



Litio: Situación actual y desafíos

**Centro de Estudios y Documentación
Mineros – CEMS**

Julio 2024

SONAMI
SOC. NACIONAL DE MINERÍA



SONAMI

SOC. NACIONAL DE MINERÍA

La propiedad intelectual de este documento corresponde a la Sociedad Nacional de Minería F.G.(SONAMI). Cualquier forma de explotación de esta obra, en especial su uso, reproducción, distribución, comunicación pública o transformación, solo puede ser realizada con la autorización de su titular, salvo las excepciones previstas por la ley. La Sociedad Nacional de Minería F.G. se reserva el ejercicio de las acciones legales correspondientes para el caso de incumplimiento de la Ley N° 17.336 de Propiedad Intelectual.

1. Introducción

El litio ha ganado protagonismo en los últimos años como uno de los metales esenciales para la transición energética debido a que es un componente clave en la elaboración de baterías eléctricas¹. En esta línea, la producción mundial de litio ha experimentado un crecimiento significativo, pasando de cerca de 200 kilotoneladas (kt) de Carbonato de Litio Equivalente (LCE, por sus siglas en inglés), el año 2016, a 983 kt, en 2023, como se puede apreciar en la Figura 1.

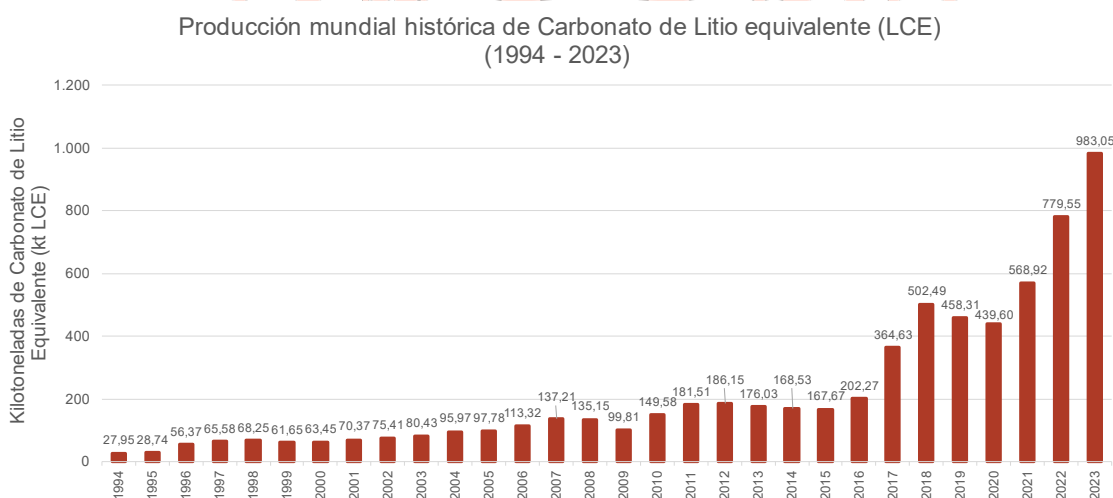


Figura 1: Producción mundial histórica de LCE entre los años 1994 y 2023. Fuente: Elaboración propia en base a USGS (U.S. Geological Survey, 2024).

En este contexto, Chile se encuentra en una posición privilegiada, pues posee aproximadamente un 33,6% de las reservas mundiales de este mineral², con 9.300 kilotoneladas,

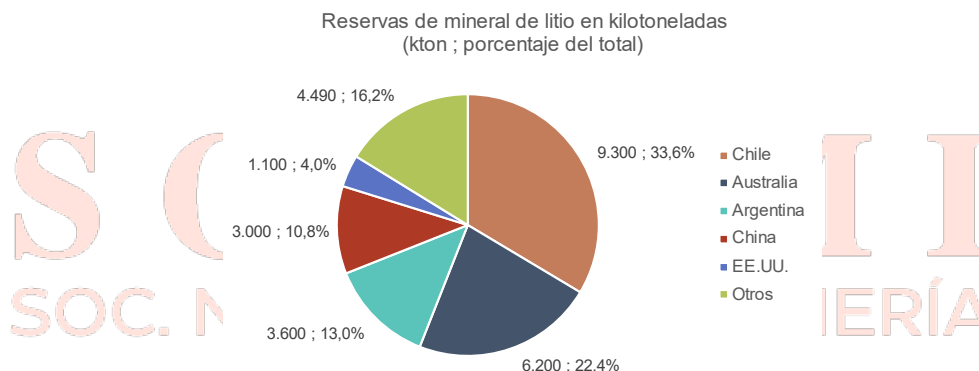


Figura 2: Reservas de litio en kilotoneladas, y su porcentaje del total (2024). Fuente: Elaboración propia en base a datos del USGS (U.S. Geological Survey, 2024).

¹ Se estima que el 87% del total del uso de este metal se destina a la elaboración de baterías (U.S. Geological Survey, 2024).

² Entendiendo por reserva aquellas con son económicamente viables de extraer (U.S. Geological Survey, 2024).

convirtiéndolo en el país con el mayor porcentaje de reservas en el mundo, como se aprecia en la Figura 2.

Más aún, actualmente ostenta el segundo lugar entre los países productores de litio, con aproximadamente 234 kt LCE, producidas el año 2023, abarcando el 23,82% de la producción mundial para ese año, como se puede observar en Figura 3.

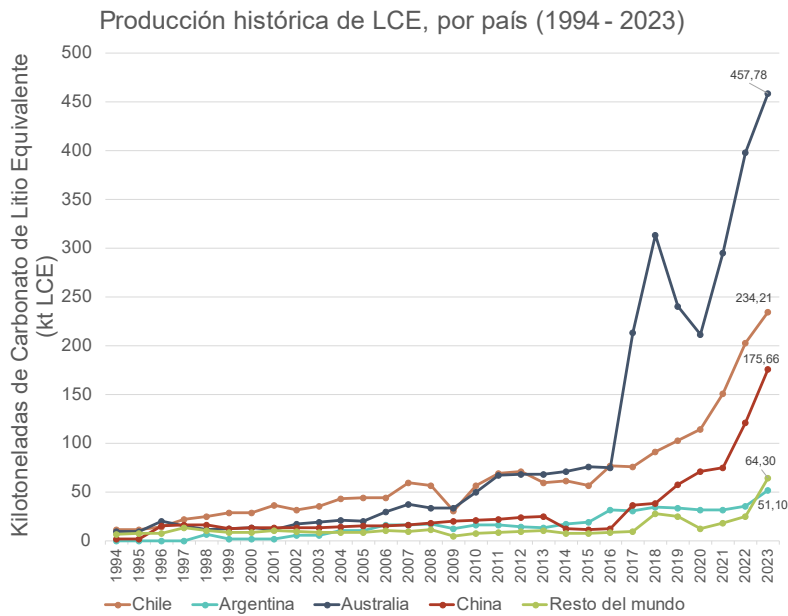


Figura 3: Producción histórica de Carbonato de Litio Equivalente (LCE), por país para los años 1994 – 2023. Fuente: Elaboración propia en base a datos del USGS (U.S. Geological Survey, 2024).

Asimismo, según cifras de COCHILCO, se proyecta que la demanda mundial crezca de unas 917 kt LCE, en 2023, hasta unas 3.829 kt LCE para el año 2035, como se puede apreciar en la Figura 4.

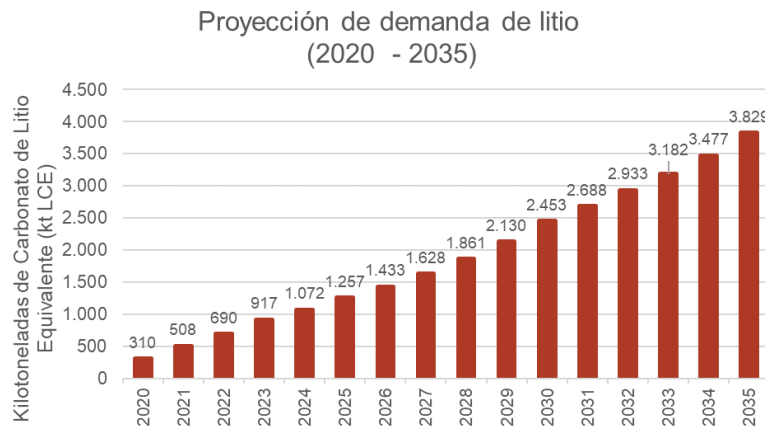


Figura 4: Proyección de demanda agregada de litio, en kt LCE, para el período 2020 - 2035. Fuente: COCHILCO (COCHILCO, 2023).

En este contexto, el litio ha adquirido un rol protagónico en el debate público en Chile durante los últimos años. Se reconoce que el aumento de la demanda, impulsado por los esfuerzos de descarbonización y la electrificación asociada, junto con las proyecciones de precios futuros favorables, representa una oportunidad para que el país asuma un papel de liderazgo en el esfuerzo global de transición energética y, ahora, no solo en el ámbito del cobre, sino también del litio, obteniendo al mismo tiempo beneficios económicos considerables. Esto, dado que se estima que en los próximos 2 a 4 años, los precios del carbonato de litio se situarán entre los 18.000 y 19.000 USD/tonelada (Bank of America, 2024).

El actual Gobierno presentó la Estrategia Nacional del Litio (ENL) (Gobierno de Chile, 2023), que comprende un “conjunto de medidas que buscan incorporar capital, tecnología, sostenibilidad y agregación de valor al sector productivo (del litio) en armonía con las comunidades”. La ENL define como fundamental el aumentar el potencial productivo del país, asegurando la máxima recuperación del recurso y minimizando el impacto ambiental de la industria. Para lograr estos objetivos, se propone invertir en capacidades productivas, atraer nuevos actores al sector e introducir nuevas tecnologías de extracción que respondan a los desafíos ambientales y sociales que enfrenta la industria actualmente.

Pero la ENL ha generado diversas interrogantes desde una perspectiva técnico-legislativa. En primer lugar, la mención a “nuevas tecnologías de extracción”, sin lineamientos técnicos concretos, genera incertidumbre. Ello, pues no está definido bajo qué criterios deberán funcionar estas nuevas tecnologías. Como se verá más adelante, distintos criterios y requerimientos podrían dejar fuera ciertas tecnologías. En segundo lugar, la decisión de mantener la inconcesibilidad del litio crea un entorno de gobernanza complejo que dificulta la participación del sector privado en la explotación del mineral.

Para comprender mejor estas inquietudes y el marco legal actual, es necesario revisar la normativa que establece al litio como sustancia mineral inconcesible y sujeta a reserva. En primer lugar, se encuentra el Decreto Ley (D.L.) 1.557, de 1976, que incorporó al litio entre los minerales que denomina “materiales de interés nuclear”; y en segundo lugar está el D.L. N°2.886 en 1979, que declaró al litio como sustancia mineral reservada al Estado, imponiendo prohibiciones y restricciones para su comercialización³. En este Decreto Ley se consagró el litio como material de interés nuclear, equiparándolo con los materiales atómicos naturales, como el uranio y el torio.

Estos D.L. fueron posteriormente consagrados por la Ley Orgánica Constitucional de Concesiones Mineras de 1982. Los argumentos utilizados para mantener la inconcesibilidad del litio se basan en el informe técnico de dicha Ley (Ministerio de Minería, 1981), elaborado por la

³ Cabe mencionar que, en el D.L. N°2.886 de 1979, se exceptuó de la declaración de inconcesibilidad las concesiones mineras ya constituidas sobre él, ubicadas dentro de los límites de la Comuna de San Pedro de Atacama. En consecuencia, el D.L. no afectó a los titulares de dichas pertenencias (CORFO y otros de menor relevancia) y, por lo tanto, sus titulares pueden, aún hoy, explorar y explotar el litio por tratarse de una sustancia mineral que era y es objeto de su concesión minera, quedando sólo sujetos a las normas especiales referidas a su comercialización.

cartera del Ministro de Minería de la época, José Piñera Echeñique. En este, se recomienda mantener la inconcesibilidad del litio por varias razones atinentes a esa época.

La primera es que Chile, al tener gran participación de las reservas mundiales de litio (en esa época consideradas un 40%, actualmente un 33,6% como se indica en la Figura 2), podría tener poder de negociación en un mercado internacional no competitivo, al mantener control sobre la oferta. Esto es debido a que el litio, en esos años, tenía una producción y utilización incipiente, lo que llevaba a que el mercado internacional no fuese competitivo. La segunda, es la aplicación del litio como material de interés nuclear, que obedecía a una decisión estratégica propia de una nación en un contexto de Guerra Fría.

Estas razones llevaron al litio a ser considerado como estratégico, situación que se ha mantenido hasta el día de hoy. El Estado chileno ostenta el control exclusivo sobre la explotación del litio, aunque puede otorgar Contratos Especiales de Operación del Litio (CEOL) a empresas privadas para su desarrollo. En el marco de la ENL, el Gobierno ha identificado 26 salares aptos para la entrega de CEOL a actores privados interesados en la explotación del mineral. Para tal efecto, se ha abierto un proceso no vinculante denominado *Request For Information* (RFI), cuyo objetivo es recopilar información y evaluar las capacidades de los potenciales interesados. Es importante destacar que este proceso no entrega información ni establece los mecanismos específicos bajo los cuales se registrarán los CEOL.

Así, a medida que se acerca la finalización del proceso RFI, las incertidumbres que rodean la ENL aumentan, especialmente en lo que respecta a los métodos de producción. Esta incertidumbre se intensifica debido a los requerimientos de sustentabilidad y las ambiciosas metas de producción que el Estado chileno se ha propuesto. Además, en el ámbito legislativo, se requiere mayor agilidad en la asignación de permisos de exploración y explotación a empresas privadas para lograr los objetivos de producción establecidos.

2. Métodos de Extracción Directa de Litio (DLE)

Uno de los principales desafíos de la explotación de litio desde salares radica en la sustentabilidad de sus métodos de extracción. La técnica más común, la concentración por evaporación, presenta serios inconvenientes. Este proceso implica colocar grandes volúmenes de salmuera en piscinas evaporíticas, donde el litio (junto a otros iones como sodio, potasio y magnesio) se concentra a medida que el agua se evapora. La salmuera concentrada se envía a una planta de procesamiento para obtener carbonato e hidróxido de litio. Sin embargo, este método es lento, con una duración de entre 10 y 18 meses, y requiere una gran superficie para las piscinas evaporíticas. Además, este proceso tiene grandes pérdidas hídricas, lo cual es particularmente relevante considerando que los salares suelen ubicarse en zonas con poca disponibilidad hídrica. Un ejemplo claro es el caso de SQM: entre agosto de 2022 y agosto de

2023, se extrajeron en promedio 120.076 m³/día de salmuera del Salar de Atacama, de los cuales se perdió el 87,7% (SQM, 2024).

Así, la búsqueda de métodos de extracción de litio más sostenibles ha impulsado el desarrollo de tecnologías de Extracción Directa de Litio (DLE). Estas tecnologías prometen extraer el litio directamente de la salmuera de forma selectiva, devolviendo la salmuera en condiciones similares a las que tenía originalmente. Esto se traduce en un menor impacto ambiental, con considerables reducciones en la pérdida de agua, mayores tasas de recuperación de litio (cerca del 80-90%) y hasta 20 veces menos uso de suelo en comparación con los métodos de evaporación tradicionales (Goldman Sachs, 2023).

Además, debido a sus mejores tasas de recuperación, permiten explotar litio desde salares que anteriormente no podían ser explotados. Estas tecnologías también poseen una mayor flexibilidad productiva, lo que les permite ajustar la producción de manera más fácil y en menor tiempo ante cambios inesperados en la demanda. En comparación, el método de evaporación requiere que los cambios en la producción se planifiquen con años de antelación debido al largo tiempo que toma extraer el litio con este método.

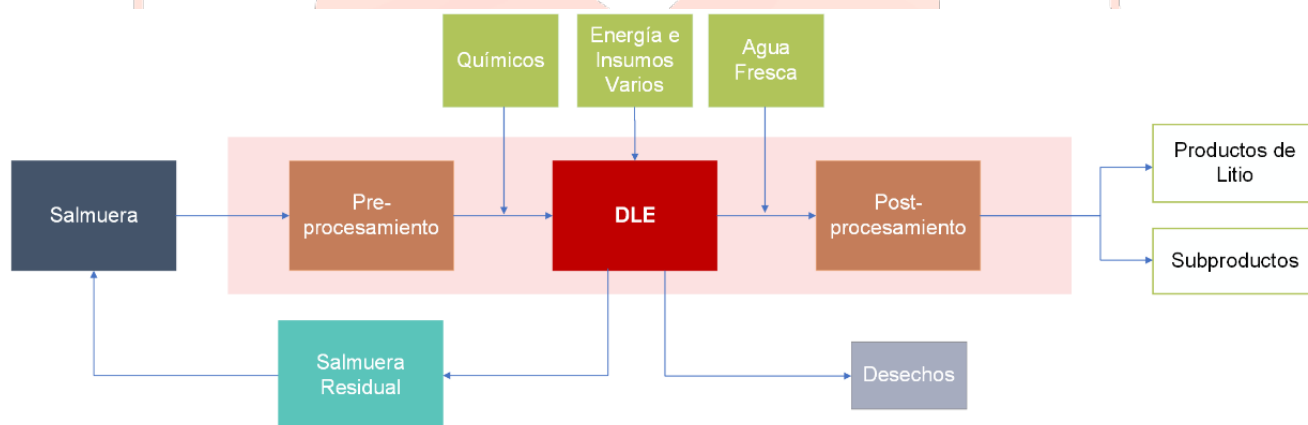


Figura 5: Descripción general del proceso de extracción de litio por medio de tecnologías DLE. Fuente: Elaboración propia en base a (Vera, Torres, Galli, Chagnes, & Flexer, 2023)

A grandes rasgos, la extracción de litio a través de DLE consiste en varias etapas. Primero, se realiza la extracción de salmuera y su preprocesamiento, donde se adecúa a los requerimientos técnicos que optimizan la tecnología DLE. Aquí se suelen agregar químicos, como correctores de pH, dióxido de titanio, tributilfosfato, entre otros, dependiendo de la tecnología. Luego, se aplica la tecnología DLE, obteniendo una solución concentrada en litio, que aún no es el producto final. Posteriormente, esta solución pasa por un post-procesamiento, donde se concentra aún más para alcanzar los grados técnicos necesarios para los procesos de refinación de carbonato e hidróxido de litio. En la Figura 5 se muestra un diagrama general para el proceso de extracción de litio mediante tecnologías DLE.

Existen distintas tecnologías de DLE, donde las más comunes se pueden clasificar en adsorción⁴, intercambio iónico, extracción por solvente, membranas y, más recientemente, métodos electroquímicos. Estas se encuentran en distintos niveles de madurez tecnológica, algunas más avanzadas que otras.

Estos avances son definidos por el Nivel de Madurez Tecnológica (TRL) (*Technology Readiness Level*, en inglés), la que es una medida que describe el estado de desarrollo de una tecnología en una escala que va desde el nivel más básico, TRL1, donde se observan principios básicos, pasando por una transición hacia una investigación aplicada, hasta el nivel más alto, TRL9, donde la innovación ha sido probada en diversas condiciones operativas (Euro-Funding, 2024).

2.1. Tipos de Tecnologías

A continuación, se describen los principales tipos de tecnologías utilizadas para la extracción directa de litio, así como su TRL.

2.1.1. Adsorción

La adsorción es un fenómeno físico en el que un compuesto en fase líquida o gaseosa entra en contacto con un sólido adsorbente y se adhiere a su superficie mediante una fuerza física (fuerza de dispersión de London). Este proceso no implica intercambio de electrones, lo que lo hace reversible (Carbotecnia, 2023). Es también una de las tecnologías más convenientes para recuperar litio de salmueras con una elevada relación Mg/Li (Saeed Butt, y otros, 2022). Su mecanismo de adsorción de iones de Li^+ (Burba, 2023) la destaca por su alta selectividad, bajo costo energético y menor impacto ambiental en comparación con otros métodos.

Sin embargo, presenta desafíos debido a las pérdidas que ocurren en el proceso de disolución, así como los largos tiempos que toma el proceso en comparación con otras tecnologías DLE. Además, los adsorbentes tienen distintos valores y pueden incidir de forma sensible en los costos operacionales. Los más comunes son los de aluminio, más baratos, pero con menor capacidad de adsorción comparados con otros materiales. Recientemente se encuentra en pilotaje el uso de adsorbentes a base de manganeso y titanio, que tienen mayor valor comercial. En general, los adsorbentes presentan complejidades para regenerar y se degradan fácilmente en medios ácidos.

⁴ No confundir con Absorción, que es otro tipo de Sorción. La Sorción puede ser de tres tipos, Absorción, Adsorción, e Intercambio Iónico. La Absorción es un fenómeno físico que implica la difusión de masa en el que uno o más componentes de una mezcla gaseosa se disuelven en un líquido. No implica cambios químicos, por lo que es reversible (Carbotecnia, 2023).

En consecuencia, es importante evaluar cada salmuera antes de implementar la tecnología de adsorción, ya que estas pueden necesitar eventualmente un pretratamiento para utilizar esta tecnología. Esto, a su vez, brinda la oportunidad de adecuar la tecnología a distintos tipos de salmueras, considerando un pre y post-tratamiento (Farahbakhsh, y otros, 2023).

2.1.2. Intercambio iónico

El intercambio iónico es una tecnología altamente selectiva que destaca por su eficiencia en la separación de iones Li^+ . Su implementación se traduce en un bajo costo de inversión y una operación con bajo consumo energético. Sin embargo, presenta un alto costo operacional, aunque este puede ser contrarrestado por su menor impacto medioambiental, siendo superior en términos de producción limpia en comparación con la tecnología de precipitación y extracción por solvente (Zhang, Wei, Rui, Wang, & Honghu, 2021; Farahbakhsh, y otros, 2023).

En este proceso, la salmuera se circula en un intercambiador de iones donde los iones de litio se intercambian con otros elementos como el sodio (Na^+) hasta alcanzar el equilibrio iónico. Posteriormente, se bombea ácido clorhídrico para obtener una solución concentrada de cloruro de litio. En tanto, el intercambiador se lava con agua para generar una solución residual, preparándolo para una nueva extracción.

Es importante considerar que si la salmuera tiene altas concentraciones de minerales como calcio y magnesio, puede presentar problemas de selectividad que reducen la recuperación del litio. Además, las resinas utilizadas en el intercambio iónico tienden a degradarse con el tiempo, y el proceso de regeneración con agua genera una solución residual que puede acumularse con el tiempo, representando un desafío ambiental (Burba, 2023).

2.1.3. Extracción por solvente

La extracción por solvente opera mediante gradientes de concentración entre dos soluciones líquidas. Destaca por su alto rendimiento, operación sencilla y continua, y alta selectividad para el Li^+ . Su capacidad para recuperar litio de salmueras con alto contenido de Mg_2^+ es notable. El proceso requiere el uso de aditivos y disolventes corrosivos, lo que puede aumentar su impacto ambiental si se planea reinyectar la salmuera al salar. Esos reactivos generan residuos y materiales tóxicos, resultando en mayores costos de tratamiento (Burba, 2023).

La tecnología implica varios pasos fundamentales: primero, la fase orgánica, que contiene el extractante que se combina con una solución que contiene litio, formando complejos de litio que se transfieren a la fase orgánica junto con impurezas residuales. Luego, la fase que contiene los complejos de litio se somete a una etapa de extracción de litio, mientras que la fase orgánica se recicla y regenera (Farahbakhsh, y otros, 2023).

El proceso es sensible a variables operativas como pH, tiempo de extracción, tipo de solvente, ciclos de la solución y temperatura. Un aspecto relevante es el alto consumo de agua de este método, generalmente superior a 1 m³ de agua fresca por tonelada de carbonato de litio. Sin embargo, sigue siendo menor que las pérdidas generadas por métodos de evaporación (Vera, Torres, Galli, Chagnes, & Flexer, 2023). También presenta desafíos como el riesgo de incendio al tratar salmueras a altas temperaturas.

2.1.4. Extracción mediante membranas

Este método ofrece altos índices de recuperación con un proceso sencillo y continuo, teniendo menor impacto ambiental dado que no hay contacto directo entre el extractor y la salmuera. Su consumo de energía es relativamente bajo, resultando en un producto con bajos niveles de impureza.

Las tecnologías de membrana desempeñan un papel crucial en DLE (Stringfellow & Dobson) y se utilizan principalmente en el pre-tratamiento para reducir la presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos en la salmuera. Esto se logra mediante procesos impulsados por presión como la ultrafiltración (UF) o microfiltración (MF). Otro tipo de tecnología de membranas que puede ser utilizada para reducir el total de sólidos disueltos (TDS) en la salmuera que entra en los procesos DLE es la nanofiltración (NF) para eliminar cationes multivalentes (Zhang, Wang, Sun, Hu, & Tang, 2020)

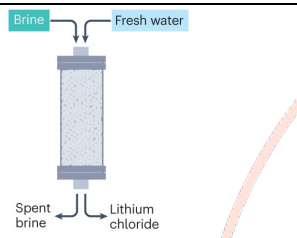
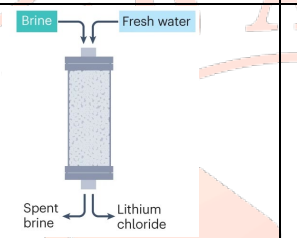
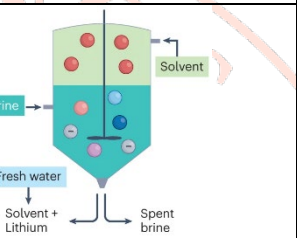
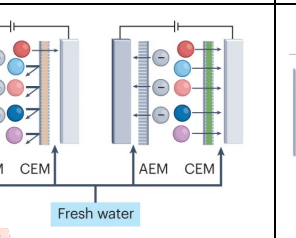
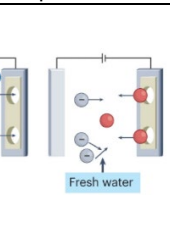
2.1.5. Extracción electroquímica

Aunque aún se encuentra en TRL 3-4, parece ser una alternativa con alta eficiencia y selectividad, además de ser amigable con el medio ambiente. Entre los desafíos que ya se observan está el requerimiento de una alta concentración de litio en la salmuera (Sun, Wang, Wang, Yun, & Xiang, 2021).

Los sistemas electroquímicos de captura de iones de litio (ELICS, por sus siglas en inglés) se pueden clasificar en baterías, batería combinada con membrana y basados en electro membrana. Los sistemas electroquímicos de bombeo de iones basados en baterías están emergiendo como una gran alternativa al DLE gracias a su operación simple, sostenible, alta eficiencia y bajo consumo de energía. Sin embargo, es crucial que los operadores e investigadores trabajen en la optimización de esta tecnología, lo cual incluye determinar la composición ideal de la solución de alimentación, la disposición de los electrodos, la densidad de corriente y el potencial aplicado (Farahbakhsh, y otros, 2023).

A continuación, en la Tabla 1, se indica el nivel de madurez tecnológica, mecanismo de funcionamiento, y algunas ventajas y desventajas asociadas a cada tecnología.

Tabla 1: Distintos métodos de Extracción Directa de Litio (DLE) Fuente: elaboración propia en base a (Zhang, Wei, Rui, Wang, & Honghu, 2021; Sun, Wang, Wnag, Yun, & Xiang, 2021; Goldman Sachs, 2023; Vera, Torres, Galli, Chagnes, & Flexer, 2023; Farahbakhsh, y otros, 2023).

	Adsorción	Intercambio Iónico	Extracción por Solvente	Membranas Selectivas	Extracción Electroquímica
Imagen					
TRL	9	8	7	4-5	3-4
Mecanismo	Se centran en la capacidad de ciertos materiales sólidos (la mayoría a base de aluminio, seguidos por los de manganeso y titanio) para capturar selectivamente iones de litio.	Se basa en la capacidad de las resinas de intercambio iónico para capturar selectivamente los iones de litio de las soluciones acuosas mediante un proceso de intercambio iónico, seguido de la liberación controlada y la recuperación del litio.	Implica la transferencia selectiva de iones de litio desde una fase acuosa (salmuera) a una fase orgánica (solvente extractante), seguida por la liberación controlada y la purificación de los iones de litio para obtener un producto final de litio de alta calidad.	<ul style="list-style-type: none"> Ósmosis inversa Electrodialísis Nanofiltración 	Utilizan reacciones electroquímicas y la aplicación de corriente eléctrica para extraer selectivamente iones de litio de soluciones acuosas.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> Adaptable a distintos tipos de salmuera. Operación simple. Comercialización global. Alta selectividad. Bajo consumo de energía. Bajo impacto ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> Alta capacidad teórica de absorción. Alta selectividad. Alta eficiencia de separación. Respetuoso con el medio ambiente. Baja inversión inicial. 	<ul style="list-style-type: none"> Baja dependencia de etapas pre y post tratamiento. Equipo relativamente simple. Adaptable a distintos tipos de salmuera. Alta selectividad. para Li⁺. Alta eficiencia Baja inversión de capital. Operación simple y continuo. 	<ul style="list-style-type: none"> Altas tasas de recuperación. No es necesaria una purificación adicional para fines industriales. Sin contacto entre el extractante y la salmuera. Bajos niveles de impurezas. Alta eficiencia. Uso de energía relativamente bajo. Respetuoso con el medio ambiente. Operación simple y continua. 	<ul style="list-style-type: none"> Alta selectividad. Alta eficiencia. Respetuoso con el medio ambiente. Se requiere una gran cantidad de electrolito (dependiendo de la configuración de instalación). Requiere etapas de pretratamiento de concentración.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> Los adsorbentes son caros y se degradan en la desorción basada en ácido. Se necesita evaluar la salmuera para conocer si es necesario un pre y post tratamiento. Pérdida de disolución. Operación que requiere mucho tiempo respecto a otras tecnologías. Altos costos de inversión inicial. Regeneración compleja de adsorbentes. La eficiencia del proceso depende en gran medida de la temperatura. Problemas de contaminación en la salmuera residual. 	<ul style="list-style-type: none"> Alto costo operativo, asociado a los insumos del proceso. Se necesita evaluar la salmuera para conocer si es necesario un pre y post tratamiento. Producción de peligro ambiental. Riesgo de seguridad del suministro de ácido. Riesgo de degradación de adsorbentes a bajo pH a largo plazo. 	<ul style="list-style-type: none"> Altos costos en relación con otras tecnologías. Adecuado para la recuperación de litio a partir de salmueras con una alta relación de masa Mg²⁺/Li⁺, Ca²⁺/Li⁺ (es necesario considerar etapas de concentración previas). Alto impacto ambiental. Se necesitan aditivos y disolventes corrosivos. Altos costos de inversión inicial. Alta producción de residuos. Producción de material tóxico. Riesgo de incendio en salmueras a alta temperatura. Preparación complicada. 	<ul style="list-style-type: none"> Altos precios. Requisito de pretratamiento. Problemas de suciedad. Inestabilidad para las salmueras geotérmicas. Altos costos iniciales de inversión y operación. Necesidad de fabricar y regenerar diferentes membranas. 	<ul style="list-style-type: none"> Se requiere una gran cantidad de electrolito (dependiendo de la configuración de instalación). Requiere etapas de pretratamiento de concentración.

Se puede observar en la tabla que las distintas tecnologías de DLE están aún en diferentes etapas de desarrollo. Desde TRL1 hasta TRL3 se considera la etapa de invención, donde en el TRL3 ya se han obtenido resultados cuantitativos a nivel de laboratorio, demostrando la factibilidad técnica del proyecto. Este es el caso de los métodos electroquímicos de extracción directa.

Por otro lado, los métodos basados en membranas (TRL 4-5) se encuentran en la etapa de validación del prototipo, buscando superar pruebas de factibilidad en condiciones reales de operación.

Las tecnologías en TRL7 y 8 representan etapas donde la tecnología ha sido perfeccionada y está lista para operar a escala pre-comercial o piloto. Se busca obtener la aprobación en diversas condiciones operativas, recolectando datos y evaluaciones financieras. Esto es aplicable a tecnologías como el intercambio iónico y la extracción por solvente.

Finalmente, en el nivel TRL9, la tecnología está lista para entrar al mercado con aliados estratégicos que han comercializado la tecnología. El piloto ha sido validado en diversas condiciones y está listo para la operación, producción y comercialización a gran escala. En el contexto de DLE, solo la tecnología de adsorción alcanza este nivel (Farahbakhsh, y otros, 2023).

2.2 Desafíos tecno-económicos de la DLE

Un problema que suele haber en la discusión general sobre tecnologías de extracción de litio es que se suele hablar de DLE como un solo concepto, sin embargo, se trata de un conjunto de distintas tecnologías, con mecanismos de funcionamiento diversos, y diferentes pros y contras. Todas con más o menos el mismo objetivo, que es ofrecer una alternativa distinta a la extracción de litio por evaporación de salmuera. Así, las distintas tecnologías de DLE no son necesariamente intercambiables entre sí, y deben ser adaptadas a cada salar (Farahbakhsh, y otros, 2023). Luego, para cada salar existe una tecnología de DLE que debe ser hecha a la medida de los requerimientos técnicos del salar, con base en la hidrogeografía y composición química de la salmuera.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, la gran mayoría de los métodos de DLE requieren de un pre y post-tratamiento. Los métodos de pre-tratamiento usualmente consisten en cambios en el pH, temperatura, y concentración de impurezas de las salmueras. Por ejemplo, para adsorción se favorece un entorno alcalino, con pH en torno a 9 y 11, para un mejor rendimiento en la recuperación de litio (Qian, y otros, 2019). Asimismo, distintas tecnologías tienen distintos rangos de temperatura para una recuperación óptima de litio. Por ejemplo, las tecnologías de adsorción e intercambio iónico tienen rangos muy variados, desde 10°C a 80°C en algunos casos, lo que podría aumentar la recuperación del litio desde un 15% a un 70% (Farahbakhsh, y otros, 2023).

Por otra parte, el post-procesamiento cobra bastante importancia debido a que es donde se obtiene el producto comercializable de litio, ya sea carbonato de litio o hidróxido de litio, a partir del cloruro de litio. El producto resultado de las distintas tecnologías no es el producto final comercializado, por lo que es necesario seguir concentrado la salmuera, para posterior refinación del producto. Distintas estrategias son utilizadas según la tecnología utilizada. Generalizando, se pueden categorizar en concentración, ya sea a través de evaporación con calor, o cristalización, enfriando la solución para que cristalice el cloruro de litio. Posteriormente, se debe refinar las soluciones de cloruro de litio, removiendo impurezas. Los métodos más utilizados para esto son extracción por solvente, intercambio iónico y precipitación (Barksdale, Yoon, Kwon, & Han, 2022).

En cuanto al uso de agua fresca, las tecnologías de intercambio iónico, extracción con solventes, electro-membranas e inserción electroquímica de iones requieren agua fresca para la elución de Li^+ desde una fase sorbente. Las cifras de utilización de agua fresca no están del todo esclarecidas. Un estudio recopiló datos sobre requisitos de agua fresca para las tecnologías de intercambio iónico, extracción por solventes, e inserción electroquímica de iones de 57 artículos comprendidos en el periodo de 2017-2022. De estos, una cuarta parte de estos informes no proporciona datos sobre el consumo de agua dulce, 13 usan cantidades menores que las prácticas actuales, 9 requieren cantidades similares y una cuarta parte utilizaba un consumo más de 10 veces mayor que el utilizado actualmente por medio de piscinas evaporíticas (Vera, Torres, Galli, Chagnes, & Flexer, 2023).

Este último caso es particularmente problemático si consideramos que los salares se ubican en zonas de poca disponibilidad hídrica, y si consideramos las metas de uso de agua continental de la Política Nacional Minera 2050 (PNM2050), donde se establece que para el año 2040, el 5% del total de aguas utilizadas en minería son continentales (Ministerio de Minería, 2022).

En términos energéticos, la mayoría de las tecnologías DLE aún carecen de datos detallados sobre sus requisitos energéticos y análisis de costos completos. A menudo, solo se reportan los requerimientos energéticos para el paso clave de las tecnologías DLE, sin considerar los procesos de pre y post-procesamiento. Por ejemplo, en procesos de intercambio iónico, se ha calculado que la energía mecánica necesaria para bombear soluciones a través de celdas electroquímicas puede ser hasta 300 veces mayor que la energía requerida para las reacciones electroquímicas mismas (Vera, Torres, Galli, Chagnes, & Flexer, 2023). Este enfoque fragmentado en la información energética dificulta las comparaciones efectivas entre tecnologías.

Además, como se mencionó anteriormente, el preprocesamiento requiere consideraciones específicas de energía, como el calentamiento de la salmuera a temperaturas óptimas para la eficiencia de adsorción y separación de Li^+ . En regiones con alta irradiación solar, como las salmueras continentales, la implementación de tecnologías de energía solar, como células fotovoltaicas o colectores solares de canal parabólico, podría no solo reducir los costos

operativos, sino también mitigar considerablemente las emisiones de CO₂, mejorando así la sostenibilidad y la eficiencia de los procesos industriales de extracción de litio.

Por lo demás, los métodos de Extracción Directa de Litio (DLE) destacan por su eficiencia operativa, con rendimientos de recuperación de hasta un 90%, significativamente superiores al método de evaporación, que alcanza solo un 40%. Esto se traduce en costos operativos (OPEX) competitivos, estimados entre 2,800 y 3,600 US\$/Tpa⁵ LCE, y costos de capital (CAPEX) que oscilan entre 26,000 y 34,000 US\$/Tpa LCE. La implementación exitosa de DLE puede resultar en la producción de insumos finales como cloruro o carbonato de litio, ofreciendo ventajas como una menor dependencia de las condiciones climáticas y un impacto ambiental reducido (Goldman Sachs, 2023).

En términos de costos de capital, la sostenibilidad juega un papel importante. Dado que el uso de agua dulce es prohibitivo, se debe recurrir a otras fuentes de agua, como la desalinización, lo cual implica grandes costos de capital. Soluciones colaborativas y coordinadas entre distintos actores representan una gran oportunidad para el desarrollo de más de una industria. Además, para que la extracción de litio tenga sentido en el contexto de la descarbonización, debe realizarse con energías renovables. Esto conlleva sus propios desafíos, como la operación nocturna, que requeriría mayores costos de infraestructura para el sistema, así como líneas de transmisión capaces de llevar la energía a grandes alturas.

Los procesos de DLE también enfrentan desafíos en términos de costos operacionales, con sensibilidades significativas en el uso de agua, energía y materiales como resinas o membranas. Los costos asociados al pre y post-tratamiento de la salmuera varían según las características específicas de cada salar y los requisitos regulatorios locales. Factores como la presencia de impurezas adicionales, como magnesio y potasio, pueden encarecer el proceso de extracción, especialmente en salmueras más diluidas, lo que conlleva incrementos tanto en costos como en tiempos de operación.

Como se dijo anteriormente, las tecnologías DLE comúnmente no alcanzan niveles de concentración de litio suficientes, por lo que requieren un procesamiento posterior para su refinación. Un ejemplo de esto es el Proyecto Fénix en el Salar de Hombre Muerto, Argentina, operado por Livent desde 1998, una de las pocas plantas DLE a escala comercial existentes (Integral Consulting Inc., 2023). En esta planta, la salmuera no alcanza los niveles de concentración requeridos, por lo que debe enviarse a piscinas de evaporación para su posterior concentración. Esto implica que las tecnologías DLE que no logran concentraciones suficientes deben recurrir a piscinas de evaporación, con sus desventajas como la pérdida de agua y mayores tiempos de producción. Alternativamente, pueden emplearse otras tecnologías de concentración, las cuales inevitablemente incrementan el consumo de energía, lo que a su vez se traduce en mayores costos operativos y de capital.

⁵ Toneladas por año

No obstante, existe un inconveniente al descartar completamente las piscinas de evaporación. Al prescindir de los métodos de evaporación, se pierden los subproductos de la extracción de litio, como el cloruro de potasio (silvita). Luego, en el caso de que no solo se necesite extraer litio, sino además otros minerales presentes en los salares⁶, se debería evaluar formas para recuperar estos subproductos. Esto podría lograrse mediante tecnologías complementarias al DLE aplicadas en etapas de pretratamiento y post-tratamiento, o mediante enfoques híbridos que combinen tecnologías de DLE con piscinas de evaporación. Cabe notar que cada opción conlleva costos de capital, huella hídrica y consumo energético distintos, que deben ser evaluados al decidir el método de extracción.

A pesar de estos desafíos, el desarrollo de proyectos DLE continúa ganando terreno a nivel global, impulsado por la creciente demanda de litio. Países como Estados Unidos, Alemania y Canadá, han avanzado significativamente en la implementación de estas tecnologías, destacando su papel en la expansión y diversificación de la industria del litio (Vulcan Energy, 2023). Como se observa en la Tabla 2, China y Estados Unidos lideran respecto a las compañías que se encuentran desarrollando proyectos de DLE.



SONAMI
SOC. NACIONAL DE MINERÍA

⁶ Cosa que actualmente ocurre al revés, pues aquellos con concesiones mineras para salares pueden extraer minerales de esta, excepto el litio que es inconcesible.

Tabla 2: Compañías con proyectos DLE. Listado no exhaustivo. Las cifras no consideran planes futuros planes de expansión efectivos después de la publicación de estas fuentes. Fuente: Elaboración propia en base a (Goldman Sachs, 2023; Farahbakhsh, y otros, 2023).

Compañía	País	Tecnología DLE	Capacidad (kt/a LCE)	Estado
Albermale	Chile	Por definirse		Pilotaje
American Batattery Materials	EE.UU.	Por definirse	-	Pilotaje
Anson Resources	Australia	Intercambio iónico	15	Producción
Anson Resources	EE.UU.	Adsorción	-	Pilotaje
Berkshire Hataway	EE.UU.	Intercambio iónico por Resina	90	Pilotaje
Clean Tech lithium	Chile	Adsorción	20	Pilotaje
Clean Tech lithium	Chile	Por definirse	-	Pilotaje
Compass Minerals	EE.UU.	Intercambio iónico por Resina	20-25	Pilotaje
Controlled Thermal Resources CTR	EE.UU.	Intercambio iónico por Resina	20	N/D
Controlled Thermal Resources CTR	EE.UU.	Intercambio iónico	25	Pruebas Demostración
E3 Metals	Canadá	Intercambio iónico	20	Pilotaje
Energy Source Minerals	EE.UU.	Intercambio iónico por Resina	20	Pilotaje
Eon minerals	Argentina	Adsorción	-	Pilotaje
Eramet/Tsingshan	Argentina	Adsorción	24	Construcción expansión
Jintai lithium	China	Adsorción	7	Producción
Lake Resources/ Lilac	Argentina	Intercambio iónico por Resina	20-25	N/D
Lanke lithium	China	Adsorción	20	Producción
LithiumBank	Canadá	Intercambio iónico	-	N/D
Livent	Argentina	Adsorción	80	Producción
Pure Energy Pure Energy	Canadá	Extracción por solvente	12	N/D
Rio Tinto	Argentina	Adsorción	50	Pilotaje
SQM	Chile	Por definirse	220-250	Pilotaje
Standard lithium	EE.UU.	Intercambio iónico por Resina	21	Demostración
Tibet National	China	Adsorción	-	Puesta en marcha
Vulcan Energy	Alemania	Adsorción	40	Pilotaje
Xinghua Lithium	China	Extracción por solvente	10	Producción
Yiwei lithium	China	Adsorción	-	Construcción
Zangge lithium	China	Adsorción	20	Producción

3. La reinyección de salmuera: El principal desafío

Como se mencionó anteriormente, las tecnologías de DLE generalmente requieren pre-tratamiento y post-tratamiento de la salmuera. Estos procesos representan uno de los principales desafíos en la extracción de litio mediante DLE. Esto pues, en la ENL se establece de manera implícita que, para obtener el CEOL para la explotación del litio, se requerirá el uso de tecnologías DLE con reinyección de salmuera al salar. La salmuera reinyectada debe mantener condiciones lo más similares posible a las que tenía al ser extraída. Sin embargo, el pre-tratamiento y post-tratamiento de la salmuera implican la introducción de elementos externos y modifican las condiciones naturales del salar. Esto genera preocupación sobre la posible presencia de contaminantes en la salmuera reinyectada, a pesar de cumplir con los estándares establecidos.

La reinyección de salmueras es uno de los principales desafíos asociados a la extracción directa de litio. La inocuidad de este proceso no está probada a gran escala, bajo un entorno de rigurosidad científica. La falta de pruebas científicas en entornos de gran escala, sumado a la ausencia de experiencias reales a gran escala en Chile, genera incertidumbre en la industria del litio, en el contexto de la ENL.

Si bien empresas en fase de pilotaje han realizado pruebas para implementar tecnologías DLE, la complejidad y gran escala de los salares exige estudios a mayor escala para comprender plenamente los efectos de la reinyección. Es importante destacar que empresas como SQM y Albemarle, actualmente reinyectan salmuera como consecuencia del método de evaporación, aunque con pérdidas cercanas al 90%. Sin embargo, esta escala no es suficiente, ya que se esperan casos donde se reinyecte cerca del 95% de la salmuera.

Para abordar estas cuestiones, el Gobierno de Chile anunció la creación del Instituto Tecnológico y de Investigación de Litio y Salares (Gobierno de Chile, 2024). Este organismo tiene como objetivo caracterizar salares, evaluar y desarrollar tecnologías para la explotación de litio. Sin embargo, existe urgencia debido a los largos plazos que requieren los estudios científicos a esta escala, donde los efectos medioambientales pueden manifestarse más tarde de lo esperado. Esto es crucial considerando las metas de extracción de litio establecidas en la PNM2050, que apunta a una producción anual de 380 kilotoneladas de carbonato de litio para el año 2030.

Ahora bien, el tema de la reinyección no solo presenta desafíos medioambientales, sino también prácticos. Si la devolución de salmuera no se realiza a presión y alejada del punto de extracción, existe la posibilidad de que el productor de litio esté diluyendo su propia materia prima, es decir, la concentración de litio en el salar (Houston, Butcher, Ehren, Evans, & Godfrey, 2011), similar a lo que sería una baja en la ley mineral en el caso del cobre. Esto inevitablemente reduciría la eficiencia del proceso minero, ya que aumentarían los costos operacionales al tener que procesar una mayor cantidad de salmuera para obtener las mismas cantidades de litio.

En este sentido, es crucial recordar que un salar es un medio acuoso y no sólido, por lo tanto, puede fluir y escurrir. Esto implica que las acciones realizadas en una concesión dentro del salar pueden afectar a otras concesiones en el mismo salar. Por ejemplo, si múltiples empresas están explotando litio en el mismo salar, la reinyección de salmuera por una empresa puede tener repercusiones en las concesiones de otras.

En esta línea, aún persiste la incertidumbre sobre si se permitirá que más de una empresa explote litio desde el mismo salar, aunque cabe mencionar que tanto SQM como Albemarle explotan litio desde el Salar de Atacama. En el hipotético caso de que así sea, podrían surgir problemas ambientales derivados de la reinyección de salmuera, planteando la interrogante sobre cómo se asignarán las responsabilidades entre las empresas que extraen y reinyectan salmuera en el mismo salar. Es crucial establecer criterios claros definidos por la autoridad para asignar y mitigar estos impactos ambientales.

Además, la empresa con mejores recursos técnicos y medios productivos podría inadvertidamente diluir el salar en la propiedad minera vecina, afectando la producción de otra empresa. La ENL ha designado un 30% del salar como área protegida. Sin embargo, las acciones realizadas en cualquier parte del salar pueden tener efectos que se propaguen por todo el cuerpo acuífero. Por lo tanto, los problemas asociados con la reinyección de salmuera podrían potencialmente afectar estas áreas protegidas también.

Ante esto, surge la duda acerca de los requisitos técnicos que se establecerán para la asignación de CEOL, ya que estos podrían potencialmente descartar tecnologías DLE. En relación con la reinyección de salmuera, ¿se exigirá un porcentaje específico de similitud con la salmuera extraída? En caso afirmativo, ¿cuál sería ese porcentaje y cómo se medirá? Las empresas interesadas en la explotación del litio mediante DLE mencionan recuperaciones cercanas al 90%. Sin embargo, no está claro en qué condiciones exactas se realiza esta devolución ni si la salmuera devuelta contiene algún grado de elementos externos al proceso de producción, producto del proceso mismo de DLE en utilización. Por todo esto, es fundamental que la autoridad aclare estos puntos para que las empresas licitantes puedan tomar decisiones informadas.

Además, es importante señalar que, dependiendo de los requisitos impuestos a las tecnologías utilizadas, podrían surgir complejidades adicionales en la matriz productiva, lo que inevitablemente aumentaría los costos para los productores, llegando incluso a hacer inviables algunos proyectos.

4. Los problemas regulatorios: Territorio, propiedad y concesión minera

Ante esta situación, es fundamental aclarar los aspectos relacionados con las concesiones y la propiedad minera en el contexto de la extracción y reinyección de salmuera. Podría ocurrir que, basándose en los antecedentes técnicos y los criterios establecidos por la autoridad, una empresa minera deba reinyectar la salmuera a una distancia específica y a una profundidad determinada desde su lugar de operación. Si estos criterios indican un lugar fuera de la propiedad minera y en la propiedad de otro titular, podría surgir un conflicto inmediato con la operación de explotación de litio. El propietario de esta otra concesión podría negarse a permitir la reinyección de la salmuera en su propiedad o establecer condiciones que vuelvan poco atractivo o inviable el proyecto.

Además, como se mencionó anteriormente, el salar es un medio acuoso. Esto quiere decir que atraviesa propiedades mineras que pueden ser de distintos propietarios. En esta misma línea, el paralelogramo definido al trazar la extensión territorial de la concesión minera no considera la interacción del medio acuoso donde se encuentra el metal de interés, con otras concesiones mineras⁷. Esto sugiere que el Código de Minería chileno no está pensado para la explotación de minerales en medios acuosos, aún menos cuando involucra dominio diverso de múltiples entidades. Este tipo de situaciones podría eventualmente llevar a problemas entre concesionarios mineros que entren en conflicto.

Estas complejidades podrían ser una de las razones por las cuales el Gobierno del Presidente Gabriel Boric ha optado por mantener el mecanismo de entrega de contratos especiales de operación, en lugar de hacer el litio concesible, consagrado en el Artículo N° 8 del Código de Minería⁸. Eso sí, cabe mencionar que hasta el momento no se ha asignado ningún CEOL que haya hecho efectiva una operación de explotación de litio.

Actualmente, el litio es explotado a través de contratos de arriendo asignados a SQM y Albemarle por parte de la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), en el Salar de Atacama. Estos contratos tienen su origen en el Decreto Ley N°2.886 de 1979, que exceptuó a las concesiones mineras constituidas antes de esa fecha, de la inconcesibilidad del litio. La mayoría de estas concesiones pertenecían a CORFO, y por lo tanto, no se rigen por el Artículo N°8 del Código de Minería.

⁷ Artículo 28.- La extensión territorial de la concesión minera configura un **sólido** cuya cara superior es, en el plano horizontal, un paralelogramo de ángulos rectos, y cuya profundidad es indefinida dentro de los planos verticales que lo limitan. El largo o el ancho del paralelogramo deberá tener orientación U.T.M. Norte sur (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 1983).

⁸ Artículo 8°.- La exploración o la explotación de las sustancias que, conforme al artículo anterior, no son susceptibles de concesión minera, podrán ejecutarse directamente por el Estado o por sus empresas, o por medio de concesiones administrativas o de contratos especiales de operación, con los requisitos y bajo las condiciones que el Presidente de la República fije, para cada caso, por decreto supremo (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 1983).

En esta línea, y como se explicó al comienzo, la inconcesibilidad del litio y su consideración como recurso estratégico se fundamentó en la Ley Orgánica de 1982 por varios motivos. En primer lugar, se argumentó que el litio es un "material de interés nuclear" y está vinculado a la "política atómica del país y al resguardo de la seguridad nacional", una lógica propia de la Guerra Fría, la cual finalizó hace más de 30 años.

En segundo lugar, se mencionó un "mercado no competitivo" debido a la "compleja e incipiente tecnología de producción y utilización del litio". Sin embargo, este argumento ha sido desmentido con el avance y la diversificación de las tecnologías de explotación del litio a lo largo de las décadas, como se ha demostrado en este texto. Existen numerosas tecnologías aplicables a la extracción de litio, ya sea por DLE o por evaporación, y su eficacia ha sido ampliamente validada en Chile, especialmente por SQM y Albemarle.

Finalmente, se argumentó que Chile posee una "reserva determinante de litio" y que, al no ser competitivo el mercado, el país debería disponer de una herramienta para aumentar su poder económico de negociación. Aunque Chile cuenta con las mayores reservas de litio a nivel mundial, como se mencionó anteriormente, un actor importante como Australia superó a Chile en producción de litio desde 2009, y se espera que China lo haga pronto. Además, países como Argentina y regiones como el Congo en África están emergiendo como productores significativos de litio. Esto indica que el mercado del litio es altamente competitivo y Chile no posee el mismo poder de negociación que tenía cuando se promulgó la ley.

Estas consideraciones muestran que considerar al litio como un recurso estratégico es totalmente anacrónico, especialmente dado que durante los últimos 30 años ha sido explotado por empresas privadas. En consecuencia, Chile no tiene control sobre la oferta en el mercado global de litio y, por lo tanto, su poder económico de negociación se ve limitado.

Con esto, la decisión de mantener la inconcesibilidad del litio merece ser cuestionada. El mecanismo basado en la asignación de CEOLs no solucionaría, por ejemplo, el problema de conflictos entre concesiones mineras debido a la naturaleza acuosa del salar. Si a alguien se le asigna un CEOL en una concesión que es parte de un salar, pero no incluye el salar completo, nada evitaría que la extracción de litio en esa concesión genere conflictos con otras propiedades mineras, especialmente al tener que reinyectar la salmuera lejos del punto de extracción para evitar la dilución de la materia prima y el consecuente aumento en los costos operativos.

Además, un productor de litio podría argumentar que otro productor en el mismo salar está perjudicando o contaminando su materia prima. Surge entonces la pregunta de cómo se resolverán estos conflictos al asignar los CEOLs, en un contexto de gobernanza ya bastante complejo. Una forma de evitar esto sería otorgar propiedad sobre todo el salar a un solo operador, lo que requeriría una gran inversión y plantearía otras dudas, como si se priorizaría la compra de propiedad a quien se le asigne el CEOL. Otra opción sería no asignar la explotación de litio en el

mismo salar a más de una entidad, lo cual sería ineficiente y contravendría las metas de producción de litio y el fomento a la producción.

En esta línea, en el contexto del proceso RFI, se realizó una serie de Preguntas y Respuestas para esclarecer las dudas de los interesados (Ministerio de Minería, 2024). En la pregunta N° 208 se lee: “¿se priorizará para otorgamiento de CEOL a cada proyecto por su propio mérito o se priorizará a los titulares de derechos mineros?”. Al respecto, el Ministerio de Minería informó que “los aspectos mencionados en la consulta sí están siendo considerados para la definición de las cláusulas y mecanismos de asignación de los contratos especiales de operación. Dichas definiciones serán oportunamente comunicadas.”

Esto plantea más dudas que certezas, pues no queda claro cómo se están considerando dichos aspectos. En particular, la preocupación es válida, ya que podría surgir un conflicto entre licitantes para un mismo CEOL. Si se prioriza a alguien que ya tiene propiedad minera para la asignación del CEOL, podría ser en detrimento de un oferente que no tenga propiedad minera, pero que sí ofrezca una mejor oferta en términos técnicos, con métodos de extracción más eficientes y avanzados, basándose en los criterios técnicos que, se espera, sean definidos por la autoridad.

Por otra parte, surge la duda de cómo se designarán las capacidades máximas de extracción de salmuera, especialmente en el caso (aún hipotético) de extracción multisalar, donde más de una entidad extrae litio del mismo salar. Las capacidades de extracción asignadas deben coincidir armónicamente con los límites técnicos del salar y con las capacidades de extracción de las empresas. Es necesario establecer un criterio claro para aumentar la extracción autorizada del salar en caso de escalamiento, basándose en los límites del salar y las capacidades de los privados.

Además, en un contexto multisalar, el aumento de la capacidad de extracción autorizada a una empresa podría afectar la producción de otra. Por ejemplo, si se autoriza un aumento de capacidad a una sola empresa, la otra podría quedar en desventaja debido a la dilución de la concentración de litio, lo que podría llevar a que una empresa perjudique e incluso elimine a otra.

Por tanto, el diálogo entre los privados y la autoridad para decidir las capacidades de extracción es primordial. No solo eso, sino que dichas capacidades de extracción están limitadas tanto por el límite técnico del salar, definido con base en criterios medioambientales, como por las capacidades de las empresas. Cada proyecto tiene una concentración mínima que lo hace viable, dependiendo de múltiples factores mencionados en este documento.

Si bien estas interrogantes plantean desafíos significativos tanto técnicos como legislativos, no deberían ser obstáculos insuperables ni razones para mantener un régimen de explotación del litio que dificulte el desarrollo de esta industria. Para abordar este tipo de problemáticas, resulta ilustrativo observar el caso de la explotación de petróleo y gas en Texas, donde múltiples concesionarios extraen de un mismo pozo, utilizando habitualmente *Joint*

Operating Agreements, o contratos de operación conjunta. Estos acuerdos proporcionan una base contractual para la explotación, desarrollo y producción de petróleo y gas entre varios "co-concesionarios" (Brister, 2015). Sería beneficioso para el legislador chileno estudiar este caso debido a las similitudes, donde diversas entidades están involucradas en la extracción de un mismo pozo, o salar en el caso de Chile.

Observando casos similares donde entidades han encontrado soluciones, resulta algo desconcertante que la componente técnica no predomine en el debate público. La discusión en torno a la inconcesibilidad del litio parece estar más influenciada por consideraciones ideológicas, lo cual podría obstaculizar el desarrollo de la industria del litio en Chile. Sin embargo, debería ser la línea técnica la que guíe este debate, especialmente con la llegada de nuevas tecnologías de extracción. En el año 2013, el documento "Mercado Internacional del Litio", de COCHILCO, estableció que "ya no existe un fundamento técnico sólido para mantener el atributo estratégico específico del litio y su condición de no concesible" (COCHILCO, 2013).

Cabe aclarar, eso sí, que ante un escenario donde el litio es concesible, se deben garantizar mecanismos claros para la implementación de las mencionadas nuevas tecnologías de extracción directa de litio. Esto es crucial, ya que el desarrollo y crecimiento de esta industria debe ser sinónimo de sostenibilidad, considerando el papel preponderante del litio en los esfuerzos globales de descarbonización. Luego, el desarrollo sostenible de la industria del litio es mandatorio.

Así, la implementación de estas tecnologías se percibe como un avance positivo en la dirección correcta, un punto en el cual sector público, privado y academia coinciden. Es en este contexto que se deben abordar los desafíos que podrían surgir con la implementación de las tecnologías DLE, facilitando la colaboración entre los sectores público y privado para resolver estos retos.

No cabe duda que la minería de litio en Chile es un ejemplo destacado de los desafíos contemporáneos en la industria minera, donde se entrelazan consideraciones ambientales, sociales y de gobernanza (ESG, por sus siglas en inglés). La adopción de tecnologías DLE presenta desafíos técnicos y regulatorios significativos. Sin embargo, estos desafíos no deben ser motivo para mantener un sistema de explotación que sea complicado y poco eficiente. Es esencial reconocer la necesidad de abordar y resolver estos desafíos técnicos en caso de que se decida hacer concesible el litio en Chile.

En resumen, para avanzar hacia un sistema más eficiente y sostenible de explotación de litio, es crucial alinear las capacidades del sector privado con las expectativas del Estado, asegurando que cualquier cambio hacia la concesibilidad del litio esté respaldado por un marco claro y robusto de regulación y tecnología adecuada.

Referencias

- Bank of America. (2024). *The copper supply crisis is here*. Bank of America Securities.
- Barksdale, A. C., Yoon, J., Kwon, H. J., & Han, J. (2022). Refinement of brine for lithium extraction using ion concentration polarization. *Separation and Purification Technology*.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (1983). *Ley N° 18.248, Código de Minería, Artículo 28*.
- Brister, A. (2015). *Oil and Gas Law Digest*. Obtenido de Introduction to Joint Operating Agreements: <https://oilandgaslawdigest.com/primers-insights/introduction-joint-operating-agreements/>
- Burba, D. (24 de Mayo de 2023). *Chile switches to Direct Lithium Extraction*. Obtenido de <https://www.innovationnewsnetwork.com/chile-switches-direct-lithium-extraction/33261/>
- Carbotecnia. (7 de Febrero de 2023). ¿Cuál es la diferencia entre absorción y adsorción?
- COCHILCO. (2013). *Mercado Internacional del Litio - Diciembre 2013*. Ministerio de Minería.
- COCHILCO. (2023). *El mercado de litio: Desarrollo reciente y proyecciones al 2035*. Comisión Chilena del Cobre. Recuperado el Junio de 2024, de [https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Mercado%20del%20Litio%20-%20Proyecciones%20al%202035%20-%20actualizacion%20mayo%202023%2006.06.2023%20con%20RPI%20%20rev%20CRL%20\(002\).pdf](https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Mercado%20del%20Litio%20-%20Proyecciones%20al%202035%20-%20actualizacion%20mayo%202023%2006.06.2023%20con%20RPI%20%20rev%20CRL%20(002).pdf)
- Euro-Funding. (2024). ¿Qué es la escala de. Obtenido de [https://euro-funding.com/es/blog/que-es-la-escala-de-madurez-tecnologica-trl/#:~:text=La%20escala%20de%20Madurez%20Tecnol%C3%B3gica%20o%20Technology%20Readiness%20Level%20\(TRL,ser%20desplegada%20en%20el%20espacio](https://euro-funding.com/es/blog/que-es-la-escala-de-madurez-tecnologica-trl/#:~:text=La%20escala%20de%20Madurez%20Tecnol%C3%B3gica%20o%20Technology%20Readiness%20Level%20(TRL,ser%20desplegada%20en%20el%20espacio)
- Farahbakhsh, J., Arshadi, F., Mofidi, Z., Mohseni-Dargah, M., Kök, C., Assefi, M., . . . Razmjou, A. (2023). Direct lithium extraction: A new paradigm for lithium production and resource utilization. *Desalination*, 575. doi:10.1016/j.desal.2023.117249
- Gobierno de Chile. (2023). *Estrategia Nacional del Litio*.
- Gobierno de Chile. (7 de Junio de 2024). Obtenido de Chile tendrá Instituto Nacional de Litio y Salares: <https://www.gob.cl/noticias/instituto-nacional-litio-salares-creacion-financiamiento-como-funcionara-sedes/>
- Goldman Sachs. (2023). *Direct Lithium Extraction: A potential game changing technology*. Obtenido de <https://www.goldmansachs.com/intelligence/pages/gs-research/direct-lithium-extraction/report.pdf>
- Houston, J., Butcher, A., Ehren, P., Evans, K., & Godfrey, L. (2011). The Evaluation of Brine Prospects and the Requirement for Modifications to Filing Standards. *Economic Geology*, 1225–1239.
- Integral Consulting Inc. (2023). *Resource and Reserve Report - Pre-Feasibility Study - Salar del Hombre Muerto*.
- Ministerio de Minería. (1981). *Informe Técnico sobre la Ley Orgánica Constitucional sobre Concesiones Mineras*.
- Ministerio de Minería. (2022). *Política Nacional Minera 2050*. Biblioteca Nacional del Congreso.

- Ministerio de Minería. (2024). *Preguntas y respuestas respecto del proceso para presentar manifestación de interés o RFI, la resolución exenta N° 907/2024, del Ministerio de Minería.*
- Qian, F., Guo, M., Qian, Z., Li, Q., Wu, Z., & Liu, Z. (2019). Highly Lithium Adsorption Capacities of H1.6Mn1.6O4 Ion-Sieve by Ordered Array Structure. *ChemistrySelect*.
- Saeed Butt, F., Lewis, A., Chen, T., Mazlan, N., Wei, X., Hayer, J., . . . Huang, Y. (29 de Marzo de 2022). Lithium Harvesting from the Most Abundant Primary and Secondary Sources: A Comparative Study on Conventional and Membrane Technologies.
doi:<https://doi.org/10.3390/membranes12040373>
- SQM. (2024). *SQM En Línea*. Obtenido de Salmuera: <https://www.sqmsenlinea.com/salmuera>
- Stringfellow, W., & Dobson, P. (s.f.). Technology for Lithium Extraction in the Context of Hybrid Geothermal Power. Obtenido de <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2021/Stringfellow.pdf>
- Sun, Y., Wang, Q., Wang, Y., Yun, R., & Xiang, X. (1 de Febrero de 2021). Recent advances in magnesium/lithium separation and lithium extraction technologies from salt lake brine. *256. Separation and Purification Technology*.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117807>
- Sun, Y., Wang, Q., Wnag, Y., Yun, R., & Xiang, X. (1 de Febrero de 2021). Recent advances in magnesium/lithium separation and lithium extraction technologies from salt lake brine. *Separation and Purification Technology, 256*.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117807>
- U.S. Geological Survey. (2024). *Mineral commodity summaries 2024*.
- Vera, M. L., Torres, W. R., Galli, C. I., Chagnes, A., & Flexer, V. (2023). Environmental impact of direct lithium extraction from brines. *Nature Reviews Earth & Environment*, 149–165.
- Vulcan Energy. (2023). Zero Carbon Lithium Phase One DFS presentation 2023.
- Zhang, Y., Wang, L., Sun, W., Hu, Y., & Tang, H. (25 de Enero de 2020). Membrane technologies for Li⁺/Mg²⁺ separation from salt-lake brines and seawater: A comprehensive review. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.09.002>
- Zhang, Y., Wei, S., Rui, X., Wang, L., & Honghu, T. (20 de Febrero de 2021). Lithium extraction from water lithium resources through green electrochemical-battery approaches: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 285.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124905>