



POLICY PAPER

Recomendaciones

para abordar las oportunidades y
desafíos en industrias estratégicas en
Chile: La industria del litio

JORGE VALVERDE-CARBONELL

ÍNDICE

I. Prefacio	4
II. Introducción	5
III. Tecnologías de producción, cadenas globales de valor y competitividad	7
1. Tecnologías de producción	8
2. Cadenas globales de valor de la industria del litio y su competitividad	15
IV. Mercado mundial del Litio	19
1. Evolución del mercado mundial	19
2. Carga tributaria por concepto de royalty	24
3. Proyección de balance de mercado (2024 – 2035)	25
V. Industria chilena del litio	28
1. Diagnóstico	28
1.1 Ventajas comparativas	28
1.2 Restricciones institucionales	29
2. Tributación, distribución de rentas y finanzas públicas	31
2.1 Régimen tributario	32
2.2 Rentas y competitividad	33
2.3 Impacto sobre las finanzas públicas	35
3. Mix de producto y valor agregado	36
4. Política industrial de facto	39
5. Estrategia Nacional del Litio y proyección de oferta 2024 – 2035	40
VI. Conclusiones	44
Referencias	47

Este documento tiene como objetivo aportar a la elaboración de recomendaciones de política pública para la explotación sostenible de litio en Chile. Fue elaborado por Jorge Valverde, con la colaboración de Marcela Angulo y Annie Dufey, directoras; y Rodrigo Guerrero, investigador de Espacio Público. A su vez, contó con el apoyo de Open Society Foundations.

I. Prefacio

La triple crisis climática -causada por el calentamiento global, la pérdida de biodiversidad y de contaminación- es el desafío contemporáneo más importante que hoy enfrenta la humanidad. Sin embargo, su escala mundial dificulta la coordinación diplomática para impulsar un plan de acción para enfrentarla. Uno de los consensos más relevantes que se han logrado es la transición desde la energía impulsada a partir del petróleo hacia la electricidad. Este cambio se ha manifestado principalmente en la industria de la movilidad, empujando con ella la demanda de los polos industriales por minerales considerados críticos.

Desde hace cerca de una década, el litio se ha posicionado como un mineral relevante para las cadenas de valor global, exacerbando el interés estratégico que tiene para nuestra economía nacional. Además, el mundo enfrenta un escenario geopolítico complejo, con disputas bélicas y comerciales que apuntan a la reconfiguración de las dinámicas de producción e intercambio de recursos. Esto propone oportunidades pero también presiones sobre nuestro país, en tanto bloques como China, Estados Unidos y la Unión Europea buscan afianzar su posición respecto al dominio de recursos críticos.

La agregación de estos factores plantea una coyuntura comercial incierta pero auspiciosa, que ha buscado ser respondida por parte del Estado de Chile mediante el impulso de su Estrategia Nacional del Litio, que fue presentada a comienzos del año 2023. Así, el análisis de gobernanza de nuestro país arroja una institucionalidad *sui generis*, que ha establecido -a partir de la experiencia arraigada en torno al Salar de Atacama- una política industrial *de facto*, constituida a partir de contratos entre Corfo y empresas privadas. Sin embargo, hoy en día apreciamos la entrada de empresas estatales a la industria, bajo el formato de alianzas público-privadas, y de licitaciones privadas que en conjunto buscarán ampliar cuantitativa y territorialmente la producción de litio en Chile. Ello propone no sólo desafíos técnicos, en tanto cada salar ofrece condiciones y comportamientos únicos, sino que también ambientales y sociales, especialmente en cuanto respecta al diálogo con comunidades indígenas.

El presente documento ofrece una descripción y análisis productivo sobre el estadio actual de la industria del litio en Chile, proyectándose a mediano plazo e incorporando las variables de contexto recién descritas. De este modo, busca abrir la discusión al identificar desafíos técnicos e institucionales y ofrece un esfuerzo en favor de impulsar políticas industriales eficientes pero también responsables, al incorporar consideraciones de comercio internacional y captación fiscal, sin dejar de lado las dimensiones social y ambiental.

II. Introducción

La transición energética, impulsada por el cambio climático y los efectos ambientales, sociales y económicos aparejados a este, puede ser entendida como el cambio de paradigma tecnológico hacia una matriz productiva baja en emisiones de carbono, desplazando así al modelo actual basado en tecnologías intensivas en el uso de combustibles fósiles. Esto quiere decir que las distintas tecnologías agrupadas dentro del concepto de transición energética, tales como energías renovables, la eficiencia energética, la electromovilidad, combustibles sintéticos y las tecnologías de almacenamiento, entre otras, se están moviendo desde un paradigma a otro acorde a sus propias estructuras de progreso tecnológico o trayectorias tecnológicas (Dosi, 1982). Al respecto, cabe señalar que al ser la transición energética un fenómeno todavía incipiente las trayectorias tecnológicas son todavía bastante inciertas y, por lo tanto, los escenarios futuros de descarbonización muy sensibles a qué tipo de tecnología termine predominando en cada dimensión de la transición energética y a la velocidad con la cual ocurra la transición (World Bank Group, 2020).

El litio se ha posicionado como uno de los minerales más críticos en la transición energética por su rol protagónico en la electromovilidad, la cual es una dimensión clave para la mitigación del cambio climático (International Energy Agency, 2021). Específicamente, el litio constituye la materia prima central de las baterías de ion-litio, tecnología que ha tomado la delantera en el segmento de los automóviles eléctricos, pero que también se utiliza en una amplia gama de dispositivos electrónicos. En concreto, la alta criticidad del litio se explica por la estrechez de mercado que se prevé en el mediano y largo plazo producto de las presiones de demanda y la incapacidad de la oferta de responder de manera competitiva a esta. Es decir, la criticidad se evalúa eliminando los efectos cíclicos de corto plazo del balance de mercado esperado (Valverde, Menendez, & Pietrobelli, 2023).

Por el lado de la demanda, las baterías de ion-litio han evolucionado rápidamente, mejorando su rendimiento y seguridad, aumentando su durabilidad y reduciendo su costo, lo cual ha repercutido en que los automóviles eléctricos hayan ganado participación de mercado respecto a los automóviles convencionales durante los últimos años. Se espera que esta tendencia se acentúe durante la próxima década, presionando a los eslabones aguas abajo, como son el litio, los compuestos de litio y cátodos de litio, para que aumenten su producción (Comisión Chilena del Cobre, 2023).

Por el lado de la oferta, si bien el litio no es un mineral per se escaso en la tierra, su criticidad se da por la incapacidad del mundo de proveer de este mineral a las cadenas de valor¹ que lo emplean en los tiempos requeridos y de manera competitiva. Lo primero hace referencia a que el aumento de la producción estimada crecería a una tasa menor a lo que lo haría la demanda, generando así un déficit estructural. Parte de este problema se explica porque los dos países con mayor cantidad de reservas y recursos minerales de litio, como son Chile y Bolivia respectivamente, poseen restricciones regulatorias para su libre explotación (Cepal,

¹ Principalmente baterías de ion-litio que concentran más del 70% del uso de litio.

2022). Lo segundo se refiere a que la organización industrial del mercado de litio se encuentra bastante concentrada, lo cual implica que ciertos países y *holdings* puedan ejercer poder de mercado en ciertos eslabones de la cadena y, por consiguiente, influir en el precio de mercado, reduciendo la cantidad suministrada respecto a un escenario de mayor competencia. Respecto a esto último, Australia representa sobre el 50% de la producción global de litio, mientras que China representa sobre el 60% de la producción global de litio refinado.

En este contexto, los países que requieren litio para abastecer a su cadenas de valor buscan asegurar su suministro a través de acuerdos, contratos y adquisiciones (inversión extranjera directa). Por su parte, los países productores de litio que no poseen integración vertical aguas abajo, como es el caso de Chile, buscan maximizar los beneficios económicos a partir de la producción y exportación del mineral. Al respecto, emergen tres dimensiones principales que se tensionan entre sí: maximización del valor agregado, distribución de las rentas y protección de los ecosistemas donde se produce el litio. El desafío radica en cómo conjugarlas de manera óptima, entendiendo que no se pueden maximizar las tres a la vez.

En este sentido, las oportunidades y desafíos que enfrenta Chile en la industria del litio se desprenden de las tensiones entre las tres dimensiones anteriormente señaladas, las cuales se moldean a partir de características propias de la industria nacional. Algunas de estas características son: Chile es el segundo mayor productor y el país con mayores reservas de litio a nivel mundial, el litio se extrae desde salmueras depositadas en salares que constituyen ecosistemas frágiles, la industria local posee una base tecnológica que le permite producir competitivamente diversos productos de litio, y Chile tiene una institucionalidad bastante *sui generis* que regula la industria de manera administrativa, supeditada a diversos marcos legislativos.

El presente documento tiene por objetivo discutir todos los elementos anteriormente señalados con el fin de poder establecer desafíos y oportunidades para la industria chilena del litio. Con este propósito, la Sección III introduce las tecnologías de producción, cadenas globales de valor y las diferencias de competitividad en costos de la industria del litio. La Sección IV da cuenta de la estructura del mercado mundial y proyecta el balance de mercado al año 2035. Luego, la Sección V hace un diagnóstico de la industria del litio chilena; la sección V.2 aborda los gravámenes específicos que recaen sobre la industria del litio y su impacto sobre las finanzas públicas de Chile, mientras que la sección V.5 presenta las principales modificaciones que incorpora la Estrategia Nacional del Litio recientemente puesta en marcha, proyectando los efectos sobre la producción de Chile al año 2035. Finalmente, la Sección VI concluye con los principales desafíos y oportunidades de la industria del litio en Chile.

III. Tecnologías de producción, cadenas globales de valor y competitividad

Esta sección introduce las tecnologías de producción del litio, las cadenas globales de valor que se han estructurado a partir de este mineral y las diferencias en competitividad de costos que emanan de éstas. Estos elementos constituyen la base de las oportunidades y desafíos que los países productores de litio enfrentan.

Existen cuatro principales productos de litio; carbonato, hidróxido, sulfato y cloruro. Los primeros dos pueden considerarse productos finales de la industria de procesamiento de litio, mientras que los dos últimos corresponden a productos intermedios de esta industria que se emplean para la producción de los dos primeros.

El análisis se desarrolla a partir de la producción de carbonato e hidróxido de litio, ya que estos dos compuestos químicos representan casi la totalidad de las transacciones de productos de litio² y son las piezas centrales para la producción de los cátodos de litio empleados por las baterías recargables de ion-litio. Es decir, las tecnologías de producción y las cadenas globales de valor que se presentan tienen a estos compuestos como bienes finales. Cabe precisar que solo una fracción del carbonato e hidróxido de litio comercializado corresponde a grado batería, ya que estos químicos también se producen a menor nivel de pureza para productos tales como grasas y aceites.

De lo anterior, se desprende que tanto el carbonato como el hidróxido de litio presentan distintas variedades y, por ende, distintas tecnologías de producción y cadenas de valor. La principal diferencia entre las distintas variedades de estos compuestos está dada por el grado de pureza (concentración de litio), el cual se logra a través de reiterados procesos de refinamiento que emplean distintos reactivos químicos y procesos térmicos. A su vez, tanto el carbonato como el hidróxido de litio pueden ser refinados hasta alcanzar el grado batería, sin embargo, sus propiedades químicas difieren y con eso el tipo de baterías donde pueden ser empleados. El carbonato de litio se utiliza principalmente en baterías de litio-níquel-manganeso-cobalto (NMC) y batería de ferro fosfato (LFP). Mientras que el hidróxido de litio se emplea en baterías de litio-níquel-cobalto-óxidos de aluminio (NCA) y en una sub-categoría específica de las NMC con alto contenido de níquel (por ejemplo, NMC 811).

Sin embargo, existe una diferenciación tecnológica mucho más importante aguas arriba, la cual está dada por la fuente primaria de litio, ya que éste puede ser extraído desde rocas (pegmatitas) o salmueras. Mediante estas dos líneas de producción se puede obtener cloruro de litio o sulfato de litio que posteriormente se utiliza para la producción de carbonato e hidróxido. Sin embargo, los procesos de producción para obtener estos compuestos de litio poseen una naturaleza diametralmente distinta.

² Esto excluye el espodumeno.

La producción de litio a partir de pegmatitas (roca) puede considerarse una tecnología de producción clásica del sector minero, ya que contempla una serie de procesos usuales en la minería, tales como: chancado, molienda, separación, flotación, calcinación y lixiviación, entre otros. Mientras que la producción de litio a partir de salmueras sigue un proceso menos “minero” y más químico, ya que la fase de extracción se lleva a cabo mediante el bombeo de salmuera que es depositada en estanques para su purificación y, luego, la concentración se realiza mediante la evaporación solar y reactivos químicos.

Las diferencias tecnológicas en la extracción y procesamiento de litio tienen un efecto directo en la conformación de las cadenas globales de valor y en las variables económicas asociadas a su producción, tales como: CAPEX³, OPEX⁴, tiempos de producción y externalidades de la producción. Como resultado, la competitividad de los países en la producción de litio depende estructuralmente de la fuente de producción, aunque como veremos más adelante también existe bastante heterogeneidad entre operaciones del mismo tipo, lo que se explica por diferencias en las concentraciones de litio de los yacimientos, ubicación geográfica y eficiencias productivas.

Dentro de las principales diferencias tecnológicas dadas por la fuente primaria de litio, ampliamente abordada en la literatura, está la inviabilidad tecnológica de producir hidróxido de litio directamente desde salmueras, con lo cual la cadena de valor del hidróxido de litio contempla como producto intermedio el carbonato de litio. Sin embargo, innovaciones recientes realizadas por SQM en el Salar de Atacama han permitido producir sulfato de litio a partir de salmueras con altas concentraciones de azufre que habían sido consideradas residuos sin valor económico. De esta forma, al ser el sulfato de litio un precursor del hidróxido de litio, se abre una línea de producción de hidróxido de litio desde litio contenido en salares sin utilizar carbonato de litio como bien intermedio. Y, a su vez, esta línea de producción ha dado origen a una nueva cadena global de valor para la producción de hidróxido de litio, ya que el sulfato de litio producido en Chile es exportado a China, país donde se refina hasta obtener el hidróxido de litio.

1. TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN

Las tecnologías de producción se definen a partir de la fuente primaria del recurso minero y del producto de litio a producir. Considerando que existen dos fuentes principales de litio, rocas y salmueras, y dos productos principales de litio que se comercializan, carbonato e hidróxido de litio, existen cuatro líneas o tecnologías de producción.

1.1 Producción de litio desde roca

Si bien, es posible encontrar litio en diferentes tipos de pegmatitas y arcillas, el espodumeno es el mineral que presenta la mayor concentración de litio (1.5% de óxido de litio en promedio) y representa la principal fuente de producción de litio a partir de mineral de roca. Su extracción contempla chancado, molienda y separación/flotación, entre otros, de lo cual se obtiene concentrado de espodumeno con un contenido aproximado de 6% de óxido de litio.

³ Costo de capital.

⁴ Costo operacional.

Una vez obtenido el concentrado de espodumeno la cadena de producción puede continuar a través de la digestión ácida de litio, de donde se obtiene el carbonato de litio, o a través de la digestión alcalina de litio, de donde se obtiene el hidróxido de litio (Tran & Luong, 2015). La figura 1 ilustra estos procesos.

Dado el bajo contenido de litio que posee el concentrado de espodumeno, su comercialización implica un costo económico y ambiental relevante (emisiones de GEI), ya que un 94% del contenido transportado corresponde a material de descarte o bajo valor económico. De hecho, 7 a 8 toneladas de concentrado de espodumeno equivalen a una tonelada de carbonato o hidróxido de litio (Gielen & Lyons, 2022).

Figura 1. Cadena de producción de litio desde espodumeno



Fuente: Elaboración propia.

i. Carbonato de litio

El carbonato de litio es el compuesto químico final en base a litio de mayor producción a nivel mundial, representando el 63% del mercado de litio. Su dominio en el mercado se debe en gran parte a su versatilidad, ya que dependiendo de su nivel de pureza es empleado para usos tradicionales, como son la industria del vidrio, grasas y lubricantes, y no tradicionales como son las baterías recargables para vehículos, almacenamiento de energía y artículos electrónicos (Comisión Chilena del Cobre, 2022).

Existen distintas tecnologías para obtener carbonato de litio desde el espodumeno, sin embargo, la tecnología dominante es la digestión ácida, la cual consiste en la calcinación del concentrado de litio (-espodumeno) a temperaturas entre 1000 y 1100°C, de donde se obtiene el -espodumeno que es mezclado con ácido sulfúrico para obtener sulfato de litio. Luego, el sulfato de litio es lixiviado y tras múltiples etapas de purificación y concentración, donde se emplean distintos reactivos químicos, tales como: hidróxido de sodio, carbonato de sodio y ácido clorhídrico, se obtiene el carbonato de litio. Adicionalmente, como resultado de este proceso, se desprenden distintos gases, tales como: dióxido de azufre, óxido de azufre y ácido sulfúrico gaseoso. Por lo tanto, estos procesos conforman una tecnología de producción intensiva en el consumo de energía, materias primas y sub-productos de bajo valor económico (Gao, et al., 2023); (Alhadad, et al., 2023).

Los procesos químicos y físicos anteriormente detallados son relevantes desde la perspectiva económica debido a que describen factores claves en la competitividad de la producción de carbonato de litio y en su cadena de valor. Por ejemplo, la intensidad de los procesos térmicos descritos implica un gran consumo de energía, con lo cual el precio y disponibilidad energética asoman como un determinante clave de la competitividad en la producción de carbonato de litio. Del mismo modo, la intensidad y variedad de reactivos químicos empleados dan cuenta de la importancia de ciertos bienes intermedios en la cadena de valor del carbonato de litio. Esto a su vez influye en el valor agregado que produce el carbonato, ya que, a mayor intensidad de bienes intermedios, *ceteris paribus*, el valor agregado de la producción disminuye. Finalmente, la intensidad de subproductos de bajo valor comercial y gases, da cuenta de costos directos e indirectos que merman la estructura de costos del producto.

En consecuencia, la literatura señala que el carbonato de litio extraído desde roca es menos competitivo dado su mayor consumo energético, sus mayores costos de producción y su mayor impacto ambiental a través de gases globales y locales (Gao, et al., 2023); (Valverde-Carbonell & Micco, 2024).

ii. Hidróxido de litio

El hidróxido de litio es un compuesto químico que ha ganado rápidamente participación de mercado en la industria del litio, llegando a representar el 34% del mercado. Esto como consecuencia de su uso en algunos tipos específicos de baterías recargables para vehículos, tales como las NCA, las cuales han mostrado tener un mejor rendimiento que las baterías que emplean carbonato de litio (Liu & Azimi, 2022).

El hidróxido de litio puede ser producido mediante distintas tecnologías, las cuales incluyen métodos electroquímicos, pirometalúrgicos, intercambio de iones e hidrometalúrgicos, siendo este último el más empleado. La producción de hidróxido de litio, a diferencia del carbonato de litio, es un proceso alcalino donde el -espodumeno (concentrado de litio) es calcinado con piedra caliza a 1050°C en una relación 1:4. De este proceso se obtiene aluminato de litio soluble, el cual es hidrolizado para recuperar el litio en forma de hidróxido de litio. La tasa de recuperación máxima del proceso es de 64% (Braga, et al., 2019).

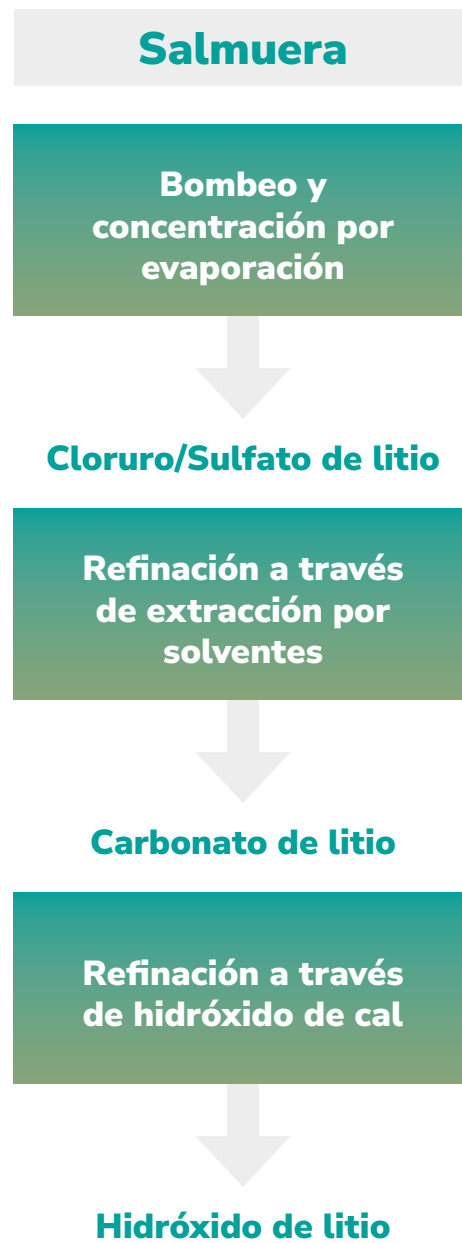
Por lo tanto, se desprende que los principales costos operacionales de la producción de hidróxido de litio están dados por el consumo energético del proceso térmico y el consumo de piedra caliza. En comparación con el costo operacional de producir carbonato de litio, el costo del hidróxido de litio es levemente superior, lo que difiere considerablemente con el costo de producir hidróxido de litio desde salmueras.

1.2 Producción de litio desde salmueras

La producción de litio desde salmueras comienza con el bombeo de la salmuera desde el salar, la cual se precipita a través de cañerías hacia piscinas de gran tamaño y baja profundidad para su concentración mediante evaporación solar. En esta etapa también se emplean reactivos químicos para separar y purificar el litio de otros minerales, tales como el potasio o el magnesio. Como resultado de este proceso, el cual toma más de un año, se obtiene cloruro o sulfato de litio, según el tipo de salar, con concentraciones que pueden variar según el número de etapas de depuración. Por ejemplo, si el cloruro de litio es ocupado como materia prima para la producción de carbonato de litio, se depura hasta alcanzar una concentración en torno a 6% de litio. Por su parte, si el bien final a ser comercializado es el cloruro o sulfato de litio, la depuración puede ir desde el 30% a sobre el 90%. Cabe destacar que la concentración primaria de litio es un proceso químico que presenta bastante heterogeneidad en función de la composición de la salmuera extraída desde el salar, ya que estas presentan distintas concentraciones de litio y grados de impureza, y de la tasa de evaporación que depende del clima y altitud principalmente (Tran & Luong, 2015); (Jiménez & Sáez, 2022).

La cadena principal de producción de litio desde salmueras continúa con la producción de carbonato de litio, el cual se puede vender como producto final o utilizar como bien intermedio para la producción de hidróxido de litio. Sin embargo, una innovación reciente introducida por SQM ha generado una cadena secundaria que produce sulfato de litio desde salmueras altas en azufre, el cual posteriormente se utiliza como bien intermedio para la producción de hidróxido de litio. La figura 2 ilustra la cadena principal de producción de litio desde salmueras.

Figura 2. Cadena de producción de litio desde salmuera



Fuente: Elaboración propia.

i. Carbonato de litio

El carbonato de litio se produce mediante la purificación y refinación de la salmuera concentrada de litio, lo cual ocurre en una planta química. Específicamente, el tratamiento consiste en la extracción por solventes, donde se filtra el litio de otros minerales como el boro y el magnesio. Para este fin se utilizan reactivos como ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y soda cáustica, además de cal en la etapa final. Como resultado de este proceso se obtiene un concentrado de litio de mayor pureza que es enviado a la carbonización. El proceso de carbonización ocurre a temperaturas entre 60°-70°C y emplea carbonato de sodio en razón cercana a 2:1 como principal reactivo, de lo cual se obtiene el carbonato de litio (Tran & Luong, 2015); (Jiménez & Sáez, 2022).

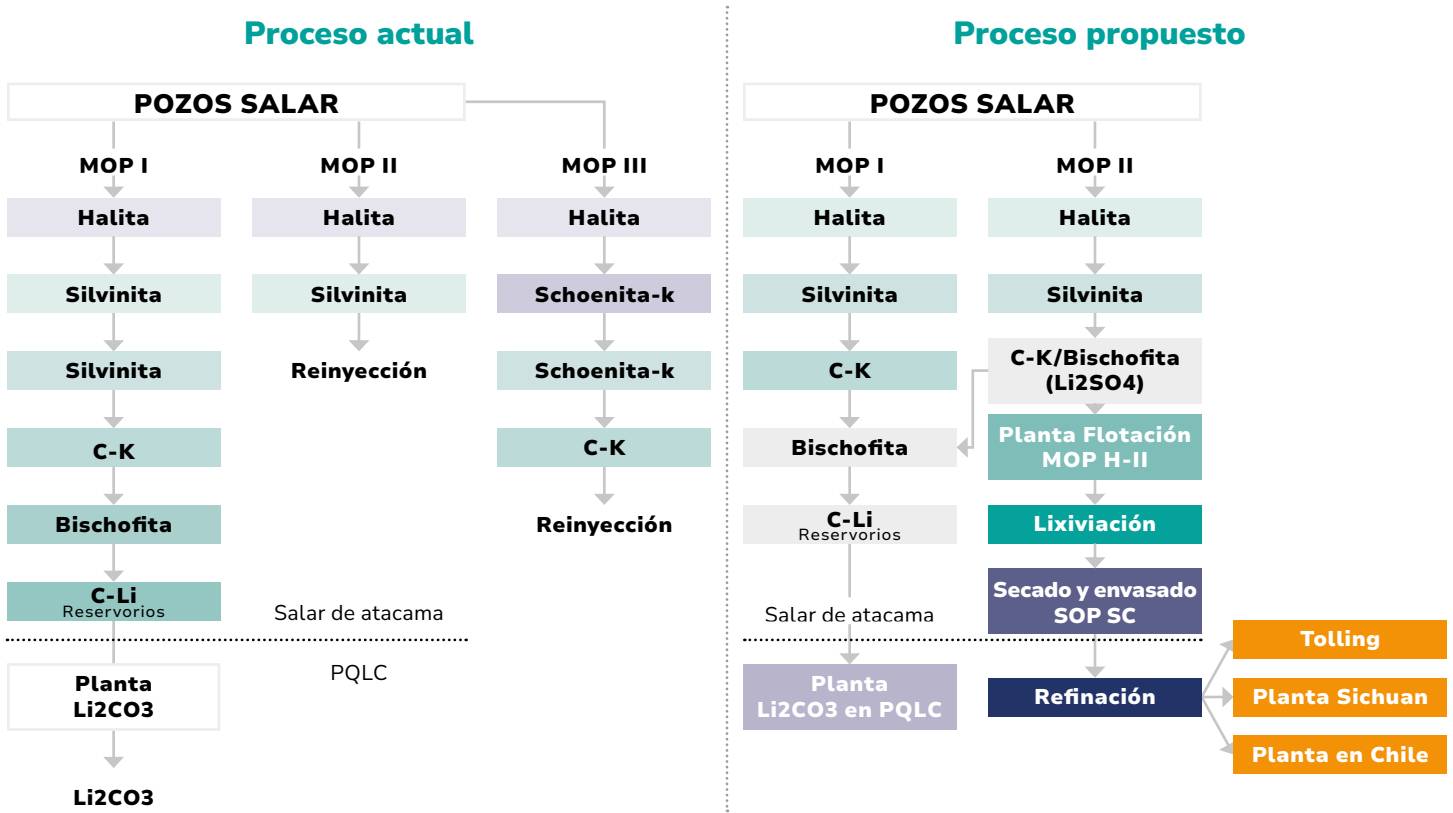
Por lo tanto, se desprende que los principales costos de este proceso están dados por el consumo de reactivos para la depuración del concentrado de litio y de cal para su carbonización. Sumado al consumo energético del proceso térmico, el cual es considerablemente menos intensivo en energía que el proceso a partir de espodumeno y acidificación mediante ácido sulfúrico.

ii. Hidróxido de litio

El hidróxido de litio se produce, principalmente, a partir de la refinación del carbonato de litio mediante la utilización de hidróxido de calcio como reactante a temperaturas entre 60°-80°C. La razón entre estos componentes es cercana a 1:1 y la tasa de recuperación en torno al 85%. El proceso final contempla la cristalización del hidróxido mediante evaporación a temperaturas en torno a 135°C, de donde finalmente se obtiene el hidróxido de litio. El residuo es principalmente carbonato de calcio desde donde se puede recuperar carbonato de litio (Jiménez & Sáez, 2022). Esta línea de producción contempla todos los costos de la producción de carbonato de litio, más los costos asociados al consumo de cal y a la energía empleada en los procesos térmicos.

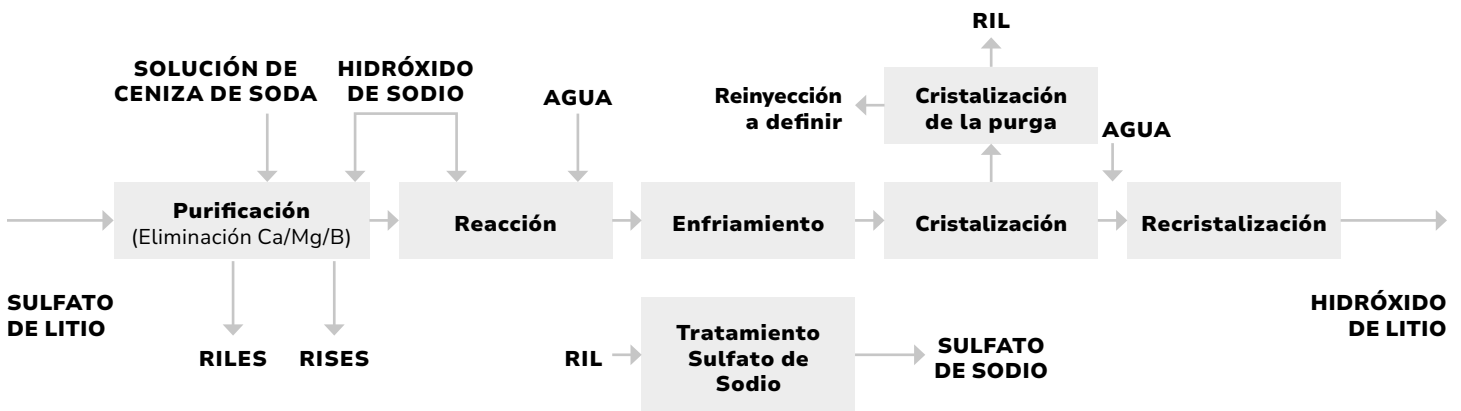
Sin embargo, SQM ha introducido una nueva cadena de producción de hidróxido de litio desde salmueras, la cual prescinde del carbonato de litio como bien intermedio. Esta nueva tecnología y cadena de valor nace a partir de una innovación que le permitió procesar salmueras no productivas (altas en sulfato) que anteriormente se reinyectaban al salar y, de esta forma, obtener directamente sulfato de litio (precursor de la producción de hidróxido de litio). Esta nueva línea de producción se debe a un cambio tecnológico que aumenta la productividad y explota los principios de economía circular, ya que emplea insumos que se descartaban (reinyección de salmuera o acopio) y capacidad instalada ociosa (pozas no operativas). Además, tiene ventajas ambientales significativas respecto a la producción de hidróxido de litio predominante desde roca, dado que tanto la huella de carbono como la huella hídrica son menores (Kelly, et al., 2021). Cuando se compara con la línea de producción de hidróxido de litio desde salmueras, también se aprecia una mayor eficiencia ambiental respecto a las emisiones de CO₂, ya que el proceso de transformación de carbonato a hidróxido de litio es intensivo en energía. La figura 3 da cuenta de la innovación productiva para la obtención de sulfato de litio, mientras que la figura 4 muestra el diagrama de los procesos para obtener hidróxido de litio a partir del sulfato de litio generado.

Figura 3. Comparación líneas de producción de carbonato versus sulfato de litio



Fuente: SQM – Vinculación con Universidades y Producción de Sulfato de Litio (2023).

Figura 4. Diagrama del proceso de producción de hidróxido de litio desde sulfato de litio



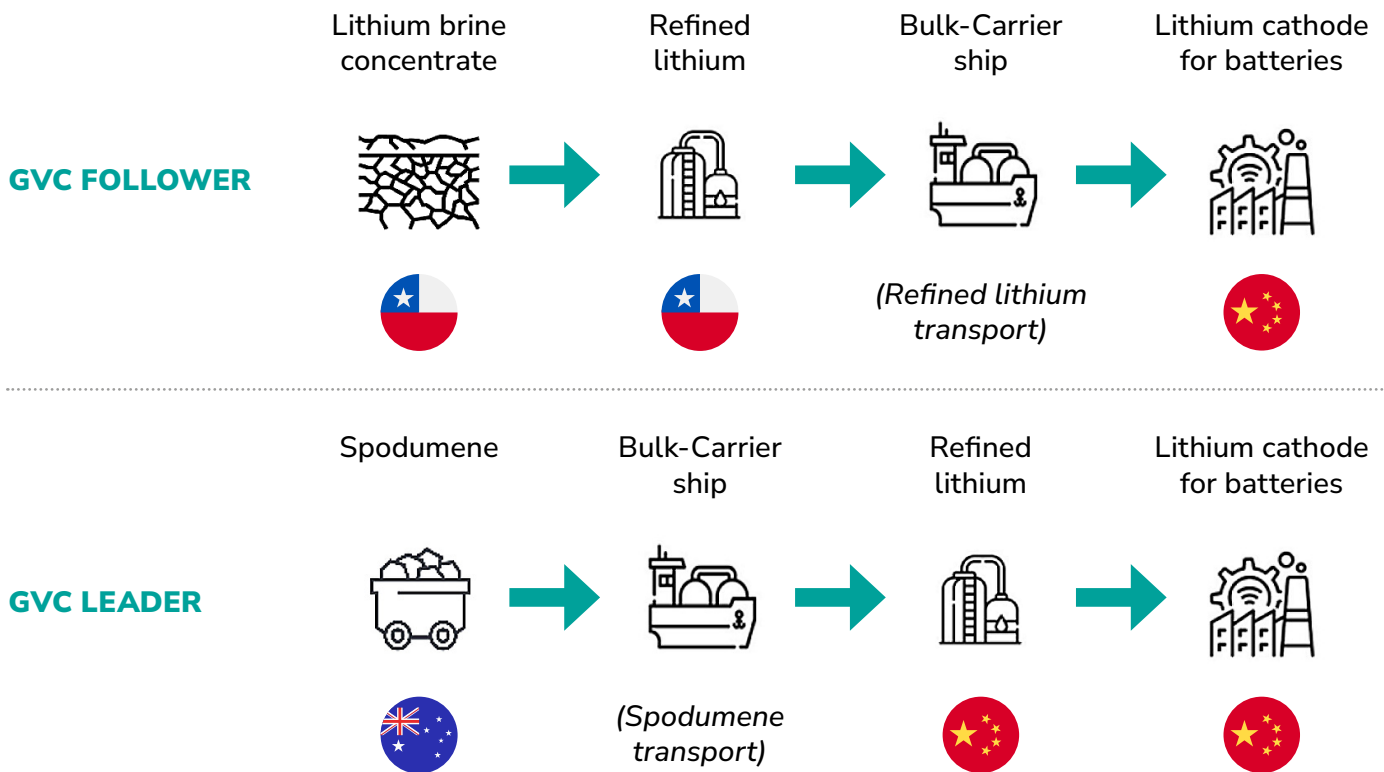
Fuente: SQM – Vinculación con Universidades y Producción de Sulfato de Litio (2023).

2. CADENAS GLOBALES DE VALOR DE LA INDUSTRIA DEL LITIO Y SU COMPETITIVIDAD

De la subsección anterior se desprende que tanto el carbonato como el hidróxido de litio pueden obtenerse a partir de distintas fuentes primarias de litio y, por ende, a través de distintas tecnologías de producción. También se concluye que la competitividad difiere entre tecnologías ya que estas emplean distintos factores productivos y bienes intermedios. Por consiguiente, las cadenas de valor también varían según la fuente primaria de litio y la tecnología empleada.

Si bien existen varias cadenas de valor para la producción de carbonato e hidróxido de litio (incluso a partir de una misma fuente de litio primario), hay dos cadenas de valor que concentran la mayor parte de la producción mundial de litio. La cadena líder, ya que concentra la mayor parte del mercado, conformada por espodumeno australiano que se refina en China hasta obtener carbonato o hidróxido de litio, para finalmente ser utilizado en China para la producción de cátodos de litio. Y la cadena seguidora, compuesta por salmuera de litio concentrada que se extrae desde el Salar de Atacama en Chile, que luego es refinada en Chile hasta obtener carbonato o hidróxido de litio, compuestos que finalmente son exportados a China para la producción de cátodos de litio. La figura 5 ilustra ambas cadenas de valor.

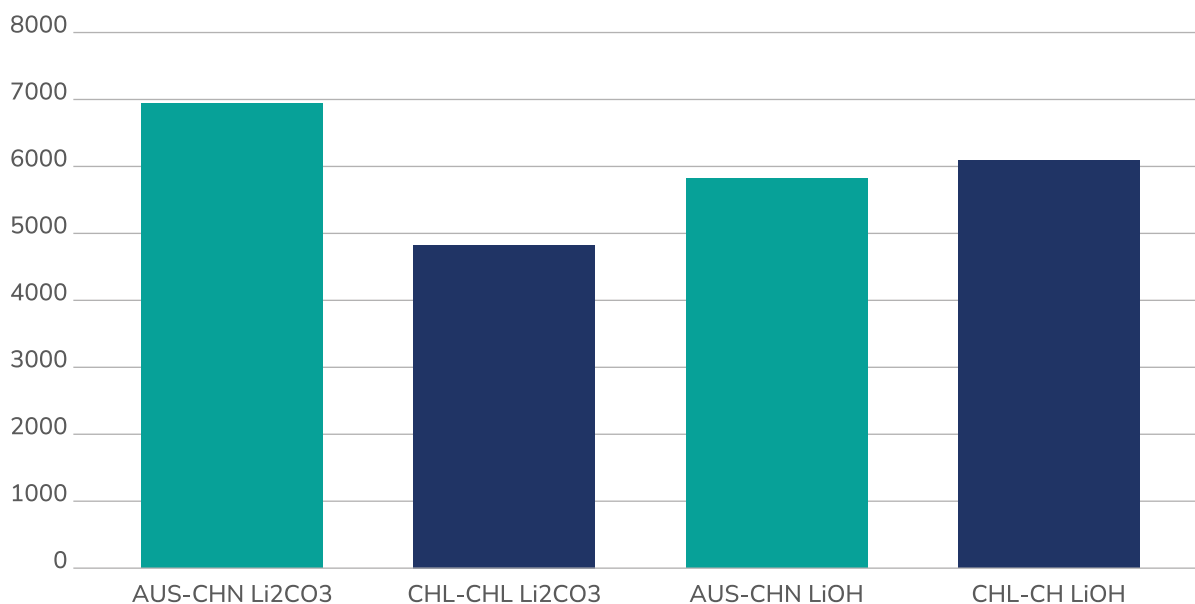
Figura 5. Cadenas de valor de la producción cátodos de litio (líder versus seguidor)



Aunque tanto la cadena líder como la seguidora son capaces de producir carbonato e hidróxido de litio, el costo de producción (privado y social) difiere entre ambas. Esto se aprecia a través del costo operacional (costo privado) y huellas de carbono e hídrica (parte del costo social no incluido en el vector de precios), dimensiones que varían significativamente según la cadena global de valor.

Por el lado del costo privado, se estima que la cadena seguidora produce carbonato de litio a un precio que es 40% más barato que la cadena líder, mientras que el costo de producción de hidróxido de litio es cerca de un 5% inferior en la cadena líder (Valverde-Carbonell & Micco, 2024). La figura 6 ilustra los costos operacionales de ambas cadenas para ambos compuestos de litio, donde AUS-CHN corresponde a la cadena líder y CHL-CHL a la seguidora.

Figura 6. Costos operacionales del carbonato e hidróxido de litio, cadena líder (verde) versus seguidora (azul)

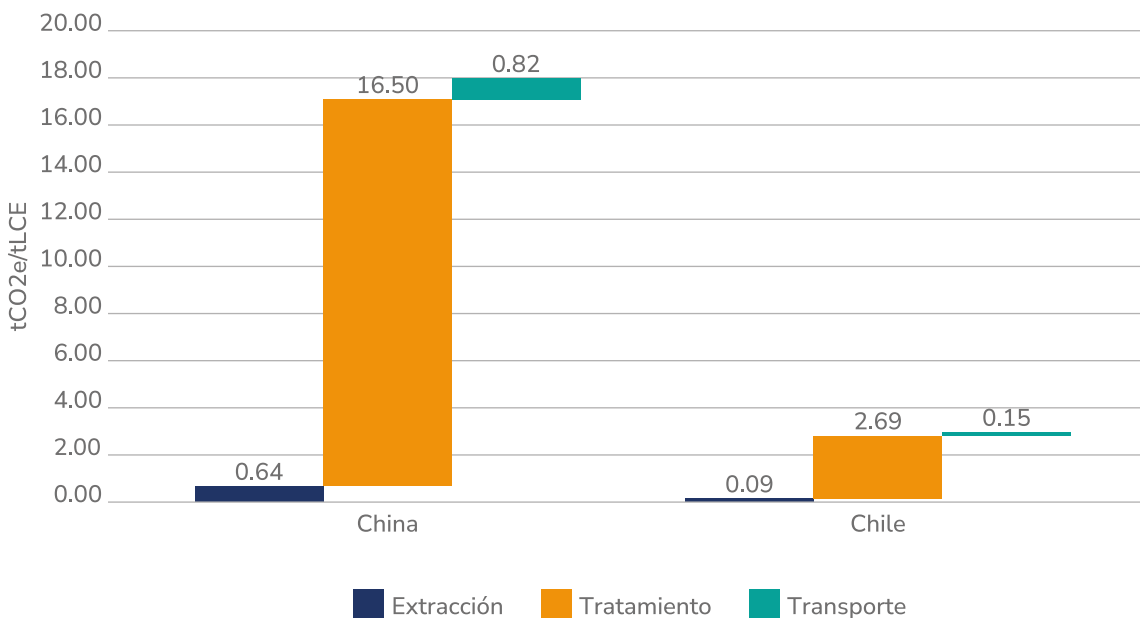


Fuente: Valverde-Carbonell & Micco, 2024. Li₂CO₃ = carbonato de litio, y LiOH = hidróxido de litio.

Por el lado del costo social, se estiman las emisiones de CO₂ generadas por la cadena líder y seguidora. La cadena líder genera un costo social considerablemente más alto que la cadena seguidora, ya que una tonelada de carbonato de litio proveniente de espodumeno emite varias veces más que una proveniente de salmuera. Por ejemplo, International Energy Agency, (2021) estima el diferencial entre 3 y 4 veces, Kelly, et al., (2021) entre 2 y 7, y Gao, et al., (2023) entre 9 y 60. La figura 7 ilustra la descomposición de las emisiones de CO₂ por etapa de la cadena de valor del carbonato de litio para la cadena líder (China) y seguidora (Chile),

donde destaca que la etapa de procesamiento (barra amarilla) concentra la mayor cantidad de emisiones y, por ende, gran parte del diferencial de emisiones entre ambas cadenas. Sin embargo, se aprecia que en todas las etapas la intensidad de emisiones es mayor en la cadena líder, de lo cual se desprende que para la configuración de las cadenas de valor el costo social (emisiones de CO2) no es una variable relevante. Por ejemplo, el transporte de la cadena líder (barra verde) emite 7 veces más CO2 que la cadena seguidora, lo cual se explica porque en la cadena líder se transporta espodumeno que posee una concentración de 6% de óxido de litio, con lo cual 94% del transporte corresponde a material de descarte sin valor económico (Valverde-Carbonell & Micco, 2024).

Figura 7. Descomposición de las emisiones de CO2 por etapa de la cadena de valor del carbonato de litio, líder (China) versus seguidor (Chile)



Fuente: Valverde-Carbonell & Micco, 2024.

Adicionalmente a las emisiones de CO2, un costo social relevante está dado por la huella hídrica, toda vez que parte importante del litio proviene de zonas con escasez hídrica donde la sobreexplotación de los acuíferos compromete la sostenibilidad de los ecosistemas y genera externalidades negativas sobre otras actividades y/o la población. Esta dimensión es particularmente sensible en el caso de la producción desde salares, ya que el uso de este recurso tiene repercusiones directas en el balance hídrico del salar, las cuencas aledañas, la biodiversidad y las comunidades locales. De hecho, la regulación de esta externalidad negativa es lo que determina en gran parte la restricción de capacidad productiva de litio desde salares (Espacio Público, 2024).

Ahora bien, cuando se compara la huella hídrica entre la producción de litio de roca vis á vis salares, se observa que ésta es menor en el caso de la producción desde salares. Esto se explica en gran medida por el mayor consumo de agua que conlleva el procesamiento del litio a través de la cadena de roca. La tabla 1 ilustra la estimación de consumo de agua en la producción de carbonato de litio para las cadenas líder y seguidora según etapa de producción. Destaca que la cadena seguidora es más eficiente en términos hídricos, empleando entre un 77% y un 49% menos de agua en promedio que la cadena líder.

Tabla 1. Huella hídrica cadena líder versus seguidora

	Extracción	Procesamiento	Total
Cadena líder (AUS – CHN)	3.4 m3/ton LI	77 m3/tonne LI	80.4 m3/tonne LI
Cadena seguidora (CHL – CHL)	2.95 – 7.3 m3/tonne LI	15.5 – 32.8 m3/tonne LI	18.4 – 41.1 m3/tonne LI

Fuente: Elaboración propia en base a estimaciones.

Por lo tanto, se desprende que la cadena seguidora (CHL – CHL) es más competitiva integralmente que la cadena líder, ya que posee menores costos operacionales, menor huella de carbono y menor huella hídrica. Sin embargo, es importante destacar que:

- La cadena líder ha ganado significativamente participación de mercado durante los últimos años. Esto se explica por la restricción de capacidad productiva de la cadena seguidora, donde la cantidad de litio producida desde el Salar de Atacama está restringida por el marco institucional que define al litio como no concesible y establece cuotas de producción a las empresas que explotan los yacimientos del Estado, lo cual se explica por razones medioambientales y “estratégicas” que datan desde la Guerra Fría. Adicionalmente, esta cadena requiere mayores tiempos de producción. La sección IV profundiza en estos puntos.
- La mayor competitividad de la cadena seguidora se debe principalmente a la tecnología de producción basada en la evaporación utilizando energía solar. Esto reduce significativamente la energía y agua utilizada en la etapa de procesamiento, disminuyendo los costos de producción. Por lo tanto, la transición hacia tecnologías de extracción directa para producir litio desde salares implica perder esta ventaja comparativa, manteniendo solo la ventaja dada por la alta concentración de litio presente en varios salares del Triángulo de Litio.
- Si bien la huella hídrica es considerablemente menor en la cadena seguidora, las externalidades negativas que se desprenden del consumo de agua en salares también son considerablemente mayores. Esto porque tienen impacto directo en la sostenibilidad del salar, las cuencas aledañas, la biodiversidad y las comunidades locales. Ergo, el costo social del uso del agua es mayor en la extracción desde salares.

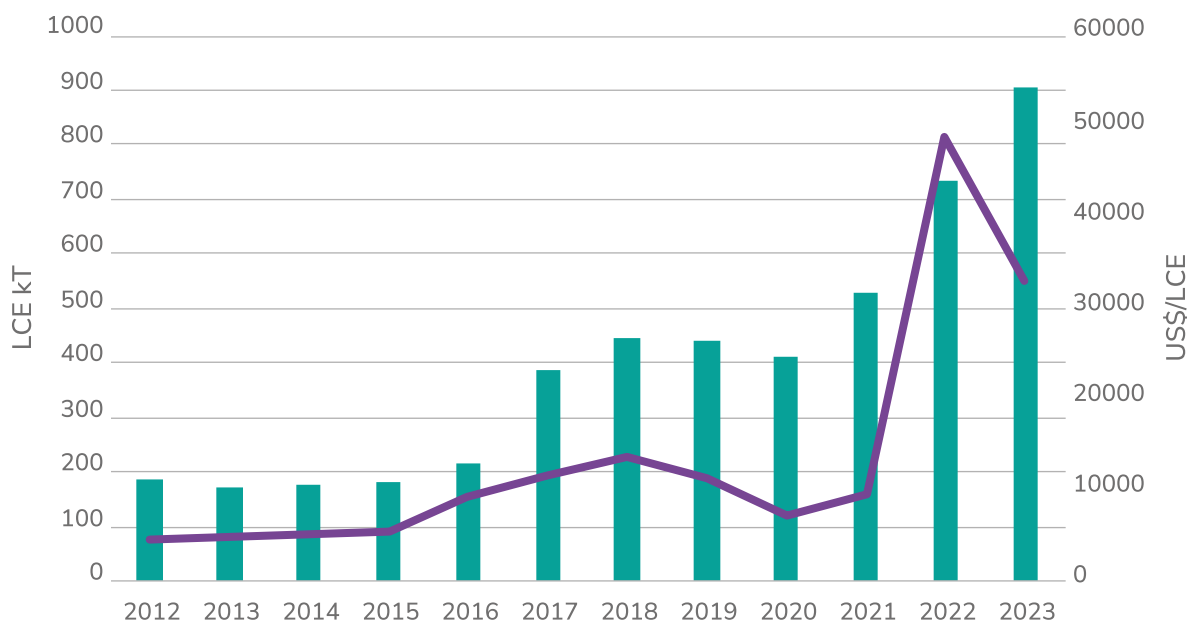
IV. Mercado mundial del litio

La primera parte de esta sección muestra la evolución del mercado mundial durante la última década enfocándose en el cambio estructural que experimentó la industria en términos de volúmenes, organización industrial y composición del mix de productos. Mientras que la segunda parte presenta un análisis que compara la carga tributaria por concepto de royalty de operaciones ubicadas en distintos países. Finalmente, la tercera parte de esta sección presenta una proyección del balance de mercado para el periodo 2024 – 2035.

1. EVOLUCIÓN DEL MERCADO MUNDIAL

La industria mundial del litio experimentó un quiebre estructural durante la segunda mitad de la década anterior como consecuencia de la creciente demanda (y expectativas de mayor demanda) por vehículos eléctricos, los cuales emplean baterías recargables de ion-litio que consumen gran cantidad de este mineral. Entre los años 2012 y 2023, el mercado del litio se expandió 4.5 veces y el precio llegó a aumentar 10 veces respecto al año 2012 (ver Figura 8). Asimismo, las baterías eléctricas pasaron de representar un 23% en 2011, a un 71% en 2020 (Cepal, 2022). Las proyecciones de distintos organismos especializados muestran que la entrada de vehículos eléctricos seguirá en aumento de la mano del cambio tecnológico, que abarata su costo de producción, y de los incentivos fiscales de los gobiernos, que promueven su demanda. Por consiguiente, se espera que la demanda por litio también crezca en el tiempo (World Bank Group, 2020); (International Energy Agency, 2021); (Comisión Chilena del Cobre, 2023).

Figura 8. Evolución de la producción y precio del litio (2012 – 2023)

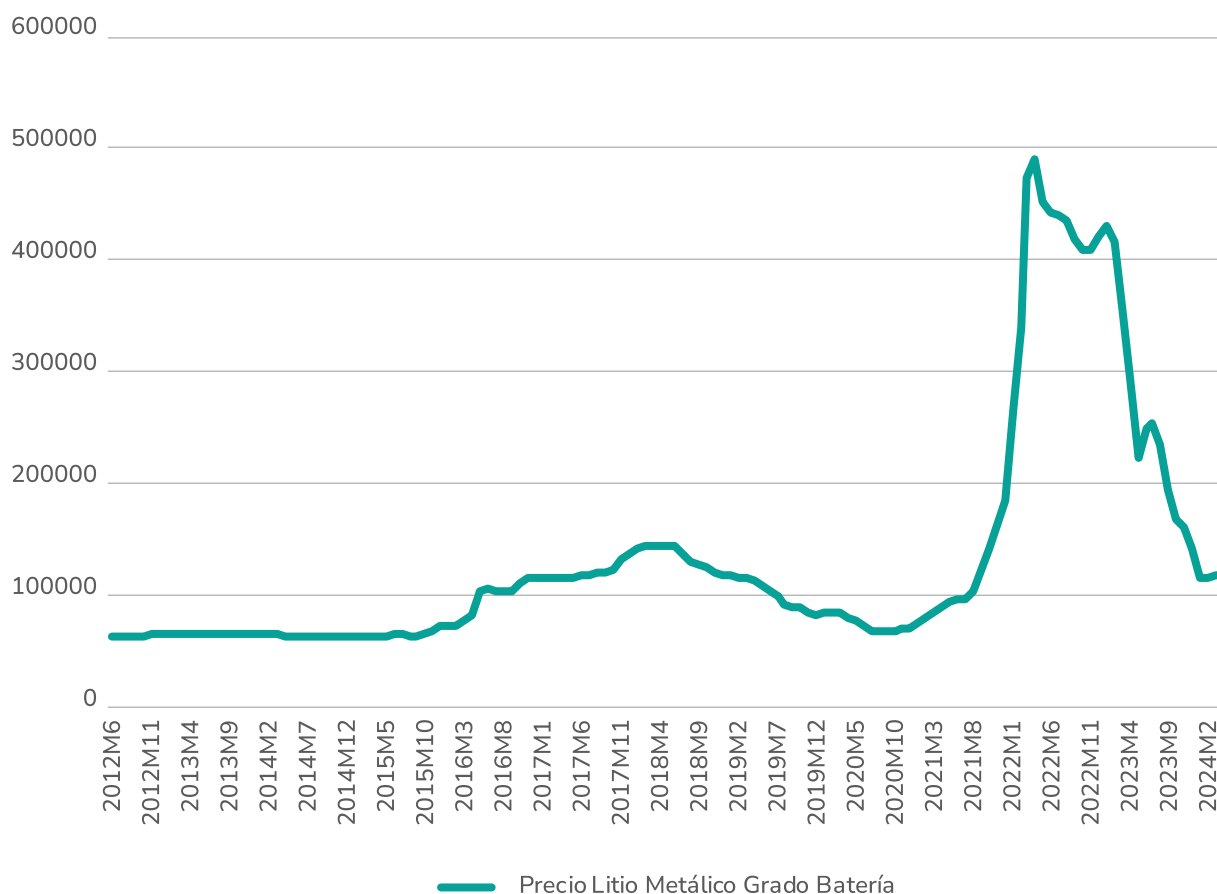


Fuente: Elaboración propia en base a datos de S&P Metals.

Sin embargo, durante el último año el mercado del litio ha estado marcado por una tendencia abajista, con un retroceso del precio en cerca de un 80%. Esto se explica por una mayor disponibilidad de materia prima, mayor capacidad ociosa de procesamiento en China y la ralentización de la tasa de crecimiento del consumo de autos eléctricos. Como consecuencia de lo anterior, varios proyectos se han puesto en *stand by* y algunas minas han declarado la paralización de sus operaciones. El principal efecto real de la caída en el precio del litio es la menor tasa de crecimiento futura de la oferta, ya que al reducirse la rentabilidad muchos proyectos se paralizan. Esto afecta principalmente a proyectos de costos altos, los cuales se concentran en yacimientos de roca. Por lo tanto, la volatilidad del precio es que juega en contra de la transición energética, ya que retrasa la entrada de producción de oferta.

La figura 9 muestra la evolución del precio del litio entre el año 2012 y 2024, apreciándose claramente el quiebre estructural del mercado y el auge y caída reciente.

Figura 9. Precio litio metálico grado batería

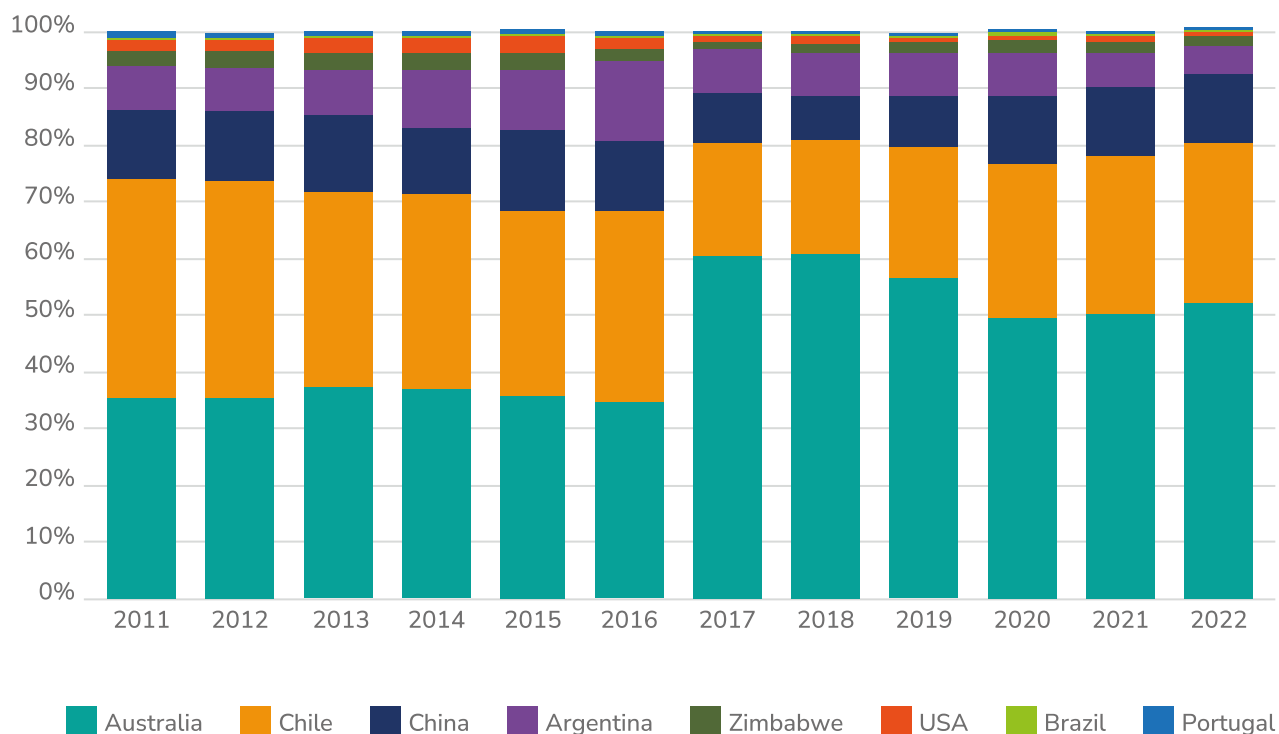


Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del FMI.

⁵ Precio litio metálico grado batería.

Adicionalmente al cambio de escala de la industria mundial, se suman tres cambios de organización industrial sumamente relevantes referidos a: la composición de las fuentes primarias de suministro, el mix de productos de la industria y el poder de mercado de China. En primer lugar, el cambio estructural de los volúmenes transados en el mercado se explica principalmente por el explosivo aumento de la producción de Australia, tal como se evidencia en la figura 10. Aquí se observa que Chile perdió el liderato ante Australia el año 2013 y, a partir de entonces, Australia aumentó significativamente su producción y participación de mercado, llegando a alcanzar el 60%, para luego estabilizarse en torno a un 50% desde el año 2020. En la actualidad (2022), Australia junto a Chile representan el 80% de la extracción mundial de litio.

Figura 10. Participación en la industria extractiva del litio por país

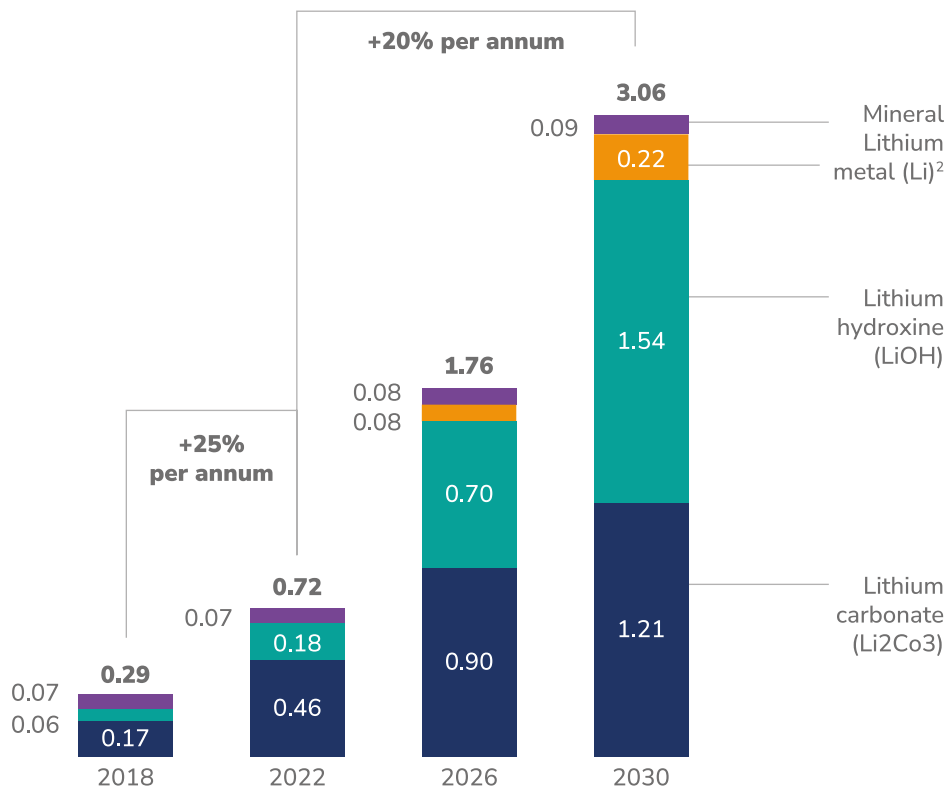


Fuente: Elaboración propia en base a datos de S&P Metals.

En segundo lugar, se observa un cambio significativo en el mix de productos fabricados por la industria, lo cual ha sido impulsado por la evolución de los requerimientos de la cadena de valor aguas abajo (material catódico y baterías recargables de ion-litio). Esto redistribuye las ventajas comparativas de la industria a favor de los yacimientos de espodumeno (Comisión Chilena del Cobre, 2023). No obstante, la alta intensidad de emisiones de CO₂ que genera la producción de litio desde roca y las (potenciales) regulaciones ambientales – comerciales al respecto (Kelly, et al., 2021), sostienen la competitividad del litio de salmuera en el largo plazo y generan incentivos a la comercialización de productos intermedios como son el cloruro y sulfato de litio.

Por ejemplo, hasta hace pocos años atrás el mercado de litio se concentraba casi exclusivamente en la producción de carbonato de litio, no obstante; durante los últimos años el hidróxido de litio ha ganado progresivamente participación de mercado, hasta alcanzar cerca del 30% del mercado, y se espera que durante la próxima década alcance al carbonato (ver Figura 11). Esta tendencia se explica por la batalla tecnológica librada entre las baterías LFP (compuestas por litio, hierro y fosfato) y NCM (compuestas por níquel, cobalto y manganeso), donde la competencia se ha basado en las características operacionales y costo de producción. Adicionalmente, el cambio tecnológico ha sido apalancado también por restricciones de mercado (voluntarias y no voluntarias) que han significado un incentivo para la sustitución tecnológica, tales como la prohibición de Indonesia de exportar níquel no procesado o las empresas que han decidido no comprar cobalto de Congo D.R por las condiciones laborales. Ejemplo de lo anterior es la sustitución de baterías NCM por LFP, o bien, cambio en la composición de las baterías NMC, pasando de una estructura 60-20-20 a una 80-10-10 de níquel, cobalto y manganeso, respectivamente.

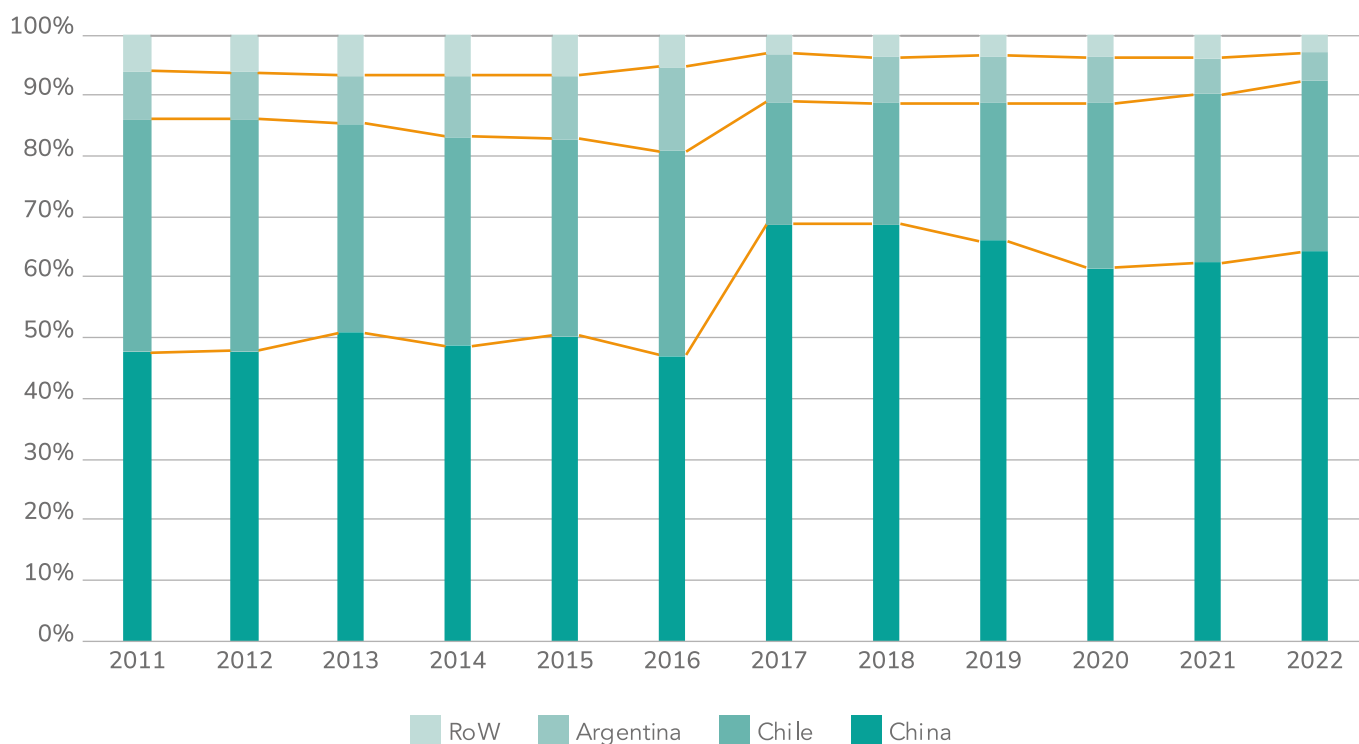
Figura 11. Participación y proyección de la demanda por tipo de compuesto de litio



Fuente: McKinsey and Company, 2023.

En tercer lugar, el poder de mercado de China se observa a partir de su creciente participación de mercado impulsada por la especialización vertical de la cadena de suministros entre China y Australia, tal como se aprecia en la figura 12. Previo al año 2017, que es cuando se produce el quiebre estructural, China ya poseía cerca del 50% del mercado de refinación. Durante los años 2017 y 2018, China alcanzó casi el 70% del mercado, porcentaje que en el transcurso de los últimos años se ha estabilizado en torno al 60%. Cabe destacar que en el caso de la línea de hidróxidos de litio este porcentaje se eleva hasta el 80% (Valverde-Carbonell & Micco, 2024).

Figura 12. Participación en la industria de procesamiento del litio por país



Fuente: Elaboración propia en base a datos de S&P Metals.

Los hechos estilizados presentados anteriormente dan cuenta de una industria muy dinámica que está siendo guiada por un mercado específico, como es el de las baterías recargables de ion-litio. Dado que estas baterías son una tecnología emergente, aún existe una carrera tecnológica en curso con resultados inciertos, lo cual puede modificar de manera importante tanto el mix de productos fabricados como la organización industrial de las cadenas de valor. Sin embargo, a la luz de la evolución reciente de la industria ya emergen ciertos patrones que son importantes a considerar, dentro de los cuales destacan:

- La mayor velocidad que muestra el litio de roca para reaccionar a los cambios de mercado. Lo cual se da, como veremos en la próxima sección, debido a los menores tiempos de producción y el menor CAPEX requerido en estos proyectos.

- Por contrapartida, se desprende que en promedio los proyectos de pegmatitas necesitan un precio-incentivo mayor que los proyectos de salmueras. Esto se deduce de dos hechos centrales: el aumento de producción de Australia (pegmatitas) solo a partir de un cambio de nivel en el precio del litio y de la capacidad instalada que ya poseía Australia previo al cambio estructural, pero que no estaba siendo explotada.
- La relación entre el crecimiento de la oferta de espodumeno y la concentración del mercado de procesamiento de litio, lo cual refleja la mayor competitividad de China en la refinación de litio de roca y releva la importancia de la producción de litio a partir de salmueras para contrarrestar el dominio chino aguas abajo.

2. CARGA TRIBUTARIA POR CONCEPTO DE ROYALTY

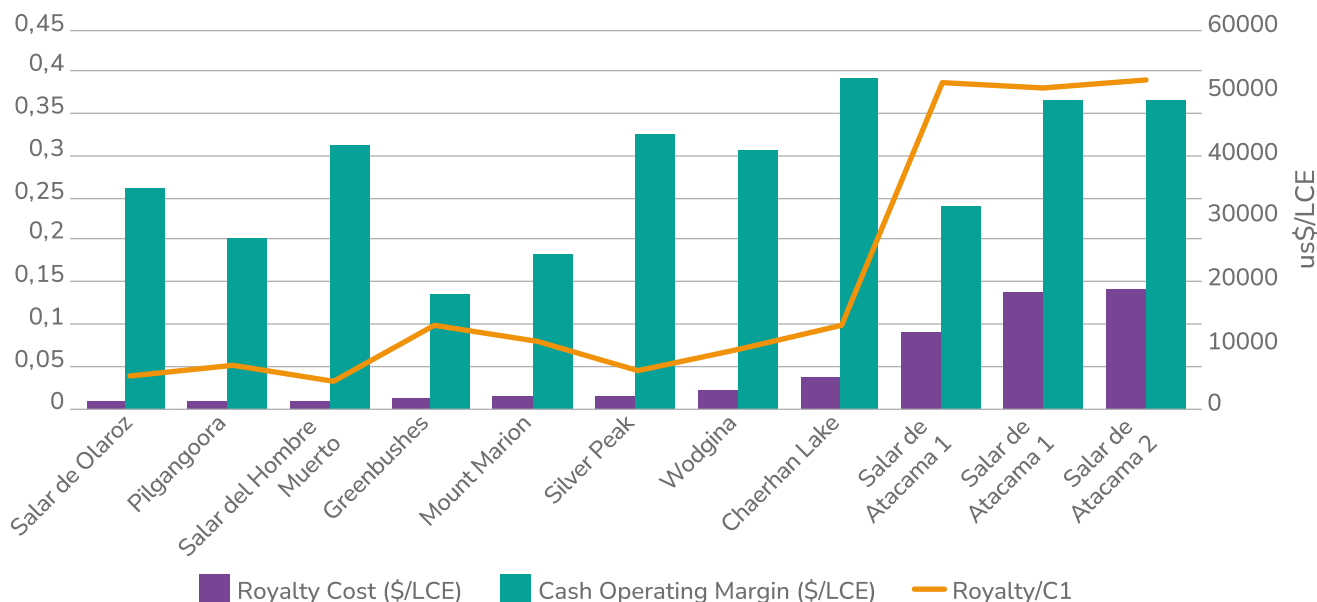
Un aspecto sensible en las industrias de minerales es la distribución de rentas entre el explotador y el Estado, toda vez que el recurso mineral se considera por lo general un bien público⁶. Así, el Estado busca maximizar la captura de rentas Ricardianas provenientes del mineral vía impuestos específicos/royalties, mientras que las empresas buscan maximizar sus rentas mediante la minimización de costos. Dado que una mayor carga tributaria aumenta los costos de producción, existe un evidente *trade-off* entre la función objetivo del Estado y las empresas. Por lo tanto, la carga tributaria se asocia generalmente a un indicador (inverso) de competitividad, ya que afecta directamente los costos de producción y la rentabilidad de los proyectos.

A continuación se compara la carga tributaria de las principales operaciones de litio a nivel mundial durante el año 2022. La muestra contempla operaciones de roca y salmuera que representan el 82.4% de la producción total de la industria del litio. La figura 13 muestra el margen operacional directo y el royalty expresado en dólares por tonelada de LME (barras), y el ratio entre ambas variables expresado en porcentaje (línea). Destaca que las dos operaciones de carbonato de litio del Salar de Atacama (Salar de Atacama 1 y 2) están en el top 3 de las operaciones con mayor margen operacional directo, solo superadas por la operación de carbonato de litio Chaerthan Lake de China. A su vez, las dos operaciones chilenas de carbonato de litio son las que poseen mayor carga de royalty por tonelada de LME, seguidas de cerca por la operación de hidróxido de litio de SQM. Por consiguiente, las cargas por concepto de royalty sobre el margen operacional directo (línea) de las operaciones chilenas son las más altas de la muestra, las cuales rondan el 40%, mientras que el promedio del resto de la muestra solo alcanza el 15%.

El elevado ratio de las operaciones chilenas se explica porque el canon de arrendamiento aumenta progresivamente acorde al precio del litio, siendo el año de análisis uno con precios históricos del litio. De esta forma, el Estado captura la mayor parte de las rentas producto del shock de precio. Esto no tiene un efecto directo en la oferta de litio chileno, ya que dado los bajos costos operacionales, el margen sigue siendo lo suficientemente alto para incentivar el aumento de producción. Luego, cuando el precio desciende el royalty también lo hace, de esta forma no ejerce presión excesiva en periodos abajistas.

⁶ Hay excepciones de países que, sobre ciertos minerales, asocian el derecho de propiedad de la tierra al derecho de propiedad sobre los minerales. Esto ocurre principalmente en Estados Unidos, Canadá y Australia respecto a derechos de propiedad históricos.

Figura 13. Margen operacional directo y royalty pagado por operación



Fuente: Elaboración propia en base a S&P Market Intelligence.

Una comparación más exhaustiva de la competitividad tributaria entre distritos mineros de litio requiere incorporar el resto de los tributos a los que están afectas las operaciones, tales como impuesto a las empresa, remesas, etc. Así como también las exenciones que puedan aplicar en cada caso. Por lo tanto, esta es una línea de investigación en la cual sería interesante profundizar.

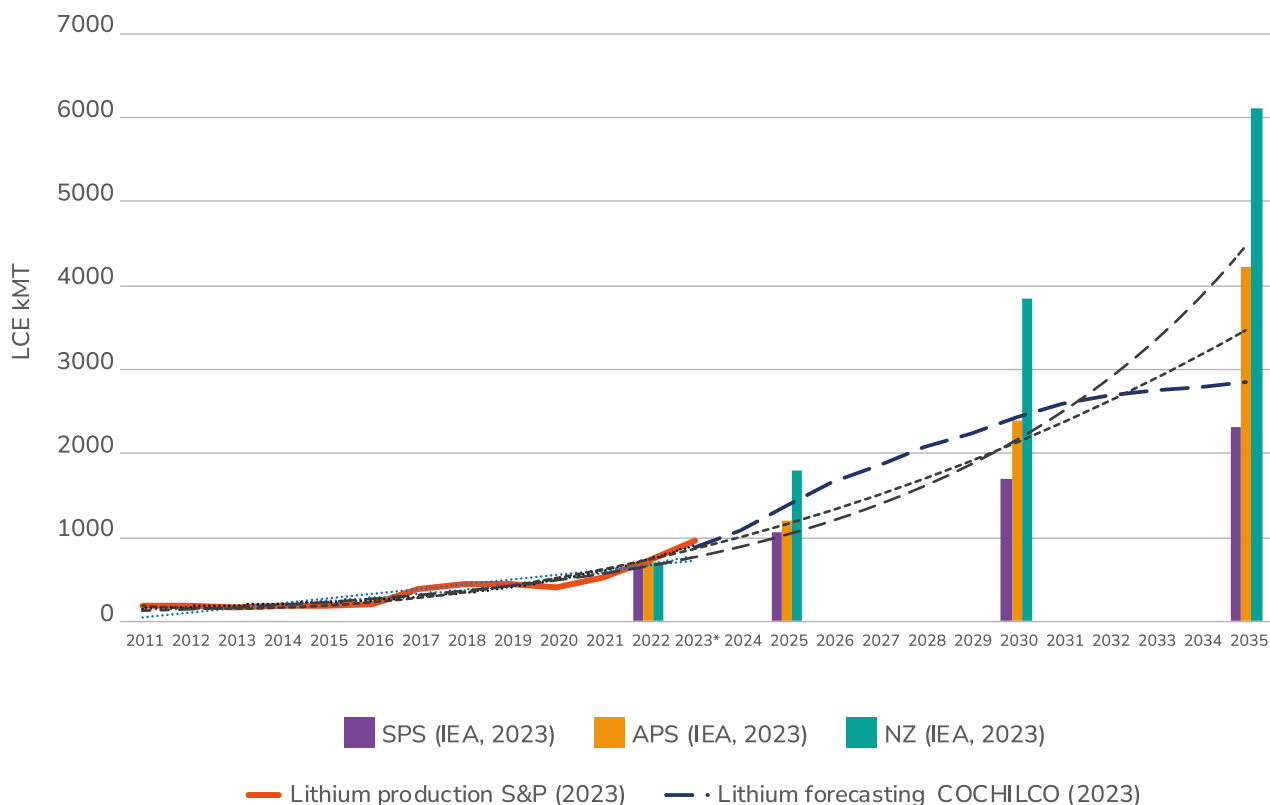
3. PROYECCIÓN DE BALANCE DE MERCADO (2024 – 2035)

Las proyecciones muestran que la demanda por litio aumentará proporcionalmente a la entrada de los automóviles eléctricos (EV). Considerando que el recambio del parque vehicular es una de las principales medidas impulsadas por los países desarrollados para mitigar el cambio climático y reducir la contaminación atmosférica, y que el cambio tecnológico en torno a los EV ha evolucionado rápidamente reduciendo significativamente los costos de producción, se espera que la demanda por vehículos eléctricos aumente significativamente durante las próximas décadas y, con ello, también la demanda y oferta de litio. De hecho, se estima que al año 2035 los vehículos eléctricos representen más del 50% del mercado, siendo al año 2022 solo un 14% (Chilean Copper Commission, 2023). Respecto a cómo será la composición de esta mayor demanda por productos de litio, no existe un consenso entre los expertos y hay posturas que pronostican una solución esquina (mercado 100% carbonato de litio o 100% hidróxido de litio). Sin embargo, la opinión dominante es que el mercado convergerá a un equilibrio balanceado entre carbonato e hidróxido de litio.

Estas proyecciones convierten al litio en uno de los minerales más críticos para la transición energética (International Energy Agency, 2021); (Valverde-Carbonell, et al., 2024), abriéndose las siguientes interrogantes: ¿Cuánto litio se necesita para alcanzar las metas de mitigación climática? ¿Cuánto litio puede proveer el mundo para estos fines?

La presente subsección busca responder a las preguntas anteriores a partir de un análisis que incorpora proyecciones de oferta y demanda previamente realizadas por organismos especializados, como son la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco) y la Agencia Internacional de Energía (IEA), con un análisis de series de tiempo que proyecta la tendencia no lineal que ha seguido la producción de litio desde la década anterior. Específicamente, se generan dos escenarios de producción de litio al año 2035 (Ver figura 14) en base a la proyección de la curva de oferta evidenciada en el periodo 2011 – 2023 y se contrasta con la proyección efectuada por Cochilco y la proyección de demanda realizada por la IEA (International Energy Agency, 2023).

Figura 14. Proyección del balance del mercado mundial del litio (2024 – 2035)⁷



Fuente: Estimación propia a partir de información de S&P y Cochilco.

⁷ La Figura 14 muestra el resultado de este ejercicio, donde la proyección de la producción en base a una tendencia cuadrática (línea negra de segmentos pequeños) prevé una oferta mundial en torno a 3,500 kTM (LCE) hacia el año 2035, mientras que la proyección en base a una tendencia exponencial (línea negra de segmentos grandes) estima la producción sobre las 4,000 kTM (LCE). El ajuste (dentro de muestra) del modelo polinómico de segundo grado es de 0.93, mientras que el ajuste del modelo exponencial es de 0.92. En la misma figura, se aprecia la proyección de Cochilco (línea segmentada celeste), la cual muestra tasas de crecimiento decrecientes hasta rondar las 3,000 kTM (LCE) hacia el año 2035. Asimismo, las barras de color rojo, amarillo y verde ilustran la demanda estimada por la IEA en distintos escenarios de ambición climática para los años 2025, 2030 y 2035. Específicamente, la barra roja, amarilla y verde reflejan la estimación en base a los escenarios Stated Policy Scenario – SPS (políticas ya establecidas), Announced Pledge Scenario - APS (políticas comprometidas) y Net Zero - NZ (políticas para alcanzar emisiones netas igual a cero).

La diferencia entre las estimaciones propias y la de Cochilco radica en la tasa de crecimiento de la oferta de litio. Cochilco proyecta una tasa de crecimiento decreciente en base a proyecciones sobre la entrada de vehículos eléctricos al mercado, mientras que nuestras estimaciones proyectan tasas de crecimiento crecientes en base a la serie de tiempo de producción de litio. Al respecto creemos que en el largo plazo, al ser todos los factores de producción variables, la producción debiese ajustarse mejor a las presiones de demanda y, por lo tanto, si la demanda crece a una tasa creciente la oferta también debiese hacerlo. Así, la curva de oferta debiese ser más similar a la estimación propia.

La divergencia entre la proyección de Cochilco y la proyección polinómica de grado dos (cuadrática) son aproximadamente 500 kTM (LCE) al año 2035, mientras que la diferencia respecto a la proyección exponencial son 1,500 kTM (LCE). Estas divergencias se traducen en distintos escenarios de balance de mercado. En base al escenario de demanda Net Zero (NZ), todas las proyecciones de oferta arrojan como resultado un mercado deficitario. No obstante, el déficit es mayor en el corto plazo que en el largo plazo según nuestras estimaciones, mientras que a partir de las proyecciones de Cochilco es al revés. En base al escenario de demanda Announced Pledge (APS), nuestras proyecciones muestran un mercado balanceado/levemente deficitario al 2025 y deficitario al 2030, mientras que las proyecciones de Cochilco arrojan un mercado superavitario al 2025 y balanceado al 2030. Finalmente, en base al escenario de demanda Stated Policies (SPS), nuestras proyecciones arrojan un mercado levemente superavitario/balanceado al 2025 y superavitario al 2030.

V. Industria chilena de litio

Esta sección se enfoca en los aspectos claves de la industria chilena del litio, contemplando cuatro subsecciones donde se abordan desde las variables institucionales hasta las implicancias asociadas a la Estrategia Nacional del Litio en curso. Así, la subsección 4.1 presenta un diagnóstico de la industria chilena del litio, donde se identifican las principales ventajas comparativas y restricciones para su desarrollo. La subsección 4.2 aborda el sistema tributario, la distribución de rentas y el impacto sobre las finanzas públicas de la industria del litio. Luego, la subsección 4.3 presenta los cambios que introduce la Estrategia Nacional del Litio y proyecta la oferta esperada en este nuevo contexto. Finalmente, la subsección 4.4 analiza la composición del mix de productos elaborados en Chile y cómo éste afecta el valor agregado de la industria.

1. DIAGNÓSTICO

La industria chilena del litio posee dos particularidades que la definen. Primero, posee ventajas comparativas dadas por la dotación del recurso mineral y la tecnología de producción en base a la evaporación de la salmuera utilizando la radiación solar. Segundo, posee una institucionalidad *sui generis* que siempre ha ido un paso atrás de la evolución de la industria, y se ha moldeado a través de leyes ya obsoletas en su propósito original, regulaciones sectoriales y actos administrativos. Si bien lo último tiene claramente una connotación negativa, ya que refleja la no existencia de un marco normativo coherente que permita el desarrollo de la industria, también ha tenido ciertas ventajas relativas a flexibilidad normativa en aspectos sensibles, como son la definición de un *royalty* de facto a través de las cuotas de arrendamiento o la política industrial implícita en los nuevos contratos.

1.1 Ventajas comparativas

Chile presenta ventajas comparativas naturales y tecnológicas para la producción de litio, en particular carbonato de litio. Esto se debe a las reservas y la alta concentración de litio que posee el salar de Atacama (única fuente de producción operativa), a la disponibilidad de una serie de otros salares económicamente explotables y a las ventajas tecnológicas que Chile ha ido desarrollando durante décadas. Estas ventajas se pueden resumir en cinco factores claves:

- Chile es el país con mayores reservas de litio a nivel mundial, es decir, posee la dotación del recurso natural necesaria para su producción (Cabello, 2021); (U.S Geological Service, 2024).
- Chile es el segundo mayor productor de litio del mundo, es decir, ya posee *know-how* y economías de escala para su producción y exportación (U.S Geological Service, 2024).
- Chile exporta el litio a través de una gama de compuestos químicos⁸, es decir, exporta productos procesados que incorporan valor agregado más allá del valor del recurso

⁸ Cloruro, sulfato, carbonato e hidróxido de litio, siendo el carbonato y el hidróxido los que han concentrado casi la totalidad de la producción. No obstante, durante el año 2023 se evidenció un gran aumento en las exportaciones de sulfato.

en sí. Si bien la producción se concentra en carbonato de litio, también posee las capacidades para exportar otros tipos de compuestos e incluso está naciendo una incipiente industria de cátodos de litio (Pietrobelli & Valverde, 2024).

- Chile posee una ventaja comparativa en la producción de carbonato de litio vis á vis al líder de la industria (Australia), la cual está dada por los menores costos que significa extraer litio desde salares versus extraerlo desde rocas (Jiménez & Sáez, 2022); (Pietrobelli & Valverde, 2024).
- Chile posee una menor huella ambiental en la producción de litio, ya que la producción desde salmuera emite considerablemente menos CO₂ al ambiente y consume menos agua que la extracción desde roca. Esto se traduce en una ventaja competitiva en un paradigma de producción sustentable (Kelly, Wang, Dai, & Winjobi, 2021); (Valverde-Carbonell & Micco, 2024). No obstante, el costo social unitario del consumo de agua en Chile es mayor que en los países competidores, dadas las mayores externalidades negativas que se generan, tales como pérdida de biodiversidad y estrés en los acuíferos.

Sin embargo, el marco institucional de Chile es rígido y complejo, lo cual representa una restricción a la capacidad productiva (Poveda Bonilla, 2020). La rigidez institucional y la falta de visión para adaptar la industria al nuevo contexto mundial (boom de las baterías recargables), significó que Chile perdiera significativamente participación de mercado durante la década anterior (ver figuras 9 y 11).

1.2 Restricciones institucionales

La institucionalidad del litio se ha ido configurando sobre la marcha a partir principalmente de actos administrativos, los cuales han respondido a la voluntad y capacidades de cada gobierno, sin poder consolidar una política de Estado duradera. Actualmente, la expansión de la oferta de litio sólo se puede efectuar a través de la firma de un Contrato Especial de Operación de Litio (CEOL), o la modificación de los vigentes. Los únicos CEOLs que se han firmado durante las últimas décadas han sido renegociaciones con las dos empresas que producen litio en el Salar de Atacama desde las décadas de los 80s y 90s.

Desde una perspectiva productiva, la institucionalidad chilena del litio presenta una triple restricción⁹: no concesibilidad, límite de extracción de agua y salmuera, y cuotas de comercialización de litio metálico. Los problemas de institucionalidad en torno al litio, además de sus efectos prácticos, han sido diagnosticados desde finales de la década de los 2000s y han sido abordados por el Estado chileno desde entonces a través de distintas políticas, desde la Comisión Nacional del Litio en 2014 hasta negociaciones bilaterales de CEOLs (Espacio Público, 2024).

⁹ Como veremos a continuación, hay restricciones que tienen por objetivo limitar las externalidades negativas que se originan en el proceso de extracción de litio (restricción ambiental), por lo cual no son socialmente ineficientes. De hecho, el beneficio privado neto se ve reducido (restricción de oferta), pero el bienestar social neto se ve incrementado al considerar el costo social de la producción (siempre y cuando el límite de la restricción esté bien establecido). Sin embargo, que la restricción sea económicamente eficiente no impide que exista una merma en la competitividad, a menos que los otros países apliquen principios similares.

Recientemente, tres nuevos hitos se sumaron a la lista: Estrategia Nacional del Litio (2023), acuerdo entre Codelco y SQM (2024), y Clasificación de Salares (2024). Donde las dos últimas son acciones para implementar la estrategia.

A continuación se conceptualizan las tres restricciones anteriormente mencionadas, detallando su efecto práctico y consecuencias en términos productivos.

Mineral no concesible

Esta restricción obedece a la naturaleza jurídica que Chile otorgó al litio el año 1979 a través del código de minería y la ley orgánica constitucional sobre concesiones mineras. Aquí se establece que el litio es un mineral no concesible y solo puede ser explorado y explotado por el Estado y sus empresas, o a través de terceros mediante contratos especiales de operación de litio (CEOL). Esto obedeció a razones estratégicas en un contexto de Guerra Fría donde el litio era un elemento clave en términos nucleares, sin embargo, la normativa permanece vigente.

Por lo tanto, la oferta no tiene la capacidad de adaptarse rápidamente a los cambios de tendencia de la demanda de litio, ya que esto requiere modificar CEOLs vigentes o generar nuevos CEOLs, lo cual es lento y complejo. Esto ha significado en la práctica que Chile solo explote litio desde el Salar de Atacama a través de dos operaciones de larga data, SQM y Abemarle, y que la capacidad instalada de producción evolucione a partir de decisiones estatales (como las modificación de los CEOLs) y no producto de los incentivos de mercado.

Cabe precisar que, de no existir esta restricción, la capacidad productiva igualmente estaría restringida. Esto se debe a que la extracción de litio desde salares tiene un límite natural dado por la cantidad de salmuera que puede extraerse sin que esto afecte de manera irreversible la sustentabilidad del salar.

Límite de extracción de salmuera y agua

Esta restricción está dada por el límite de extracción de salmuera y agua autorizada por la autoridad ambiental en la evaluación de impacto ambiental, la cual tiene por objetivo resguardar el salar y su ecosistema. La tecnología de extracción vigente de litio consume intensivamente agua ya que consiste en el bombeo de salmuera y su posterior evaporación para recuperar el litio. Además el proceso productivo requiere de agua para su funcionamiento, la cual se obtiene de pozos aledaños al salar. Por lo tanto, la producción de litio es una función directa del consumo de agua (salmuera y dulce).

Por lo tanto, esta restricción puede considerarse una restricción “natural” que busca promover la sostenibilidad del salar y, con ello, la producción en el largo plazo. De hecho, puede considerarse un mecanismo para internalizar las externalidades negativas de la producción. En este sentido, el reto es establecer el límite natural de cada salar, el cual (dada la complejidad de los salares) no es estático y debe ser monitoreado constantemente. Esto sugiere que la regulación ambiental debe ser ad-hoc a cada salar y su ecosistema, lo que por contrapartida

resta generalidad a la regulación. En este *trade-off* es clave definir cuales son los criterios, impactos y compensaciones aceptables, ya que esto da un marco estándar en el cual la particularidad de cada salar debiese expresarse en los guarismos de las distintas dimensiones, y no en las dimensiones en sí.

Un efecto positivo de esta restricción es que ha promovido la innovación y cambio tecnológico, incentivando el desarrollo de técnicas como la extracción directa de litio, la cual es menos intensiva en el uso de salmuera. Sin embargo, aún no conocemos el impacto ambiental total de estas tecnologías y sí sabemos que no son competitivas respecto a la tecnología de producción vigente tradicional (Espacio Público, 2024).

Cuotas de comercialización de litio

Esta restricción corresponde al límite que la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CChEN) establece sobre la producción y comercialización de litio. Dicho límite define la cuota de litio metálico acordada vía administrativa entre el Estado y las empresas. Por ende, modificar los volúmenes de producción de los CEOLs vigentes o determinar la producción asociada a nuevos CEOLs requiere de la aprobación previa de la CChEN. De esta forma, la producción de litio no solo se limita por el lado del *input* (cantidad de salmuera extraída), sino también por el *output* generado (producción de litio). En la práctica esto implica imponer coeficientes técnicos de producción fijos, limitando las ganancias de eficiencia producto del cambio tecnológico, lo cual no tiene razonabilidad económica dado que no implica un mayor costo social (externalidad negativa de extracción de salmuera).

En general, la CChEN ha validado las cuotas negociadas entre CORFO y las empresas privadas, por lo cual podría considerarse una restricción no activa. Sin embargo, también han existido situaciones en las cuales las ha rechazado, sin estar muy claro cuál es el bien que se protege. Por lo tanto, la participación de la CChEN en la determinación de la producción de litio de Chile no parece tener mayor justificación que una dependencia de la trayectoria en términos burocráticos.

De las tres restricciones presentadas anteriormente, se desprende que la restricción más fuerte es la ambiental. Esto porque si la función objetivo de la industria del litio incluye la sustentabilidad de los salares, aun existiendo concesibilidad sobre el mineral, la producción dependerá del volumen de salmueras permitido extraer. Esto podría no ser así si la producción de litio se desacopla de la cantidad de salmuera extraída, como es con las nuevas tecnologías. En ese caso, un régimen de concesiones mineras del litio podría ser más eficiente, ya que el caso a caso regulatorio tendría menos sentido.

2. TRIBUTACIÓN, DISTRIBUCIÓN DE RENTAS Y FINANZAS PÚBLICAS

Esta subsección resume los aspectos claves en materia del régimen tributario al que está sujeta la industria del litio, la distribución de rentas y su efecto sobre la competitividad, y el impacto sobre las finanzas públicas.

2.1 Régimen tributario

La industria del litio en Chile tiene la particularidad de estar afecta a gravámenes que provienen de fuentes administrativas y legislativas. La fuente administrativa corresponde al pago por arrendamiento de las pertenencias mineras que las empresas que explotan el litio deben pagar a Corfo, dueño de las pertenencias mineras. El precio del arrendamiento se define a través de contratos de largo plazo individuales con cada empresa. En dicho contrato se definen también todos los aspectos claves de la actividad productiva, tales como cuota de producción, obligaciones, compensaciones, etc. Mientras que, la fuente legislativa corresponde a las obligaciones tributarias que emanan de la ley, como son el Impuesto de Primera Categoría, el Global Complementario y el Impuesto Específico a la Actividad Minera. Este último ha sido recientemente reformulado y llamado simplemente royalty minero.

En la segunda mitad de la década anterior, Corfo renegoció los contratos vigentes con las dos compañías con operaciones en el Salar de Atacama, SQM y Albemarle. Aquí se renegociaron los cánones de arrendamiento de las pertenencias mineras, lo cual *de facto* opera como un impuesto *ad valorem*. Antes de estas renegociaciones, el contrato de Albemarle no contemplaba pago de arrendamiento y el de SQM estipulaba una tasa fija del 6.8% sobre el precio de exportación FOB, la cual después de deducciones se traducía en una tasa real en torno al 5.8%. Los nuevos contratos estipularon tasas progresivas de arrendamiento acorde al precio del litio, diferenciando por compuesto de litio comercializado. De esta forma, las nuevas tasas comienzan en 6.8% y llegan hasta el 40% para escenarios de precio del litio (carbonato e hidróxido) desde los US\$10.000 hacia arriba. Adicionalmente, se estableció que el precio relevante debía ser el cobrado a terceros y no intra holding, y los límites de cada tramo se establecieron en términos nominales. La tabla 2 muestra las tasas de impuesto bajo los nuevos contratos tanto para el carbonato como el hidróxido de litio.

Tabla 2. Tasas de impuesto ad valorem

CARBONATO DE LITIO		HIDRÓXIDO DE LITIO	
Precio (US\$/TM)	Tasa (%)	Precio (US\$/TM)	Tasa (%)
0-4 k	6.8	0-5 k	6.8
4-5 k	8	5-6 k	8
5-6 k	10	6-7 k	10
6-7 k	17	7-10 k	17
7-10 k	25	10-12 k	25
10 k-	40	12 k-	40

Fuente: Elaboración propia. La letra k se refiere a miles.

Adicionalmente, los nuevos contratos también establecieron recursos para investigación y desarrollo, así como también para el desarrollo de las comunidades locales. En el caso de la investigación y desarrollo, Albemarle se comprometió a financiar cerca de US\$300 millones por el periodo que dura el contrato, mientras que SQM comprometió cerca de US\$220 millones (su contrato termina 13 años antes que el de Albemarle). En el caso del aporte para el desarrollo de las comunidades locales, Albemarle comprometió el 3.5% de las ventas de carbonato de litio y cloruro de potasio a 18 comunidades locales, mientras que SQM a través del nuevo contrato firmado con CORFO se comprometió a entregar el 1.7% de las ventas para este fin, además de entre US\$10 – 15 millones anuales para proyectos de inversión y fomento en la cuenca del Salar de Atacama.

Por su parte, la fuente legislativa (tributaria) de los gravámenes a la minería se compone del impuesto a las utilidades de las empresas, el impuesto específico a la minería (IEAM), las patentes a las pertenencias mineras, y la contribución para el desarrollo regional. Si bien la tasa impositiva de la economía ha aumentado durante la última década desde 20% a 27%, las dos empresas que actualmente componen la industria del litio se encuentran acogidas a convenios de invariabilidad tributaria, lo cual les ha permitido reducir las presiones tributarias. En materia de IEAM, ambas empresas pagan este tributo, aun cuando el pago ha sido rechazado y judicializado por parte de SQM. De todas formas, el nuevo royalty aprobado el año 2023 y que comienza a operar en enero del año 2025 deroga el IEAM y no considera a la industria del litio. Por lo tanto, esto reducirá la carga tributaria de la industria (al menos por este concepto). Las patentes a las pertenencias mineras tienen un canon de 0.3 UTM¹⁰ por hectárea. Mientras que la contribución para el desarrollo regional corresponde a una tasa del 1% sobre el valor de los activos físicos inmovilizados de los proyectos de inversión sobre US\$10 millones.

Si nos enfocamos en los pagos de cánones y tributos asociados exclusivamente al mineral, es evidente que la política tributaria se ha ejercido principalmente por la vía administrativa, ya que los ingresos por concepto de arrendamiento de las pertenencias superan considerablemente a los ingresos del IEAM (Jorrat, 2022). Por lo tanto, la debilidad institucional del litio en materia de gobernanza representó un activo para fines tributarios, ya que brindó la flexibilidad necesaria para elevar los cánones de arriendo justo en el auge de la industria y, así capturar una mayor parte de la renta Ricardiana. El contrafactual del aumento de cánones vía administrativa hubiese sido el aumento de las tasas vía proyecto de ley, lo cual en el caso de la industria del cobre tomó casi 20 años.

2.2 Rentas y competitividad

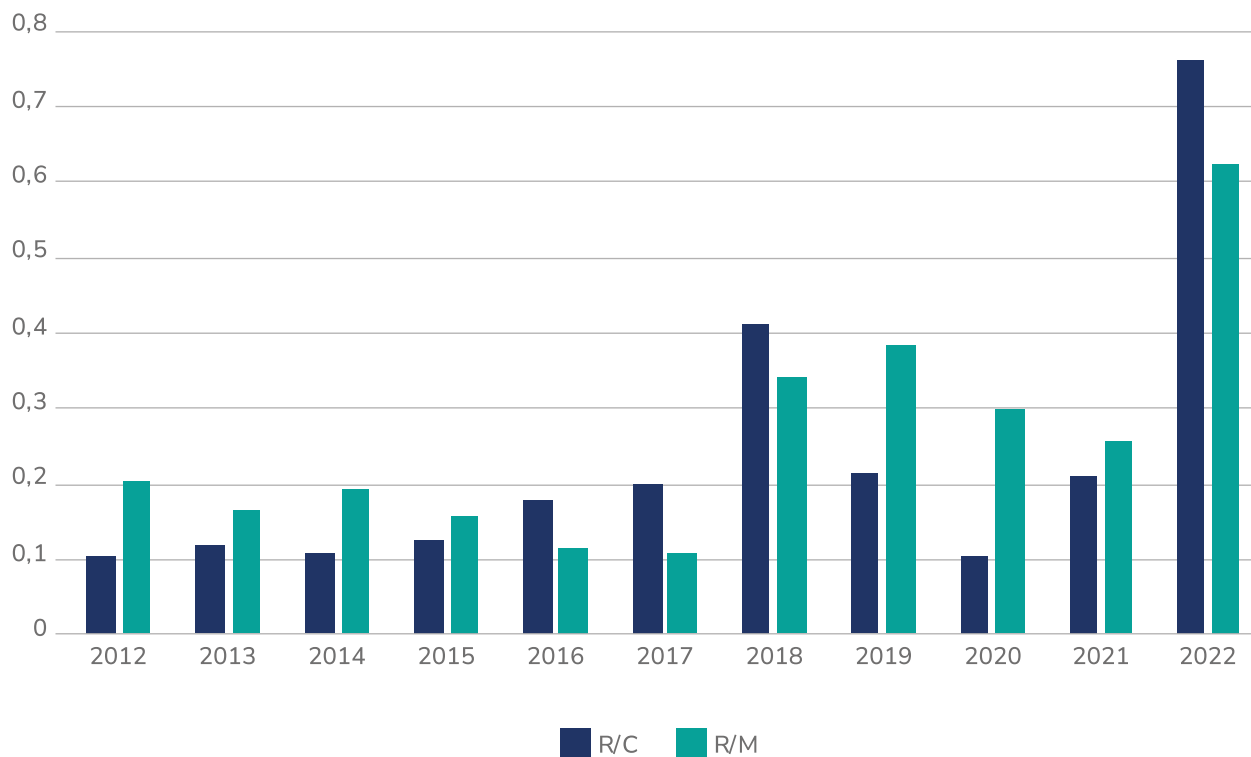
Desde la perspectiva de distribución de rentas y competitividad, hay dos ratios interesantes de analizar; el peso del royalty sobre el margen operacional total (R/M) y la participación del royalty en los costos operacionales de producción (R/C). El ratio R/M ilustra qué porcentaje de rentas captura el Estado a través de las regalías por arrendamiento de las pertenencias mineras sobre el margen total que obtienen los privados. El margen total incluye los flujos de efectivo generados por la empresa en general, no solo por la operación en sí

¹⁰ 1 UTM = 67 dólares aproximadamente.

(por ejemplo, incluye flujos de efectivo producto de inversiones). La figura 15 muestra como este ratio venía disminuyendo hasta el año 2017, evidenciando un creciente aumento en la captura de rentas por parte de los privados. Luego, a partir del año 2018, la participación del royalty aumenta considerablemente como consecuencia de la renegociación del contrato de SQM y el aumento en el precio del litio, para luego disminuir durante los años 2019 y 2020 a raíz de los menores precios producto de la crisis económica mundial gatillada por la pandemia. Finalmente, el año 2022 el ratio R/M aumenta fuertemente de la mano de los mayores precios, alcanzando un 60% del margen efectivo total.

Por su parte, el ratio R/C da cuenta del peso del royalty sobre los costos operacionales de la industria, lo cual puede considerarse un indicador de competitividad de la industria ya que muestra la presión de los tributos sobre los costos de producción. La figura 15 muestra que hasta el año 2017 el royalty representó entre 10% y 20% de los costos operacionales, porcentaje que aumenta a 40% el año 2018 y luego vuelve a caer al rango 10% - 20% en el periodo 2019 – 2021. Finalmente, el año 2022 el ratio R/C escala hasta un 75% como consecuencia del rally en el precio del litio.

Figura 15. Evolución de la carga del royalty sobre el margen efectivo total y los costos de producción del litio



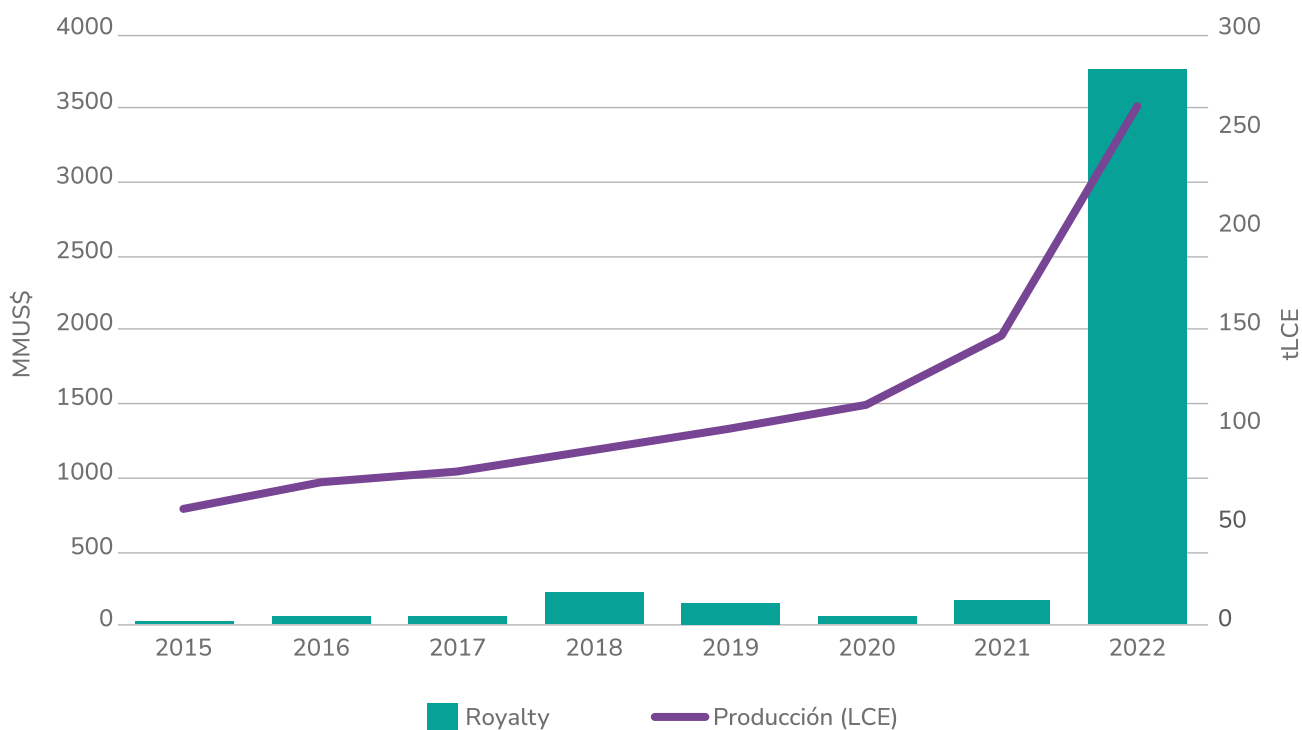
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de S&P Intelligence.

Del análisis anterior, es interesante notar que el salto en nivel de ambos ratios el año 2018 tiene un componente endógeno (nuevas tasas de royalty) y un componente exógeno (precio). Luego, cuando el precio comienza a bajar (años 2019, 2020 y 2021), se aprecia que el ratio R/C converge a los niveles previos al cambios de tasas del royalty, lo cual refleja un comportamiento pro-cíclico entre el precio del litio y la carga por royalty. Es decir, cuando el precio disminuye, la presión del royalty sobre los costos también lo hace, lo que favorece a la competitividad de la industria en periodos abajistas del mercado. Por su parte, la captura de rentas por parte del Estado también fluctúa acorde al ciclo de precio, pero de manera más suave. Esto se aprecia en la caída rezagada y más moderada del ratio R/M, y en que este indicador nunca converge a los niveles pre renegociación de tasas.

2.3 Impacto sobre las finanzas públicas

Los ingresos fiscales provenientes de la industria del litio han aumentado considerablemente durante la última década, alcanzando su máximo el año 2022 cuando la industria aportó MMUS\$5,500 al fisco, equivalente a 1.9% del PIB y 7.2% de los ingresos fiscales, superando a la contribución de la minería del cobre (CFA, 2022). Estos ingresos MMUS\$3,750 aproximadamente provinieron de los cánones de arrendo de las pertenencias mineras estipulados vía contrato con CORFO.

Figura 16. Producción de litio y recaudación por concepto de royalty (2012 – 2022)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de S&P Intelligence y Sernageomin. * El royalty solo considera la regalía de arrendamiento pagada a Corfo.

El mayor aporte del litio a las arcas fiscales se explica por tres factores: mayor producción, boom de precio y cambio en las regalías (ver figuras 9 y 16, y tabla 2). Entre el año 2012 y 2022 la producción de litio aumentó cerca de un 300% y su precio se multiplicó por ocho. Por su parte, las regalías provenientes del arrendamiento de las pertenencias mineras de Corfo aumentaron significativamente a partir de la renegociación de contratos con Albemarle y SQM, los años 2016 y 2018 respectivamente. Estas renegociaciones incluyeron una tasa variable que aumenta progresivamente acorde al precio del litio, lo cual le permitió al Estado capturar gran parte de las rentas originadas por el boom del precio.

Si bien, una mayor recaudación es siempre una buena noticia para el fisco, la naturaleza de estos recursos representó (y aún representa) un desafío para la política fiscal. Esto porque la regla de balance estructural (balance cíclicamente ajustado) no consideraba un tratamiento especial para los ingresos del litio y, por lo tanto, estos fueron considerados como permanentes. Sin embargo, se sabe que una parte significativa de los mayores ingresos por litio son de carácter transitorio debido al shock de precio del mineral, lo cual ha quedado en evidencia durante el último año donde el precio ha disminuido un 70% (ver figura 9). A partir de esto, la Dirección de Presupuestos (Dipres) inició a fines del año 2023 una consulta pública para modificar la metodología del cálculo del Balance Estructural con el fin de incorporar un ajuste prudencial a los ingresos del litio.

La materialización de la Estrategia Nacional del Litio a través del acuerdo entre Codelco y SQM, y la definición de los salares susceptibles a ser explotados, expandirán la oferta de litio de Chile en el corto y mediano plazo, lo cual repercutirá en mayores ingresos para el fisco. Estos mayores recursos serán en función de los resultados operacionales de la nueva empresa, lo cual pasa principalmente por el precio del litio (exógeno) y los costos de la empresa (endógeno). Ambas variables son difíciles de prever, el precio por su volatilidad en un mercado en expansión y los costos por el cambio tecnológico comprometido por la nueva empresa con el fin de reducir la huella hídrica.

3. MIX DE PRODUCTOS Y VALOR AGREGADO

La producción de litio de cada operación en Chile está acotada por la cuota definida en el CEOL respectivo. Si solo existiese un producto de litio comercializable, la sumatoria del promedio anual de las cuotas definiría el valor agregado esperado de la industria. Sin embargo, existen cuatro principales productos de litio; carbonato, hidróxido, sulfato y cloruro. Los primeros dos pueden considerarse productos finales de la industria de procesamiento de litio, mientras que los dos últimos corresponden a productos intermedios de esta industria. Así, el valor agregado de la industria es función tanto de la cuota como del mix de producto escogido por cada firma. Producir una tonelada de un determinado compuesto de litio tiene como costo de oportunidad el valor agregado de no producir otro compuesto, lo cual se explica no solo por el costo de oportunidad de la asignación de las inversiones, sino también por la asignación del consumo de la cuota.

La definición del mix de productos ofertados por las firmas depende de las ventajas competitivas de éstas (estructura de costos) y de la demanda. Las ventajas competitivas a su vez son en función de la fuente primaria de litio y la tecnología empleada para su producción.

Las dos fuentes principales de donde se extrae el litio son pegmatitas (rocas) o salmueras (salares). La producción de litio a partir de pegmatitas (roca) puede considerarse una tecnología de producción clásica del sector minero, ya que contempla una serie de procesos usuales en la minería, tales como: chancado, molienda, separación, flotación, calcinación y lixiviación, entre otros. Mientras que la producción de litio a partir de salmueras sigue un proceso menos “minero” y más químico, ya que la fase de extracción se lleva a cabo mediante el bombeo de salmuera que es depositada en estanques para su purificación y, luego, la concentración se realiza mediante la evaporación solar y reactivos químicos (Jiménez & Sáez, 2022).

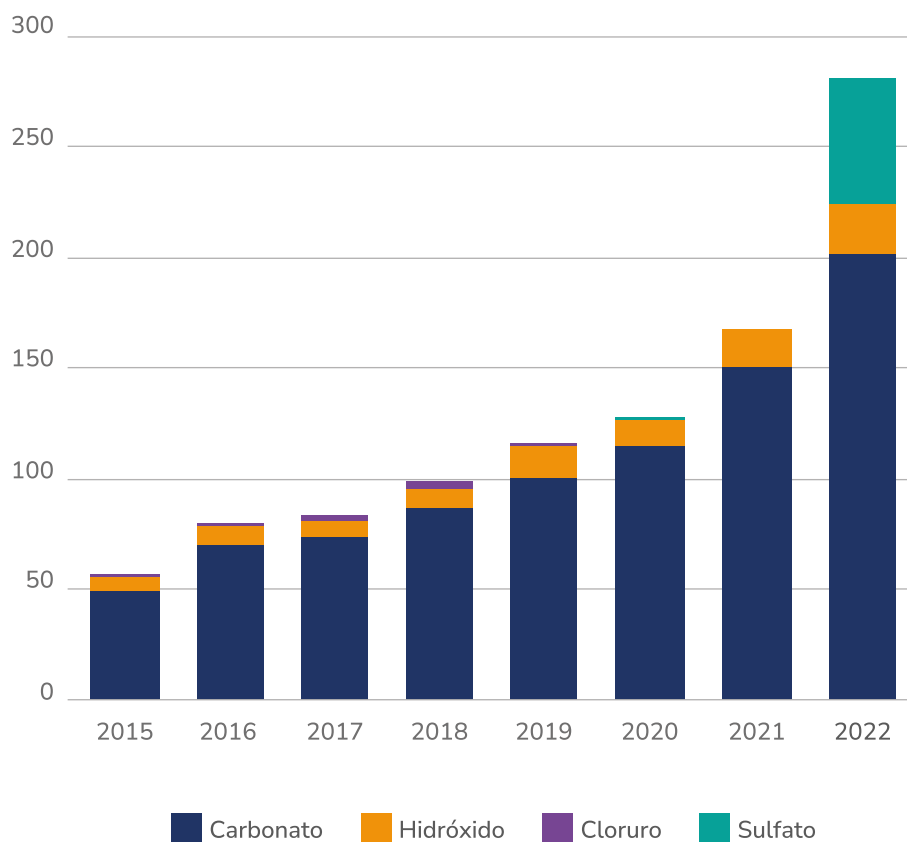
Mientras que los dos principales compuestos de litio comercializados son el carbonato y el hidróxido. Las tecnologías vigentes permiten obtener directamente carbonato de litio a partir de espodumeno (roca) o de cloruro de litio contenido en las salmueras; mientras que, el hidróxido de litio sólo se producía directamente a partir de espodumeno. De hecho, el hidróxido de litio producido desde salmueras utiliza como producto intermedio el carbonato de litio. Sin embargo, desarrollos tecnológicos recientes han permitido la producción de hidróxido de litio a partir de mineral extraído desde salmueras sin pasar por carbonato de litio. Específicamente, SQM logró concentrar sulfato de litio a partir de salmuera con alta concentración de sulfato de litio, no útil para la producción de carbonato de litio. El sulfato de litio es posteriormente exportado a plantas en China para su transformación en hidróxido de litio.

La producción directa de hidróxido de litio desde salmueras introduce oportunidades y desafíos para los países que producen litio a partir de esta fuente primaria. Por un lado, la nueva tecnología elimina el carbonato de litio como bien intermedio, lo cual aumenta la competitividad del hidróxido desde salmueras. Por otro lado, implica realizar un *upgrade* tecnológico para adoptar eficientemente la nueva tecnología. El riesgo de no lograr el dominio de la nueva tecnología es retroceder en términos de procesamiento y valor agregado de los productos comercializados, ya que los países que logren dominar la tecnología demandarán cloruro y sulfato de litio como bienes intermedios.

De esta forma, el aumento de la demanda por hidróxido de litio pone incentivos para que los países productores de litio desde salmuera, como Chile y Argentina, exporten bienes intermedios de litio con menor valor agregado, como son el cloruro y sulfato de litio. O puesto en términos positivos, la mayor demanda por hidróxido de litio incentiva el cambio tecnológico para producir hidróxido de litio de manera directa en desmedro de la producción de carbonato de litio.

Al observar el mix de productos de Chile, se observa que la producción se ha concentrado históricamente en el carbonato de litio. Sin embargo, las estadísticas del año 2022 (ver figura 17) muestran un boom en la producción de sulfato de litio, lo que en la práctica reduce la intensidad del valor agregado exportado por Chile. Durante este año la producción de sulfato representó un tercio de la producción total del país.

Figura 17. Composición de la producción de litio de Chile (LCE)



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Sernageomin.

La producción de sulfato de litio se explica por una innovación productiva de SQM que le permitió procesar salmueras no productivas (altas en sulfato) que anteriormente se reinyectaban al salar. SQM posee *strings* de 15 kton/LCE al año, que le permiten producir sulfato de litio con una concentración de 85%, el cual exporta para ser procesado en China donde posee una planta propia con capacidad de 30kton/LCE.

Esta nueva línea de producción se debe a un cambio tecnológico que aumenta la productividad y explota los principios de economía circular, ya que emplea insumos que antes se descartaban (reinyección de salmuera o acopio) y capacidad instalada ociosa (pozas no operativas). Además, tiene ventajas ambientales significativas respecto a la producción de hidróxido de litio a través de la ruta tradicional (usando carbonato de litio como bien intermedio), dado que tanto la huella de carbono como la huella hídrica son menores (esta última es considerablemente menor)¹¹. Sin embargo, la restricción de producción dada por la cuota de extracción, genera un efecto de sustitución que podría tener efectos negativos sobre el valor agregado del sector. Específicamente, una tonelada de sulfato de litio (LCE) implica una tonelada menos de carbonato de litio, dada la cuota de producción de litio.

¹¹ SQM – Vinculación con Universidades y Producción de Sulfato de Litio (2023).

Si consideramos que previo a este cambio tecnológico la salmuera era devuelta al salar o acopiada como material de descarte, y que la producción de sulfato de litio consume parte de la cuota de litio, se da la paradoja que una innovación que aumenta la productividad tiene un efecto negativo sobre la intensidad del valor agregado de la industria. Esto se explica porque la restricción de oferta (cuota de litio) hace que cada tonelada de sulfato de litio tenga como costo de oportunidad el equivalente en litio metálico de toneladas de carbonato de litio que se podrían haber producido en su lugar. En base a estimaciones propias (año 2022), el costo de producción del sulfato de litio rondaría los US\$600 y su precio de venta, US\$22,000. Por su parte, el costo de producción del carbonato de litio ascendió a US\$4,500 y su precio de venta a US\$37,000. Luego, el margen operacional del sulfato de litio asciende a 97,2% y el margen del carbonato de litio a 87,8%. Mientras que el valor agregado de producir carbonato de litio (margen US\$32,500/ton LCE) es mayor que el valor agregado del sulfato de litio (margen US\$21,400/ton LCE)¹². En consecuencia, existe un *trade off* entre rentabilidad y valor agregado.

4. POLÍTICA INDUSTRIAL DE FACTO

La renegociación de los contratos con Albemarle (2016) y SQM (2018) contienen *de facto* las políticas industriales más ambiciosas de Chile durante el último tiempo, las cuales consideran una visión de valor compartido donde se incluye el desarrollo local de las comunidades y la protección ambiental.

De esta forma, Corfo implementó políticas de desarrollo productivo e investigación y desarrollo tecnológico vía administrativa, evitando burocracia y frenos políticos de ejecutar políticas de este estilo vía legal. Estas políticas, denominadas incentivos al valor agregado, tienen por objetivo central el desarrollo de un ecosistema productivo en torno a la industria del litio, con encadenamiento hacia adelante y atrás que permitan generar valor agregado a partir de este mineral.

En materia de desarrollo productivo y cadenas de valor, el instrumento de política más importante es la cláusula que crea una cuota de venta de litio a precios preferentes para consumidores locales. Esta cuota puede extenderse hasta el 25% de la producción de cada empresa y asegura suministro de largo plazo a precios competitivos. De esta forma, se incentiva que productores extranjeros y nacionales desarrollen capacidad productiva aguas abajo, agregando valor a través del procesamiento local del litio. En particular, esta cuota busca incentivar a que empresas productoras de material catódico se instalen en Chile.

El contrato de SQM establece dos cuotas de 11,244 toneladas por año de carbonato de litio grado batería, habiéndose ya asignado la primera de ellas a la empresa China BYD para su planta de cátodos en Antofagasta. Sin embargo, la empresa puso en pausa su planta de cátodos un año más tarde, argumentando lentitud y falta de claridad por parte del gobierno de Chile. Parte de la incertidumbre se da porque el contrato que obliga a SQM a proveer carbonato de litio a precios preferentes termina en 2030, por lo cual el suministro de largo plazo a estos precios no está garantizado.

¹² Si bien no conocemos la descomposición de costos de ambos compuestos y, por ende, tampoco cuánto corresponde a bienes intermedios y cuánto a los factores primarios de producción, el margen entre ingresos y costos puede considerarse una medida de valor agregado (rentas + depreciación) de cada producto.

Otra cláusula de los contratos que promueve el desarrollo productivo y agregación de valor, es la que estipula el aumento de la capacidad instalada de producción de productos de litio grado batería, lo cual promueve la producción y exportación de productos de litio altamente refinados. El contrato de Albemarle incluye la construcción de una nueva planta para la producción de carbonato de litio grado batería con una capacidad de 24,000 toneladas anuales, mientras que el contrato de SQM incluye la ampliación de la capacidad productiva de litio grado batería en 50,000 toneladas. Asimismo, ambos contratos prohíben la comercialización de salmuera en cualquiera de sus formas (concentraciones).

En materia de investigación y desarrollo tecnológico, el contrato de SQM incorpora entre MMUS\$10.7 y MMUS\$18.9 anuales para investigación y desarrollo tecnológico en minería metálica y no metálica. Adicionalmente, destina el 0.3% de las ventas para fines productivos del Gobierno Regional de Antofagasta. Por su parte, el contrato de Albemarle contempla entre MMUS\$6 y MMUS\$12.4 anuales para investigación y desarrollo durante la vigencia del contrato (termina el 2043). Algunas de las iniciativas que se planean financiar con los aportes en I+D son el Instituto Solar Minero en la Región de Antofagasta, el Instituto de Big Data e Inteligencia Artificial y el Instituto de Manufactura Avanzada, entre otros.

De esta forma, la política industrial de Chile en materia de litio se realiza principalmente vía administrativa a través de las cláusulas incorporadas en los contratos. El resultado de estos instrumentos están aún por verse, pero a partir de la experiencia reciente de BYD y el gran interés por explotar nuevos salares en Chile pareciera ser que: i) asegurar suministro de largo plazo a un precio preferente no es suficiente para incentivar el desarrollo de la cadena productiva aguas abajo, y ii) el principal atractivo de Chile está dado principalmente por su recurso mineral.

5. ESTRATEGIA NACIONAL DEL LITIO Y PROYECCIÓN DE OFERTA 2024 – 2035

La Estrategia Nacional del Litio, en temprana implementación, modifica el marco institucional y dinamiza la oferta a través de un esquema donde el Estado adquiere un rol empresarial protagonista. Esto se manifiesta tanto en el acuerdo entre Codelco y SQM, donde la extensión del contrato de SQM desde el año 2031 es a cambio del control de empresa por parte de Codelco; y del listado de salares a ser sujetos de explotación, donde los salares con mayor potencial productivo se reservan para la explotación del Estado o en conjunto con el Estado. Por su parte, para los salares no estratégicos, los privados pueden expresar su intención de explotación y firmar CEOLs. Por lo tanto, la expansión de producción de litio seguirá estrechamente determinada por la capacidad estatal, sumándose a lo institucional-regulatorio, la capacidad de Codelco y Enami de establecer asociaciones público-privadas, definir los contratos y gestionar las nuevas empresas.

La presente sección tiene por objetivo proyectar la producción de litio de Chile para el periodo 2024 -2035, considerando el efecto sobre la producción del acuerdo Codelco-SQM y el listado de salares susceptibles a ser explotados. La proyección se realiza desde una perspectiva *bottom-up* sumando la producción esperada de las distintas operaciones vigentes y proyectos entrantes.

La información primaria se obtiene desde fuentes públicas de información a partir de lo señalado por las mismas empresas y de los remanentes de cuotas vigentes de explotación. Los resultados de este ejercicio se contrastan con la última proyección realizada por Cochilco.

Los principales supuestos empleados para la proyección de producción son:

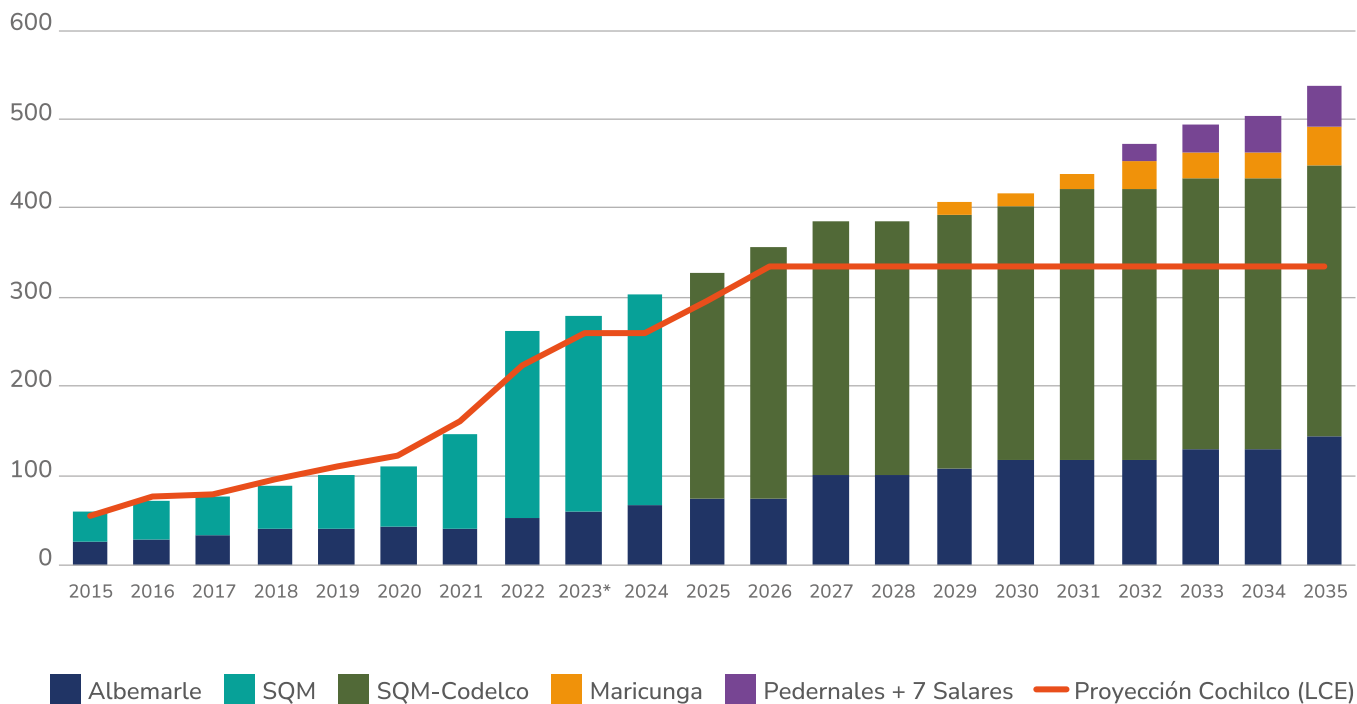
- SQM consume la cuota restante del contrato vigente (1,600 mil toneladas de LCE), más las 300 mil establecidas en el preacuerdo con Codelco. Esto implica una producción de 1,900 mil toneladas de LCE entre 2024 y 2030.
- A partir del año 2031 SQM aumenta su producción de carbonato e hidróxido a 303 mil anuales, en línea con lo estipulado en el preacuerdo con Codelco.
- Albemarle aumenta su cuota de producción al doble, lo cual se traduce en un aumento progresivo de su producción hasta alcanzar 144 mil toneladas de LCE anuales al 2035.
- Codelco consolidará las operaciones en el Salar de Maricunga y comenzará a producir junto a terceros el año 2029. En una fase inicial Maricunga producirá 15 mil toneladas de LCE anuales, las cuales aumentarán progresivamente hasta alcanzar 45 mil toneladas el año 2035.

Los salares de Pedernales (Codelco) y Siete Salares (Enami) comenzarán a producir el año 2032. En conjunto sumarán 20 mil toneladas de LCE el año 2032, las cuales aumentarán hasta 45 mil toneladas el año 2035.

La figura 18 muestra la proyección de demanda de litio (LCE) desagregada por operación en el caso del Salar de Atacama y agregada en los casos de los salares de Maricunga y Pedernales – Siete Salares. Se considera que estos son los únicos nuevos salares que producirán litio durante el periodo de estudio (2024 – 2035). En el caso de SQM, se incorporan los efectos sobre la producción del acuerdo con Codelco a partir del año 2025. Mientras que en el caso de Albemarle se incorpora la duplicación de su cuota de producción.

Adicionalmente, se muestra la última proyección pública realizada por Cochilco (2023), lo cual consideramos el escenario pre Estrategia Nacional del Litio. Nuestra línea base, o *business as usual* (BAU), considera el aumento de producción estipulado en el acuerdo Codelco – SQM y la mayor cuota otorgada a Albemarle. Mientras que nuestro escenario esperado incluye la entrada en operación de los salares de Maricunga, Pedernales y Siete Salares.

Figura 18. Producción y proyección de la oferta de litio de Chile (2015 – 2035)



Fuente: Estimación propia en base a los supuestos señalados.

De la figura anterior destaca que:

- Chile producirá 537.5 mil toneladas de LCE al año 2035, es decir, 201.5 mil toneladas más (+60%), que lo proyectado por Cochilco previo a la Estrategia Nacional del Litio.
- El potencial acuerdo entre SQM y Codelco sería el principal impulsor del aumento de producción de litio de aquí al 2030.
- La mayor producción esperada al año 2035 respecto al año 2023 se distribuye equitativamente entre SQM, Albemarle y los nuevos salares.
- La entrada de los salares de Maricunga, Pedernales y Siete Salares podría representar cerca del 17% de la producción nacional de litio al año 2035.

Si bien la producción proyectada aumenta sostenidamente en el tiempo, cuando se compara la tasa de crecimiento de la oferta nacional versus la tasa de crecimiento de la oferta mundial, se observa que la oferta mundial crece mucho más rápido (figura 13). Esto se traduce en una disminución de la participación de mercado y refleja una pérdida de competitividad.

En términos concretos, Chile registró una participación de mercado de 28% el año 2022 y a partir de nuestra proyección de oferta (mundial y nacional), estimamos que al año 2035 su participación se reducirá a un 15%.

Por lo tanto, incluso en el escenario más optimista proyectado en la figura 18, donde nuevas operaciones empiezan a producir en los salares de Maricunga, Pedernales y Siete Salares, la respuesta de la oferta chilena de litio a la mayor demanda mundial es débil. La pérdida de competitividad de 13 puntos porcentuales de participación de mercado reflejan que el resto del mundo es capaz de aumentar su producción mucho más rápido que Chile, pese a que somos el país con mayores reservas del mundo.

Ahora bien, la pérdida de participación de mercado puede considerarse como una consecuencia inevitable dada la fuente primaria de litio, ya que la extracción desde salares posee una restricción natural dada por el volumen de salmuera extraída, mientras que la extracción desde roca (pegmatitas) no. Sin embargo, cambios tecnológicos que disocian la producción de litio respecto a la extracción del salmuera desactivan esta restricción y, por ende, hacen endógena la producción de litio. Por lo tanto, la política económica sí tiene un rol que cumplir al respecto.

VI. Conclusiones y recomendaciones

El presente trabajo se enfoca en la industria chilena del litio, dando a la vez una mirada integral sobre la industria mundial del litio. En este sentido, el análisis abarca seis dimensiones claves de la industria: i) eficiencia económica (costos), ii) eficiencia ambiental, iii) institucionalidad, iv) competitividad tributaria y finanzas públicas, y v) mix de producto, valor agregado y política industrial.

Respecto a la eficiencia económica, Chile sigue estando en el top de la industria mundial, lo cual le permite seguir obteniendo rentas incluso en periodos de precios bajos como el actual. Su mayor competitividad está en el carbonato de litio, sin embargo, también es competitivo en la producción de hidróxido de litio. No obstante, la competitividad se debe en gran parte a la tecnología de producción intensiva en el uso de agua (evaporación de grandes volúmenes de salmuera), la cual el país ha propuesto sustituir por tecnologías de extracción directa que son más sustentables. En este sentido, no es claro que Chile pueda mantener su ventaja comparativa bajo la nueva tecnología, en especial si otros países con condiciones similares a la de Chile producen con la tecnología tradicional que es más barata. Ahora bien, si el estándar internacional de producción de litio desde salmueras es la extracción directa, Chile mantendría la ventaja comparativa dadas las mayores concentraciones de litio presente en varios de sus salares. Por lo tanto, un desafío de la industria chilena es cómo compensar posibles pérdidas de competitividad producto del cambio tecnológico.

En lo referido a la eficiencia ambiental, la producción chilena posee una huella de carbono y de agua considerablemente menor que la producción en base a litio de roca y, por lo tanto, su cadena productiva es más eficiente ambientalmente que la australiana-china. Sin embargo, el costo social del uso del agua es mayor debido a los efectos sobre la sostenibilidad del salar (balance hídrico), los acuíferos aledaños, y la disponibilidad del recurso para las comunidades locales. Esto atenúa la ventaja comparativa ambiental de ser más eficientes en el uso del recurso. El desafío económico que emerge al respecto es cómo transformar la ventaja ambiental en una ventaja económica en el corto y mediano plazo, ya que en términos funcionales el carbonato de litio grado batería Chino (con emisiones de CO₂ seis veces superior al chileno) es el mismo. Por lo tanto, la intensidad de emisiones no es una variable económicamente relevante hoy en día. Luego, si no existe un mecanismo de mercado que permita la diferenciación horizontal de productos a partir del contenido de emisiones, la ventaja es económicamente nula. En este sentido, políticas de precio al carbono podrían ayudar a monetizar la eficiencia ambiental, tal y como lo hace el Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) de la Unión Europea. Otra opción es promover políticas comerciales a nivel de cadenas de valor a través de acuerdos comerciales, donde se estipule un precio por contribuir a un producto final bajo en emisiones. Un ejemplo en esta línea sería medir y certificar las emisiones contenidas en las baterías de los autos eléctricos, de tal forma que este pueda ser un atributo que se traspase en precio a la demanda. Así, existiría un valor monetario de producir litio de bajas emisiones. O bien, directamente certificar la cadena de producción de productos semiterminados de litio, en línea con lo que hace el Copper Mark en el caso del cobre.

Respecto a la institucionalidad, la concesibilidad del mineral es probablemente el aspecto más polémico. Sin embargo, estimamos que bajo el escenario actual donde la producción potencial está circunscrita a un par de salares, no es una restricción relevante. De hecho, la restricción activa es la relativa a los efectos ambientales de la producción de litio a partir de salmuera y, en particular, a su efecto sobre los balances hídricos y de biodiversidad. Mientras no existan líneas bases, sistemas de monitoreo confiables y un entendimiento amplio sobre los efectos medioambientales aceptables y los mecanismos de mitigación y compensación, no existirá la certidumbre necesaria para planificar proyectos productivos de largo plazo y la regla general será el caso a caso. En este sentido, la institucionalidad ambiental debería definir un marco general aplicable a todos los salares, dejando un porcentaje menor de la regulación para tratar las particularidades de cada caso.

En relación a los aspectos tributarios y de finanzas públicas, se observa que las operaciones chilenas son las que soportan la mayor carga tributaria mundial por concepto de royalty. De hecho, durante el peak de precio del año 2022, el royalty representó cerca del 40% de los costos directos de la producción de carbonato de litio en el Salar de Atacama, mientras que para el caso del principal productor mundial (Greenbushes) este porcentaje solo llegó a 10%. Esta diferencia es sostenible por los menores costos productivos que presenta Chile y la nueva normalidad de precios del litio evidenciados desde el año 2017. No obstante, el auge de distritos con condiciones similares a las de Chile, como por ejemplo Argentina, podría significar una competencia importante donde la brecha de competitividad tributaria es relevante. En el ámbito de las finanzas públicas, existen dos desafíos claves. Por un lado, desacoplar los ingresos del litio entre estructurales y transitorios, de lo contrario existe el riesgo de introducir pro-ciclicidad en la política fiscal y, así aumentar la volatilidad de la economía. Por otro lado, asegurar el correcto uso de los recursos provenientes del litio, en especial aquellos que se destinan a regiones, toda vez que si no existen las capacidades institucionales para gestionar y utilizar los recursos para los fines especificados, se abre una puerta para la corrupción. En este sentido, un cambio importante sería modificar las leyes y contratos vigentes con el fin de asegurar que la rendición de cuentas de los recursos pasen por auditoría (Contraloría) y que en caso que los recursos no se hayan gastado en un plazo a establecer, estos se redirijan a las arcas fiscales.

Respecto al mix de productos de la industria, el valor agregado y las políticas industriales, lo relevante es que las políticas industriales que buscan agregar valor a la industria a través de encadenamientos productivos y políticas de innovación y desarrollo tecnológico sean capaces de moverse y adaptarse acorde al mercado. Chile tiene la ventaja de tener capacidad productiva en todos los productos intermedios y finales del procesamiento de litio, lo cual es un activo considerando la incertidumbre sobre hacia dónde se moverá la demanda. Pero esto también puede suponer retroceder hacia productos de menor valor agregado. Este es el caso de la exportación de sulfato de litio, la cual si bien se debe a una innovación productiva a partir de material de descarte, tiene un costo de oportunidad relevante producto de las cuotas de producción que existen en Chile. Luego, las políticas productivas debiesen apalancar las innovaciones de las empresas con el fin de maximizar el valor local, priorizando instrumentos de un tamaño que permita rápidamente escalar a comercialización y no simplemente quedarse como pilotos. En este ejemplo, apalancando la construcción de una planta de procesamiento de sulfato de litio para así procesar localmente lo que hoy se envía a China.

Otro aspecto relevante en la definición de las políticas industriales es lo geopolítico, toda vez que la concentración de mercado aumenta el riesgo de confluir a un monopsonio que capture las rentas del mineral. Este es un tema de máxima relevancia considerando que China posee ya más del 60% de la capacidad productiva de litio refinado y, por lo tanto, tiene influencia sobre el precio del litio. De hecho, parte del desplome del precio del litio durante el último año se debe al exceso de capacidad productiva en las refinerías chinas. Por lo tanto, las políticas industriales en Chile deberían promover el aumento de la capacidad de procesamiento de litio refinado grado batería, promover que la producción no converja a una solución esquina (ejemplo, 100% carbonato de litio) mientras la carrera tecnológica siga en curso, y facilitar el desarrollo de etapas productivas aguas abajo (material catódico).

Referencias

Alhadad, M. y otros, 2023. Lithium extraction from β -spodumene: A comparison of keatite and analcime processes. *Hydrometallurgic*, Volumen 215.

Braga, P. y otros, 2019. *Alkaline Process for Extracting Lithium from Spodumene*. s.l., Hydro-process 2019.

Cabello, J., 2021. Lithium brine production, reserves, resources and exploration in Chile: An updated review. *Ore Geology Review*.

Cepal, 2022. *Estudio Económico de América Latina y el Caribe: Dinámica y desafíos de la inversión para impulsar una recuperación sostenible e inclusiva*, Santiago de Chile: UN ECLAC.

Comisión Chilena del Cobre, 2022. *El mercado del litio: desarrollo reciente y proyecciones al 2035*, s.l.: s.n.

Comisión Chilena del Cobre, 2023. *El mercado del litio: desarrollo reciente y proyecciones al 2035*, Santiago de Chile: s.n.

Dosi, G., 1982. Technological paradigms and technological trajectories. *Research Policy*.

Espacio Público, 2024. *Litio: recomendaciones para la gobernanza de salares en Chile*, s.l.: s.n.

Gao, T., Fan, N., Chen, W. & Dai, T., 2023. Lithium extraction from hard rock lithium ores (spodumene, lepidolite, zinnwaldite, petalite): Technology, resources, environment and cost. *China Geology*, Volumen 6, pp. 137-153.

Gielen, D. & Lyons, M., 2022. *Critical materials for the energy transition: Lithium*, International, Abu Dhabi: IRENA.

International Energy Agency, 2021. *The role of critical minerals in clean energy transition*, s.l.: IEA.

International Energy Agency, 2023. *Critical Minerals Market Review*, s.l.: IEA.

Jiménez, D. & Sáez, M., 2022. *Agregación de valor en la producción de compuestos de litio en la región del triángulo del litio*, Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

Jorrat, M., 2022. *Renta Económica, Régimen Tributario y Transparencia Fiscal de la Minería del Litio en Argentina, Bolivia y Chile*, s.l.: CEPAL.

Kelly, J., Wang, M., Dai, Q. & Winjobi, O., 2021. Energy, greenhouse gas, and water life cycle analysis of lithium carbonate and lithium hydroxide monohydrate from brine and ore resources and their use in lithium ion battery cathodes and lithium ion batteries. *Resources, Conservation & Recycling*, Volumen 174.

Liu, H. & Azimi, G., 2022. Production of Battery Grade Lithium Hydroxide Monohydrate Using Barium Hydroxide Causticizing Agent. *Resources, Conservation & Recycling*, Issue 179.

McKinsey and Company, 2023. *Australia's potential in the lithium market*, s.l.: s.n.

Pietrobelli, C. & Valverde, J., 2024. (Forthcoming) Avenues to Maximizing Value Added from Critical Minerals. En: J. Jobet & T. Moerenhout, edits. *Downstream Diversification in Mineral-Rich Countries*. s.l.:Springer Nature, p. <https://www.springer.com/series/17365>.

Tran, T. & Luong, V., 2015. Chapter 3: Lithium Production Processes. En: ., A. Chagnes & J. Światowska, edits. *Lithium Process Chemistry: Resources, Extraction, Batteries and Recycling*. s.l.:Elsevier, pp. 81-124.

Valverde-Carbonell, J. & Micco, A., 2024. Does the energy transition open a green window of opportunity in the mineral processing industry? The cases of the copper and lithium industries.. *MERIT Working Papers, United Nations University - Maastricht Economic and Social Research Institute on Innovation and Technology*, Issue 2024-005.

Valverde-Carbonell, J., Pietrobelli, C. & Menéndez, M., 2024. Minerals' criticality and countries' mining competitiveness: Two faces of the same coin. *Resources Policy*, Volumen 98.

World Bank Group, 2020. *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*, WDC: World Bank Publications.



WWW.ESPACIOPUBLICO.CL



[@EsPublicoCL](https://twitter.com/EsPublicoCL)



[espaciopublicochile](https://www.facebook.com/espaciopublicochile)



[espaciopublicochile](https://www.instagram.com/espaciopublicochile)