salmuera sin evaporar agua.

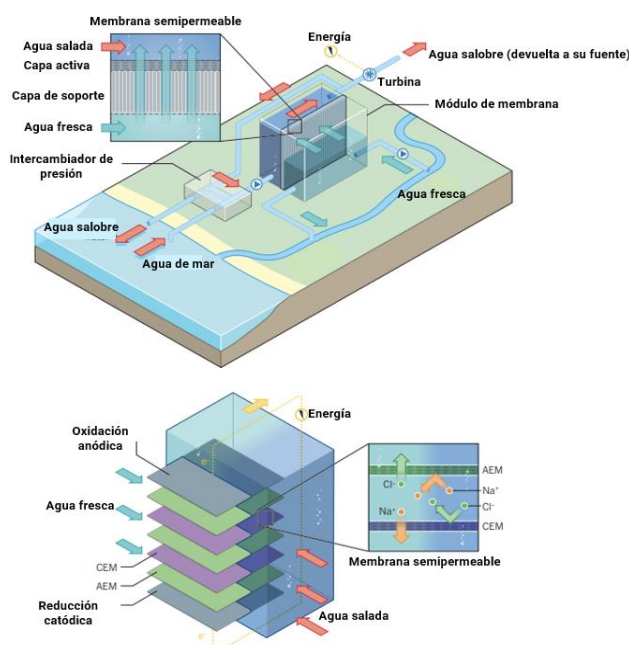


Figura 19. Mecanismo de osmosis inversa para generación sostenible de energía a partir del agua de mar

Fuente: Logan & Elimelech, 2012.

Informe elaborado por el Centro de Energía UC como parte del proyecto ATE240005 del Concurso Anillos de Investigación en Áreas Temáticas Específicas 2024: "Development of advanced technologies for sustainable production of lithium salts and derivatives from salt flats in Chile".

3.4.3 Tecnologías de Nanofiltración (NF)

La nanofiltración es un proceso de separación por membranas que utiliza poros de menos de $0.001\ \mu\text{m}$ ($1\ \text{nm}$), permitiendo la separación selectiva de iones según su tamaño (Figura 20). Desarrollada como una alternativa a la ósmosis inversa, la nanofiltración opera a presiones más bajas, lo que reduce los costos energéticos, y es utilizada para la separación precisa de iones de Litio en soluciones complejas. Su desarrollo se ha acelerado en las últimas décadas, mejorando las características de las membranas y expandiendo sus aplicaciones industriales (Solis et al., 2016).

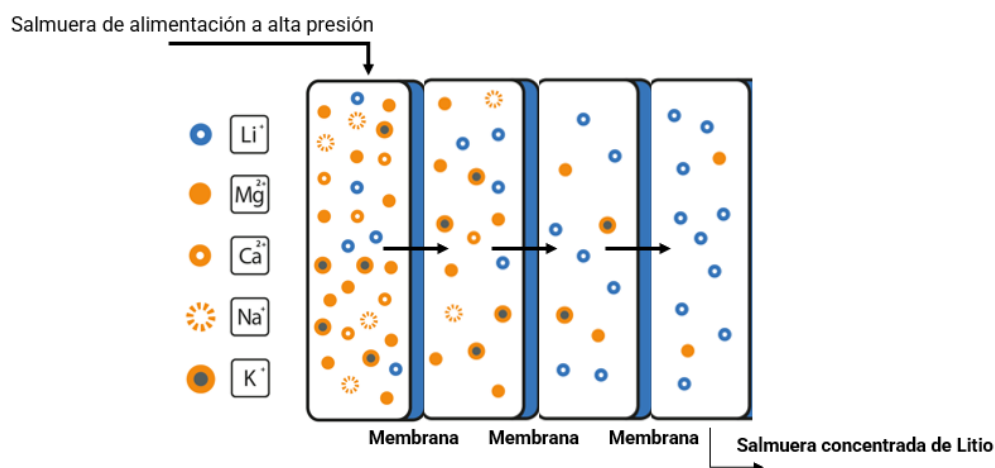


Figura 20. Mecanismo de nanofiltración para la recuperación de Litio
Fuente: Elaboración propia a partir de Meng et al., 2024.

3.4.4 Proceso ElectraLith

ElectraLith, una empresa derivada de la Universidad de Monash (Australia), ha desarrollado un proceso patentado de extracción y refinación directa de Litio (DLE-R) basado en

tecnologías de electro membranas, capaz de producir Hidróxido de Litio de grado batería sin el uso de agua ni productos químicos, y con un consumo mínimo de energía.

La tecnología de DLE-R de ElectraLith se caracteriza por su modularidad y flexibilidad, aplicándose a diversas fuentes de Litio, incluyendo salmueras de bajas concentraciones como las geotérmicas y de yacimientos petrolíferos (Electralith, s.f.).

El proceso ElectraLith consta de dos etapas (Figura 21):

- **Etapas de DLE:** Utiliza membranas patentadas para la electrodialisis, extrayendo Litio en forma de cloruro de Litio (LiCl) sin requerir el uso de agua o productos químicos. Este proceso puede manejar salmueras de alta concentración, como aquellas con menos de 60 ppm de Litio, siendo altamente eficaz en la eliminación de contaminantes.
- **Etapas R:** La salmuera tratada se reintegra al acuífero, minimizando el impacto ambiental, sin generar residuos adicionales.

Para validar la tecnología, ElectraLith realizó una prueba de concepto donde produjo Hidróxido de Litio apto para baterías a partir de diversas fuentes de Litio (salmueras de salar, salmueras geotérmicas de yacimientos petrolíferos) y zonas geográficas (EE.UU., Argentina) obteniendo un consumo mínimo de agua, y sin uso de productos químicos. Esta prueba de concepto incluía la producción de Hidróxido de Litio con una pureza del 99,9% a partir de una salmuera con menos de 60 ppm de Litio (IP Group, 2024).

Con el respaldo de Rio Tinto, IP Group y Monash Investment Holdings, la tecnología de DLE-R de ElectraLith se ha transformado en una importante tecnología emergente para extraer y refinar Litio.

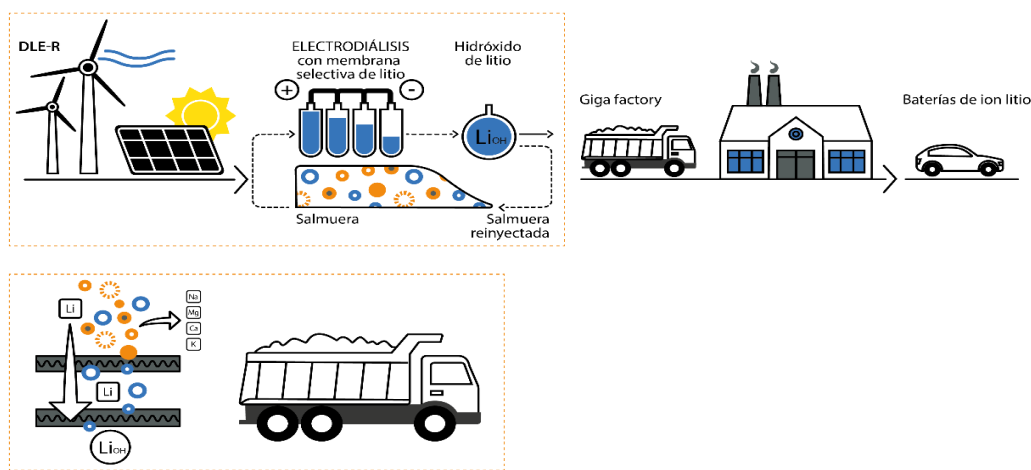


Figura 21. Diagrama del proceso de ElectraLith

Fuente: Elaboración propia a partir de ElectraLith, s.f.

Informe elaborado por el Centro de Energía UC como parte del proyecto ATE240005 del Concurso Anillos de Investigación en Áreas Temáticas Específicas 2024: "Development of advanced technologies for sustainable production of lithium salts and derivatives from salt flats in Chile".

3.5 Tecnologías de Separación Electroquímica

La separación electroquímica de iones metálicos fue descrita por primera vez en 1903 por el científico francés M.A. Hollard, quien utilizó este método para separar el níquel del zinc mediante un ánodo de zinc amalgamado y un cátodo de platino. Desde entonces, se han publicado numerosos estudios sobre la separación electroquímica de diversos iones metálicos (Clarke & Wooten, 1939).

El principio básico de este método implica la aplicación de un potencial eléctrico externo que induce la migración de iones en un electrolito (en este caso, salmuera enriquecida en Litio) hacia un electrodo que contiene materiales adsorbentes diseñados específicamente para su captura (Kim et al., 2019).

Actualmente, los materiales de electrodos empleados en este proceso se clasifican en dos categorías principales: i) tipo Litio hierro fosfato (LiFePO_4 o LFP) y ii) tipo óxido de manganeso de Litio (LiMnO_2 o LMO) (Battistel et al., 2020). Entre estos, LiFePO_4 destaca por su canal interior unidimensional, que facilita la inserción del Li^+ . Además, presenta ventajas significativas como estabilidad estructural, alta reversibilidad, menor toxicidad y costos competitivos.

Esta tecnología es especialmente interesante para la extracción a partir de salmueras con alta relación Mg/Li y bajas concentraciones de Li^+ , debido a su sostenibilidad ambiental y su capacidad demostrada para ofrecer altos niveles de recuperación, eficiencia de los ciclos, escalabilidad, reversibilidad y selectividad (Srimuk et al., 2020).

En comparación con otras alternativas de DLE como la tecnología de intercambio iónico, la separación electroquímica no presenta problemas relacionados con la disolución del adsorbente y no requiere el uso de reactivos químicos adicionales, como ácidos o bases. Sin embargo, la presencia de otros cationes contenidos en la salmuera de Litio puede afectar negativamente la selectividad y la eficiencia del proceso, lo que subraya la necesidad de desarrollar materiales con alta especificidad para Li^+ (Bunel, 2024).

Una vez capturado el Li^+ , este se libera del material del electrodo mediante una solución de recuperación limpia, que comúnmente requiere agua fresca. Este proceso genera una solución diluida de LiCl (Figura 22), la cual puede concentrarse en etapas posteriores para cumplir con las especificaciones del producto final. Este enfoque se perfila como una alternativa sostenible y competitiva para la extracción de Litio, especialmente cuando se combina con fuentes de energía renovables, minimizando así su impacto ambiental (Calvo, 2019)

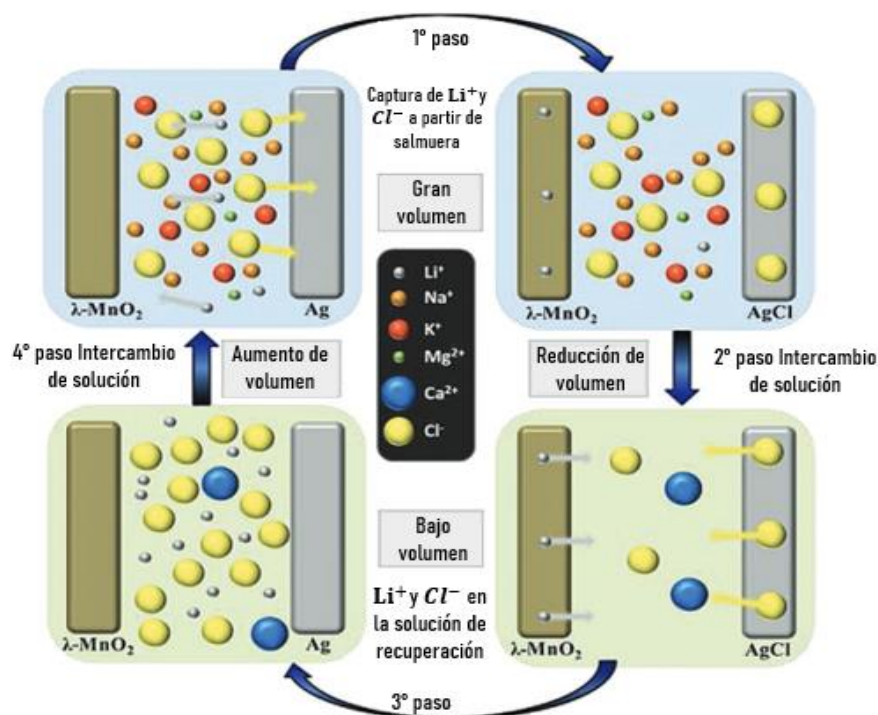


Figura 22. Recuperación de Litio a partir de salmueras utilizando $\lambda\text{-MnO}_2$ como electrodo de captura de Li^+ y Ag^+ como electrodo de captura de Cl^-
Fuente: Battistel et al., 2020.

3.5.1 Proceso Mangrove Lithium

Mangrove Lithium es una empresa canadiense con sede en Vancouver que ha desarrollado una propuesta innovadora para la producción de Hidróxido y Carbonato de Litio empleando diversas fuentes de alimentación, como salmueras, rocas duras, arcillas y baterías

recicladadas. La tecnología de esta plataforma también se comercializa para la conversión de salmueras residuales en productos químicos y agua desalinizada (Mangrove Lithium, 2022).

La solución modular de Mangrove implementa un proceso electroquímico patentado denominado Clear-Li que permite la conversión directa del cloruro de Litio y del sulfato de Litio en Hidróxido de Litio (Figura 23). Este proceso de refinado del Litio también genera subproductos fungibles, lo que incrementa la rentabilidad de la inversión y consolida la viabilidad financiera del proyecto. Estos subproductos, como HCl y H_2SO_4 en el caso del cloruro de Litio y el sulfato de Litio respectivamente, pueden ser reutilizados en la fase de extracción del proceso de obtención de Litio, mejorando así la sostenibilidad mediante un sistema de extracción de circuito cerrado (Mangrove, s.f.).

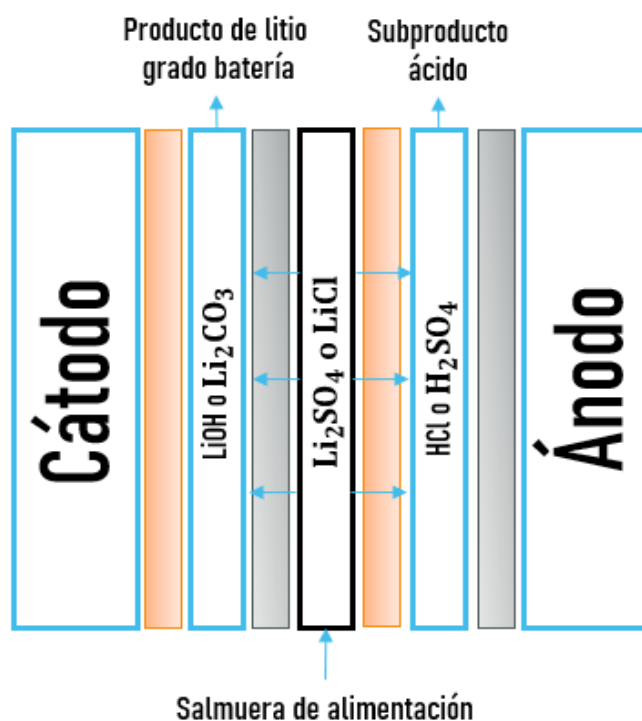


Figura 23. Diagrama del proceso de Mangrove Lithium
Fuente: Elaboración propia a partir de Mangrove Lithium, s.f.

4

Resumen Tecnologías

El número y características de tecnologías DLE hoy disponibles y en desarrollo es extenso. A continuación, se presenta un análisis comparativo entre las diversas tecnologías de manera de facilitar la identificación de oportunidades y ventajas. Esta información permite identificar atributos técnicos y económicos de cada método, destacando sus fortalezas en términos de eficiencia, selectividad y adaptabilidad a distintas condiciones operativas. Asimismo, facilita la evaluación de desafíos como la necesidad de pretratamientos, el impacto ambiental, los costos de inversión y operación, así como los requerimientos de agua y dependencia de reactivos críticos. La Tabla 1 presenta una síntesis de las ventajas y desventajas de las principales tecnologías de DLE: adsorción, intercambio iónico, extracción por solventes, electro-membranas y separación electroquímica.

4.1

Ventajas y Desventajas de las Tecnologías de DLE

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las tecnologías de DLE

Fuente: Elaboración propia a partir de Goldman Sachs, 2023; International Lithium Association, 2024; Farahbakhsh et al., 2024 y otros, 2023.

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Adsorción	• Alta selectividad • Adaptabilidad • Comercialización global • No requiere reactivos químicos • Puede alcanzar sobre 90% de recuperación • Bajos residuos • Bajo uso de energía • Bajo-medio impacto ambiental • No se ve afectado por las condiciones meteorológicas • Tecnología en uso a escala comercial desde hace más de 20 años	• Pérdida por disolución • Riesgo de desgaste de los adsorbentes • Proceso dependiente de la temperatura (>50 °C) • Necesidad de etapas de postratamiento y purificación • Requiere monitoreo y control de interferencias de otros metales durante la extracción de Litio y estabilidad del adsorbente a lo largo del tiempo

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Intercambio Iónico	• Alta selectividad • Baja-media inversión inicial • Alta eficiencia de separación • Alta capacidad teórica de absorción de Litio • Uso relativamente bajo de agua • No se ve afectado por las condiciones climáticas • Adecuado para baja concentración de Litio • Alta tasa de recuperación • Puede alcanzar sobre 90% de recuperación	• Grandes requerimientos de ácido y base • Riesgo de seguridad en el suministro de ácido • Riesgo de degradación del adsorbente a pH bajo a largo plazo

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Extracción por Solventes	• Baja dependencia de etapas postratamiento • Tecnología bien establecida para separar metales de soluciones acuosas • Alta selectividad • No se ve afectado por las condiciones climáticas • Bajo consumo de energía • Puede alcanzar sobre 90% de recuperación	• Requiere aditivos y disolventes corrosivos • Riesgo de contaminación de salmuera residual • Elevada producción de residuos • Coste de capital potencialmente mayor • Se requiere un pretratamiento intensivo para salmueras con una elevada relación másica Ca/Li y Mg/Li • Costes de producción serían demasiado elevados cuando la relación Mg/Li es demasiado alta

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Electro Membranas	• No hay contacto entre las soluciones de alimentación y salida • Proceso continuo • Genera bajo nivel de impurezas • No se ve afectado por las condiciones climáticas • No requiere reactivos químicos	• Problemas de <i>fouling</i> • Alto CAPEX y OPEX • Requiere pretratamiento y postratamiento • Riesgo de degradación de membranas

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Separación Electroquímica	• Buena respuesta en términos de alta relación Mg/Li • Bajo impacto ambiental • No requiere reactivos químicos • Puede alcanzar sobre 90% de recuperación • Alta selectividad • Bajo consumo energético	• Aún por demostrar a escala piloto y a gran escala • Alto OPEX • Riesgo de degradación de electrodos

4.2

Comparación de Proyectos en Base a CAPEX y OPEX

En general, las empresas proveedoras de tecnologías presentan en sus reportes corporativos indicadores preliminares sobre emisiones de CO₂, consumo de energía, consumo de agua, consumos de reactivos químicos que no son posible de verificar, más aún, la falta de información detallada y la confidencialidad de los datos obtenidos en plantas pilotos dificultan la comparación directa entre estas tecnologías.

Si bien no se han realizado análisis técnico-económico de las distintas tecnologías DLE debido a que la información pública disponible no es suficiente para realizar este ejercicio, existe un estudio relevante que fue desarrollado por el *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) en 2021, el cual compara procesos de DLE para salmueras geotérmicas, evaporitas, y campos petrolíferos.

La Tabla 2 compara datos clave de proyectos seleccionados, resaltando los costos de producción (CAPEX y OPEX), la tasa interna de retorno (TIR) y las características particulares de cada proyecto. Esta información, aunque limitada, señala la importancia de contar con datos a escala piloto para afinar los modelos de rentabilidad y sostenibilidad en la extracción de Litio.

Del estudio se desprende que los costos de producción de las tecnologías de DLE, independiente del tipo de salmuera, convergen a cerca de los 4.000 dólares la tonelada de LCE producida, con precios proyectados que promedian 13.000 dólares por tonelada de Carbonato de Litio.

Tabla 2. Comparativa económica entre distintos proyectos de DLE

Fuente: Elaboración propia a partir de Warren, 2021.

Compañía	SRI International	Vulcan Energy Resources	Standard Lithium	E3 Metals Corp	Anson Resources	Pure Energy Minerals	Lake Resources
Nombre proyecto	Salton Sea	Upper Rhine Valley	Lanxess Smackover	Clearwater	Paradox Fase 3	Clayton Valley	Kachi
Ubicación	California, USA	SW Alemania	Arkansas, USA	Alberta, Canada	Utah, USA	Nevada, USA	Catamarca, Argentina
Documento	DOE, CEC reportes	PFS	PEA	PEA	PEA	PEA	PFS
Tipo de salmuera	Geotérmica	Geotérmica	Evaporita	Campos petrolíferos	Evaporita	Evaporita	Salar
Recursos (ton LCE)	Información no disponible	15.850.000	3.140.000	2.200.000	192.000	217.700	1.010.000
Concentración de Litio (mg/l)	400	181	168	74,6	100-500	65-221	289
Producción (t/año)	20.000	40.000	20.900	20.000	15.000	11.500	25.500

Costo de producción (USD/t)	3.845	3.217	4.319	3.656	4.545	3.217	4.178
CAPEX (USD 1.000)	52.300	1.287.600	437.162	602.000	120.000	358.601	544.000
OPEX (USD 1.000/ año)	76.900	128.688	90.259	73.200	68.180	36.516	106.539
Precio estimado (US\$/t)	12.000	14.925	13.550	15.160	13.000	12.267	11.000
TIR (antes de impuestos %)	268	31	41,8	32	106	24	25
Tipo de tecnología	Intercambio iónico	Adsorción	Intercambio iónico	Intercambio iónico	Intercambio iónico	Extracción por solventes	Intercambio iónico
Recuperación de Litio	90%	90%	90%	>90%	75%	90%	83,2%
Producto	Li ₂ CO ₃	LiOH·H ₂ O	Li ₂ CO ₃	LiOH·H ₂ O	Li ₂ CO ₃	LiOH·H ₂ O	Li ₂ CO ₃

4.3

Comparación Global de Tecnologías de DLE

La evaluación comparativa de las tecnologías de extracción directa de Litio requiere indicadores transversales que permitan clasificar su desempeño en función de tres objetivos fundamentales:

- **Extracción selectiva de Litio:** Las tecnologías de DLE se deben diseñar para capturar iones de Litio selectivamente desde salmueras, considerando que en la mayoría de las salmueras la concentración de Litio representa menos del 1% de los sólidos disueltos totales, en comparación con otras especies iónicas mucho más concentradas, como el sodio, potasio y magnesio.
- **Reinyección de salmuera tratada:** Las tecnologías de DLE cobran sentido ante la tecnología convencional en la medida que permitan devolver la salmuera procesada al salar, lo que preservaría en gran medida el equilibrio hídrico y minimizaría la perturbación ambiental.
- **Impacto ambiental:** Las tecnologías de DLE requieren menos área de operación y, potencialmente, menos agua fresca que las pozas de evaporación, lo que contribuye a reducir el impacto sobre los ecosistemas locales.

La Tabla 3 presenta una comparación integral de los métodos de extracción de Litio, abarcando tanto los enfoques convencionales como las tecnologías de DLE. Este análisis identifica las fortalezas y debilidades de cada tecnología mediante métricas clave que evalúan su desempeño técnico, sostenibilidad ambiental y viabilidad económica. Cabe destacar que la puntuación se realiza en base al promedio de los resultados de proyectos asociados a cada tecnología.

Los parámetros analizados son:

Indicador	★	★★	★★★
Tiempo de Producción	Producción en escalas de meses.	Producción en escalas de días.	Producción en escalas de horas.

Indicador	★	★★	★★★
Tasa de Recuperación de Litio	Recuperación del 40-50%.	Recuperación del 60-80%.	Recuperación del 60-80%.
Costos de Producción	Más de \$6.000 USD por tonelada de LCE.	Entre \$4.000 y \$6.000 USD por tonelada de LCE.	Menos de \$4.000 USD por tonelada de LCE.
Selectividad Li⁺/Na⁺	Selectividad baja, con alta dependencia de procesos posteriores.	Selectividad moderada, pero aún requiere etapas adicionales para alcanzar niveles comerciales de pureza.	Selectividad alta, minimizando la necesidad de tratamientos posteriores para alcanzar niveles comerciales de pureza.
Selectividad Li⁺/Mg²⁺	Selectividad baja, con alta dependencia de procesos posteriores.	Selectividad moderada, pero aún requiere etapas adicionales para alcanzar niveles comerciales de pureza.	Selectividad alta, minimizando la necesidad de tratamientos posteriores para alcanzar niveles comerciales de pureza.
Uso de Agua (incluye pérdidas por evaporación de agua)	Consumo superior a 100 m ³ de agua por tonelada de LCE.	Consumo entre 70 y 100 m ³ de agua por tonelada de LCE.	Consumo inferior a 70 m ³ de agua por tonelada de LCE.
Uso de Superficie	Más de 1.200 m ² por tonelada de LCE.	Entre 300 y 1.200 m ² por tonelada de LCE.	Menos de 300 m ² por tonelada de LCE.
Uso de Energía	Más de 210.000 MJ por tonelada de LCE.	Entre 33.000 y 210.000 MJ por tonelada de LCE.	Menos de 33.000 MJ por tonelada de LCE.
Factibilidad de Reinyección de Salmuera	Contaminación por agentes externos en la salmuera residual.	Sin contaminación externa, pero sensible a la dilución.	Sin contaminación externa y sin afectación en la recuperación tras reinyección.

Tabla 3. Comparativa general entre métodos de extracción de Litio
Fuente: Elaboración propia a partir de Goldman Sachs, 2023; International Lithium Association, 2024; Farahbakhsh et al., 2024 y otros, 2023.

Parametros	Método convencional	Adsorción	Intercambio iónico	Extracción por solventes	Electro membranas	Separación electroquímica
Menor tiempo de producción	★☆☆	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★
Tasas de recuperación de Litio	★☆☆	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★
Menor costos de producción	★★★★	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆
Selectividad Li vs Na	★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆
Selectividad Li vs Mg	★☆☆	★★★☆☆	★★★★	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆
Menor uso de agua	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★
Menor uso de superficie	★☆☆	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★
Menor uso de energía	★★★★	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆
Factibilidad de reinyección de salmuera	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★★	★★★☆☆	★★★★	★★★★

La elección de la tecnología de DLE más adecuada para la extracción de litio en un salar dependerá de una evaluación integral de estos factores, incluyendo aspectos como la calidad de la salmuera, los costos operativos, la eficiencia en la extracción, y las restricciones medioambientales y operativas.

Tecnologías como la adsorción y el intercambio iónico destacan por su alta selectividad y adaptabilidad, pero enfrentan desafíos relacionados con la degradación de los materiales y la necesidad de pretratamientos específicos para la salmuera de manera de prepararla antes de tratarla. Por su parte, la extracción por solventes, a pesar de su buen desempeño en términos de eficiencia energética y selectividad, sigue enfrentando obstáculos derivados de la presencia de aditivos orgánicos en la salmuera residual, dificultando el objetivo de la reinyección.

En cuanto a las tecnologías de electro membrana y separación electroquímica, estas ofrecen una prometedora alternativa debido a su selectividad y bajo impacto ambiental, aunque sus altos costos y la necesidad de un mantenimiento constante de sus componentes siguen siendo áreas clave de mejora.

En la próxima década el desarrollo tecnológico y la innovación en materiales serán aspectos fundamentales para superar las limitaciones anteriormente mencionadas. Estas soluciones deben buscar un equilibrio entre la eficiencia operativa, la sostenibilidad ambiental y la viabilidad económica en la producción de Litio a partir de salmueras. Hoy no existe certeza de cuales de estas tecnologías será la dominante en el futuro en la industria del Litio, y seguramente en los próximos años veremos significativos esfuerzos para encontrar soluciones diseñadas a la medida de cada proyecto donde se deberán evaluar cada una de estas tecnologías en los aspectos anteriormente revisados.

4.4 Catastro Proyectos DLE

En esta sección se presenta un catastro de proyectos de DLE con el propósito de informar del panorama global de las iniciativas más destacadas en la industria del Litio, destacándose las tecnologías consideradas en la extracción eficiente y sostenible de este recurso. Los proyectos están en diversas etapas de desarrollo, desde estudios preliminares hasta fases comerciales y piloto, y abarcan una amplia gama de tecnologías de DLE, como adsorción, intercambio iónico, membranas y extracción por solventes. Además, se observa una distribución geográfica significativa, con proyectos en países clave de América Latina como Chile, Argentina y Bolivia, así como en otras regiones como China, Canadá, Estados Unidos y Europa.

Esta revisión no solo destaca la diversidad de enfoques tecnológicos, sino también las variaciones en los orígenes tecnológicos, que incluyen proveedores de todo el mundo. Este panorama de proyectos permite identificar tendencias, desafíos comunes y el potencial de cada tecnología para impulsar la transición hacia una producción de Litio más eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

Tabla 4. Listado no exhaustivo de proyectos de DLE

Fuente: Elaboración propia a partir de Goldman Sachs, 2023; International Lithium Association, 2024, y otros, 2023.

Compañía	Proyecto	Pais proyecto	Etapa DLE	Tipo DLE	Origen Tecnología
Clean Tech Lithium	Laguna Verde	Chile	Piloto	Adsorción	China
Clean Tech Lithium	Francisco Basin	Chile	Piloto	Información no disponible	Jersey
Lilac Solutions	Información no disponible	Chile	Piloto	Intercambio Iónico	USA
Albemarle	Atacama	Chile	Piloto	Información no disponible	Información no disponible
SQM	Atacama	Chile	Piloto	Información no disponible	Información no disponible
Energy X	Black Giant	Chile	Piloto	Membranas	USA
SIMCO Lithium	Sales de Maricunga	Chile	Piloto	Adsorción	USA
Geolith	Antofagasta	Chile	Piloto	Intercambio Iónico	Francia
Summit Nanotech	Llamara	Chile	Piloto	Adsorción	Canadá
Wealth Minerals	Kuska	Chile	Piloto	Información no disponible	Información no disponible

ENAMI	Salares Alto Andino	Chile	Estudio	Información no disponible	Información no disponible
Arcadium Lithium	Fenix	Argentina	Comercial	Adsorción	USA
Eramet	Centenario-Ratones	Argentina	Comercial	Adsorción	Francia
Lake Resources	Kachi	Argentina	Piloto	Intercambio Iónico	USA
Rio Tinto	Rincón	Argentina	Piloto	Información no disponible	Información no disponible
Eon Minerals	Amanecer	Argentina	Piloto	Adsorción	Argentina
Arena Minerals	Sal de la Puna	Argentina	Piloto	Adsorción	China
Arcadium Lithium	Olaroz	Argentina	Estudio	Información no disponible	Información no disponible
Lake Resources	Los Ángeles	Argentina	Información no disponible	Información no disponible	Información no disponible
Lithium Chile	Arizaro	Argentina	Piloto	Adsorción	Canadá
Alpha Lithium Co	Salar Tolillar	Argentina	Información no disponible	Adsorción	China
YLB	Salar de Uyuni	Bolivia	Estudio	Información no disponible	Información no disponible
Lanke Lithium	Yiliping Lake	China	Comercial	Adsorción	China

Zangge Lithium	Chalkhan Lake	China	Comercial	Adsorción	China
Jintai Lithium	Mahai Lake	China	Información no disponible	Adsorción	China
Tibet National	Qinghai	China	Comercial	Adsorción	China
Yiwei Lithium	Qinghai Salt Lake	China	Precomercial	Adsorción	China
E3 Lithium	Clearwater	Canadá	Piloto	Intercambio Iónico	Canadá
LithiumBank	Boardwalk	Canadá	Estudio	Intercambio Iónico	Canadá
Arizona Lithium	Praire Lithium	Canadá	Piloto	Adsorción	USA
Vulcan Energy	Upper Rhine Valley	Alemania	Piloto	Adsorción	Alemania
Anson Resources	Paradox Lithium	USA	Piloto	Adsorción	USA
Compass Minerals	Great Salt Lake	USA	Piloto	Adsorción	USA
Berkshire Hathaway	Salton Sea	USA	Piloto	Adsorción	USA
Energy Source Minerals	Salton Sea (Project ATLIS)	USA	Piloto	Adsorción	USA
Controlled Thermal Resources	Salton Sea	USA	Piloto	Intercambio Iónico	USA

Controlled Thermal Resources	Hell's Kitchen	USA	Piloto	Intercambio Iónico	USA
Standard Lithium	Smackover (Lanxess Project)	USA	Demo	Intercambio Iónico	USA
American Battery Materials	Lisbon Lithium Project	USA	Piloto	Información no disponible	USA
Exxonmobil	Arkansas Lithium	USA	Información no disponible	Información no disponible	USA
US Magnesium	Great Salt Lake	USA	Piloto	Adsorción	USA
Pure Energy Minerals	Clayton Valley	USA	Estudio	Extracción por Solventes	USA
Cornish Lithium	Cornualles	UK	Información no disponible	Información no disponible	Información no disponible
Lithium de France	Alsace	Francia	Información no disponible	Intercambio Iónico	China

4.5

Consideraciones Finales para la Aplicación de Tecnologías de DLE

La implementación de tecnologías de DLE enfrenta desafíos técnicos, económicos y ambientales que requieren una evaluación integral para maximizar su viabilidad y sostenibilidad. En primer lugar, el éxito de muchas tecnologías de DLE dependen de pretratamientos específicos de las salmueras, como ajustes de pH, temperatura o eliminación de impurezas específicas (Figura 24). Estos pretratamientos, aunque necesarios para favorecer el rendimiento de la extracción directa de Litio, incrementan el consumo energético, el costo y la demanda de insumos químicos, lo que debe ser tomado en cuenta al evaluar conceptualmente el costo operativo y el impacto ambiental de cada proyecto.

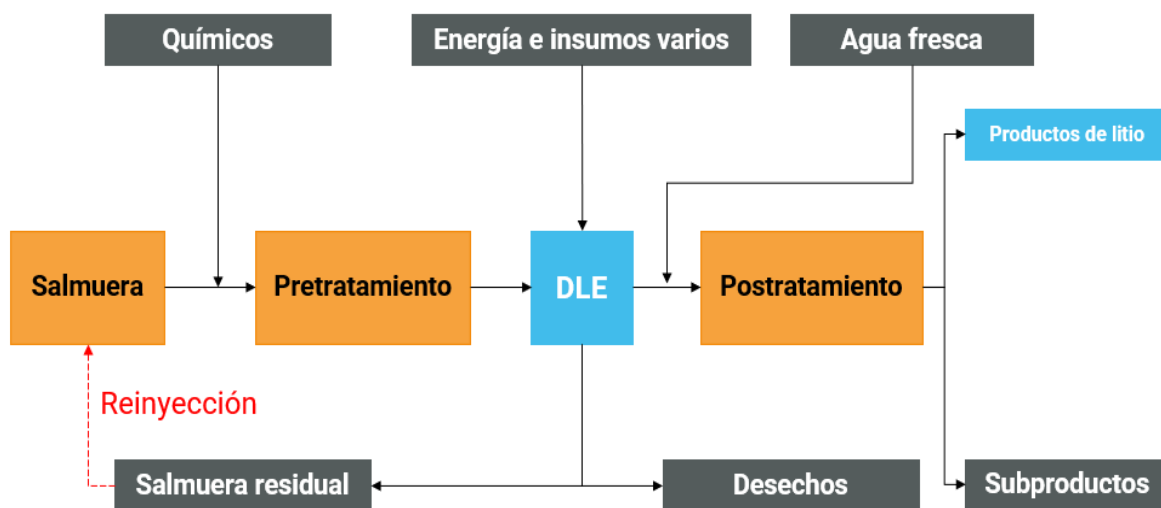


Figura 24. Diagrama general de proceso de obtención de productos de Litio por medio de tecnologías de DLE

Fuente: Elaboración propia a partir de Vera et al., 2023.

Además, estas tecnologías DLE no suelen producir Litio de alta pureza de manera directa, lo que exige etapas adicionales de purificación y conversión. Bajo esta mirada, el desafío de la evaluación e implementación de tecnologías DLE debe ser abordado como una parte integral de una secuencia de procesos necesarios para alcanzar productos comerciables de Litio, como Carbonato de Litio grado batería. Es muy probable que las tecnologías DLE encuentren nichos de aplicación óptimos dependiendo de las condiciones del proyecto.

Otro aspecto clave de la selección de tecnologías DLE es la capacidad de mejorar indicadores de sostenibilidad hídrica y usos del agua. La viabilidad de las tecnologías de DLE requiere avances significativos en los consumos de agua y la capacidad de reinyectar las salmueras descargadas de Litio al salar. Por un lado la recuperación de agua mediante tecnologías como la ósmosis inversa o la evaporación forzada contribuyen a reducir el consumo de agua y mejora la eficiencia en regiones donde la escasez hídrica es un desafío recurrente. Sin embargo, estas soluciones incrementan el consumo energético y los costos operativos de los procesos. Respecto de la inyección, poco o nada de estudios se han hecho al respecto que permitan eliminar las dudas existentes en la comunidad. Estos temas seguirán siendo de relevancia, análisis y debate en las próximas décadas.

5

Referencias

Adionics. (2022).

Clean lithium extraction.

https://www.ccifa.com.ar/fileadmin/argentine/user_upload/Adionics.pdf

Albemarle. (2016).

Declaración de Impacto Ambiental - Proyecto Ampliación Planta La Negra Fase 3.

<https://www.albemarleLitio.cl/sostenibilidad/medio-ambiente/evaluacion-ambiental>

Arcadium Lithium. (2023).

Resources and Reserve Report Pre-Feasibility Study- Salar del Hombre Muerto.

<https://livent.com/wp-content/uploads/2023/06/2023-Livent-Resource-and-Reserve-Report-Salar-del-Hombre-Muerto.pdf>

Battistel, A., Palagonia, M. S., Brogioli, D., La Mantia, F., & Trócoli, R. (2020).

Electrochemical Methods for Lithium Recovery: A Comprehensive and Critical Review. *Advanced Materials*, 32(23).

<https://doi.org/10.1002/adma.201905440>

Boroumand, Y., & Razmjou, A. (2024).

Adsorption-type aluminium-based direct lithium extraction: The effect of heat, salinity and lithium content.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916424001176>

Bunel, E. (2024).

Estudio de vigilancia tecnológica sobre métodos de extracción directa de Litio, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

<https://www.cepal.org/es/publicaciones/80739-estudio-vigilancia-tecnologica-metodos-extraccion-directa-Litio>

Calvo, E. (2019).

Electrochemical methods for sustainable recovery of lithium from natural brines and battery recycling. Current Opinion in Electrochemistry, 15.

<https://doi.org/10.1016/j.coelec.2019.04.010>

Centro de Documentación e Información Bolivia. (2024).

El proyecto de Litio en Bolivia | Pueblo y Soberanía - La nueva CEDIB.

<https://www.cedib.org/biblioteca/el-proyecto-de-Litio-en-bolivia/>

Clarke, B., & Wooten, L. (1939).

Internal Electrolysis as a Method of Analysis. Transactions of The Electrochemical Society, 76(1).

<https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.3500308>

COCHILCO (2023).

El mercado de Litio Desarrollo reciente y proyecciones al 2035.

<https://www.cochilco.cl/web/download/367/2023/12428/el-mercado-de-Litio-desarrollo-reciente-y-proyecciones-al-2035-actualizacion-a-mayo-2023.pdf>

COCHILCO. (2024).

El Litio y sus tecnologías de procesamiento.

<https://www.cochilco.cl/web/download/917/2024/12429/el-Litio-y-sus-tecnologias-de-procesamiento.pdf>

DuPont. (2024).

Manual técnico de las membranas de ósmosis inversa FilmTec™.

<https://www.dupont.es/content/dam/water/amer/us/en/water/public/documents/es/RO-NF-FilmTec-Manual-45-D01504-es.pdf>

Dye, J. (2023).

Lithium.

<https://www.britannica.com/science/lithium-chemical-element>

ElectraLith. (s. f.).

ElectraLith-DLE-R.

<https://www.electralith.com/dle-r>

Encina, P. (2022).

Seis empresas son preseleccionadas para competir por contratos de explotación de Litio en Bolivia. Reporte Minero | el Portal de Minería En Chile.

<https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2022/06/seis-empresas-seleccionadas-contrato-Litio-bolivia>

Eramet. (2023).

Nuestro proceso de extracción de Litio – Eramet.

<https://www.eramet.com/es/actividades/Litio/nuestro-proceso-de-extraccion-de-Litio/>

Extantia (2024).

The technology overview: closing the lithium supply gap with direct lithium extraction (DLE) and battery recycling. Medium.

<https://medium.com/extantia-capital/the-technology-overview-closing-the-lithium-supply-gap-with-direct-lithium-extraction-dle-and-d686e0e7a923>

Farahbakhsh, J., Arshadi, F., Mofidi, Z., Mohseni, M., Kök, C., Assefi, M., Soozanipour, A., Mohsen, Yasaman B., Volker, P., & Amir Razmjou, A. (2024).

Direct lithium extraction: A new paradigm for lithium production and resource utilization. Desalination, 575.

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

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.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103572>

Goldman Sachs. (2023).

Direct Lithium Extraction: A potential game changing technology.

<https://www.goldmansachs.com/pdfs/insights/pages/gs-research/direct-lithium-extraction/report.pdf>

International Battery Metals (s.f.).

Reshaping the Future of Lithium Extraction - About IBAT.

<https://www.ibatterymetals.com/about-us>

IP Group. (2024).

ElectraLith's DLE-R proof of concept produces battery grade lithium using no water or chemicals.

<https://www.ipgroupanz.com/news/2024/2024-08-27>

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.

<https://doi.org/10.1002/9783527628698.hgc121>

Kim, S., Joo, H., Moon, T., Kim, S.-H., & Yoon, J. (2019).

Rapid and selective lithium recovery from desalination brine using an electrochemical system. Environmental Science, 21.

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/em/c8em00498f>

Lee, M. (2020).

Tecnologías de concentración de Litio alternativas a las pozas de evaporación. Pontificia Universidad Católica de Chile.

<https://repositorio.uc.cl/handle/11534/43337>

Lilac Solutions. (2023).

Technology - Lilac Solutions. Lilac Solutions - Scaling Lithium Supply For The Electric Era.

<https://lilacsolutions.com/es/tecnologia/>

Logan, B., & Elimelech, M. (2012).

Membrane-based processes for sustainable power generation using water. Nature, 488.

<https://doi.org/10.1038/nature11477>

Lucy, C. (2003).

Evolution of ion-exchange: from Moses to the Manhattan Project to Modern Times. Journal Of Chromatography A, 1000.

[https://doi.org/10.1016/s0021-9673\(03\)00528-4](https://doi.org/10.1016/s0021-9673(03)00528-4)

Mangrove Lithium. (2022).

El nuevo financiamiento de un importante fabricante automotriz posiciona a mangrove en un papel central en el futuro de la fabricación de vehículos eléctricos sostenibles. PR Newswire.

<https://www.prnewswire.com/news-releases/el-nuevo-financiamiento-de-un-importante-fabricante-automotriz-posiciona-a-mangrove-lithium-en-un-papel-central-en-el-futuro-de-la-fabricacion-de-vehiculos-electricos-sostenibles-895113042.html>

Mashtalir, O., Nguyen, M., Bodoïn, E., Swonger, L., & O'Brien, S. (2018).

High-Purity Lithium Metal Films from Aqueous Mineral Solutions. ACS Omega, 3.

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.7b01501>

Meng, W., Chen, S., Chen, P., Gao, F., Lu, J., Hou, Y., He, Q., Zhan, X., & Zhang, Q. (2024).
Space-Confined Synthesis of Thinner Ether-Functionalized Nanofiltration Membranes with Coffee Ring Structure for Li⁺/Mg²⁺ Separation. *Advanced Science*.

<https://doi.org/10.1002/advs.202404150>

Meng, X., Long, Y., Tian, Y., Li, W., Liu, W., & Huo, S. (2021).

Electro-membrane extraction of lithium with D2EHPA/TBP compound extractant. *Hydrometallurgy*, 202.

<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105615>

Monash University. (2023).

Membrane technology promises cleaner, cheaper, faster lithium production for growing battery market.

<https://www.monash.edu/news/articles/membrane-technology-promises-cleaner,-cheaper,-faster-lithium-production-for-growing-battery-market>

Pankaj, K., Min-seuk, K., Rajiv, R., Lee, J., & Lee, J. (2016).

Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: Lithium. Part I: From mineral and brine resources. *Minerals Engineering*, 89.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.01.010>

Roskill. (2016).

Lithium: Global Industry, Markets and Outlook to 2025.

Shi, C., Jing, Y., Xiao, J., Wang, X., & Jia, Y. (2017).

Liquid-liquid extraction of lithium using novel phosphonium ionic liquid as an extractant. *Hydrometallurgy*, 169.

<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.02.015>

Smolyakov, G., Parrès-Maynadié, S., Bourgeois, D., Dautriche, B., Pouessel, J., Grassot, J.-M., Mabire, D., Meyer, D., Pellet-Rostaing, S., & Diat, O. (2018).

Efficient Liquid-Liquid Extraction of NaCl Governed by Simultaneous Cation and Anion Coordination. *Desalination*, 432.

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.01.010>

Solis, C., Velez, C., & Ramírez, J. (2016).

Tecnología de membranas: desarrollo histórico / Membrane technology: historical development. *Entre Ciencia e Ingeniería*.

https://www.researchgate.net/publication/304175336_Tecnologia_de_membranas_desarrollo_historico_Membrane_technology_historical_development

Srimuk, P., Su, X., Yoon, J., Aurbach, D., & Presser, V. (2020).

Charge-transfer materials for electrochemical water desalination, ion separation and the recovery of elements. *Nature Review Materials*, 5.

<https://www.nature.com/articles/s41578-020-0193-1>

Thornton, J. (2008).

Extraction, liquid-liquid.

https://doi.org/10.1615/atoz.e.extraction_liquid-liquid

Vera, M., Torres, W., Galli, C., Chagnes, A., & Flexer, V. (2023).

Environmental impact of direct lithium extraction from brines. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(3), 149-165.

<https://doi.org/10.1038/s43017-022-00387-5>

Vulcan Energy. (2023).

A Growing wave of sustainable lithium supply: adsorption-type direct lithium extraction (DLE).

<https://v-er.eu/app/uploads/2023/12/DLE-Q4.pdf>

Yang, S., Wang, Y., Pan, H., He, P., & Zhou, H. (2024).

Lithium extraction from low-quality brines.

<https://www.nature.com/articles/s41586-024-08117-1>

Zhou, Z., Fan, J., Liu, X., Hu, Y., Wei, X., Hu, Y., Wang, W., & Ren, Z. (2020).

Recovery of lithium from salt-lake brines using solvent extraction with TBP as extractant and FeCl₃ as co-extraction agent. *Hydrometallurgy*, 191.

<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105244>