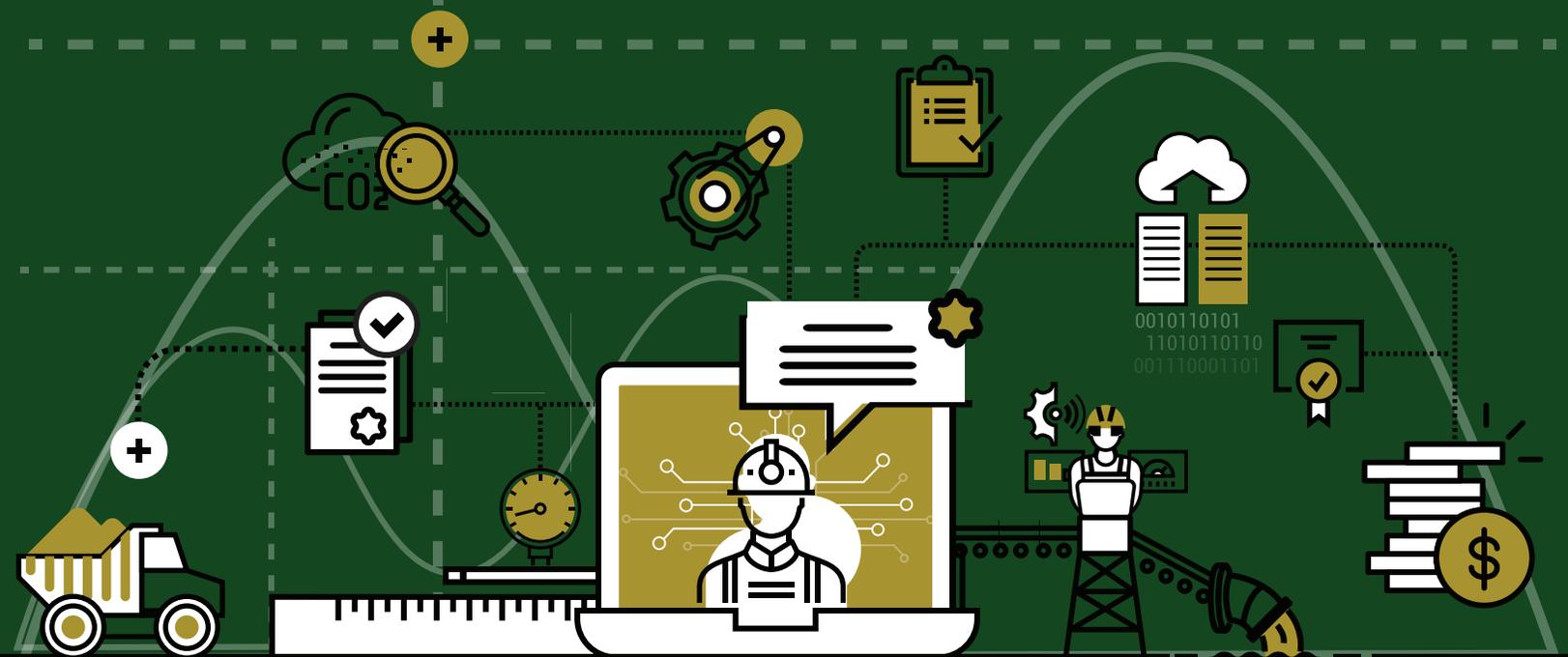


Agregación de valor en la producción de compuestos de litio

en la región del triángulo del litio

Daniel Jiménez y Martín Sáez



NACIONES UNIDAS

CEPAL



cooperación
alemana

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

 www.cepal.org/es/publications

 www.cepal.org/apps

Documentos de Proyectos

Agregación de valor en la producción de compuestos de litio en la región del triángulo del litio

Daniel Jiménez
Martín Sáez



Este documento fue preparado por Daniel Jiménez, Consultor de la Unidad de Recursos No Renovables de la División de Recursos Naturales de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), y por Martín Sáez, Jefe de Investigación de iLiMarkets, en el marco de las actividades de la mencionada División y del programa Cooperación Regional para la Gestión Sustentable de los Recursos Mineros en los Países Andinos, ejecutado por la CEPAL junto con la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) y financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania. Los autores agradecen los valiosos comentarios de Pablo Chauvet, Mauricio León, José Luis Lewinsohn y Orlando Reyes, funcionarios de la CEPAL.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización o las de los países que representa.

Publicación de las Naciones Unidas
LC/TS.2022/87
Distribución: L
Copyright © Naciones Unidas, 2022
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.22-00263

Esta publicación debe citarse como: D. Jiménez y M. Sáez, "Agregación de valor en la producción de compuestos de litio en la región del triángulo del litio", *Documentos de Proyectos* (LC/TS.2022/87), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2022.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Introducción	7
I. Litio	9
A. Litio en la naturaleza	9
B. Productos y usos del litio	10
C. Proyección de demanda	12
D. Proyección de oferta	12
E. Balance global oferta y demanda	14
F. Amenazas al litio	14
G. Productores y proyectos en el triángulo del litio y su relevancia	15
II. El litio en la cadena de valor de la batería de ion litio	17
A. Cadena de valor del litio	18
1. Producción de químicos de litio a partir de salmuera	18
2. Producción de concentrados de litio a partir de minerales	18
3. Producción de cátodos	20
4. Producción de celdas y baterías	22
B. Valor litio en el cátodo	24
C. Uso del litio en baterías y su valor relativo	25
D. Uso del litio en EV y su valor relativo	25
III. Oportunidades y desafíos técnicos y tecnológicos	27
A. Procesos de extracción convencionales	27
1. Concentración solar	27
2. Refinación convencional a carbonato de litio	28
3. Refinación convencional a hidróxido de litio	28
B. Recursos y reservas: composición química	29
C. Tecnologías de extracción directa de litio	30

D.	Impacto ambiental	31
E.	Reciclaje.....	33
IV.	Oportunidades y desafíos económicos	37
A.	Producción de químicos de litio	37
1.	Gasto de capital y gastos operativos.....	37
2.	Costo total de producción.....	40
3.	Comparación con producción desde minerales	41
B.	Curva de costos genérica.....	42
C.	Financiamiento de proyectos	45
V.	Oportunidades y desafíos institucionales	47
A.	Chile.....	47
1.	Litio y su legislación.....	47
2.	Albemarle y SQM	49
3.	Proceso de licitación CEOL 2021.....	50
B.	Argentina	51
1.	Litio y su legislación.....	51
C.	Bolivia (Estado Plurinacional de)	51
1.	Litio y su legislación.....	51
D.	Oportunidades	52
1.	Modelos económicos comparativos; efecto impuestos y royalties	52
2.	Lineamiento de políticas públicas para la agregación de valor	55
VI.	Conclusiones y recomendación	57
	Bibliografía.....	59
	Anexos	61
	Anexo 1	62
	Anexo 2	63
	Anexo 3	66
	Cuadros	
Cuadro 1	Fuentes de litio	9
Cuadro 2	Proyectos en distinto grado de desarrollo en el triángulo del litio, 2021.....	16
Cuadro 3	Intensidad de químicos por tipo de cátodo	24
Cuadro 4	Gasto de capital concentración de LiCl	38
Cuadro 5	Gastos operativos concentración de LiCl	38
Cuadro 6	Gasto de capital producción de carbonato de litio	38
Cuadro 7	Gastos operativos producción de carbonato de litio	39
Cuadro 8	Gasto de capital producción de hidróxido de litio.....	39
Cuadro 9	Gastos operativos producción de hidróxido de litio.....	39
Cuadro 10	Precio de inflexión entre grupos de Royalty	49
Cuadro 11	Condiciones de los contratos de ALB y SQM.....	50
Cuadro A1	Análisis de sensibilidad por etapa de la cadena de valor.....	62
	Gráficos	
Gráfico 1	Demanda por uso, 2020-2030	11
Gráfico 2	Mundo: proyección de demanda de litio, 2020-2030.....	12
Gráfico 3	Mundo: oferta de litio, 2021.....	13

Gráfico 4	Mundo: proyección de oferta de litio, 2020-2030	13
Gráfico 5	Precios de litio	15
Gráfico 6	Oferta de litio	16
Gráfico 7	Mundo: oferta de litio de salares por país, 2021 y 2030	18
Gráfico 8	Mundo: oferta de litio de minerales por país	19
Gráfico 9	Participaciones de mercado de salares, 2021	19
Gráfico 10	Participaciones de mercado de minerales, 2021.....	20
Gráfico 11	Participaciones de mercado cátodos, 2021	20
Gráfico 12	Evolución tecnologías de cátodo en uso de litio	21
Gráfico 13	Participación de mercado de baterías de litio, 2019	22
Gráfico 14	Valor relativo del litio en el cátodo, 2021	24
Gráfico 15	Composición de costos de una batería, 2021	25
Gráfico 16	Composición de costos de un EV, 2021	26
Gráfico 17	Recursos de litio provenientes de salares	29
Gráfico 18	Recursos de litio provenientes de salares	30
Gráfico 19	Tasa de extracción de salmuera	31
Gráfico 20	Emisiones de gases invernadero	32
Gráfico 21	Consumo de energía	32
Gráfico 22	Consumo de agua fresca.....	33
Gráfico 23	Mundo proyección de producción de litio reciclado	34
Gráfico 24	Reciclaje de litio.....	35
Gráfico 25	Costo de producción total de Li_2CO_3 desde salmuera	40
Gráfico 26	Costo de producción total de LiOH desde salmuera.....	41
Gráfico 27	Costo de producción total Li_2CO_3	42
Gráfico 28	Costo de producción total LiOH	42
Gráfico 29	Gastos operativos por recurso en la producción de Li_2CO_3	43
Gráfico 30	Gastos operativos por recurso en la producción de LiOH	44
Gráfico 31	Gastos operativos y de capital por recurso en la producción de Li_2CO_3	45
Gráfico 32	Gastos operativos y de capital por recurso en la producción de LiOH	45
Gráfico 33	Inversiones de capital a proyectos de litio	46
Gráfico 34	Royalty efectivo minero grupo 1	48
Gráfico 35	Royalty efectivo minero grupo 2	48
Gráfico 36	Royalty específico al litio	49
Gráfico 37	Composición del VPN de un proyecto de litio en Chile	52
Gráfico 38	Composición del VPN de un proyecto de litio en Argentina, Salta	53
Gráfico 39	Composición del VPN de un proyecto de litio en Bolivia (Estado Plurinacional de)	54
Gráfico 40	Composición del VPN de un proyecto de SC6 en Australia.....	54
Gráfico A1	Proyecto en Chile	66
Gráfico A2	Proyecto en Argentina.....	66
Gráfico A3	Proyecto en Bolivia (Estado Plurinacional de)	67
Gráfico A4	Proyecto en Australia	67
Diagramas		
Diagrama 1	Árbol de litio y sus usos por químico	11
Diagrama 2	Cadena de valor de la batería.....	17
Diagrama 3	Producción futura de baterías en la Unión Europea	23
Diagrama 4	Producción futura de baterías en Estados Unidos	23
Diagrama 5	Proceso de extracción de litio	27

Diagrama 6	Modelo de reciclaje de litio	34
Diagrama A1	Salmuera a carbonato de litio	63
Diagrama A2	Salmuera a hidróxido de litio	63
Diagrama A3	Minerales a concentrado de espodumeno	64
Diagrama A4	Espodumeno a carbonato de litio	64
Diagrama A5	Espodumeno a hidróxido de litio	65

Mapa

Mapa 1	Mundo: ubicación de yacimientos de litio	10
--------	--	----

Introducción

Con la aparición de las baterías y la necesidad del mundo de alejarse de los motores de combustión interna, ciertos elementos y compuestos químicos han ganado mayor notoriedad y volumen en los mercados internacionales. Uno de ellos es el litio, que gracias a la electromovilidad y al almacenamiento de energía estacionario ha tenido un crecimiento de demanda cuántico.

Debido a este crecimiento, los países que cuentan con recursos minerales de litio tienen la posibilidad de generar ingresos con la extracción del mineral y producción de concentrados o químicos de litio usados en la producción de baterías. Los principales concentrados y químicos de litio comercializados actualmente son: espodumeno, cloruro de litio, carbonato de litio e hidróxido de litio.

El litio es abundante en la naturaleza. Sin embargo, geográficamente en el límite entre Chile, Argentina y el Estado Plurinacional de Bolivia¹, se encuentran los recursos de litio cuyo costo de extracción es potencialmente el más bajo del mundo, esta es la zona denominada el “triángulo del litio”. Estos países en desarrollo buscan generar valor dentro de la cadena de valor del litio para aumentar los ingresos provenientes de éste.

Para la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) es considerado de vital importancia entender que opciones existen para una mayor captura de valor en la producción del litio mediante distintos compuestos de litio como el carbonato, el hidróxido u otro.

Para esto, el presente documento busca analizar la potencialidad de agregación de valor en la elaboración, a partir de yacimientos en salares en el triángulo del litio (Argentina, Bolivia y Chile), de diferentes compuestos de litio (carbonato de litio e hidróxido de litio u otro con potencial) de manera técnica, económica e institucional, dando cuenta de las principales ventajas y desventajas en relación con la tecnología, costos de proceso, inversiones e incentivos a partir de los recursos existentes en la región y comparar estos con la producción de químicos de litio a partir de recursos minerales en roca.

¹ En el resto del documento se utilizará el nombre de “Bolivia” para hacer referencia al Estado Plurinacional de Bolivia.

El estudio está dividido en 6 capítulos:

En el primer capítulo, se hace una introducción general al litio describiendo los recursos de litio, sus usos y a partir de ello, entender las proyecciones de las curvas de oferta y demanda. Además, se presentan las amenazas previsible para la batería de ion litio (LIB), como las baterías de ion sodio o celdas de hidrógeno, o la posibilidad de reciclaje del litio. Finalmente, se hace referencia a la región de triángulo del litio para destacar sus reservas y posibilidades de producción presente y futura, analizando productores actuales y proyectos en desarrollo.

En el segundo capítulo se analiza la posición del litio dentro de la cadena de valor de la LIB para esclarecer su valor. Para este propósito, se presenta la cadena de valor con la ubicación geográfica actual y futura (proyectada al 2030), los principales actores en cada uno de los eslabones; las formas de representación del litio en concentrados, químicos, cátodos, celdas y vehículos eléctricos (EV por sus siglas en inglés) y, el valor monetario del litio relativo dentro de cada eslabón de la cadena.

En tercer lugar, para entender y examinar las oportunidades y desafíos técnicos que existen, se revisan distintos recursos y reservas para comparar su composición química y analizar las implicancias productivas de ello. Además, se exponen los distintos procesos de extracción de litio incluyendo concentración solar, tecnologías de extracción directa de litio (DLE) y procesos de refinación/conversión convencionales de cloruro de litio (LiCl) a carbonato de litio (Li_2CO_3) e hidróxido de litio (LiOH), extraídos a partir de salmueras y desde roca, para entender sus implicancias, ventajas, dificultades y posible aplicación en el triángulo del litio. Por último, se incluyen aspectos ambientales como el uso de energía, agua y emisiones de carbono, comparando las externalidades de la extracción desde el macizo rocoso versus las salmueras.

En el cuarto capítulo, se presentan las oportunidades y desafíos económicos, la evaluación se basa en los principales costos para la producción de litio, como son los costos de capital (CAPEX) y costos de operación (OPEX) en cada uno de los procesos, incluyendo en detalle los componentes más importantes, comparando el caso de extracción de litio de salmuera en contraste con minerales de roca, luego, mediante una curva de costos general, entender la posición de cada uno de los minerales en la producción de Li_2CO_3 y LiOH. Dentro del marco económico, un desafío importante es la necesidad de financiamiento de los proyectos y como conseguirlo, para esto, se presentan una línea temporal con distintos ejemplos.

En cuanto al quinto capítulo, para los desafíos y oportunidades institucionales se presenta la situación actual legislativa con respecto al litio en los 3 países que conforman el triángulo: Argentina, Bolivia (Est. Plurinacional de) y Chile. Para el caso de Chile específicamente, se ahonda en el desarrollo del Salar de Atacama y su relación con Corfo. En base a esta información se trata de dilucidar posibles oportunidades relacionadas con la legislación en la explotación del litio y proponer lineamientos para políticas públicas. Además, se presenta un modelo económico simple para dilucidar la competitividad de la producción de LiOH o Li_2CO_3 en la región, comparando los efectos de royalties e impuestos chilenos, argentinos y bolivianos entre ellos y contra un proyecto de mineral en Australia.

Finalmente, se expone un Resumen y Conclusiones de los hallazgos del estudio y sus implicancias en la agregación de valor en la producción de LiOH o Li_2CO_3 en la región.

I. Litio

A. Litio en la naturaleza

El litio es un elemento perteneciente al grupo de los metales, que se encuentra en la naturaleza en la forma de minerales, en las salmueras de los salares, en salmueras geotermales, salmueras de campos petroleros o gas y sedimento de arcillas entre otros.

En la actualidad la extracción de litio a nivel industrial se realiza desde salares y ciertos minerales, en su mayoría espodumeno, pero también lepidolita (véase el cuadro 1).

Cuadro 1
Fuentes de litio

		Ubicación	Concentración de litio
Salmueras	Salares	(Chile, Argentina, Bolivia, China)	100-1600 Li Mg/L
	Salmueras geotermales	(USA, Alemania)	50-200 Li Mg/L
	Salmueras de campos petrolíferos	(USA)	50-200 Mg/L
Minerales	Espodumeno	(Australia)	0,5-2,5% Li ₂ O
	Lepidolita	(USA, Canadá)	0,5-1,2% Li ₂ O
	Jadarita	(Serbia)	1,0-1,9% Li ₂ O
	Petalita	(África)	0,5-2,5% Li ₂ O
Arcillas		(USA, México)	0,1-0,8% Li ₂ O
Agua de mar			0,1-0,2 Li Mg/L

Fuente: Elaboración propia.

En el mapa 1 se pueden apreciar los lugares donde se concentran los yacimientos de litio. En el caso de minerales, estos se concentran mayormente en Australia, China, Brasil y América del Norte. En el caso de los salares, estos se concentran en la región del triángulo del litio (Chile, Argentina, Estado Plurinacional de Bolivia), China y en menor medida en Estados Unidos.

Mapa 1
Mundo: ubicación de yacimientos de litio



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

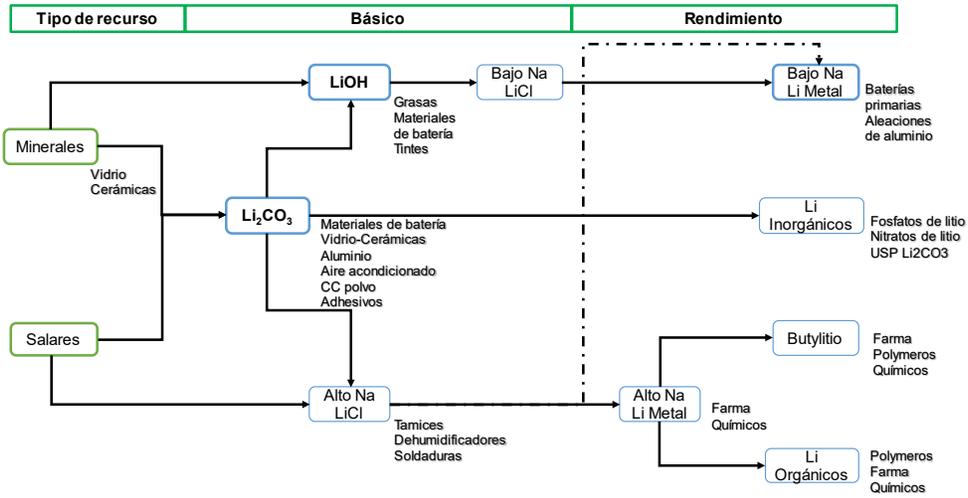
B. Productos y usos del litio

El litio tiene diversos usos. El concentrado de espodumeno es usado en la producción de vidrios y cerámicas, el carbonato de litio es usado en la industria del aluminio, cerámicas, vidrios y adhesivos, pero su principal uso es en la industria de baterías, siendo un componente crítico en el cátodo de las baterías recargables de LIB. Parecido es el caso del hidróxido de litio que se utiliza en grasas y tinturas, pero su uso principal es en baterías.

Existen otros químicos de litio, pero no representan más del 5% de la demanda total, merece la pena nombrar al litio metálico que se espera se utilice en baterías de estado sólido en el futuro.

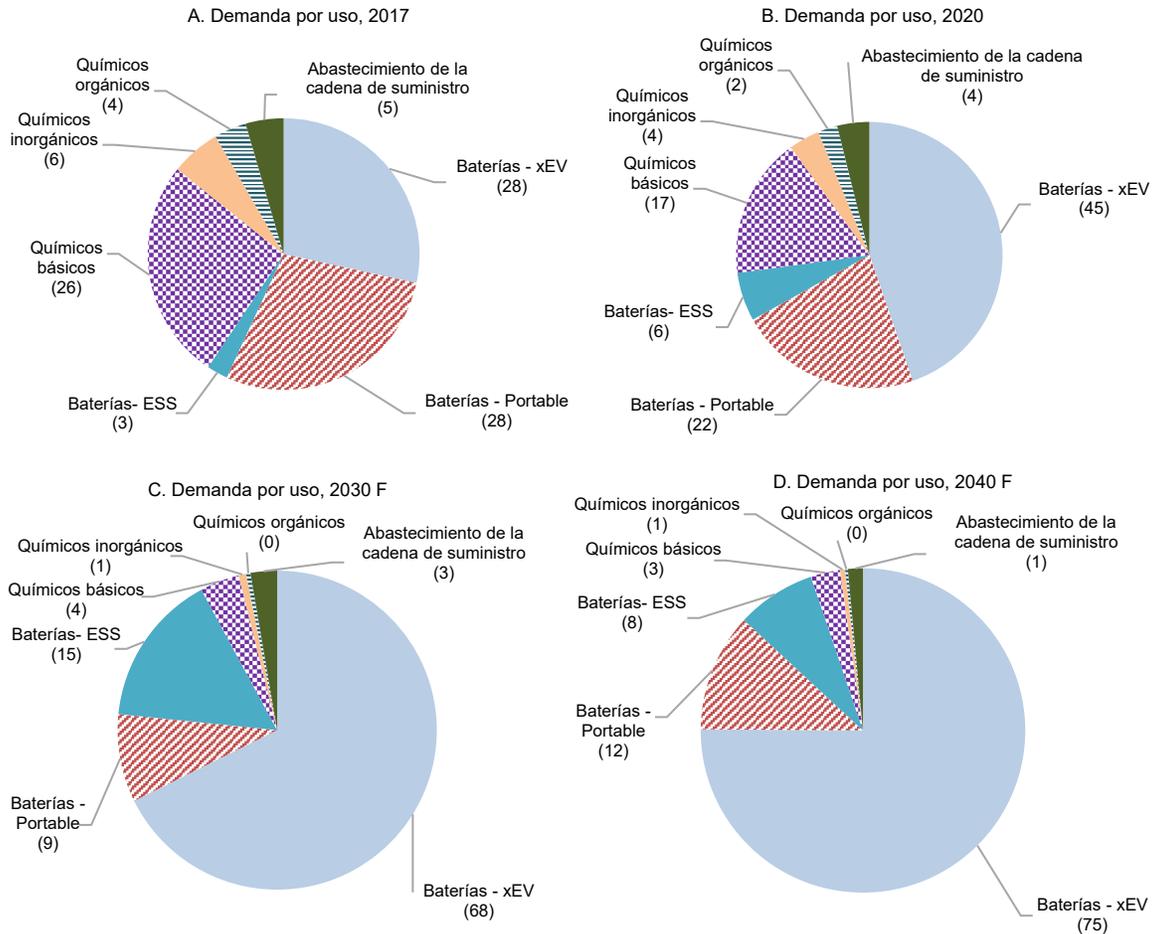
Cabe destacar que el consumo de litio en batería ha crecido exponencialmente y es hoy en día el motor del crecimiento del consumo de litio, en el gráfico 1 se puede apreciar como a través del tiempo se espera que el segmento de baterías alcance hasta 95% en 2040, en 2020 se aproxima que un 73% de la demanda fue en baterías. En el diagrama 1 se resume lo explicado.

Diagrama 1
Árbol de litio y sus usos por químico



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 1
Demanda por uso, 2020-2030
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

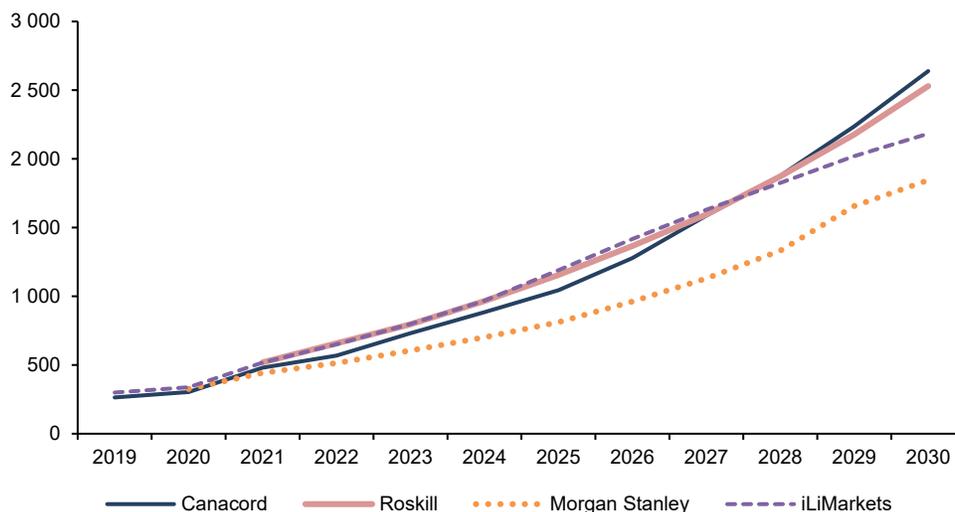
C. Proyección de demanda

Como se adelantó en la sección anterior, la industria más demandante de litio es la de baterías, siendo además la con mayores expectativas de crecimiento dentro de todas las aplicaciones. La mayor parte de los expertos coincide en que el crecimiento compuesto anual de la demanda de litio en baterías estará entre un 20% y un 30% para esta década (2020-2030). Cabe destacar que sistemáticamente a través del tiempo se ha subestimado la demanda de litio; en el año 2021 la demanda de litio estuvo alrededor de los 450-500 LCE kMT (Thousand Metric Tonnes of Lithium Carbonate Equivalent, por sus siglas en inglés) (iLiMarkets, 2021).

En este trabajo se usa como demanda base un modelo propio de iLiMarkets que presenta una demanda de 1200 kMT LCE al 2025 y de 2200 kMT LCE al 2030.

El gráfico 2 refleja cómo esta proyección se compara con las proyecciones elaboradas por distintos bancos de inversión y consultoras. Si bien es cierto existe una dispersión, que naturalmente crece con el tiempo, el consenso es que habrá un crecimiento muy fuerte de demanda.

Gráfico 2
Mundo: proyección de demanda de litio, 2020-2030
(En miles de toneladas)



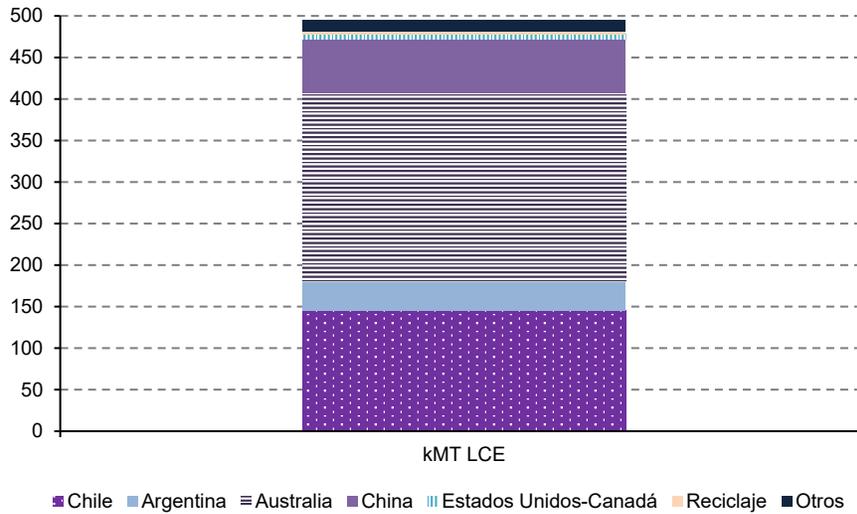
Fuente: Elaboración propia, estudios varios.

D. Proyección de oferta

El año 2021 la oferta (producción) mundial de litio alcanzó niveles de alrededor de 500 kMT LCE, proviniendo el 46% de minerales australianos, el 36% de salmueras sudamericanas, y el saldo desde China y otras áreas de menor producción. Los principales productores a nivel global durante el 2021 fueron Albemarle (ALB) y SQM con un 21% y 20% de participación respectivamente, seguidos por Tianqi, Ganfeng, y Pilbara con un 11%, 10% y 8%. La mayoría de los productores tienen o están desarrollando, una red de múltiples activos productivos en distintas geografías, tanto en extracción como refinación.

Hacia el año 2030 se espera un crecimiento sostenido de Argentina gracias al avance de nuevos proyectos, al igual que Estados Unidos, sin embargo, Australia se mantendría en primer lugar. Al igual que en la demanda, en la oferta hay bastante dispersión dentro de los pronósticos de expertos.

Gráfico 3
Mundo: oferta de litio, 2021
 (En miles de toneladas)

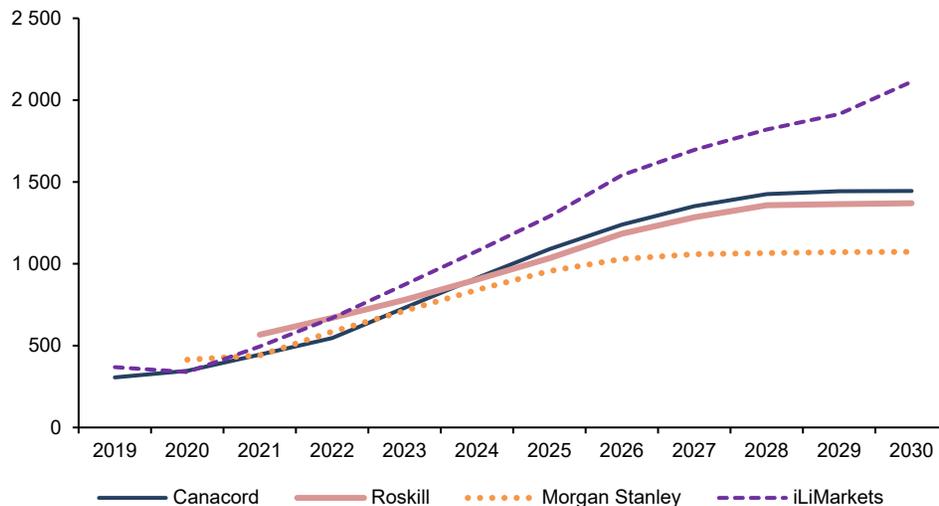


Fuente: Elaboración propia.

En el presente documento se utiliza un modelo propio que presenta una oferta de 1300 kMT LCE al 2025 y de 2100 kMT LCE al 2030. Sin embargo, es muy probable que para el 2030 la oferta sea más grande pues el horizonte de tiempo permite el desarrollo de proyectos que hoy están en etapas tempranas.

El gráfico 4 muestra cómo se compara con las distintas proyecciones.

Gráfico 4
Mundo: proyección de oferta de litio, 2020-2030
 (En miles de toneladas)



Fuente: Elaboración propia, estudios varios, Roskill, 2021, Canacord 2021, Morgan Stanley 2021.

E. Balance global oferta y demanda

A pesar de la gran dispersión en las proyecciones, hay una constante que se mantiene; le será difícil a la oferta seguir los ritmos de crecimiento esperados para la demanda de la mano de los vehículos eléctricos que a su vez ha sido impulsada por la necesidad de moverse hacia tecnologías más sostenibles. En el año 2021 ya se demandaron más unidades de litio de las producidas durante ese año. Para suplir el déficit será necesario que la gran mayoría de los proyectos anunciados llegue a la etapa de comercialización, he incluso más, proyectos que no están visualizados hoy deberán explorarse, construirse y operar.

En un mayor horizonte de plazo la situación tampoco mejora, si bien hay un sin número de proyectos, la mayoría son denominados "greenfield", lo cuales deben pasar por procesos y permisos para ser desarrollados lo que conlleva riesgos de tiempos y ejecución por lo que pondrían no estar en operación cuando la demanda lo requiera.

F. Amenazas al litio

Si bien los expertos coinciden en que está será una gran década para el litio debido a las baterías de ion-litio, está no está exenta de amenazas, los altos precios que se están experimentando en las materias primas necesarias como el litio, cobalto, níquel dan un espacio a que se den incentivos para acelerar el desarrollo de tecnologías sustitutas y que éstas tomen un espacio en el mercado.

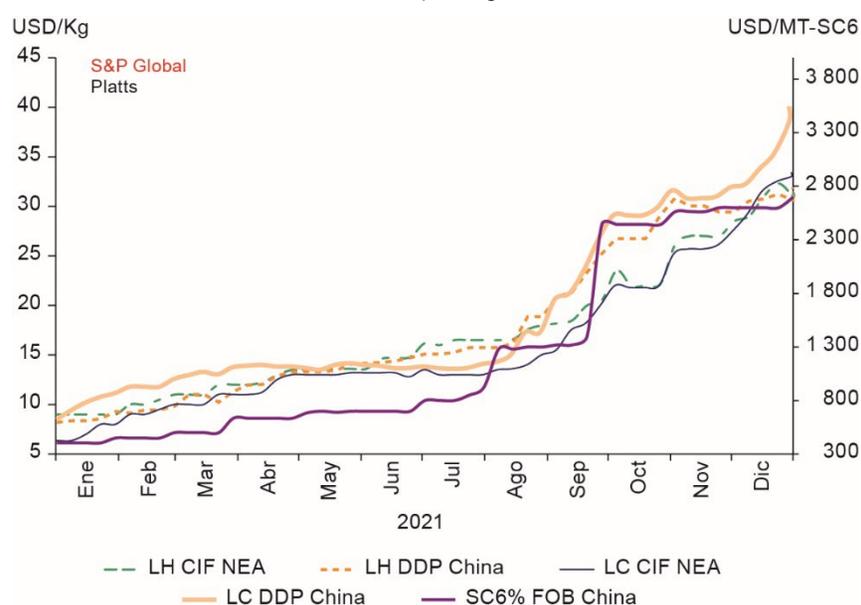
CATL, empresa China considerada el mayor productor de baterías a nivel global y líder en desarrollo tecnológico de éstas, anunció su batería de ion sodio en julio de 2021 que alcanza densidades energéticas cercanas y a un costo menor que una batería de fosfato de hierro y litio (LFP, nombre en inglés), en base a Li y de gran crecimiento esperado. Se espera que la batería de ion sodio 2022 ya se comience a utilizar en almacenamiento de energía estacionario y partir del 2024 a vehículos eléctricos.

Y aunque pareciera que por el momento las tecnologías de las celdas de combustible de hidrógeno están perdiendo la carrera tecnológica con la LIB, un posible alto costo de esta última podría llevar a un renacer de las primeras.

Otra amenaza es la apuesta del mercado por baterías más chicas (menos contenido de litio) a cambio de una amplia red de estaciones de carga de alta velocidad. A medida que la posibilidad de cargar el auto se hace más exequible y rápida, la necesidad de tener una batería de larga duración (y más costosa) se hace menos atractiva.

Finalmente, no se puede dejar de ver la amenaza que para la industria de la minería litio representa el reciclaje de litio. En la medida que baterías empiecen a ser reemplazadas una vez finalizada la vida útil, el litio será recuperado lo cual significa que, por cada unidad de litio recuperada, será necesario extraer menos unidades a partir de recursos mineros.

Gráfico 5
Precios de litio
(En dólares por kilogramo)



Fuente: Elaboración propia, data de S&P Global Platts.

Nota: LH CIF NEA: Precio Hidróxido de litio Japón, República de Corea, LH DPP China: Precio hidróxido de litio China Delivery Duty Paid, LC: Precio Carbonato de Litio, SC6% FOB China: Precio Free on board China espodumeno al 6%.

G. Productores y proyectos en el triángulo del litio y su relevancia

Dentro de América del Sur se encuentra el 53% de las reservas mundiales de litio (USGS, 2021). El triángulo del litio se caracteriza por ser una zona geográfica que presenta las mayores concentraciones de litio en salares del norte de Chile y Argentina y la zona suroeste de Bolivia (Estado Plurinacional de). Cabe destacar que Brasil también tiene depósitos de litio, pero en forma de mineral de espodumeno.

Dentro de la región hay 4 empresas que ya extraen y comercializan compuestos de litio. En Chile están la Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) y Albemarle (ALB) en el Salar de Atacama, mientras que en Argentina se encuentran Livent (LTHM) y Orocobre (ORE) en salar Hombre Muerto y Olaroz respectivamente. Si bien Bolivia hasta el día de hoy no posee producción comercial, desde el año 2017 existe una empresa estatal llamada Yacimientos de Litio Boliviano (YLB) que viene a tratar de revitalizar los fallidos intentos de producción de litio en Bolivia, pero sin mucho éxito hasta el momento.

Si bien son una cantidad reducida de actores, la capacidad de producción futura de la región no ha pasado desapercibida; hay numerosos proyectos de litio desde fase de exploración que esperan estar produciendo antes de 2030 (véase el cuadro 2). Argentina posee la mayor cantidad de proyectos, en su mayoría concentrados en las provincias de Salta y Catamarca.

En Chile se encuentran solo un par de proyectos siendo el más próximo el proyecto Salar Blanco en el salar de Maricunga de Lithium Power International y CODELCO. En el caso de Bolivia el único proyecto visualizado actualmente es el de Uyuni.

Si bien en la región se observa prometedor el futuro en términos de proyectos, dentro del contexto mundial la región podría caer en términos relativos de proyectos en desarrollo con respecto a otras, en 2021 un 37% de litio consumido provino de la región, mientras que para el 2030 se espera que sea un 32%.

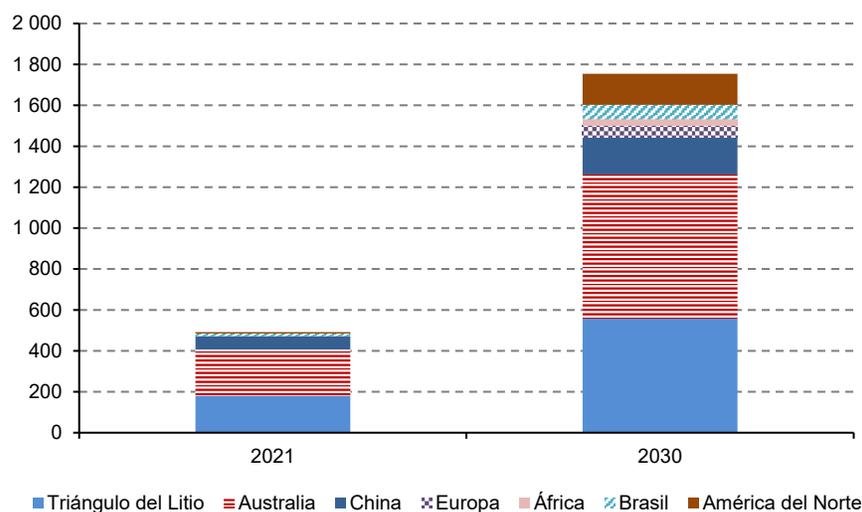
Cuadro 2
Proyectos en distinto grado de desarrollo en el triángulo del litio, 2021

Salar	País	Compañía	Contenido de Li	Relación magnesio	Relación sulfato	LCE
			mg/l	y litio	y litio	kTM
Atacama	Chile	SQM	1 600	6,3	7,5	89 426
Maricunga	Chile	LPI/Codelco	1 170	7,0	16,3	2 100
La Isla	Chile	Vecciola	860	6,6	5,8	4 871
Pedernales	Chile		400	7,1	11,9	5 067
Uyuni	Bolivia		424	18,6	24,3	46 547
Rincón	Argentina	Rincón Salar	403	9,2	30,8	7 900
Rincón	Argentina	Argosy	325	8,0	55,4	245
Llullaillaco	Argentina	Ganfeng	320	14,1	50,0	2 810
Antofalla	Argentina	Trendix	350			800
Pozuelos	Argentina	Lítica Pluspetrol LSC	509	5,7	17,3	2 308
Pastos Grandes	Argentina	Lítica Pluspetrol LSC	467	6,4	21,0	1 246
Pastos Grandes	Argentina	Centaur Resources	400	6,8	20,6	1 490
Pastos Grandes	Argentina	Millennial Lithium	439	6,2	18,8	4 918
Diablillos	Argentina	Tíbet Summit	556	3,7	13,5	4 950
Hombre Muerto	Argentina	Allkem	732	1,4	14,0	7 233
Hombre Muerto	Argentina	Posco	780	1,4	13,2	4 100
Hombre Muerto	Argentina	NRG Metals	756	2,4	12,2	571
Hombre Muerto	Argentina	Livent	747	1,4	13,8	390
Hombre Muerto	Argentina	Galan Lithium	946	1,6	15,3	2 300
Cauchari	Argentina	LAC	592	2,7	32,4	24 576
Olaroz	Argentina	Orocobre	690	2,4	21,7	6 400
Cauchari	Argentina	Advantage Lithium	450	2,6	49,4	4 800
Kachi	Argentina	Lake Resources	300	4,2		4 400
Aparejos	Argentina	Portofino Resources	224	0,8		242
Tres Quebradas	Argentina	Neolithium	601	3,2	0,6	6 922

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de los estudios PEA, PFS, DFS de los proyectos.

Nota: PEA = Preliminary Economic Assessment; PFS = Pre-Feasibility Study; DFS = Definitive Feasibility Study. El magnesio y el sulfato son considerados impurezas, a mayor número es menos atractivo un salar.

Gráfico 6
Oferta de litio
(En miles de toneladas)



Fuente: Elaboración propia.

II. El litio en la cadena de valor de la batería de ion litio

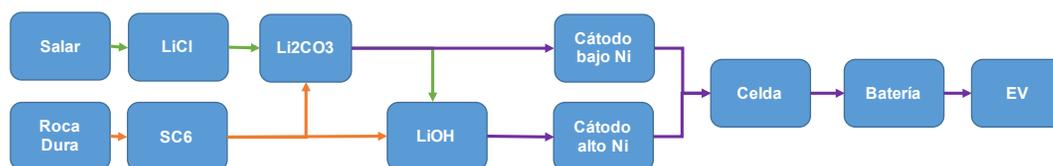
Para tener una comprensión acertada del valor del litio en el mercado, se debe entender su cadena de valor y suministro hasta algún producto final, entonces, se toma el caso del vehículo eléctrico, debido a que será el mercado que consumirá más del 80% de la producción de litio al 2030 a nivel mundial.

El proceso de producción de litio a partir de salmueras considera la producción de un concentrado de cloruro de litio (LiCl), que luego es convertido a través de un proceso de carbonización en carbonato de litio (Li_2CO_3) para ser, finalmente, comercializado para la producción de cátodos de bajo níquel. Alternativamente, y a un costo incremental, se puede producir hidróxido de litio (LiOH) para cátodos de alto níquel.

La producción de litio a partir de minerales se realiza mediante los procesos de molienda, separación vía DMS (dense media separation), luego, la calcinación y acidificación del mineral para producir una solución acida de sulfato de litio (Li_2SO_4), esta puede ser reaccionada para producir carbonato de litio o hidróxido de litio a un costo muy similar. Cabe destacar que, a partir de la producción de minerales, no es necesario producir carbonato de litio para luego producir hidróxido de litio, es decir, no hay un costo incremental. Lo que no significa que sea el de menor costo.

Al igual que en el caso de los salares, los químicos de litio pasan a cátodos para ensamblar las celdas que irán en las baterías del vehículo eléctrico (véase el diagrama 2).

Diagrama 2
Cadena de valor de la batería



Fuente: Elaboración propia.

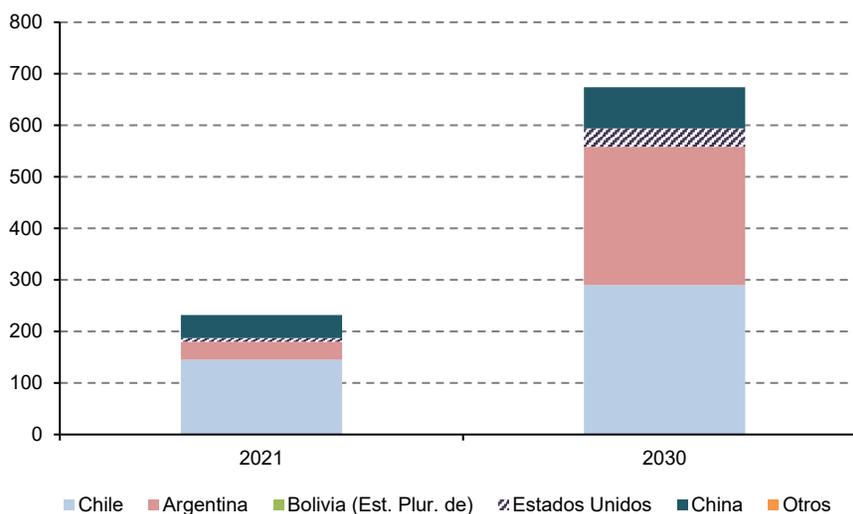
A. Cadena de valor del litio

1. Producción de químicos de litio a partir de salmuera

En el año 2021 el 73% de la producción mundial de químicos de litio a partir de salmueras se concentraba en 4 productores del triángulo del litio: SQM y Albemarle en Chile, Allkem (Orocobre) y Livent en Argentina. El resto de la producción se daba principalmente en China y en una menor medida en Estados Unidos.

Para el año 2030, se espera que la producción de químicos de litio a partir de salmueras se incremente principalmente en Argentina, aumentando de 35 kMT LCE a 268 kMT LCE. Le sigue Chile, en donde SQM y ALB podrían duplicar sus producciones actuales al 2030 debido a que sus planes de expansión presentes lo contemplan. Las proyecciones no consideran al Estado Plurinacional de Bolivia partiendo a escala comercial antes del 2030. En términos de aumentos de producción en regiones externas al triángulo del litio, se espera que China tenga un crecimiento importante debido a las mejoras tecnológicas en la recuperación de litio y ampliaciones de proyectos.

Gráfico 7
Mundo: oferta de litio de salmueras por país, 2021 y 2030
(En miles de toneladas)



Fuente: Elaboración propia.

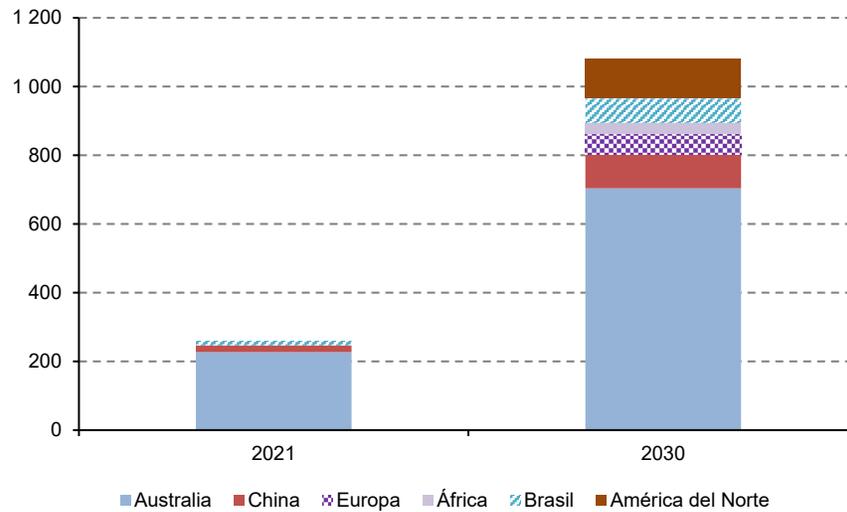
2. Producción de concentrados de litio a partir de minerales

Para el año 2021, Australia representó el 87% de la producción mundial de litio a partir de minerales. El principal productor es Talison (empresa conjunta con 50% de ALB, 25% de Tianqi y 25% de IGO) con un 42% del total, seguido por Ganfeng y Pilbara Minerals con un 19% y 16% respectivamente. El resto de la producción mundial de litio a partir de minerales es de recursos ubicados en China, donde además se refina el 100% del concentrado de litio producido en Australia a químicos de litio.

Para el año 2030 se espera que Australia aumente en forma importante su producción de concentrados de litio, y que se incorporen nuevos productores en Brasil, África, Europa y América del Norte, entre otros. De la misma forma, la refinación de estos concentrados comenzará a diversificarse geográficamente, acercándose o a las fuentes de producción de concentrado, como Australia, o en lugares de consumo de químicos de litio como Estados Unidos y Europa.

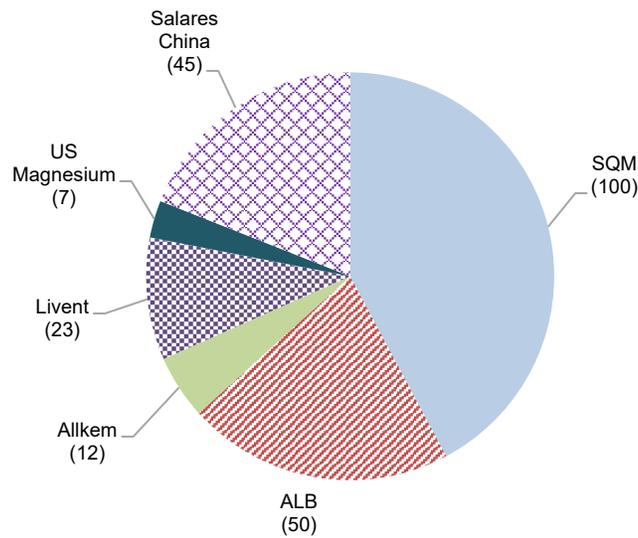
Además, se espera que comiencen a aparecer productores de litio a partir de otros tipos de minerales, particularmente arcillas. Depósitos de este tipo están siendo desarrollados en Estados Unidos y México.

Gráfico 8
Mundo: oferta de litio de minerales por país
(En miles de toneladas)



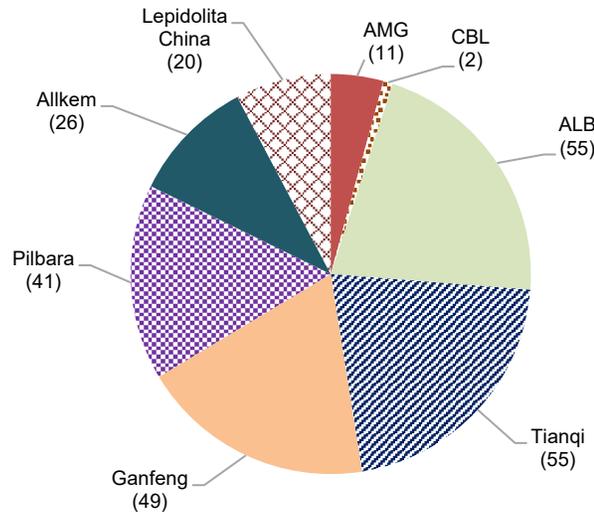
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 9
Participaciones de mercado de salares, 2021
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 10
Participaciones de mercado de minerales, 2021
(En porcentajes)

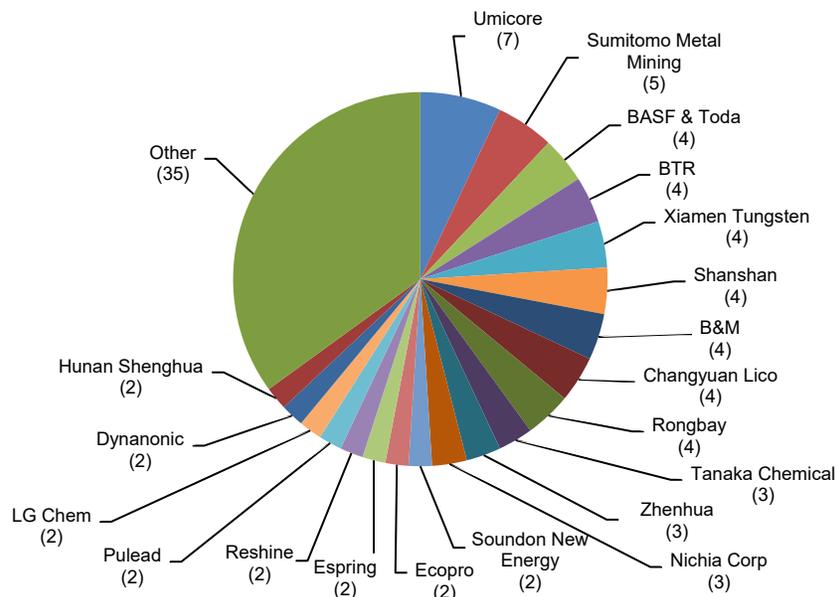


Fuente: Elaboración propia.

3. Producción de cátodos

La industria de cátodos se concentra en China, Japón y República de Corea, produciendo más de 90% del total en el mundo (Rosskill,2020). Dentro de los mayores productores se encuentran Sumitomo Chemical, Umicore, BASF, Shanshan entre otros. Vale la pena destacar que el tipo de cátodo define la intensidad de uso de litio y de químico a utilizar.

Gráfico 11
Participaciones de mercado cátodos, 2021
(En porcentajes)

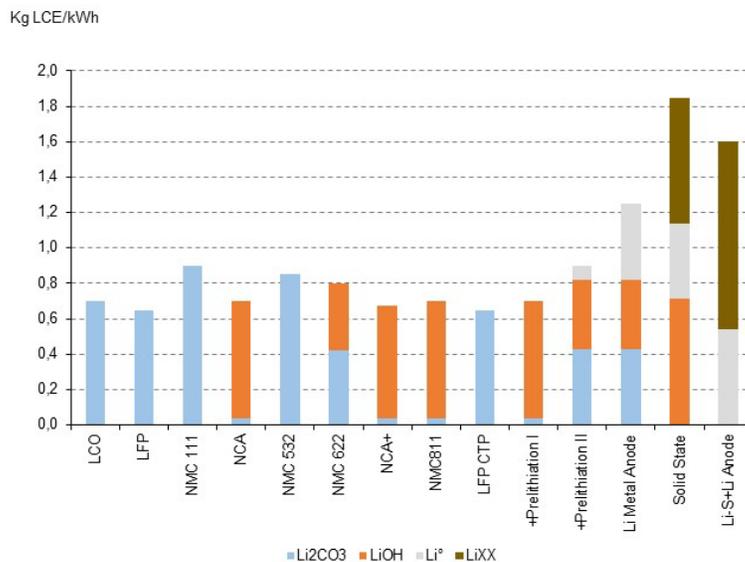


Fuente: Elaboración propia, datos de Rosskill.

La química de cátodos ha evolucionado con el tiempo buscando cada vez mayor densidad energética de la batería. Al mismo tiempo se busca la reducción de costos por lo que ha habido 3 fenómenos a destacar: la reducción del uso de cobalto, por costo, el aumento del uso del níquel, como una forma de aumentar la densidad energética y el revivir de la tecnología de LFP, de bajo costo y alta durabilidad, pero de baja densidad energética y donde se superó la deficiencia de la densidad energética, haciendo cambios a la arquitectura de la celda y su integración al chasis del vehículo.

Los desarrollos tecnológicos futuros llevarán a nuevos cambios de química, particularmente el llevar la batería a un estado sólido, es decir, sin electrolitos líquidos. Ello producirá que el litio sea incorporado en las baterías ya no como Li_2CO_3 o LiOH , sino como Li metálico.

Gráfico 12
Evolución tecnologías de cátodo en uso de litio
(Kilos de LCE por kilowattthora)



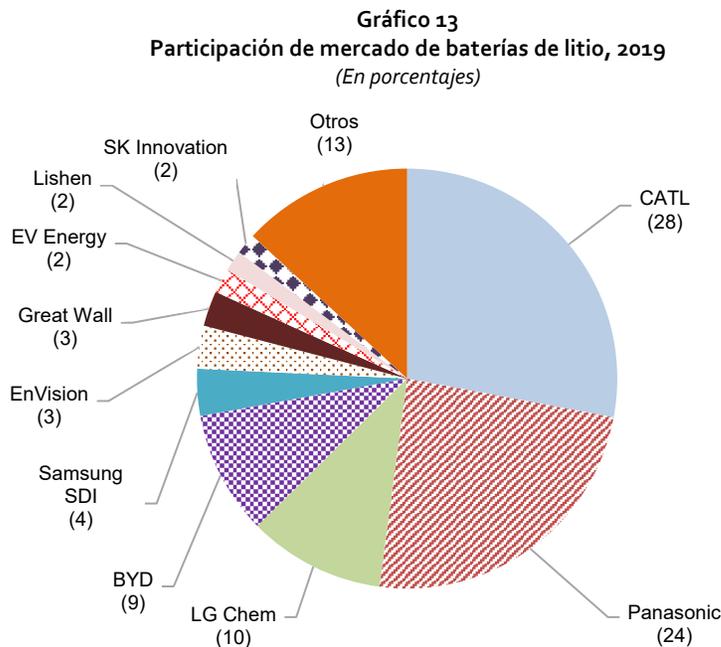
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de Albemarle Investor Day 2019, publicado el 10 de noviembre de 2019.

Nota: LCO: Lithium Cobal Oxide, LFP: Lithium Iron Phosphate, NCM, Nickel Cobalt Manganese, NCA: Nickel Cobalt Aluminium Oxide, CTP: Cell to Pack.

Si bien no se espera que al 2030 cambie el dominio asiático en la producción de cátodos mundial, si se espera que se desarrolle capacidad en la Unión Europea, como ejemplo, se tienen los proyectos de BASF en Alemania y Umicore en Polonia que deberían empezar a producir en el 2022. Además, existen algunos proyectos a futuro como EcoPro en Hungría, Northvolt en Suecia y Posco en Europa. En el caso de Estados Unidos, hay pequeños volúmenes producidos por BASF y Johnson Matthey a los que se sumará Posco, que acaba de anunciar producción en ese país. Las tensiones geopolíticas están llevando a los productores de vehículos y gobiernos occidentales a promover el acercamiento de la cadena de suministro a los centros de consumo de productos finales, como Europa y Norte América.

4. Producción de celdas y baterías

La manufacturación de celdas y baterías se concentra en un 57% en China, seguido por Japón y República de Corea con un 15% y 10% respectivamente, y luego por Estados Unidos con otro 10% (Benchmark Mineral Intelligence, 2021). En cuanto a los productores, el mayor es CATL con 28%, seguido por Panasonic 24% y LG Chem 10% (Pilbara Minerals, 2020).



Fuente: Elaboración propia, datos de Ronald Zenn, publicado en "Shipped Battery for Automotive in 2019" copilado desde SNE Research 02/2020, extraído desde Pilbara Minerals, disponible en: <http://www.pilbaraminerals.com.au/site/PDF/93f9906a-525b-4489-bd68-71f2259dac3b/CorporatePresentation>.

Para fines de la década, se espera un crecimiento sostenido de capacidad de producción de batería en Estados Unidos y Europa, acercando la cadena de suministro al lugar de producción del producto final.

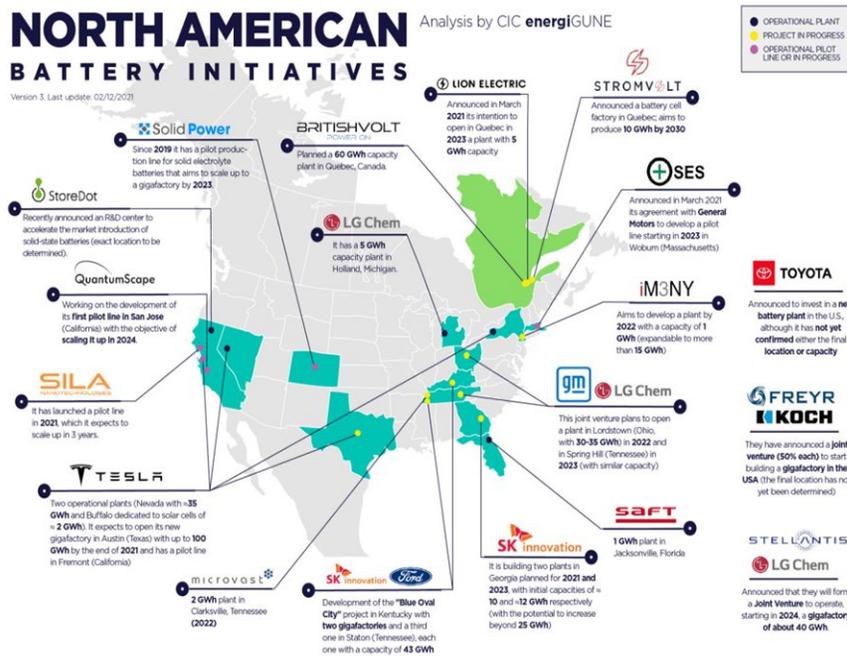
En América del Norte, productores como SK Innovation, LGChem y Tesla tienen planes ambiciosos al 2030, proyectando capacidades de producción superiores a los 60 GWh cada uno. En Europa, productores como Farasis, CATL y Volkswagen esperan tener altos volúmenes de producción (véanse los diagramas 3 y 4).

Diagrama 3
Producción futura de baterías en la Unión Europea



Fuente: BloombergNEF, actualizado el 2 de diciembre de 2021, disponible en https://109ee710-a8f3-4a8a-9952-28554c7df7a5.usrfiles.com/ugd/109ee7_775f8efa3d034d439124b5431ff095a1.pdf.

Diagrama 4
Producción futura de baterías en Estados Unidos



Fuente: BloombergNEF, actualizado el 2 de diciembre de 2021, disponible en https://109ee710-a8f3-4a8a-9952-28554c7df7a5.usrfiles.com/ugd/109ee7_775f8efa3d034d439124b5431ff095a1.pdf.

B. Valor litio en el cátodo

Actualmente el uso del litio se concentra en el cátodo de una batería, dependiendo del tipo de cátodo, se utilizan distintas cantidades y distintos químicos de litio, de la misma manera que los otros químicos en la batería, como el manganeso, cobalto y zinc.

Cuadro 3
Intensidad de químicos por tipo de cátodo
(En g/Kwh)

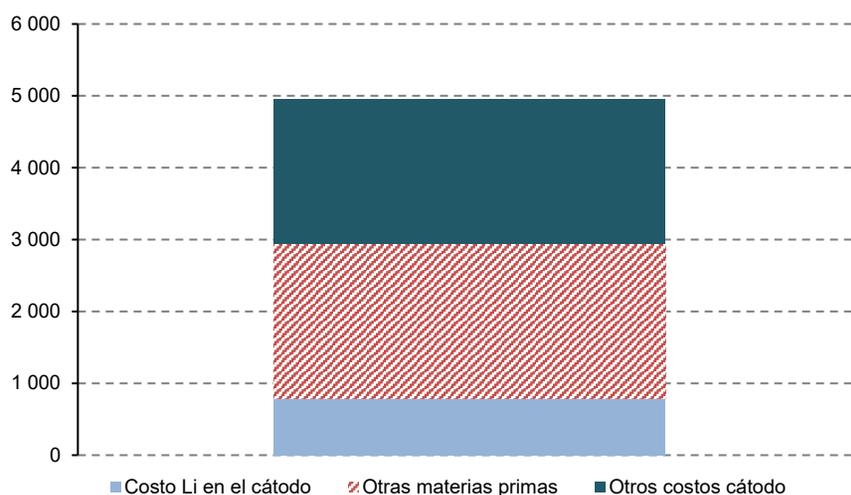
	NCM 111	NCM 523	NCM 622	NCM 811	NCA	LNO	LFP	LMO	LMNO
Nickel	411	575	666	771	807	897			262
Cobalt	413	231	188	97	148				
Manganese	385	323	175	80				1 969	736
Aluminium					14				
IronPhosphate							1710		
Lithium	776	724	655	607	619	565	522	662	570

Fuente: Elaboración propia, datos de Morgan Stanley, (2021), "The New Oil: Investment Implications of the Global Battery Economy", Bluepaper [Reporte de Investigación].

En general, se estima que las materias primas en el cátodo son alrededor del 60% del costo total de producción (BloombergNEF, 2021). La información y supuestos proporcionados por BloombergNEF, estima que el cátodo hoy es alrededor del 50% del costo de la batería (BloombergNEF, 2021), y el costo promedio de producción de baterías de uso para EV es cercano a 132 USD/kWh, lo que conlleva a un costo total de cátodo para una batería de tamaño de 75 kWh a los USD 4.960.

En promedio la intensidad de consumo de litio es de 0,7 kg/kWh, es decir, una batería de 75 kWh consume alrededor de 52,5 kg de LCE, si se tiene en un precio de 15 USD/Kg LCE vemos que el costo total de litio rondaría los USD 800 de un total de USD 4.950, es decir un 16% del total del costo de producción del cátodo, además, se estima que un 60% del costo del cátodo es materias primas, se deduce que el litio sería un 27% del costo en materias primas.

Gráfico 14
Valor relativo del litio en el cátodo, 2021
(En dólares)

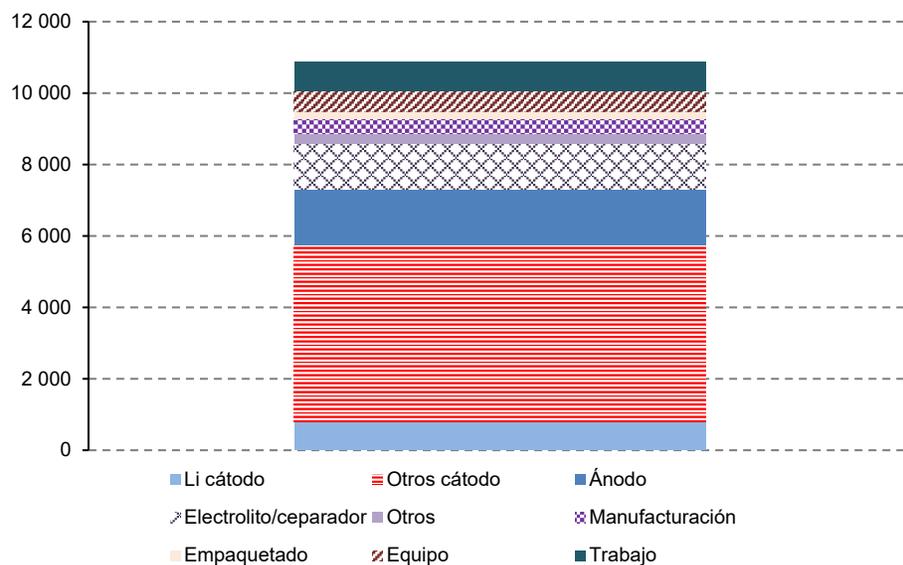


Fuente: Elaboración propia, datos de Morgan Stanley 2021.

C. Uso del litio en baterías y su valor relativo

Como se mencionó en el inciso anterior, el costo de producción del cátodo de la batería representa alrededor del 50% del total y que el costo del litio utilizado es alrededor de USD 800 (suponiendo un precio de 15 USD/kg LCE). En el siguiente gráfico se presenta la composición de costos de batería (BloombergNEF, 2021), en función de ellos se ve que el costo total de una batería es alrededor de USD 10.875 siendo un 50% el cátodo y el litio un 8% del costo total.

Gráfico 15
Composición de costos de una batería, 2021
(En dólares)

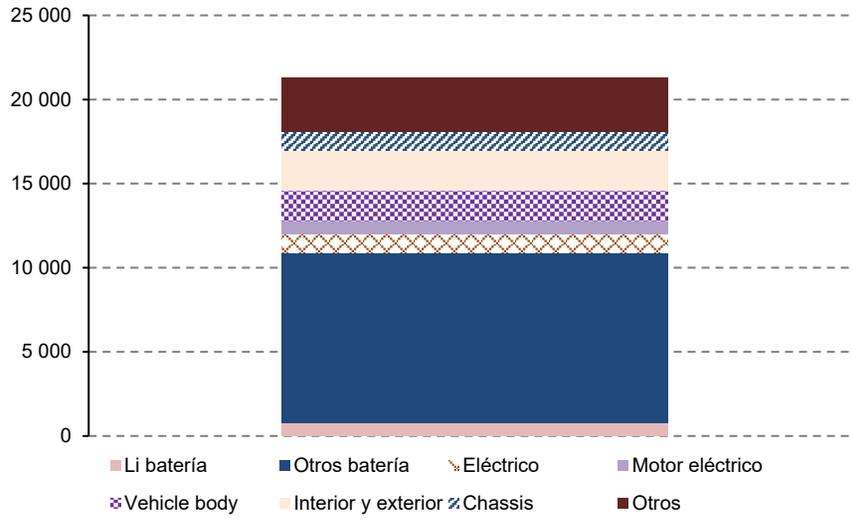


Fuente: Elaboración propia, datos de BloombergNEF y Morgan Stanley.

D. Uso del litio en EV y su valor relativo

Es difícil calcular el valor del litio en un vehículo eléctrico debido a la gran cantidad de modelos y gamas existentes. Para este ejercicio se utilizan los números publicados por Morgan Stanley (2021) y el supuesto de un precio de 15 USD/Kg precio cercano al precio de incentivo a largo plazo para el productor marginal de litio, (análisis detallado en la sección de costo marginal de producción). En función de estos costos se tiene que la batería es alrededor de un 50% del valor del automóvil, por lo tanto, el cátodo es un 25% y, finalmente, el litio cerca de 2%.

Gráfico 16
Composición de costos de un EV, 2021
(En dólares)



Fuente: Elaboración propia, datos de BloombergNEF y Morgan Stanley.

Nota: En el anexo 1 se incluye un análisis de sensibilidad del valor relativo del litio, variando la intensidad de uso del litio y su precio.

III. Oportunidades y desafíos técnicos y tecnológicos

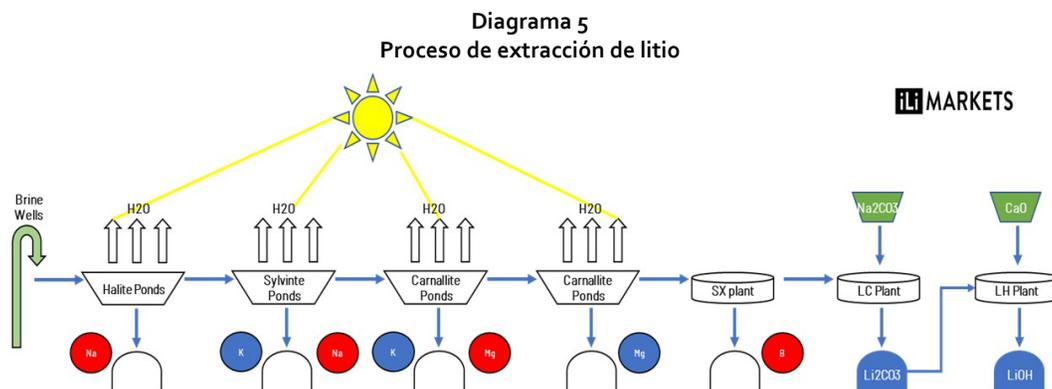
En este capítulo, se presentan de manera resumida los procesos convencionales de producción de litio para establecer una base de conocimiento, y seguido, los desafíos y oportunidades que se observan en este ámbito.

A. Procesos de extracción convencionales

El proceso de extracción convencional de litio desde salares consta de 3 grandes etapas: la concentración solar; la refinación para producir carbonato de litio; y una siguiente refinación, si se quiere producir hidróxido de litio.

1. Concentración solar

La salmuera se bombea del salar a un sistema de estanques. A medida que la salmuera avanza por los estanques, se precipitan diferentes sales y se aplican tratamientos químicos para eliminar las impurezas (magnesio, potasio, sulfatos, entre otros). La salmuera concentrada sale del sistema de estanques y luego ingresa a la planta química. En esta etapa se obtiene cloruro de litio concentrado con litio al 6% o sulfato de litio (véase el diagrama 5).



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Na: sodio; K: potasio; Mg: magnesio; B: boro.

En el caso de la minería desde minerales, el proceso de concentración parte por la trituración del mineral, donde se muele con rodillos de molienda de alta presión. Luego para la eliminación de mica y granos gruesos se utiliza un separador de medios gruesos, deslime y separación magnética para la eliminación de impurezas de hierro. Se puede agregar un proceso de flotación para producir un producto más fino. Los rendimientos del proceso están en el orden de 70% a 75% con el objetivo de producir un espodumeno con 5,5%-6% de concentración de óxido de litio.

2. Refinación convencional a carbonato de litio

La salmuera de litio concentrada entre 1%-6% se almacena en estanques cubiertos, luego, se bombea desde los estanques a la planta de extracción de solvente para eliminar el boro. Los principales reactivos utilizados en este paso son ácido clorhídrico, un poco de ácido sulfúrico y soda cáustica. Después de la extracción de boro, la salmuera se mezcla con el licor final para precipitar la mayor parte del magnesio como carbonato de magnesio. La salmuera resultante se filtra y se envía a la segunda etapa de eliminación de magnesio. En esta etapa, se hace reaccionar el magnesio con cal para precipitarlo en forma de hidróxido de magnesio, además, el calcio precipita como carbonato de calcio. La pasta se filtra y la salmuera purificada se envía a la etapa de carbonización. El carbonato de magnesio precipitado se trata junto a la pasta de calcio y magnesio en una etapa de deshidratación para que pueda ser almacenado en una pila de residuos sólidos.

El principal reactante en la producción de carbonato de litio es el carbonato de sodio, del cual se utiliza aproximadamente 1,9 MT por MT producida de carbonato de litio. De éstas 1,9 MT, 1,4 MT aproximadamente se utilizan estequiométricamente para la precipitación del carbonato de litio, los otros 0,4 MT de carbonato de sodio permanecen en el licor madre; Una parte de este licor madre se utiliza para precipitar magnesio como $MgCO_3$.

Por su parte, la reacción del carbonato de litio tiene lugar a temperaturas entre 60° y 70° Celsius. Luego, el carbonato de litio se filtra y se lava en un filtro cinta y posteriormente se seca. Los rendimientos de una planta de carbonato de litio se esperan entre un 75% al 80%. Normalmente, una parte de la producción se da fuera de especificación (entre 10% a 20%) que requiere procesamiento adicional. En el anexo 2 se presenta el proceso en detalle.

En el caso del espodumeno, el proceso de refinación parte con un calcinado a temperaturas superiores a 1000° Celsius para convertir α -espodumeno a β -espodumeno, luego es molido, mezclado con ácido sulfúrico y tostado. El sulfato de litio conseguido es solubilizado mediante lixiviación con agua. Las impurezas se eliminan y la pasta se neutraliza mediante la adición de hidróxido de sodio y carbonato de sodio, seguido de una filtración por correa. Luego, se pasa a través de otro filtro de pulido y un proceso de precipitación en dos etapas. Posteriormente, se agrega hidróxido de sodio para eliminar el magnesio; para eliminar el calcio se agrega el carbonato de sodio, y para eliminar los iones de carbonato se agrega ácido clorhídrico. La solución obtenida se transfiere a columnas de intercambio iónico para eliminar las impurezas restantes. Finalmente se hace un proceso de purificación, concentración y carbonización para obtener carbonato de litio.

3. Refinación convencional a hidróxido de litio

El proceso más utilizado para convertir Li_2CO_3 en $LiOH$ es utilizando la Cal, que es aplicado por SQM, ALB y Livent entre otros. Se inicia haciendo reaccionar carbonato de litio con hidróxido de calcio, donde se obtiene hidróxido de litio en estado acuoso y carbonato de calcio como desperdicio. Es importante controlar los contaminantes en la cal para lograr especificaciones de alta calidad, el uso de cal aproximado es de 1,2 MT por cada tonelada de hidróxido de litio. Los rendimientos del proceso son de aproximadamente 85%. El proceso se realiza entre 60° y 80° Celsius y produce una solución que contiene aproximadamente 2,25 – 2,75% en peso de hidróxido de litio. Intentos en aumentar las concentraciones producen pérdidas de carbonato de litio en el residuo de carbonato de calcio, esto debido a que la solubilidad del carbonato se reduce por la presencia de hidróxido de litio. La reacción

entre materiales poco solubles requiere de agitación intensa. El residuo insoluble (carbonato de calcio) se elimina y el hidróxido monohidratado se cristaliza del licor madre mediante la evaporación. Luego, se separa y se seca cuidadosamente a temperaturas entre 130°-140° Celsius.

En el caso del espodumeno, el proceso de refinación es igual al de carbonato de litio hasta las columnas de intercambio iónico. Luego, se agrega hidróxido de sodio para convertir el sulfato de litio en hidróxido de litio y generar sulfato de sodio que se cristaliza. El rendimiento es del orden del 80-85% de Li.

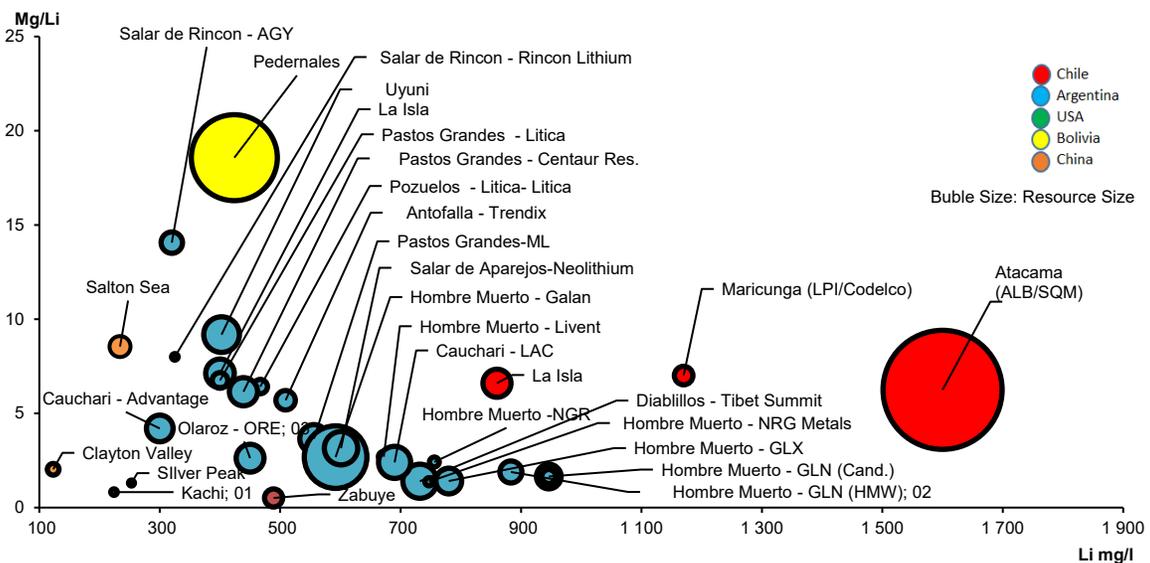
La necesidad de la salmuera de tener que producir carbonato de litio para luego producir hidróxido de litio, la deja en una desventaja en términos de tiempo, flexibilidad y costos contra la producción desde minerales. Debido a esto hay una gran cantidad de procesos nuevos en desarrollo que buscan la producción directa de hidróxido de litio desde salares.

B. Recursos y reservas: composición química

El primer desafío en la extracción de litio desde salares es la amplia gama de combinaciones químicas posibles de salmuera, cada salar es distinto en concentraciones de litio e impurezas (véanse los gráficos 17 y 18), por esta razón los procesos de extracción de litio deben ser ajustados y pensados de manera particular para los diferentes salares. En consecuencia, cada salar necesita su propio diagrama de flujo para la recuperación de litio.

Las impurezas o compuestos químicos más importantes para tener en cuenta son magnesio, sulfato, calcio, sodio y potasio. En base a las impurezas hay ciertos parámetros claves a definir para la correcta extracción de litio. La concentración del litio en el salar define el factor de concentración y el área de evaporación necesaria. La relación sulfato-litio (SO₄ ml/Li ml) define si la salmuera se trata de un depósito de sulfato de litio o cloruro de litio. La relación magnesio-litio (Mg ml/Li ml) indica la cantidad de magnesio que debe eliminarse mediante cristalización fraccionada o precipitación selectiva. Finalmente, la relación calcio – litio (Ca ml/ Li ml) se concentra junto con el magnesio y ambos deben eliminarse antes de que se pueda precipitar el carbonato de litio.

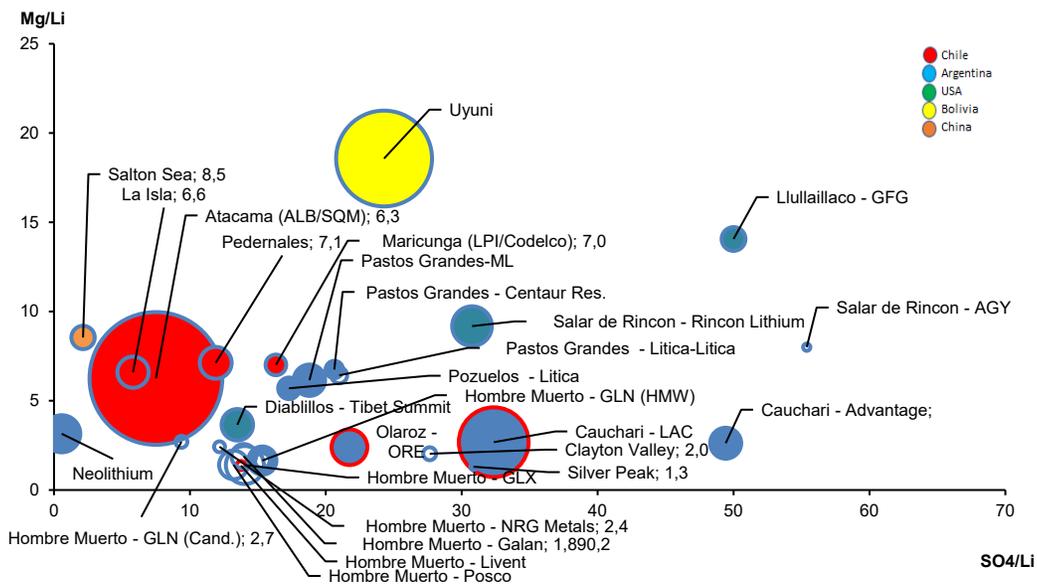
Gráfico 17
Recursos de litio provenientes de salares
 (En Mg/Li – eje vertical y Li mg/L – eje horizontal)



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de los estudios PEA, PFS, DFS de los proyectos.
 Nota: PEA = Preliminary Economic Assessment; PFS = Pre-Feasibility Study; DFS = Definitive Feasibility Study.

La tasa de evaporación depende, de la altitud y el clima local, además, las condiciones como el clima, la hidrogeología de las pozas, la permeabilidad, las reservas, la infraestructura (electricidad y accesibilidad) y la disponibilidad de agua dulce afectan la factibilidad técnica para explotar un salar. Los salares que tienden a ser más competitivos son aquellos con alta concentración de litio y tasas de evaporación, a la vez que contengan bajos niveles de magnesio – litio y sulfato – litio.

Gráfico 18
Recursos de litio provenientes de salares
(En Mg/Li – eje vertical- y SO₄/Li – eje horizontal)



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de los estudios PEA, PFS, DFS de los proyectos.
 Nota: PEA = Preliminary Economic Assessment; PFS = Pre-Feasibility Study; DFS = Definitive Feasibility Study.

Se observa que la gran cantidad de recursos explorados se encuentran en el triángulo del litio, Chile sobre sale por las altas concentraciones de litio en sus salares, pero ha habido poca exploración de nuevos recursos, por lo que la cantidad de información es bastante reducida. Un caso distinto es el de Argentina, donde se observan una gran cantidad de recursos explorados con una gran variedad de concentraciones de litio que va desde los 950 Li mg/l hasta de 300 Li mg/l como Kachi de Lake Resources. En el caso de Bolivia, solo se tienen datos de Uyuni, que, si bien es uno de los recursos más grandes en cuanto a tamaño, su concentración de litio es baja comparado con el promedio de Chile o Argentina, además, sus altas concentraciones de magnesio hacen difícil la posibilidad de extracción a través de procesos convencionales. Finalmente, los recursos en Estados Unidos de Norteamérica y China tienen niveles de concentraciones bajo los 300 Li mg/l y tamaños de recursos bastante reducido.

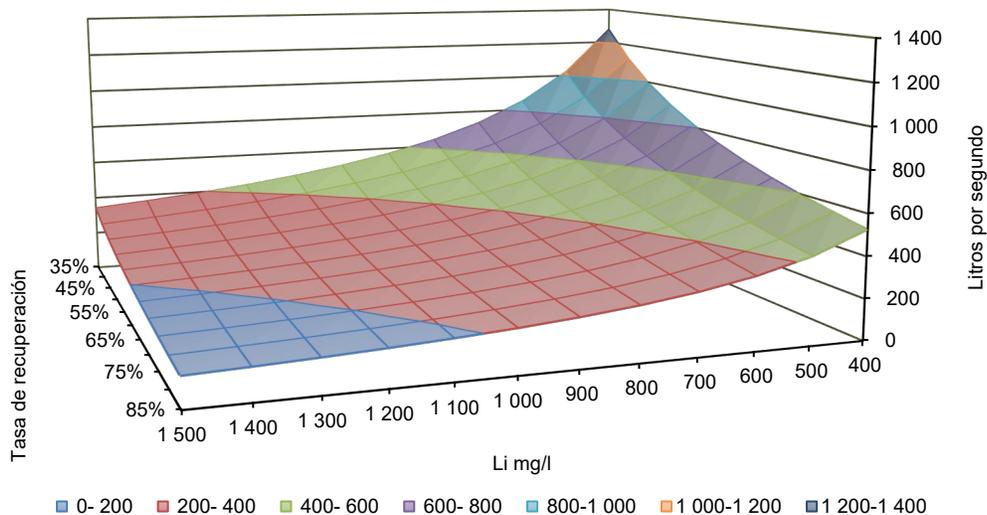
C. Tecnologías de extracción directa de litio

Las tecnologías de extracción directa de litio están en la etapa de desarrollo, y su propósito es ser una alternativa para recursos que no son posibles de extraer mediante tecnología convencional o mejorar en algún aspecto el proceso convencional. Un gran número de ellas se concentra en el desafío de producir hidróxido de litio desde el salar sin necesidad de producir primero carbonato de litio, como, por ejemplo, Lilac Solutions, Standard Lithium y E3 Lithium.

Se debe clarificar que a la fecha ninguna tecnología de extracción directa ha logrado demostrar que funciona a escala comercial. Sin embargo, recientemente se ha hablado de avances importantes en China en el uso de tecnologías de extracción directa para aumentar el rendimiento de los salares chinos (bajo contenido de Li).

Como se mencionó, el nivel de impurezas de un salar, sus características hidrogeológicas y la concentración de litio afecta activamente la capacidad de extracción de litio (véase el gráfico 19). En salares con bajas concentraciones de litio, como los norteamericanos o chinos la capacidad de extracción mediante tecnologías convencionales es baja, debido a esto el desarrollo de tecnologías de extracción directa podría aumentar la cantidad de litio extraído mediante un aumento de los rendimientos de recuperación. Asimismo, salares con altos contenidos de impurezas, como Uyuni, tienen una baja tasa de recuperación de litio, elemento que también se espera mejorar mediante tecnologías de extracción directa.

Gráfico 19
Tasa de extracción de salmuera
(En litros por segundo)



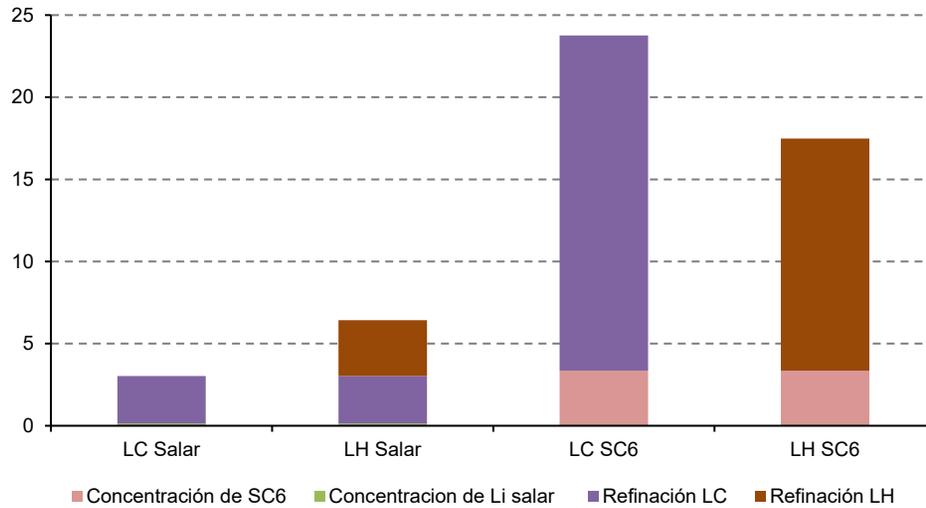
Fuente: Elaboración propia.

D. Impacto ambiental

Uno de los desafíos técnicos más importante es disminuir el impacto ambiental que tiene la extracción de litio. Un estudio realizado en 2021 por el Laboratorio Nacional Argonne, de Estados Unidos, mediante un análisis de ciclo de vida, estimó los impactos en emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de agua fresca y consumo de energía en la producción de hidróxido de litio y carbonato de litio de SQM en sus operaciones en el Salar de Atacama y las comparó con las reportadas por Ganfeng, en su producción desde espodumeno. En los gráficos 20, 21 y 22 se observan los resultados encontrados.

Las emisiones de gases invernadero para la producción de carbonato de litio provenientes de salares o minerales son ~3 y 23,8 MT CO₂/MT LCE respectivamente, es decir, una tonelada de carbonato de litio producida de minerales emite 7,8 veces más gases invernadero que la producida desde un salar. En el caso de la producción de hidróxido se mantiene la tendencia, pero la brecha es menor, siendo las emisiones 6,4 y 17,5 8 MT CO₂/MT LCE, siendo 2,7 veces más contaminante la producción desde espodumeno.

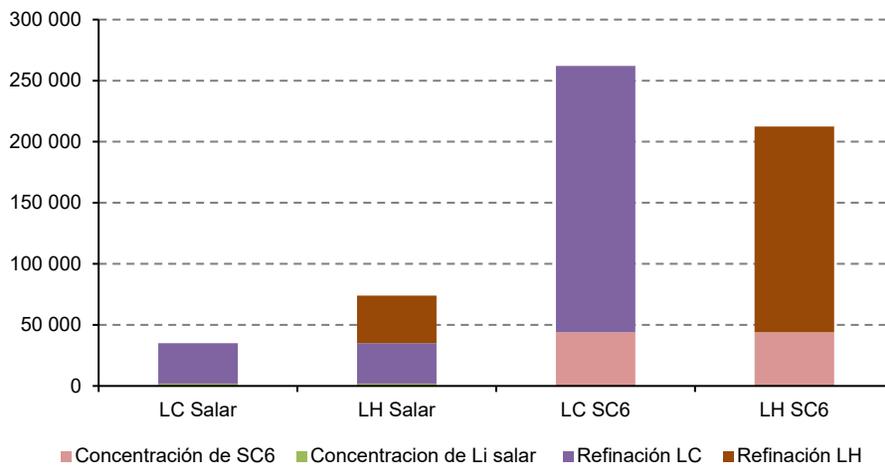
Gráfico 20
Emisiones de gases invernadero
(En MT CO₂/MT LCE)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de Kelly & Wang 2021.
 Nota: LC=carbonato de litio; LH= Hidróxido de litio; SC6: concentrado de litio.

En cuanto al consumo de energía las relaciones entre carbonato e hidróxido de cada fuente se mantienen; la producción de carbonato de litio desde salares consume 35.000 MJ/MT LCE producida, siendo la obtenida desde espodumeno 2,9 veces mayor. En el caso del hidróxido de litio, el consumo es de 74.000 MJ/MT LCE para salmuera y ~212.500 MJ/MT LCE para minerales.

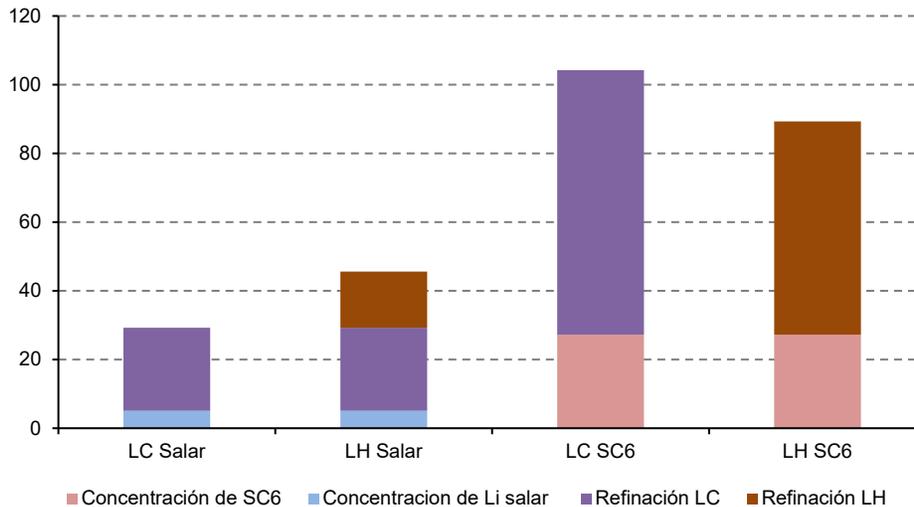
Gráfico 21
Consumo de energía
(En mega julios por tonelada métrica LCE)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de Kelly & Wang 2021.
 Nota: LC=carbonato de litio; LH= Hidróxido de litio; SC6: concentrado de litio.

Finalmente, en el caso del consumo de agua fresca para la producción de químicos de litio también es menos intensiva la producción desde salares, pero con una menor diferenciación que las variables anteriores. Como se pueda observar, la producción desde salares tiene un menor impacto en las 3 dimensiones estudiadas.

Gráfico 22
Consumo de agua fresca
(En metros cúbicos por tonelada métrica de LCE)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de Kelly & Wang 2021.
Nota: LC=carbonato de litio; LH= Hidróxido de litio; SC6: concentrado de litio.

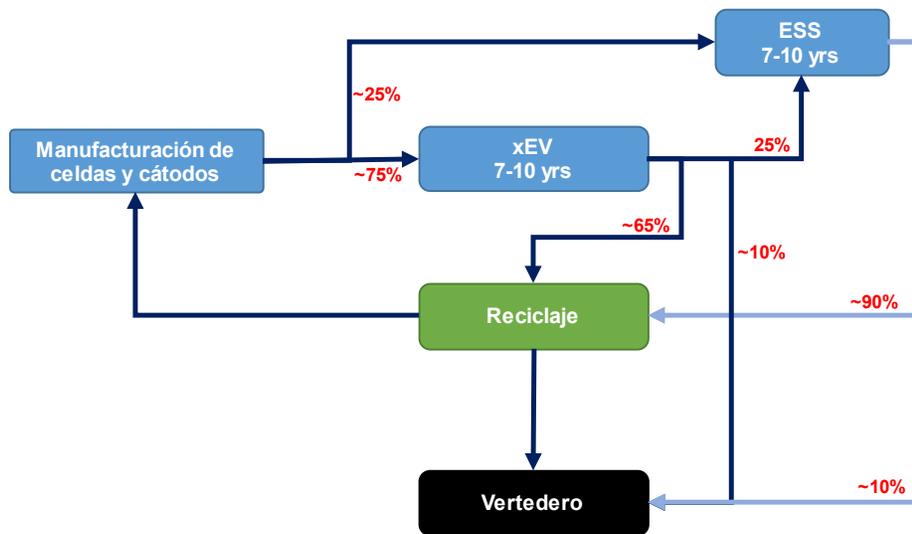
Cabe destacar que el estudio utiliza los datos disponibles para la refinación de espodumeno en China, utilizando carbón como energía (generación de una central térmica), que tiene un impacto mayor que si se utilizara gas natural.

E. Reciclaje

Otro desafío imperativo para la industria es qué hacer con las baterías una vez que cumplan su vida útil. Se espera que una batería en promedio tenga una vida útil de 7-10 años, y en el caso de las baterías de EV, se asume que alrededor del ~25% pasarían a una segunda vida en sistemas de almacenamiento de energía.

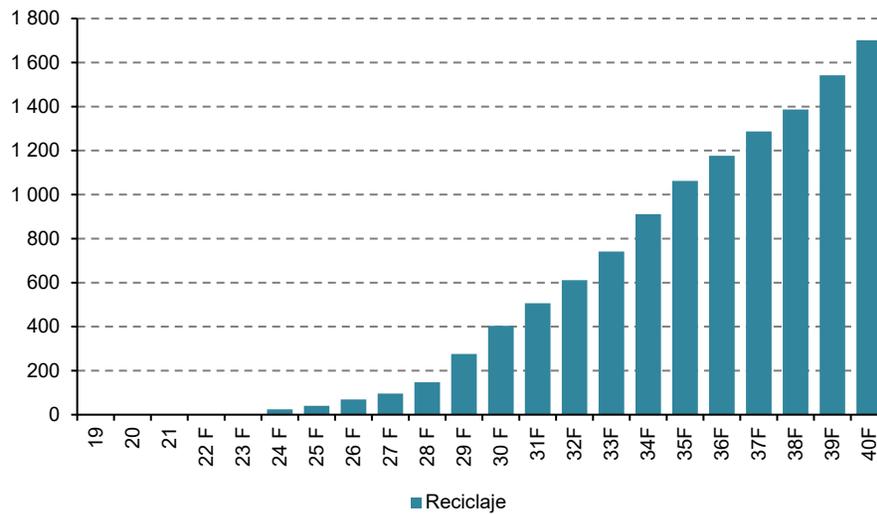
El diagrama 6 muestra los supuestos y la lógica que se espera para el reciclaje durante la próxima década. Bajo esta lógica, los volúmenes esperados de reciclaje no serán significativos antes del final de la década, sin embargo, es probable que esta industria se transforme en el "productor" de litio más importante entre los años 2034-2040 (véase el gráfico 23).

Diagrama 6
Modelo de reciclaje de litio



Fuente: Elaboración propia.

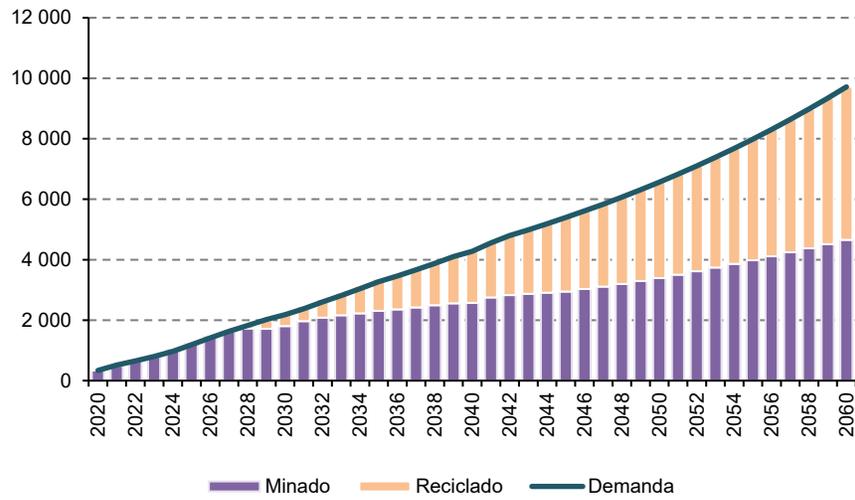
Gráfico 23
Mundo proyección de producción de litio reciclado
(En miles de toneladas)



Fuente: Elaboración propia.

El efecto directo del aumento en la cantidad de litio reciclado es la menor necesidad de seguir minando litio, en consecuencia, las tasas de crecimiento de litio minado podrían caer con fuerza en un periodo de 10 años, la tasa esperada de crecimiento anual compuesta para el litio minado entre los años 2021 al 2030 es de 16%, mientras que para la década del 2030-2040 disminuye a tan sólo un 4% (véase el gráfico 24).

Gráfico 24
Reciclaje de litio
(En miles de toneladas)



Fuente: Elaboración propia.

IV. Oportunidades y desafíos económicos

En esta sección se presenta un análisis de las oportunidades y desafíos económicos en los países del triángulo de litio, para esto, se expone un recuento detallado de los costos en la producción de carbonato de litio e hidróxido de litio, a partir de los procesos mencionados en el capítulo anterior, para analizar la relevancia de ciertos elementos y cómo estos afectan la producción del triángulo del litio, así otorgar una visión general de los gastos de capital y operativos presentes, y como estos se comparan con proyectos desde minerales. Además, se presenta una curva de costos genérica para visualizar cual podría ser el costo marginal de producción en años venideros.

Luego, se analiza el financiamiento de proyectos y como se ha desarrollado en los últimos años, tanto en los países del triángulo como en el resto del mundo, para dar cuenta de la factibilidad económica de los proyectos, plazos de puesta en marcha e inicio de la producción.

A. Producción de químicos de litio

1. Gasto de capital y gastos operativos

En primer término, la unidad que se utiliza para comparar los gastos de capital es la intensidad de capital, debido a que la cantidad de producción por proyecto varía significativamente, por lo tanto, el gasto total de capital es dividido por la capacidad de producción anual. Los gastos operativos se miden en la misma unidad.

Para contextualizar, la primera fase del proceso de producción de químicos de litio es la concentración de cloruro de litio, realizado en las pozas de evaporación, luego, es enviado a la planta química. El gasto de capital presente del bombeo varía considerablemente, depende de las características físicas del salar como la permeabilidad y porosidad. Las pozas de evaporación son el componente más importante de los gastos de capital en esta fase, los factores que más afectan son la concentración de litio presente en el salar y la tasa de evaporación neta, que puede estar entre los 1,500 y 3,000 mm al año dependiendo del salar, la altitud y el clima.

Los costos de las pozas de evaporación están entre 15 a 20 USD/m², y las áreas necesarias por tonelada de LCE varía entre 250 a 400 m²/MT. Todos estos elementos afectan la concentración final de litio que es enviada a la planta, esta varía entre 1% y 6% de litio y afecta en el costo posterior de refinación. Debido a la gran variedad de combinaciones posibles en los salares (físicas, químicas, geográficas y climáticas), sumado a que cada proyecto ha estudiado en distinta profundidad su salar, además, cada uno está en un distinto grado de avance, es difícil tener un número exacto para los gastos y su distribución, en este trabajo se asumen rangos sobre la base de distintos reportes de factibilidad (PEA, PFS, DFS entre otros) de proyectos en Argentina (véanse los cuadros 4 y 5).

Cuadro 4
Gasto de capital concentración de LiCl

	Rango	
	Bajo	Alto
	kUSD/MT-LCE	kUSD/MT-LCE
Extracción de salmuera	2	3
Pozas de evaporación	6	8
Total Capex	8	11

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 5
Gastos operativos concentración de LiCl

	Rango	
	Bajo	Alto
	kUSD/MT-LCE	kUSD/MT-LCE
Bombeo y operación pozas	0,4	0,6
Limpieza y transporte	0,2	0,3
Total Opex	0,6	0,9

Fuente: Elaboración propia.

La segunda fase del proceso químico se realiza en la planta de carbonato, los costos de capital varían entre 10 a 15 kUSD/MT LCE, siendo la planta en sí el mayor costo. La mayoría de los salares se encuentran en regiones remotas por lo que la ubicación de la planta usualmente implica diferencias en costos. Si esta se instala a boca del salar, hay que tener en cuenta mayores gastos en infraestructura y en servicios generales.

En términos de gastos operativos vemos como el componente más relevante es el de los reactantes, como la ceniza de soda necesaria para obtener el carbonato de litio. La variación de costos se da debido a las diferentes posibilidades de concentración de cloruro de litio que viene desde las pozas y los distintos niveles de contaminantes dependiendo del salar.

Cuadro 6
Gasto de capital producción de carbonato de litio

	Rango	
	Bajo	Alto
	kUSD/MT-LCE	kUSD/MT-LCE
Planta de carbonato de litio	4	5
Servicios generales	4	6
Infraestructura	3	4
Total Capex	10	15

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 7
Gastos operativos producción de carbonato de litio

Operational expenditure	Rango	
	Bajo	Alto
	kUSD/MT-LCE	kUSD/MT-LCE
Planta Li ₂ CO ₃	0,8	1,1
Ceniza de soda	0,5	0,7
Servicios básicos	0,4	0,6
Mantenimiento	0,5	0,8
Total Opex	2,2	3,2

Fuente: Elaboración propia.

Para el proceso de conversión a hidróxido de litio no se encuentra mucha información concreta disponible debido a que los proyectos de salmuera no contemplan una producción de este en sus proyectos, y si lo hacen, proponen tecnologías de extracción directa las que no están probadas y están bajo acuerdos de confidencialidad. Debido a esto los números presentes en el siguiente inciso provienen de un estudio interno conjunto entre iLiMarkets y Process and Environmental Consultancy (PEC).

En el proceso de conversión a hidróxido en gastos de capital nos encontramos con un promedio de kUSD/MT 5, donde el gasto en equipos es alrededor del 45-40% del total, seguido luego por el gasto de construcción. Al igual que la planta de carbonato, algunos gastos difieren dependiendo de la ubicación de la planta (salar contra puerto o ciudad).

Cuadro 8
Gasto de capital producción de hidróxido de litio

	Rango	
	Bajo	Alto
	kUSD/MT-LCE	kUSD/MT-LCE
Equipos	2,0	2,5
Electricidad	0,1	0,4
Servicios	0,8	0,8
Construcción	1,1	1,1
Refinación (Na, Cl, SO ₄ , MMP)	0,4	0,4
Tratamiento de agua	0,0	0,4
Oficinas, laboratorios, caminos, talleres	0,0	0,9
Total Capex	4,4	6,4

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los gastos operativos estos se sitúan alrededor de los kUSD/MT 1,5 siendo bastante constante entre plantas debido a que la reacción parte desde un carbonato de litio que ya es un producto refinado estándar.

Cuadro 9
Gastos operativos producción de hidróxido de litio

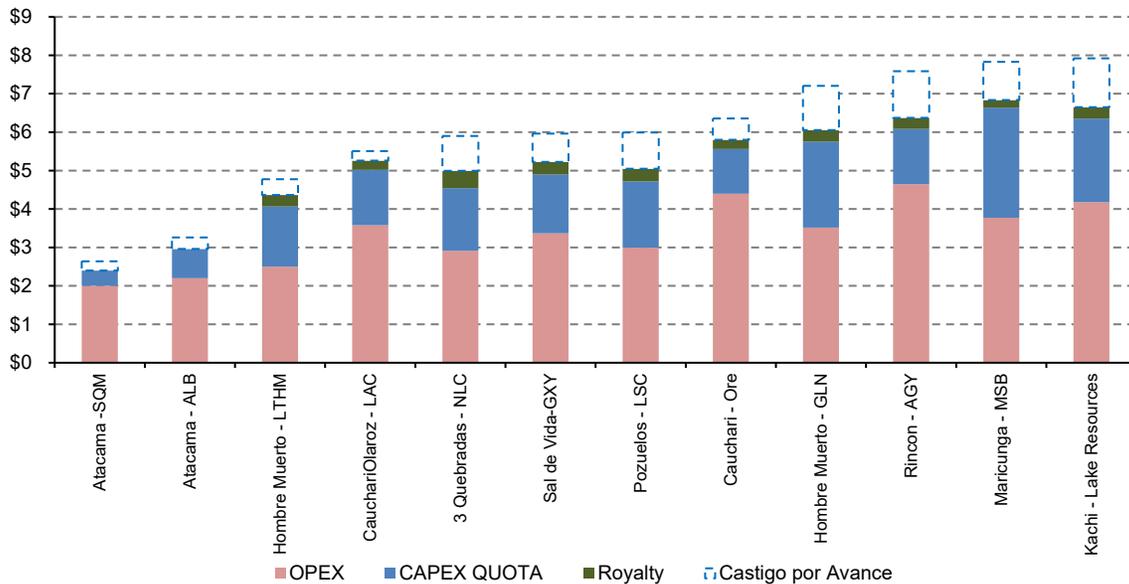
	Units	Unit/MT	kUSD/MT	kUSD/MT LiOH
CaO	MT	1	0,3	0,4
Vapor	MT	8	0,4	0,3
Electricidad	MW	1	1,5	0,2
Mano de obra	USD/y			0,3
Mantenimiento				0,3
Total Opex				1,5

Fuente: Elaboración propia.

2. Costo total de producción

Ahora que se tiene una noción de los rangos estimados para la construcción y operación de un proyecto de salmuera de litio se construye un gráfico de costos según los detalles publicados por cada uno de los proyectos estudiados (véase el gráfico 25). Para este ejercicio se utilizan los gastos operacionales reportados por cada uno de los proyectos, luego los gastos de capital publicados son transformados a intensidad de capital y transformados a una cuota anual a una tasa de descuento del 8% por 20 años (números estándar dentro de la minería y proyectos de litio en general). A estos 2 componentes sumados, se les agrega el royalty aplicable según la jurisdicción (a precio de 15 USD/kg Li_2CO_3) y finalmente un castigo a los números publicado por las compañías en función del avance del proyecto: un 20% más en costo si está en PEA o PFS, un 15% si está en DFS y 10% si es una ampliación de un productor ya instalado.

Gráfico 25
Costo de producción total de Li_2CO_3 desde salmuera
(En miles de dólares por tonelada métrica de Li_2CO_3)



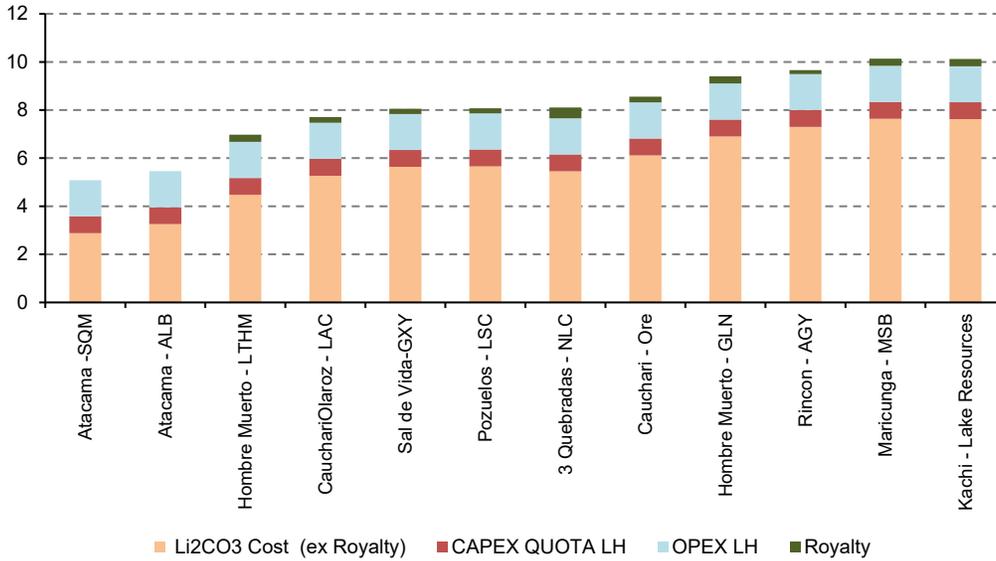
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de los estudios PEA, PFS, DFS de los proyectos.
 Nota: PEA = Preliminary Economic Assessment; PFS = Pre-Feasibility Study; DFS = Definitive Feasibility Study.

De este análisis se pueden rescatar los siguientes puntos: los gastos operacionales publicados van entre los USD 2 hasta los USD 5. Los costos de capital van entre los USD 0,5 hasta USD 2,5. Cualquiera de estos proyectos o productores paga sus costos de producción e inversión con precios sobre los USD/Kg 8. Los productores actuales se encuentran en la parte baja de la curva (ALB, SQM, LTHM) con la excepción de Orocobre.

En cuanto a la producción de LiOH , se asume como gastos operativos kUSD/MT 1,5 para cada proyecto debido a que está dentro del rango presentado en la tabla 9 y para los gastos de capital una intensidad de kUSD/MT 6 (tabla 8) el cual luego es llevado a cuotas de pago anuales con una tasa de descuento del 8%. Como resultado se observa un aumento en el costo de producción comparado al de carbonato de alrededor de kUSD/MT 2,2 además de royalties dependiendo de la ubicación (se usa USD/Kg 15 como precio nuevamente). De estos proyectos o productores el único que efectivamente produce LiOH en la misma jurisdicción que produce el carbonato es SQM, el cual tiene tanto sus plantas

de carbonato e hidróxido en Chile, en el caso de Albemarle (ALB) refina hasta carbonato y envía el producto a sus plantas en China y Estado Unidos para conversión a hidróxido, lo mismo para el caso de Livent en Argentina (LTHM).

Gráfico 26
Costo de producción total de LiOH desde salmuera
(En miles de dólares por tonelada métrica de LiOH)



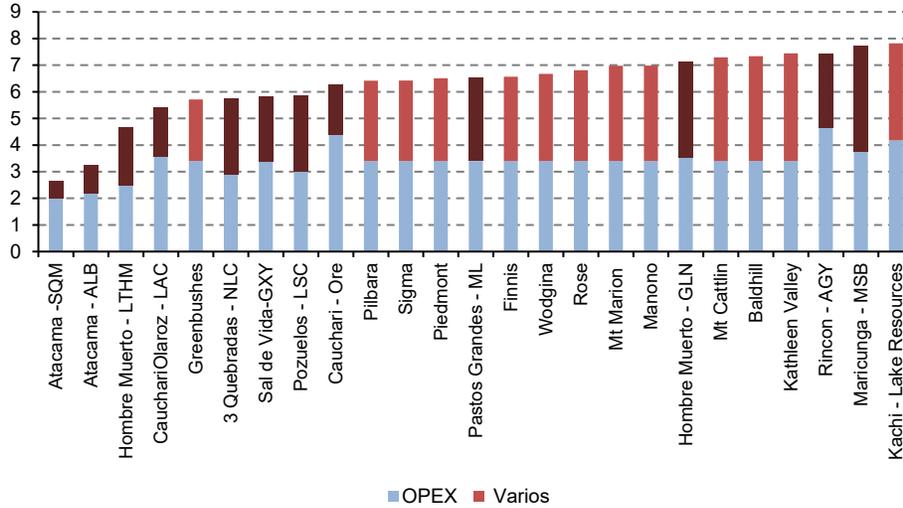
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de los estudios PEA, PFS, DFS de los proyectos.
 Nota: PEA = Preliminary Economic Assessment; PFS = Pre-Feasibility Study; DFS = Definitive Feasibility Study.

3. Comparación con producción desde minerales

Comparando los números de salmuera del inciso anterior con los publicados por proyectos de mineral, se observa el siguiente resultado (véase el gráfico 26). Los costos de producción están ordenados de menor a mayor destacando en verde proyectos o productores de mineral y en naranja los de salmuera. Bajo un costo de producción total de kUSD/MT 6 se encuentran solo proyectos de salmuera y la mina Greenbushes en Australia, destacando la relativa ventaja de la salmuera sobre los recursos minerales para la producción de carbonato de litio.

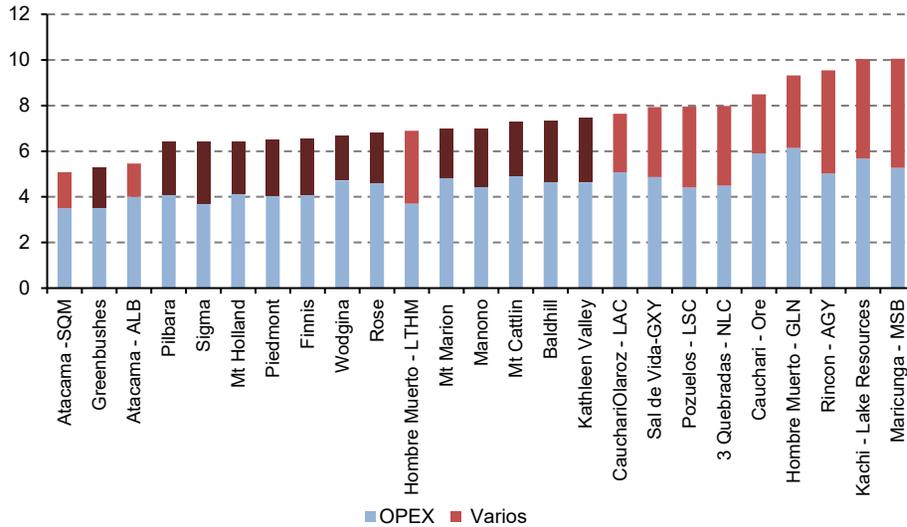
En el caso de la producción de hidróxido de litio la producción desde recursos de salmuera pierde su ventaja debido al costo extra que debe incurrir a la hora de producir, por simplicidad, para el caso de la producción mineral asumimos que mantiene los mismos costos que para la producción de Li₂CO₃. En este caso vemos como todos los proyectos del triángulo del litio quedan sobre los kUSD/MT 7,5 y sobre todos los proyectos de mineral, debido a esto se entiende que ninguno de estos proyectos este enfocado a la producción de hidróxido en un horizonte próximo.

Gráfico 27
Costo de producción total Li₂CO₃
 (En miles de dólares por tonelada de Li₂CO₃)



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de los estudios PEA, PFS, DFS de los proyectos.
 Nota: PEA = Preliminary Economic Assessment; PFS = Pre-Feasibility Study; DFS = Definitive Feasibility Study.

Gráfico 28
Costo de producción total LiOH
 (En miles de dólares por tonelada de LiOH)



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de los estudios PEA, PFS, DFS de los proyectos.
 Nota: PEA = Preliminary Economic Assessment; PFS = Pre-Feasibility Study; DFS = Definitive Feasibility Study.

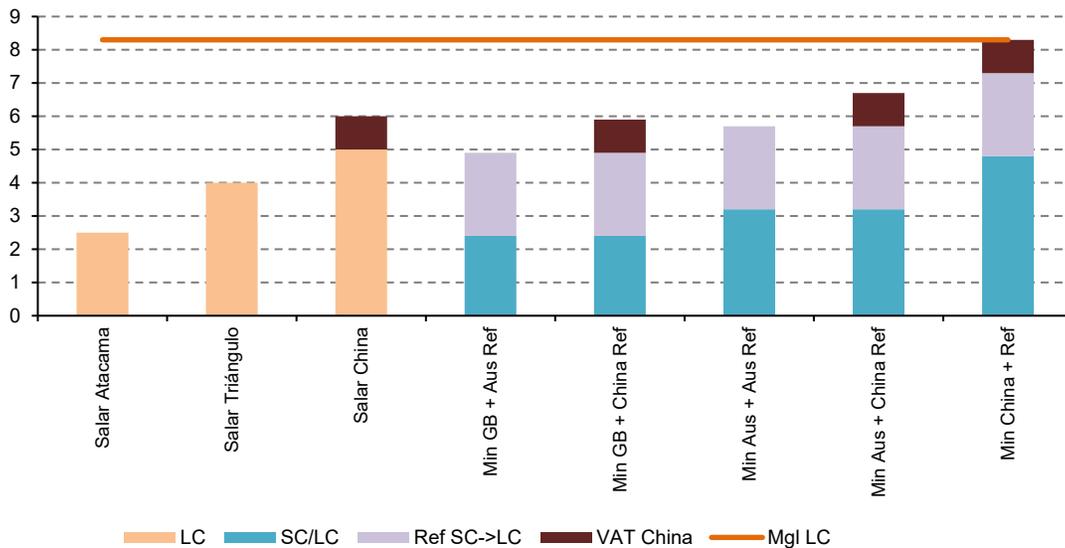
B. Curva de costos genérica

Además de los costos independientes de cada proyecto y su posición relativa de costo entre ellos y entre salmuera y mineral, es imperativo tener en cuenta donde se ubicará el costo marginal de producción durante los próximos años para tener una idea de que proyectos son económicamente viables. Para este

ejercicio se divide la producción de carbonato e hidróxido en distintos grupos de costos según tipo de recurso y ubicaciones de producción y refinación. En el caso de las salmueras se presentan 3 grupos, salar de Atacama, salares en el triángulo y salares en China. En el caso de minerales se tienen diferencias de costo dependiendo del lugar de refinación del espodumeno a hidróxido o carbonato (mano de obra, IVA), debido a esto se presentan 5 grupos, mina Greenbushes con refinación en Australia, mina Greenbushes con refinación en China, recurso mineral australiano con refinación en Australia, recurso mineral australiano con refinación en China y finalmente recurso chino con refinación en China. Los siguientes 2 gráficos resumen la comparativa entre ellos. En el caso de los gasto operativos en Li_2CO_3 se aprecia como la salmuera está bien posicionada en relación al espodumeno, los recursos no chinos tienen costos menores que cualquier productor de mineral, mientras que los salares chinos estarán cerca del costo de producción desde recursos australiano refinados tanto en China como Australia, finalmente el productor de mayor costo es el recurso mineral y refinación en China el cual se acerca a $\text{kUSD/MT } 8,3$ incluyendo el IVA que no se recupera al exportar productos desde China. Se asume a este como el futuro productor de costo marginal debido a su gran capacidad de crecimiento desde lepidolitas de baja ley, en función de esto se visualiza como en general todo proyecto dentro del triángulo del litio debería ser viable en el largo plazo en términos económicos.

En el caso del hidróxido se observa que debido al costo extra que deber afrontar el productor desde salmuera para poder llegar hasta este producto pierde sustancialmente su ventaja por sobre los minerales. Si bien el salar de Atacama se mantiene como el más barato, las producciones desde otros sectores del triángulo se observan más caras en términos relativos a la producción de minerales desde Australia independiente de su lugar de refinación. Es importante destacar que se mantiene como productor marginal a la producción mineral desde China, por lo que si bien el margen es menor para el productor de salmuera si decide producir hidróxido de litio, este sigue siendo positivo.

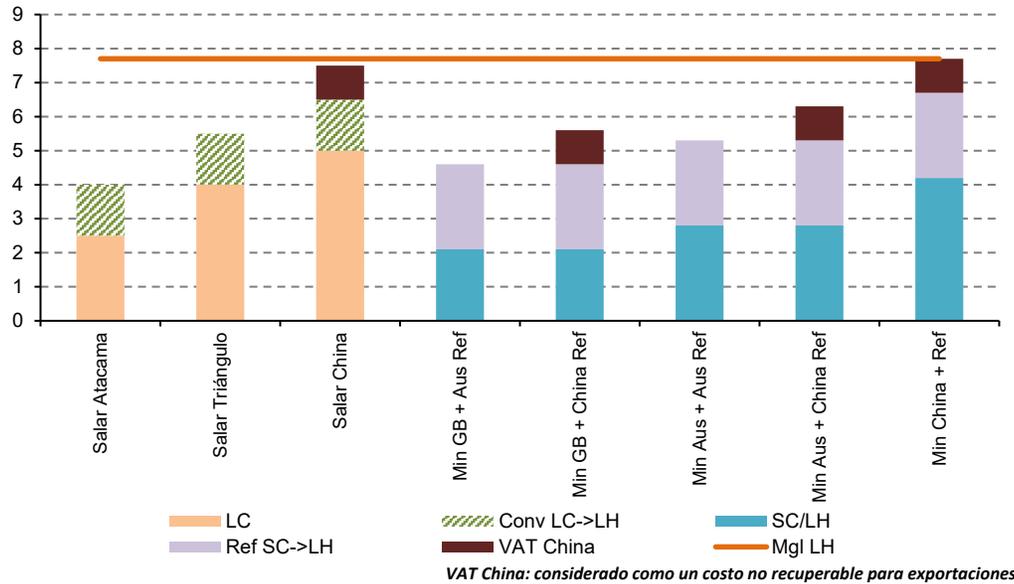
Gráfico 29
Gastos operativos por recurso en la producción de Li_2CO_3
(En miles de dólares por tonelada de LCE)



VAT China: considerado como un costo no recuperable para exportaciones

Fuente: Elaboración propia.

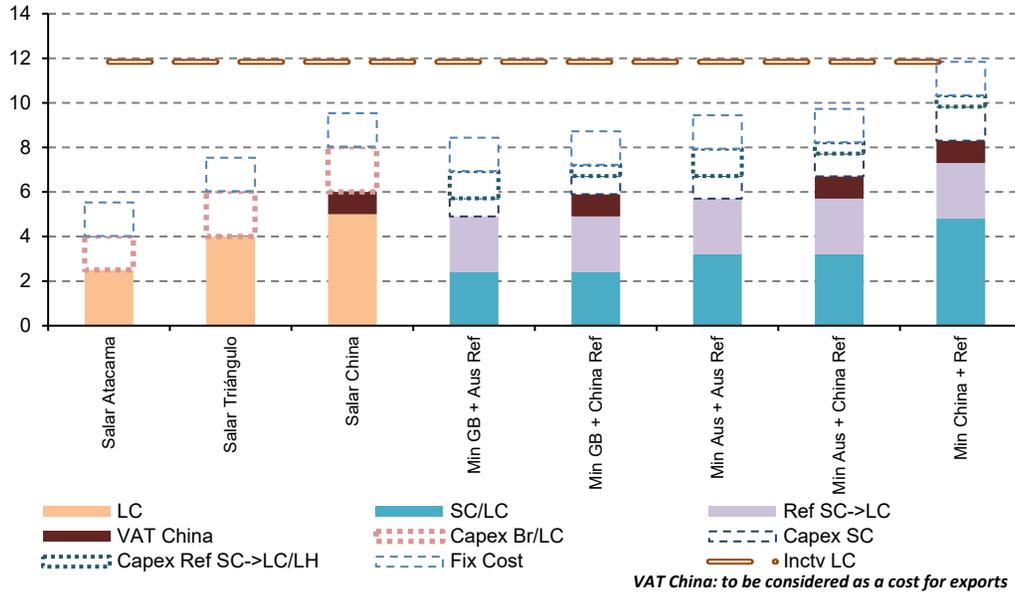
Gráfico 30
Gastos operativos por recurso en la producción de LiOH
(En miles de dólares por tonelada de LCE)



Fuente: Elaboración propia.

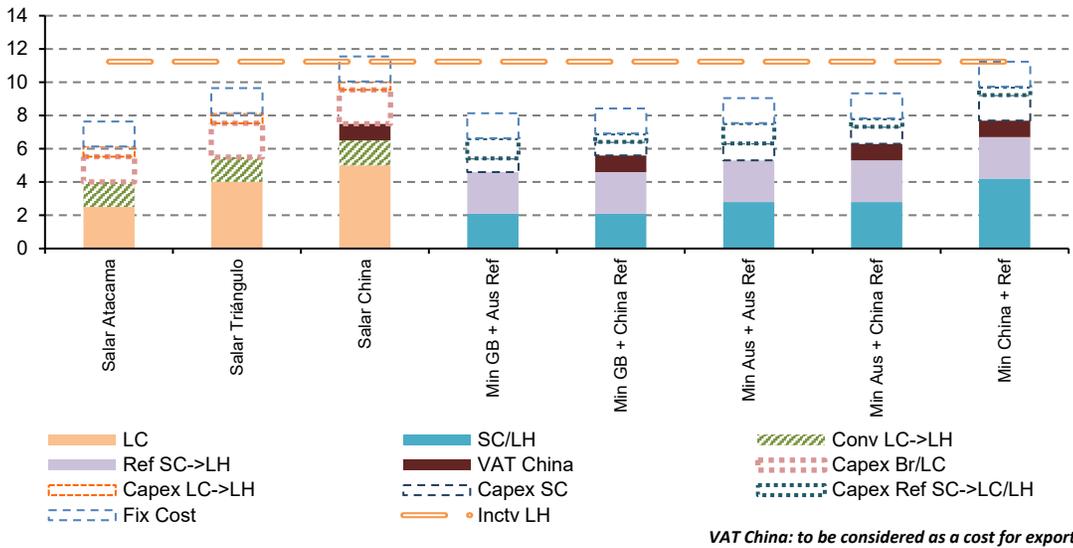
Con este análisis se concluye que los costos marginales de producción en el largo plazo para ambos químicos deberían proceder de material mineral proveniente de China y refinado en China, sin embargo, para que un proyecto se lleve a cabo este también debe ser capaz de cubrir los gastos de capital incurridos en la etapa de desarrollo. Los gráficos 31 y 32 presentan el mismo análisis del inciso anterior, pero ahora incluyendo los gastos de capital en una cuota anual a 20 años a una tasa de descuento del 8% y un costo fijo de producción de kUSD/Mt 1,5. La inclusión de estos gastos permite visualizar el precio de incentivo necesario para que un proyecto que no ha sido construido se realice. En el caso del carbonato de litio se observa que el precio de incentivo para que el productor marginal esté dispuesto a realizar la inversión es de kUSD/MT LCE 12 y en el caso del LiOH es levemente menor debido a que la unidad de medida es toneladas métricas de LCE y el hidróxido tiene menor contenido de litio. También se aprecia que, en el caso del hidróxido, la producción de salares desde China no tendría incentivos suficientes para producir hidróxido debido a que sus costos totales sería mayores que el del productor marginal.

Gráfico 31
Gastos operativos y de capital por recurso en la producción de Li₂CO₃
 (En miles de dólares por tonelada de LCE)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 32
Gastos operativos y de capital por recurso en la producción de LiOH
 (En miles de dólares por tonelada de LCE)



Fuente: Elaboración propia.

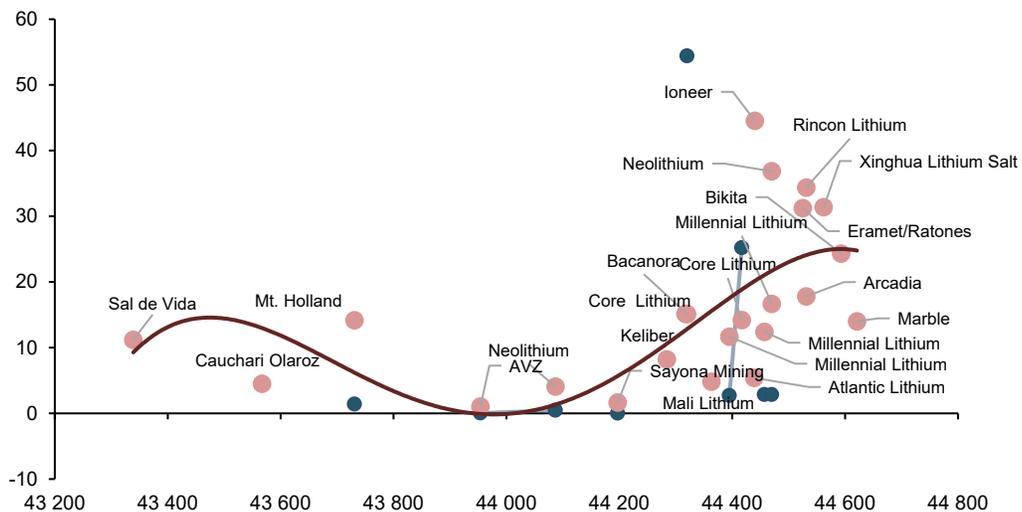
C. Financiamiento de proyectos

Como se dilucidó en capítulos anteriores, se espera que el mercado de litio este muy estrecho en los años venideros, muchos proyectos que hoy solo se encuentran en estado de estudio serán necesarios para cubrir la gran demanda que se avecina, además un proyecto en la parte alta de la curva de costos

necesitará ver precios mínimos alrededor de kUSD/MT LCE 12 para ser llevado a cabo. Debido a esto, se ve una correlación entre inversiones de capital realizadas en proyectos de litio y el precio de mercado, a mayores precios el interés en proyectos de litio que no están financiados aumenta, el gráfico 33 muestra las distintas transacciones públicas que han ocurrido.

Un proyecto de salmuera se demora alrededor de 7 a 10 años desde la etapa de exploración temprana a producción industrial, debido a esto, el descubrimiento de un recurso nuevo de litio durante esta década difícilmente estará en producción antes de 2030 por lo que la oferta de litio tendrá que venir de proyectos existente que hayan sido financiados. Desde esta perspectiva Chile y Bolivia se encuentra en desventaja respecto a Argentina. La gran cantidad de proyectos en Argentina, más el alto precio de litio durante el 2021 acrecentaron enormemente las inversiones extranjeras en términos de adquisición de recursos realizadas en litio en el país y en consecuencia su capacidad futura de producción. Por otro lado, la poca claridad con respecto a recursos en Chile y Bolivia hace dudar su relevancia productiva durante esta y la siguiente década.

Gráfico 33
Inversiones de capital a proyectos de litio
(En miles de dólares por tonelada de capacidad esperada de LCE)



Fuente: Elaboración propia, base de datos de iLiMarkets.

V. Oportunidades y desafíos institucionales

En el siguiente capítulo se hace breve mención de la legislación actual de cada país del triángulo y en el caso de Chile dar claridad de la relación actual entre la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) y los actores en el salar de Atacama, además de un análisis del proceso de licitación de Contratos Especiales de Operación de Litio (CEOL) del año 2021-2022. Luego se presenta un modelo simple de valor presente neto para un proyecto estándar de litio en cada país del triángulo, de manera de comparar los efectos de royalties e impuestos entre ellos y contra un proyecto de las mismas cualidades, pero de minerales en Australia, y finalmente, dar paso a presentar lineamiento de políticas públicas que puedan ayudar en la agregación de valor.

A. Chile

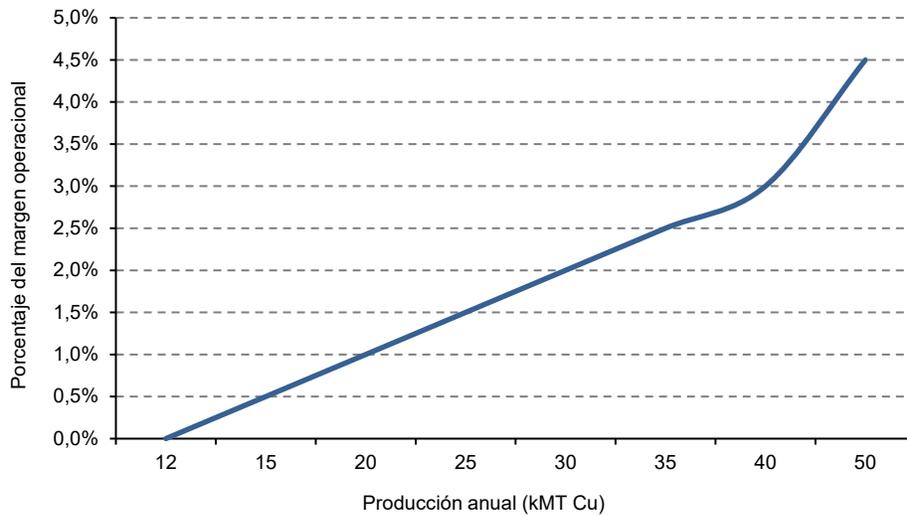
1. Litio y su legislación

La legislación vigente con relación al litio se basa en el código nacional minero publicado en 1981 y considera al litio como un mineral estratégico y por lo tanto pertenece al Estado de Chile. Para poder realizar explotación del litio en una pertenencia minera posterior a 1981 se debe contar con un CEOL, el cual es un acuerdo específico para la exploración y explotación de litio. En el caso que a un actor le sea otorgado un CEOL está tendrá condiciones específicas de royalties. La primera es el Impuesto Específico a la Minería (2005 Ley 20.026) el cual está definido con tasas diferenciadas según niveles de ventas. Este varía de acorde al tamaño de la operación minera: si es menor a 50 kMT Cu (Cobre) el royalty se cobra sobre el margen operacional y su nivel se basa en función de la producción anual de Cu (véase el gráfico 34). El grupo 2 en cambio (nivel de producción sobre 50 kMT Cu) el royalty se calcula sobre el porcentaje del margen operacional sobre Ingresos de manera progresiva desde un 5% al 14% como se ve en el gráfico 35. El impuesto corporativo es del 27%.

La relación -litio cobre se hace en función de una regla de tres entre precio Cu, Precio Li_2CO_3 y producción de LCE, el cuadro 10 muestra el precio de inflexión entre grupo de royalties para un proyecto de 20 kMT LCE (proyecto estándar), a modo de ejemplo, si el precio del Cu es USD/LB 3, un productor de 20 kMT LCE estará en el grupo 1 del royalty si el precio del Li es menor a USD/Kg 16,5.

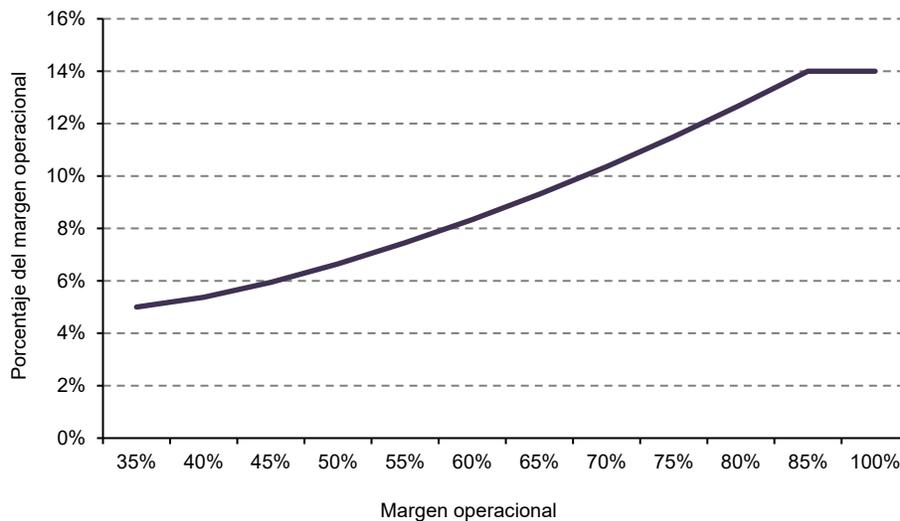
El siguiente royalty es el que se propone en las bases de participación del CEOL de 2021, en donde, además del impuesto a la minería, se cobraría uno específico al litio en función del porcentaje de margen operacional anual, este royalty parte desde el 7%, llegando hasta el 16% como se ve en el gráfico 36.

Gráfico 34
Royalty efectivo minero grupo 1
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia, Código de Minería, Ley 20.026 Artículo 64 bis.

Gráfico 35
Royalty efectivo minero grupo 2
(En porcentajes)



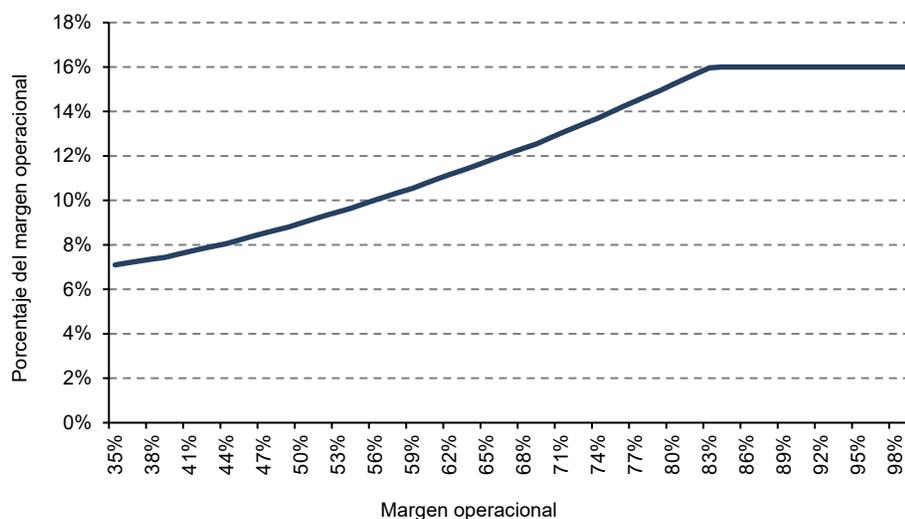
Fuente: Elaboración propia, Código de Minería, Ley 20.026 Artículo 64 bis.

Cuadro 10
Precio de inflexión entre grupos de Royalty

Cu Price	Li2CO3 Price	Cu Price
USD/LB	USD/Kg-LCE	USD/Kg
2,5	13,8	5,51
3,0	16,5	6,61
3,5	19,3	7,71
4,0	22,0	8,82
4,5	24,8	9,92
5,0	27,6	11,02

Fuente: Elaboración propia, Código de Minería, Ley 20.026 Artículo 64 bis.

Gráfico 36
Royalty específico al litio
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia, Bases de Licitación Pública Nacional E internacional para la suscripción de CEOL para la exploración, explotación y beneficio de yacimientos de litio, 27 de Julio de 2021.

2. Albemarle y SQM

En la actualidad, ambos productores (ALB & SQM) de litio en Chile se encuentran operando en el Salar de Atacama, las operaciones de SQM datan del año 1997 con la producción de carbonato de litio en Salar del Carmen y las de Albemarle (en ese tiempo llamado Rockwood) desde 1984 con la construcción de la planta de carbonato. Ambos tienen permiso de extracción hasta el año 2030 y 2043. El cuadro inferior presentada en el Estudio de caso sobre la gobernanza del litio en Chile (2020) resume correctamente las condiciones de los permisos actuales.

Además de las condiciones pactadas, debido a la necesidad de desarrollar una industria aguas abajo en la producción de compuestos de litio, se incluyó una cláusula en donde el 25% de las producciones de cada una de ella debe ir a precio preferente, si es que existiese, a una empresa de productos especializados de litio aprobado por la CORFO que avancen en la cadena de valor y desarrollen sus labores de producción en Chile (Anexo 11 del contrato de arriendo). La iniciativa todavía no rinde frutos

ya que en el año 2017 se hizo un llamado internacional que fracasó debido a la desconexión entre los productos ofrecido por Albemarle y lo que necesitaban las empresas y el mal momento del precio de litio a nivel global (Poveda,2020).

Cuadro 11
Condiciones de los contratos de ALB y SQM

Conceptos	Albemarle	SQM
Cuota extracción	Nueva de 262 131 tons. + remanente de 110 de la anterior cuota de 200000	de 349 553 tons. + remanente de 64816 de la anterior de 180 001
Extracción salmuera y agua	Se mantienen en 442l/s y 23,4l/s	Se mantienen en 1500l/s y 240l/s
Plazo	31-12-2043 (antes no fijado)	31-12-30 (se mantiene)
Royalty (pago comisión)	6,8% a 40% por precio de Li. (antes no existía)	6,8 a 40% por precio de Li. (antes 5,8% fijo)
Aportes para I+D	Entre US\$ 6 y US\$ 12,4 millones (antes no existían)	Entre US\$ 10,7 y US\$ 18,9 millones (antes el 0,8% del 5,8%)
Incentivo al valor agregado	Hasta un 25% de la producción a precio preferente	Hasta un 25% de la producción a precio preferente
Comunidades	3,5% de las ventas	Entre US\$ 10 y US\$ 15 millones
Control y fiscalización	Acceso a información operativa, financiera y ambiental	Acceso a información operativa, financiera y ambiental

Fuente: R. Poveda Bonilla, "Estudio de caso sobre la gobernanza del litio en Chile", serie Recursos Naturales y Desarrollo, N° 195 (LC/TS.2020/40), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2020.

3. Proceso de licitación CEOL 2021

En Julio de 2021, el Ministerio de Minería empezó el proceso denominado como Licitación Pública e Internacional para la suscripción de CEOL para la exploración, explotación y beneficio de yacimiento de litio, el cual buscaba otorgar un máximo de 5 contratos especiales, cada uno por una cantidad de producción igual 80 kMT de litio metálico durante la vida del proyecto (alrededor de 425 kMT LCE~21 kMT LCE anuales), con plazos de 7 años de exploración, extensible por 2 años más y luego 20 años de explotación, el contrato podría ser aplicado en cualquier recurso natural de litio en Chile mientras se aprueben los permisos correspondientes. A este se le aplica un royalty exclusivo, el cual se detalló en el inciso pasado. Cada participante podía ofertar por un máximo de 2 contratos de los 5, ofreciendo un precio mínimo de licitación de MUSD 5 por contrato. Con fecha de 14 de enero de 2022 fueron presentados los resultados de la licitación, los cuales fueron seleccionados en función de que las propuestas emitidas fueran aquellas que *"satisfacen de forma adecuada y eficiente el interés público y privado para el aprovechamiento de litio, permitiendo generar sinergias entre el sector público y privado para el uso de los recurso y reservas de litio existente en nuestro país."* (Diario Oficial, 13 de octubre de 2021).

Los ganadores fueron: BYD, empresa de origen Chino que cuenta con la mayor producción de vehículos eléctricos a nivel global y en Chile es quien provee de 435 buses eléctricos para la red de transporte público de Santiago, con una oferta de MUSD 61 por una cuota y; el Grupo Errázuriz (Servicios y Operaciones Mineras del Norte S.A), conglomerado perteneciente a Francisco Javier Errázuriz que cuenta entre otros con producciones de yodo y pertenencias mineras con litio, ofreciendo MUSD 60 por otra cuota.

Sin embargo, el proceso se encuentra suspendido debido a la discusión latente de si efectivamente de esta forma se maximiza el interés público, de las comunidades y de la sinergia con el ente estatal, argumentando que la cuota no da ninguna garantía sobre el desarrollo de industria aguas abajo en la cadena de valor.

B. Argentina

1. Litio y su legislación

La legislación argentina parte de una base federal y puede ser considerada la más liberal económicamente dentro de sus pares en la región, donde cada provincia otorga derecho de explotación y desarrollo de extracción de litio a empresas privadas a cambio de royalties sin interferir en las tasas productivas. Las provincias relevantes en este ámbito son Catamarca, Jujuy y Salta con niveles de royalties de 2% de las ventas, 1,6% de las ventas y 3% del margen operacional respectivamente. Debido a esto, encontramos en Argentina una gran cantidad de proyectos en distintas fases de desarrollo. El impuesto corporativo a la minería es del 25%. Argentina en su estrategia no visualiza la necesidad de incentivar la producción aguas debajo de químicos de litio, de hecho, permite la exportación de concentrado de cloruro de litio, producto con poco valor agregado, el cual luego es mandado a China para su refinación.

La pasividad del gobierno central argentino ha permitido que la relación entre provincias y proyectos de litio sea fluida y permita el desarrollo de nuevos proyectos desde actores internacionales de manera rápida.

C. Bolivia (Estado Plurinacional de)

1. Litio y su legislación

Como bien define Obaya (2019), el concepto de la extracción de litio se basa en 2 pilares fundamentales: una industria estatalmente controlada desde el acceso, la extracción y el desarrollo de químicos de litio en los salares y; la necesidad de desarrollar la industria aguas abajo con un componente estatal, pero asociándose con empresas extranjeras. Cabe destacar que la necesidad de asociarse con empresas extranjeras refleja la falta de mano de obra capacitada y expertos en el ámbito de la extracción del litio y su cadena de valor y que la apertura a esta opción se fue dando paulatinamente.

En 2010 Bolivia define su estrategia de industrialización (Estrategia Nacional de Industrialización de los Recursos Evaporíticos) presentando 3 fases (Obaya, 2019): la fase I, que busca desarrollar procesos de investigación y desarrollo en el marco tecnológico de la extracción de litio con la construcción de una planta piloto de carbonato de litio y semi industrial de cloruro de potasio. La fase II que se basa en producción industrial nacional con la construcción de una planta industrial de carbonato de litio (30 kMT LCE al año) y de cloruro de potasio (700 kMT al año) y finalmente la fase III que busca generar valor aguas abajo en la cadena con la producción de material activo de cátodo y LIB. Importante destacar que se esperaba la implementación de producción de la fase II para el 2016, lo cual no llegó a suceder, también destacar la exclusión de empresas privadas en las fases I y II, relegándoles solamente a actores socios para transferencias tecnológicas.

La creación de la Empresa Pública Nacional Estratégica Yacimientos de Litio Boliviano (YLB) en 2017 busca revitalizar los fallidos intentos de producción de litio en Bolivia, con su creación se intensificó el proceso de selección de empresas extranjeras para la fase III de producción de LIB (Obaya, 2019), culminando en la asociación entre YLB y ACI, pero no a nivel de producción de material de cátodos o baterías, si no a nivel de procesamiento de los residuos ricos en litio en la fase II posiblemente dejando en evidencia la baja tasa de recuperación de litio en el proceso presentado por YLB.

Según la Ley de Minería N° 535² los royalties se establecen en un 3% del valor bruto de la venta y en el caso del Salar de Uyuni, el 100% de ellos serán destinadas al municipio de Colcha K.

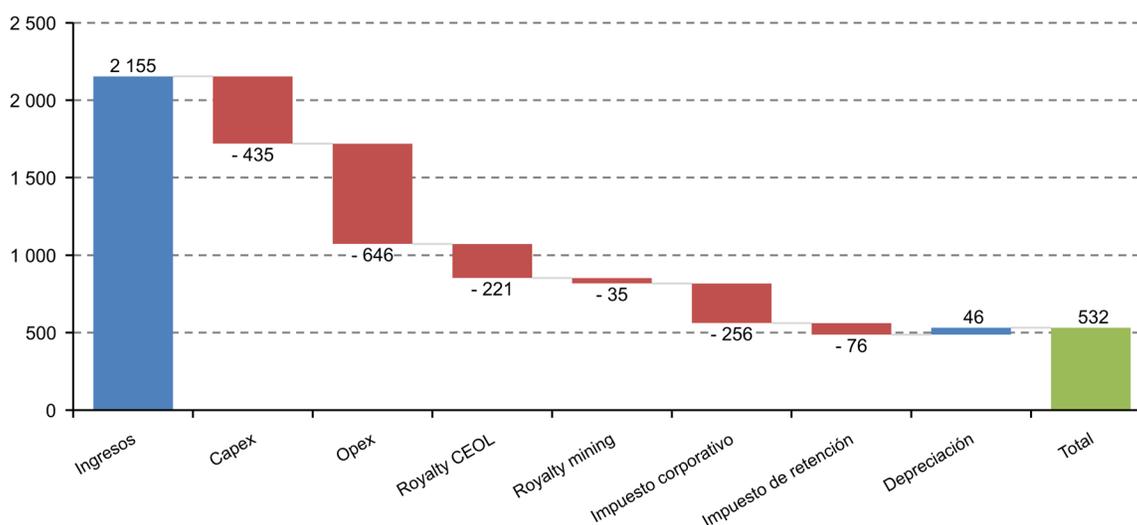
D. Oportunidades

1. Modelos económicos comparativos; efecto impuestos y royalties

Para cada uno de los países se presenta un modelo simple de flujo de caja para un proyecto tipo en cada jurisdicción para comparar los efectos que tienen las políticas de cada país con respecto al litio. Como supuestos generales se toma un proyecto de 20 kMT de producción anual de carbonato de litio, un precio promedio de largo plazo de USD/Kg 15 por MT de carbonato de litio con un tiempo de construcción de 3 años y con escalamientos de producción, partiendo con un 25% el año 1, un 65% el año 2 y 100% desde el año 3 en adelante, un WACC del 8% (costo promedio ponderado del capital por su nombre en inglés), intensidad de capital de kUSD/MT 20 y costos operativos de USD/Kg 4,5, por último se considera un Capex de mantención de 2% anual.

Para el caso de Chile, además se considera un precio de USD/LB 4 Cu, lo que implica que el tamaño del proyecto de litio en términos de producción de cobre es de 34 kMT Cu, lo que define que estaría en el grupo 1 de royalty a la minería en Chile, además se incluye el royalty CEOL que se había decidido para el proceso de 2021 – 2022, por último, impuesto corporativo del 27% y 8% de retención de impuesto, llegando a un 35%. El resultado es un valor presente neto del proyecto de MUSD 532 con una tasa interna de retorno (TIR) del 22%, la composición se presenta en el gráfico 37. Cabe considerar que el análisis no considera el pago del CEOL, lo cual se podría considerar como un gasto de capital al año 0. (en la licitación del último año se otorgó la cuota de extracción en primera instancia por MUSD 60).

Gráfico 37
Composición del VPN de un proyecto de litio en Chile
(En millones de dólares)

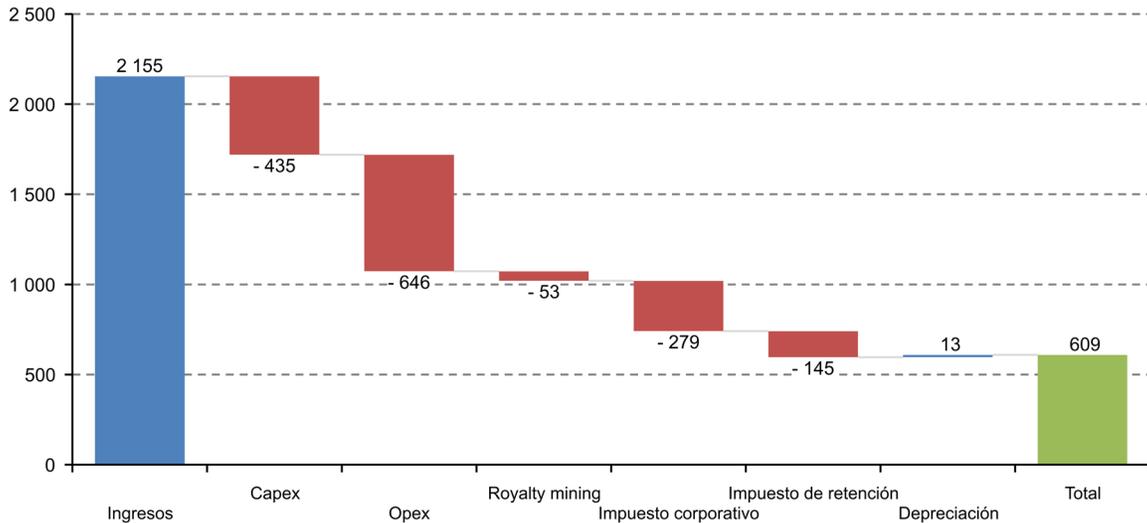


Fuente: Elaboración propia.

² <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/bol134697.pdf>.

En el caso argentino se utiliza la provincia de Catamarca debido a que es la que concentra la mayor cantidad de proyectos de litio en Argentina. El impuesto corporativo es del 25%, sujeto a un impuesto de retención del 13%, que se traduce en un 34,75% de impuesto sobre el ingreso (Millennial Lithium, DFS). El royalty al litio es de 3% del margen operacional. Los resultados muestran un valor presente neto de MUSD 609 con una TIR de 24%.

Gráfico 38
Composición del VPN de un proyecto de litio en Argentina, Salta
(En millones de dólares)



Fuente: Elaboración propia.

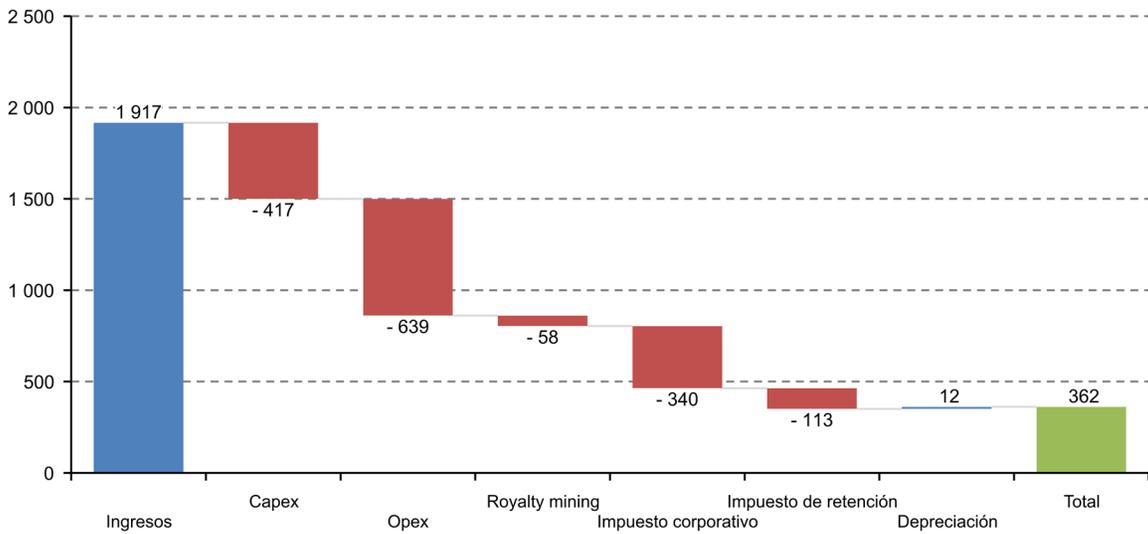
En el caso de Bolivia, el impuesto corporativo es del 25% pero a las actividades mineras se les aplica un extra de 12,5%, alcanzando un 37,5% del margen operacional, además de un impuesto de retención del 12,5%, finalmente el royalty al litio sería de un 3% del valor bruto de la venta (Deloitte, 2021). Además, dado las condiciones presentes de Bolivia en cuanto extracción de litio, el modelo prevé un escalamiento de producción más lento (aumentos del 25% anual) y un año extra de construcción, además, debido al alto nivel de impureza del salar de Uyuni se sube el gasto operativo aplicado de kUSD/Mt 4,5 a 5. Los resultados sugieren un VPN de MUSD 362 con una TIR del 18%.

Como se puede apreciar, para un proyecto de litio con las mismas características en cada país, se obtiene un valor presente neto distinto debido a la diferentes tasas y formas de aplicación de los royalties e impuestos. Argentina es, en términos de valor presente neto, el más atractivo de sus pares. Chile por su lado recolecta una cantidad mayor en royalties usando la forma definida en el último proceso de licitación de extracción de litio. En el caso de Bolivia el royalty al litio es mayor que sus pares debido a que se cobra por sobre los ingresos brutos en vez del margen neto. Hay que destacar que en el caso argentino no se toma en cuenta los problemas de tipo cambiario. En el anexo 3 se incluye análisis de sensibilidad para cada uno en forma de gráfico de tornado.

Más allá de la comparativa entre proyectos de salmuera en la región, estos también compiten contra la producción desde minerales, la cual se da en su mayoría en Australia, esta producción en general no se encuentra integrada hasta la producción de químicos y solo se produce hasta el concentrado de espodumeno el cual luego es vendido a refinadores de litio, predominantemente en China debido a la cercanía geográfica, barata mano de obra y gran cantidad de plantas de refinación ya construidas, los cuales refinan el espodumeno a carbonato o hidróxido y luego es vendido al mercado de cátodos en China, Japón y la República de Corea. En modelo supone un productor de espodumeno australiano no integrado

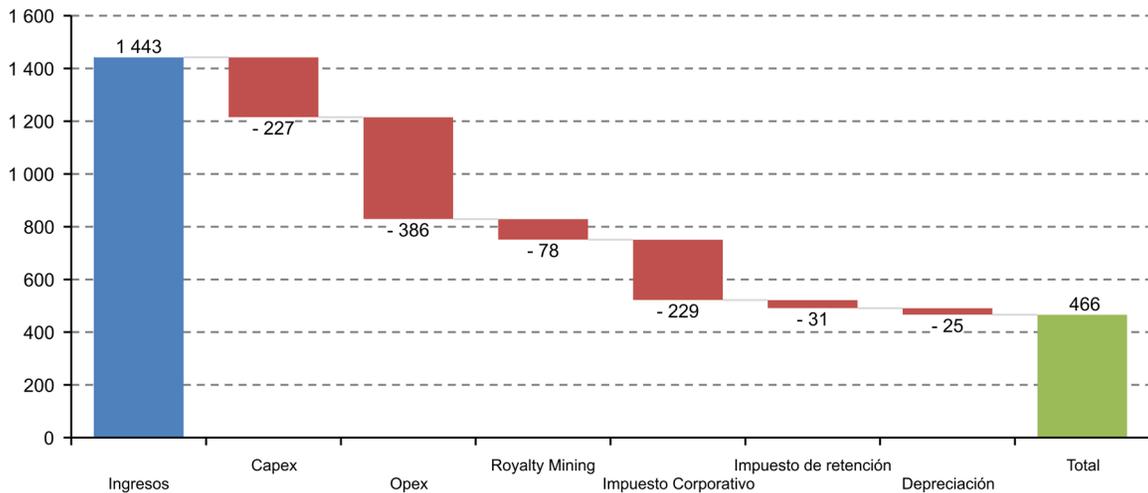
que produce alrededor de 20 kMT LCE anuales por 20 años, con intensidades de capital de 10 kUSD/MT LCE y gastos operativos de kUSD/MT LCE 2,4, como en el inciso anterior se asumió precios de kUSD/MT LCE 15 para carbonato, para espodumeno se considera precios de kUSD/MT 9 LCE ya que por simplicidad asumimos que se queda con el 50% del margen entre su costo de producción y el valor al cual el refinador podrá vender el carbonato, también la construcción tiene un periodo menos debido a que la dificultad de construcción de solamente la parte de concentración es relativamente fácil. Finalmente se toma el royalty al espodumeno, que es un 5% del margen bruto de la venta australiana y un impuesto corporativo del 30%. Los resultados indican un valor presente neto de MUSD 466 con una TIR del 30% (véase el gráfico 40).

Gráfico 39
Composición del VPN de un proyecto de litio en Bolivia (Estado Plurinacional de)
(En millones de dólares)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 40
Composición del VPN de un proyecto de SC6 en Australia
(En millones de dólares)



Fuente: Elaboración propia.

Desde los resultados, se concluye una serie de elementos: La propuesta productiva del espodumeno es atractiva y posee la TIR más alta. En términos de jurisdicción, Australia da bastantes más certezas jurídicas y políticas que los países del triángulo del litio y por el lado de la producción, al producir solo un concentrado se facilitan los tiempos de construcción y procesos necesarios para la operación. Si bien se puede argumentar que la producción de solo concentrado no aumenta el valor agregado del producto, vemos como por la estructura de royalties, logra recaudar más que los modelos propuestos para Argentina y Bolivia.

2. Lineamiento de políticas públicas para la agregación de valor

Los 3 países del triángulo de litio tienen distintas formas de ver la producción del litio hacia el futuro, partiendo por Argentina con una política liberal y abierta al ingreso de empresas extranjeras privadas sin injerencias del gobierno, hasta Bolivia donde se aboga por una producción 100% estatal. Ya que son tan distintas, es importante resaltar los resultados reales que han traído y que consecuencias han tenido para el desarrollo del litio.

Por parte de Chile vemos la aparición y producción de actores nuevos futuros se ha visto estancada debido al poco incentivo existente para explorar litio. Como el litio es un mineral estratégico perteneciente al Estado, los dueños de pertenencias mineras no están interesados en realizar exploración preliminar. Un efecto directo es la poca información profunda que hay sobre recursos y reservas a lo largo de los salares de Chile que se tiene. El proceso de licitación de CEOL es probablemente el camino más directo, dentro de la legislación actual, para aumentar la capacidad productiva de Chile y el interés de empresas extranjeras de operar en Chile.

Por el lado boliviano la falta de acceso a expertos y mano de obra calificada nacional para realizar las labores desencadenan que sean muy difícil llegar a sus aspiraciones de una producción de litio 100% nacional, Obaya (2019) comenta como el gobierno boliviano, al darse cuante de la brecha tecnológica, se ha abierto paulatinamente a la cooperación con empresas internacionales, pero sin proponer un modelo que económicamente atraiga.

Argentina por su lado se asemeja más a Australia, no hay incentivos puestos para el desarrollo aguas abajo de la cadena de valor, pero hay impuestos y royalties bien definidos para la producción de los químicos de litio, lo que se condice con la cantidad de inversiones de capital a proyectos que se ha visto en el último año.

En términos de la agregación de valor se ven diferencias importantes en lo logrado por cada uno, por un lado, la motivación de Chile y Bolivia de producir productos aguas abajo en la cadena de valor no ha rendido frutos y pone trabas importantes al desarrollo de proyectos debido a las condiciones que se les imponen a actores extranjeros que quieran participar. Por el lado de Bolivia, tendría que relacionarse con el Estado y con YLB, por el lado chileno, la necesidad de que se necesite previamente la obtención de un CEOL, reduce las oportunidades de ingreso solo ha momentos donde una licitación de CEOL ocurra y sea otorgada, procesos que no han llegado a buen puerto en su historia. Por el otro lado, Argentina, si bien no logra capturar una gran cantidad del valor agregado de la producción de litio, gracias a su apertura, ha creado un portafolio de proyectos para mantenerla y volverla relevante en la industria.

Cabe destacar que se espera que el cuello de botella de la industria de las baterías de esta década será por unidades de litio producidas y no por falta de capacidad de refinación. La gran capacidad química que posee China, más su velocidad para construir plantas nuevas pone en duda la necesidad de desarrollar una industria química en el triángulo del litio. Hoy en día la demanda de cátodos y baterías

actual se da China, Japón y la República de Corea, países que desde el punto de vista geográfico se encuentra más cercanos a Australia que al triángulo del litio, haciendo de Australia un competidor atractivo contra los salares. Hacia el futuro se espera que tanto la industria de cátodos como la de baterías se mueva hacia los mercados finales como Europa y Estados Unidos dándole un mayor espacio a la ubicación de América del Sur, pero sin hacerla extensamente relevante. En conclusión, las políticas desde el triángulo del litio deberían primero focalizarse en la extracción de unidades de litio para en primera instancia poner al país a niveles de producción importantes a escala mundial, y en segunda instancia promover la integración de la cadena de valor, pensando en los mercados futuros de Europa y Estados Unidos. Además, se debería resaltar las ventajas comparativas que tiene la salmuera en la producción de carbonato y en sostenibilidad a largo plazo contra la producción de minerales.

VI. Conclusiones y recomendación

El litio es una de las materias primas clave en la transición energética que está viviendo el mundo a través de la masificación de las baterías. Si bien se espera que el crecimiento de la demanda sea explosivo, este no está exento de amenazas. i) Los aumentos sustanciales de precio de las materias primas pueden generar movimientos hacia tecnologías sustitutas como el hidrógeno o las baterías de ion sodio. El análisis concluye que los aumentos de precio de litio tienen un impacto no despreciable en el costo de una batería, con precio de USD/Kg LCE 50 puede llegar a ser alrededor del 30% del costo de la batería. ii) Los altos precios incentivan aún más el reciclaje de baterías, y con ello de litio. Todo el litio que se está extrayendo y “almacenando” en baterías hoy, estará disponible y será reciclado a partir de fines de esta década una vez que la vida útil de las baterías haya llegado a su fin. Ello genera una nueva fuente de litio que se hace relevante a partir de comienzos de la década del 30 y con ello la necesidad de “litio fresco” disminuirá y con ello los precios. Esto significa que para aprovechar la oportunidad el sentido de urgencia es alto. Los tiempos de desarrollo de proyectos de salmuera van entre los 7-10 años, por lo tanto, resulta entonces de importancia tener un portafolio de proyectos en desarrollo o en etapa de exploración antes del 2025 y con posibilidades de financiamiento razonables. El desafío no parece fácil, en el caso de Chile el único CEOL vigente y que podría estar produciendo antes del 2030 es CODELCO en el Salar de Maricunga, en el caso de Bolivia, si bien se reconfiguró la propuesta de valor en 2010 para estar produciendo químicos de litio en 2016, los avances en términos de proceso productivo, construcción y producción han sido casi nulos y no se espera verlo en etapa productiva antes del 2030. La excepción a la regla es Argentina donde se visualizan al menos 7 nuevos productores hacia el 2026. El éxito de Argentina se debe en que su legislación minera ha atraído inversión en exploración y desarrollo de proyectos.

Desde en el punto de vista económico, para los salares hay una ventaja comparativa al producir carbonato. Si bien el análisis de costo marginal permite que productores de salmuera produzcan hidróxido de litio y generen valor, este es menor a que si produjeran carbonato debido al costo incremental del proceso. Además, se estima que la demanda por carbonato sea mayor al hidróxido por lo que se insta a que los productores desde salares se inclinen hacia la producción de carbonato para maximizar el margen.

Con respecto a tecnologías de extracción directa de litio (DLE), que se proponen para extraer litio de salares sin evaporar salmuera, dichas tecnologías están aún en etapas tempranas de desarrollo, llevan más de 15 años en ello. Hoy en día la única de estas que se utiliza para la producción de litio, es un híbrido utilizado por Livent en Argentina. Si bien es cierto la teoría dice que las DLE podrían aumentar la producción de litio y disminuir los costos relativos de producción de hidróxido comparado con las tecnologías convencionales de evaporación solar, los requerimientos energéticos, y con ellos la huella de carbono, son altos. Algunas de ellas requieren cantidades altas de agua fresca, que en esta parte del mundo no abunda. Actualmente es de alto riesgo pensar en estas tecnologías para desarrollar la producción de litio en el área.

Desde el punto de vista institucional las dificultades que han tenido los países del triángulo del litio para avanzar en su estrategia productiva del litio no han sido menores, Argentina en un futuro cercano cerrará la brecha productiva que tiene con Chile debido a su política liberal en promoción de exploración y explotación, atrayendo una gran cantidad de actores extranjeros a operar a Argentina. Chile y Bolivia se encuentran mucho más atrás debido a las dificultades legales que se presentan con respecto a la extracción de un mineral que no es concesible. En estos 2 países la inversión en exploración ha sido prácticamente cero, y lo continuará siendo en la medida que los incentivos no estén.

Para Bolivia, su gran desventaja es la falta de incentivos para que empresas extranjeras ingresen, la propuesta boliviana espera recibir la mano de obra calificada y con los conocimientos técnico para desarrollar tanto la etapa de extracción de litio, como la etapa de producción de productos aguas abajo desde el extranjero, sin ofrecer la posibilidad de que la empresa extranjera comercialice el litio.

Chile, su incertidumbre con respecto a los procesos de CEOL y sus posibles cambios en royalties mineros hace difícil la entrada de algún actor nuevo. La paralización del proceso de licitación de CEOL de 2021 justamente responde a esta problemática, donde se demuestra que no hay un conceso a nivel político de lo que significa el litio, cuanto valor se puede generar y de cuan corta duración es la oportunidad. La propuesta de Chile para atraer empresas de productos aguas abajo con un precio de venta preferente desde SQM o Albemarle es interesante, sin embargo, falla en visualizar el contexto mundial de la cadena de valor, el litio, si bien es una parte no menospreciable del costo del cátodo, también utiliza otras materias primas la cuales no se encuentra en Chile y tendrían que ser importadas, aún más, este cátodo luego tendría que ser enviado desde Chile a mercados importantes en la producción de batería o autos eléctrico como China, Japón y la República de Corea.

Finalmente, también nombrar la experiencia australiana, siendo una jurisdicción tradicionalmente minera y siendo el mayor productor de litio del mundo, vemos poco interés en moverse aguas abajo en la producción de químicos, optando por opciones más baratas como China para la refinación, lo cual se acerca al modelo de algunos proyectos en Argentina como Tibet Summit, los cuales pretenden producir un concentrado de cloruro de litio y exportarlo a China para su refinación, debido a esto no sorprende que Argentina es quien tenga más capacidad nueva de producción en los próximos 5 años.

Por último, hay que destacar que debido a la urgencia de la oportunidad las políticas deberían estar enfocadas hacia reglas claras que permita a actores extranjeros privados participar aplicándoseles royalties bien definidos. Se cree que el proceso de licitación de CEOL era a grandes rasgos la forma de avanzar en Chile para la producción de litio, si bien no responde a un desarrollo de valor agregado en la cadena de valor productiva del litio, si constituye un avance para la producción de litio en Chile y motivar la exploración de recursos. Posiblemente la falta de integración de las comunidades en la discusión ha sido un problema en la experiencia de Chile y Bolivia.

Bibliografía

- Aduanas Chile (2021), [en línea] <https://www.aduana.cl/exportacion-por-pais-y-codigo-arancelario/aduana/2018-12-14/101258.html>.
- Albemarle (2019), Investor Day Presentation 12 de diciembre de 2019 [en línea] https://investors.albemarle.com/presentations?field_nir_asset_date_value=2019.
- Argosy Minerals (2018), "PEA Results Rincon Lithium Project" November 2018, <https://www.asx.com.au/asxpdf/20181130/pdf/440v5cq9ohdmyl.pdf>.
- Battery Brunch, Volta Foundation, Intercalation (2021), Battery Report [en línea] <https://www.batterybrunch.org/battery-report>.
- BloomberNEF (2021), El futuro de las baterías de ion de litio y sus metales en Latinoamérica, 24 de junio de 2021 [Evento virtual].
- Burga, E., Burga, D. (2020), "Updated Feasibility Study and Mineral Reserve Estimation to Support 40,000 tpa Lithium carbonate Production at the Cauchari-Olaroz Salars, Jujuy Province, Argentina", Jujuy, Argentina, ACSI, Montgometry & Associates, https://www.lithiumamericas.com/_resources/pdf/investors/technical-reports/cauchari-olaroz/LAC-NI-43-101-Updated-DFS-FINAL-Oct-19-2020.pdf.
- Canaccord Genuity, Global Equity Research (August 2021), "Rating and Target Price Changes, EV Materials".
- Deloitte (2021), International Tax Bolivia Highlights May 2021, [en línea] <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Tax/dttl-tax-boliviahighlights-2021.pdf>.
- Diario Oficial de la República de Chile (octubre, 2021,) Ministerio de Minería establece requisitos y condiciones del contrato especial de operación para la exploración, explotación y beneficio de yacimientos de litio que el Estado de Chile suscribirá, conforme a las bases de licitación pública nacional e Internacional que se aprobarán para estos efectos, Santiago, 27 de julio de 2021.
- Galaxy Resources Limited (2016), "Sal de Vida: revised definitive feasibility study confirms low cost, long life and economically robust operation", 22 Agosto 2016. <https://gxy.com/wp-content/uploads/2020/05/439hfb9zq8bpwp.pdf>.
- Jarod C. Kelly, Michael Wang, Qiang Dai, Olumide Winjobi, "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 and Recycling, Volume" 174, 2021, 105762, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105762>.

- Marek Dworzanowski, Mike Rosko, Peter Ehren, "Feasibility Study of The Pastos Grandes Project in Salta province, Argentina", Vancouver, Canada, Worley [Estudio de Factibilidad] <http://minedocs.com/21/PASTOS-GRANDES-FS-07292019.pdf>.
- Mark King, Marek Dworzanowski (2021), "Feasibility Study (FS) - 3Q Project NI 43-101 Technical Report", Catamarca, Argentina, Worley [Estudio de Factibilidad] <https://www.neolithium.ca/pdf/Feasibility-Study-3Q-Project-Nov-25-2021.pdf>.
- Ministerio del Interior y Seguridad Pública y Ministerio de Minería Chile (2021), *Establece requisitos y condiciones del contrato especial de operación para la exploración, explotación, y beneficio de yacimientos de litio que el Estado de Chile suscribirá, conforme a las bases de licitación pública nacional e internacional que se aprobarán estos efectos*, Diario Oficial, Núm. 43.076, miércoles 13 de octubre de 2021.
- Ministerio de Minería de Chile (2021), *Autoriza el llamado y aprueba bases de licitación pública nacional e internacional para la suscripción de un contrato especial de operación para la exploración, explotación y beneficio de yacimientos de litio*, Santiago, 27 de Julio de 2021.
- M. Obaya, "Estudio de caso sobre la gobernanza del litio en el Estado Plurinacional de Bolivia", Documentos de Proyectos (LC/TS.2019/49), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2019.
- Modificación y fijación texto refundido y actualizado del contrato de arrendamiento de pertenencias mineras oma, CORFO y SQM Salar S.A y Otras, Repertorio N°707.2018.
- Morgan Stanley (2021), "The New Oil: Investment Implications of the Global Battery Economy", Bluepaper [Reporte de Investigación].
- Orocobre, Salar de Olaroz Lithium Facility [en línea] <https://www.orocobre.com/operations/salar-de-olaroz/>.
- Penta-Transaction (2021), [en línea] <https://penta-transaction.com/>.
- Rosskill (2020), "Lithium Outlook to 2030".
- Rosskill (October 2021), Lithium 18th Edition Update October 2021.
- Ronald Zenn, publicado en "Shipped Battery for Automotive in 2019" copilado desde SNE Research 02/2020, extraído desde Pilbara Minerals, disponible en: <http://www.pilbaraminerals.com.au/site/PDF/93f9906a-525b-4489-bd68-71f2259dac3b/CorporatePresentation>.
- R. Poveda Bonilla (2020), "Estudio de caso sobre la gobernanza del litio en Chile", serie Recursos Naturales y Desarrollo, N° 195 (LC/TS.2020/40), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- S&P Global, Lithium Price Assessment (2021), [en línea] <https://www.spglobal.com/platts/en/our-methodology/price-assessments/metals/china-lithium-assessment>.
- Standard Lithium, (January 2021), "Can direct lithium extraction unlock domestic mineral resources" [En línea] https://d1io3yogoox5.cloudfront.net/_638c9bab370e339dc1d434a9fd4336e5/standardlithium/db/314/1938/pdf/January+2022+Corp+Presentation.pdf.
- USGS (2021), U.S Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2021 [en línea] <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-lithium.pdf>.
- WorleyParsons (2019), "Definitive Feasibility Study of MSB Blanco Lithium Carbonate Project" Región de Atacama, Canadian Standard NI43-101, 17 de enero de 2019. <https://lithiumpowerinternational.com/wp-content/uploads/2019/01/Definitive-Feasibility-Study-of-MSB-Blanco-Lithium-Carbonate-Project.pdf>.

Anexos

Anexo 1

Análisis de sensibilidad del valor del litio en la cadena de valor

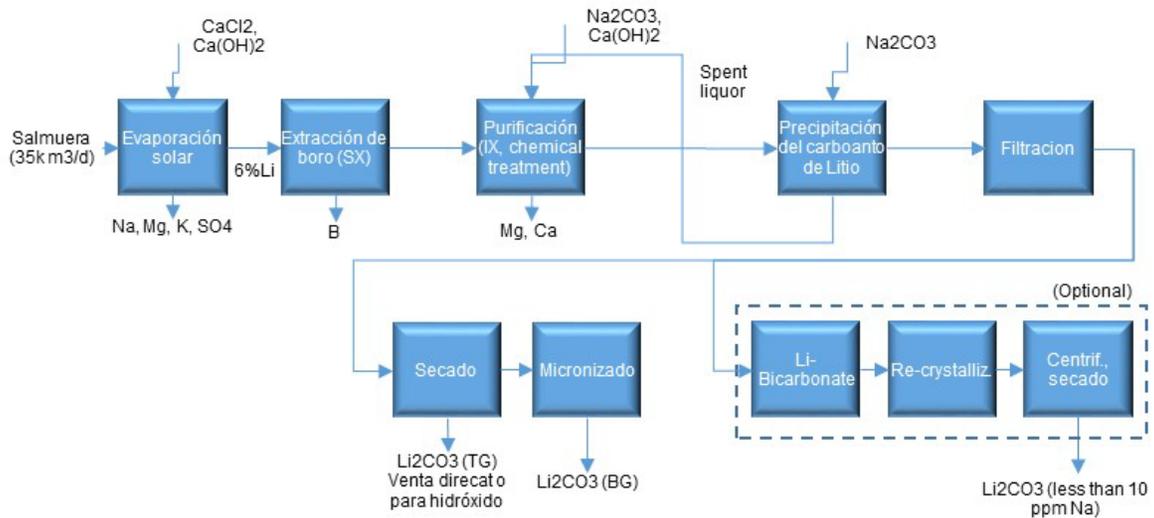
Cuadro A1
Análisis de sensibilidad por etapa de la cadena de valor

Costo de Li en el cátodo		Precios Li (USD/kg)					
Intensidad de uso (kg/kWh)	28%	5	7	10	15	30	50
	0,5	4%	6%	8%	11%	21%	30%
	0,7	6%	8%	11%	15%	27%	38%
	0,9	7%	10%	13%	19%	32%	44%
	1,2	9%	13%	17%	24%	38%	51%
Costo de Li en la batería		Precios Li (USD/kg)					
Intensidad de uso (kg/kWh)	7%	5	7	10	15	30	50
	0,5	2%	3%	4%	6%	11%	17%
	0,7	3%	4%	5%	8%	14%	22%
	0,9	3%	5%	7%	10%	18%	26%
	1,2	5%	6%	9%	12%	22%	32%
Costo de Li en EV		Precios Li (USD/kg)					
Intensidad de uso (kg/kWh)	2%	5	7	10	15	30	50
	0,5	1%	1%	2%	3%	5%	9%
	0,7	1%	2%	3%	4%	7%	12%
	0,9	2%	2%	3%	5%	9%	14%
	1,2	2%	3%	4%	6%	12%	18%

Fuente: Elaboración propia.

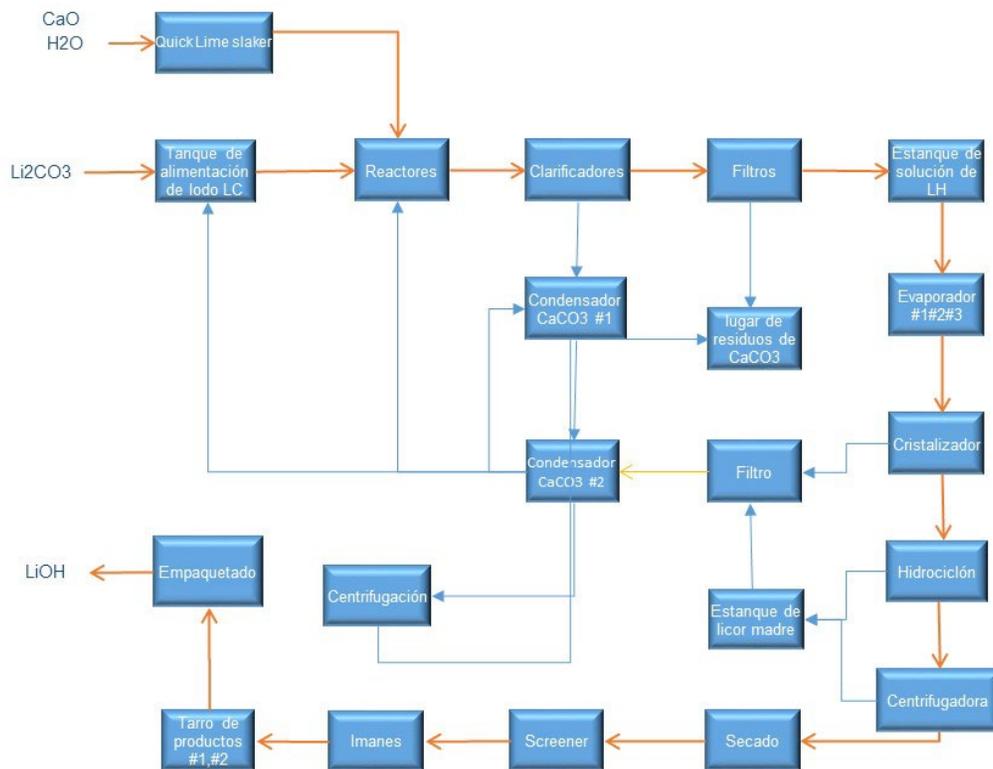
Anexo 2 Esquemas de procesos de producción de químicos de litio

Diagrama A1
Salmuera a carbonato de litio



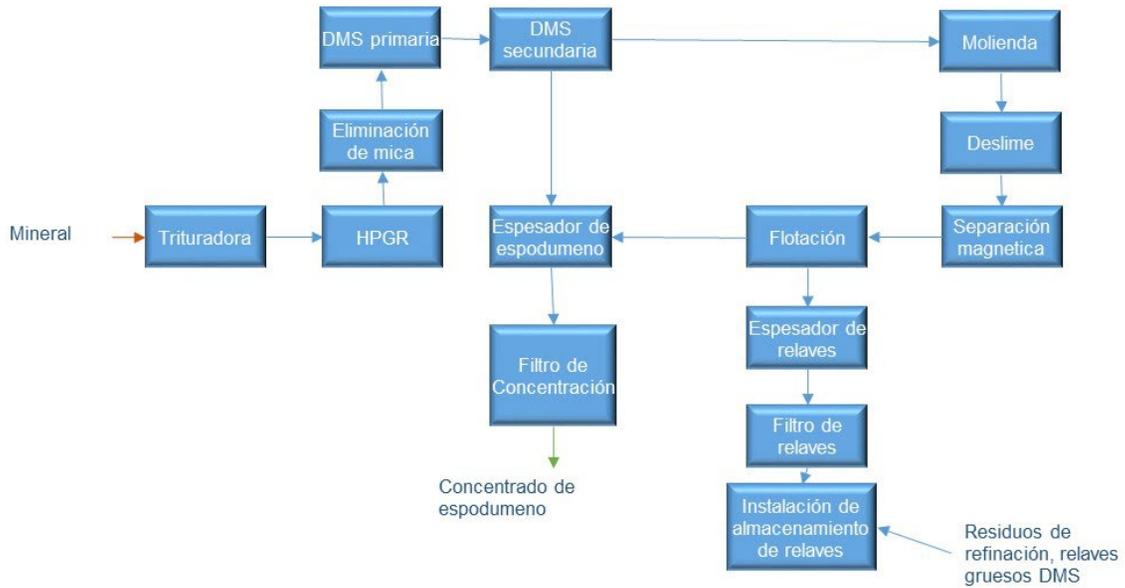
Fuente: Elaboración propia.

Diagrama A2
Salmuera a hidróxido de litio



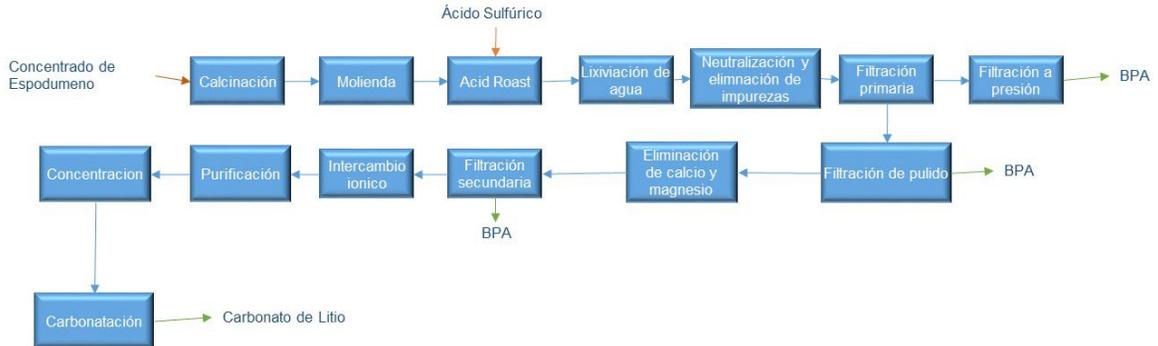
Fuente: Elaboración propia.

Diagrama A3
Minerales a concentrado de espodumeno



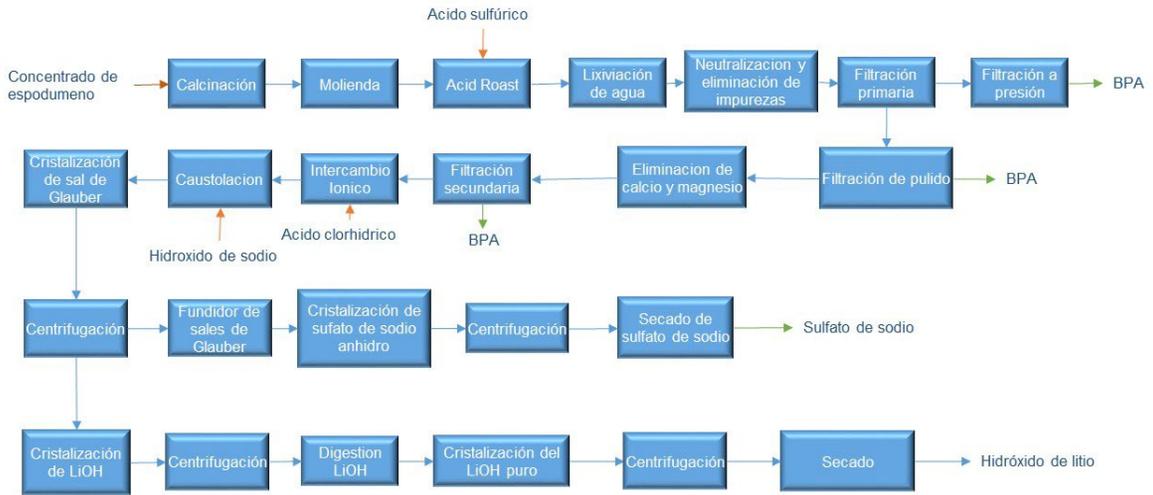
Fuente: Elaboración propia.

Diagrama A4
Espodumeno a carbonato de litio



Fuente: Elaboración propia.

Diagrama A5
Esposdumeno a hidróxido de litio

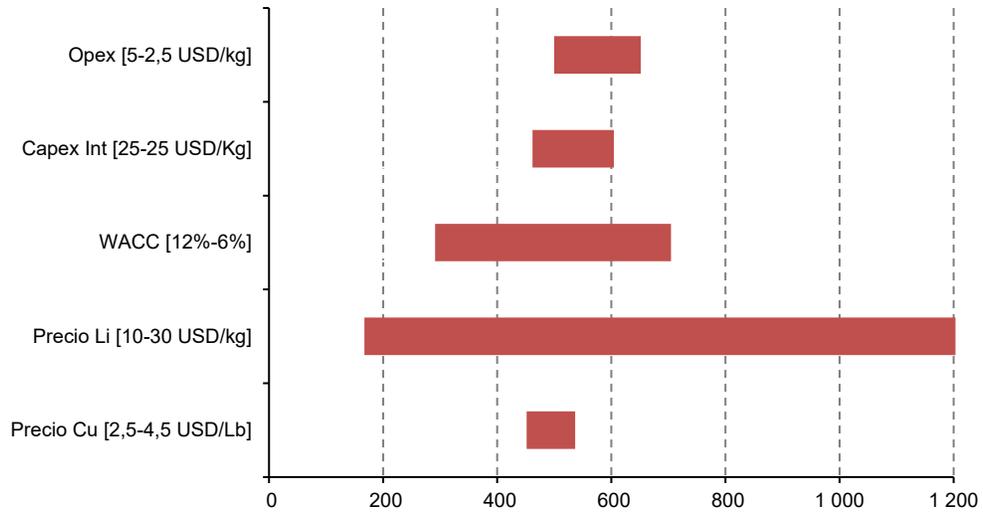


Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3

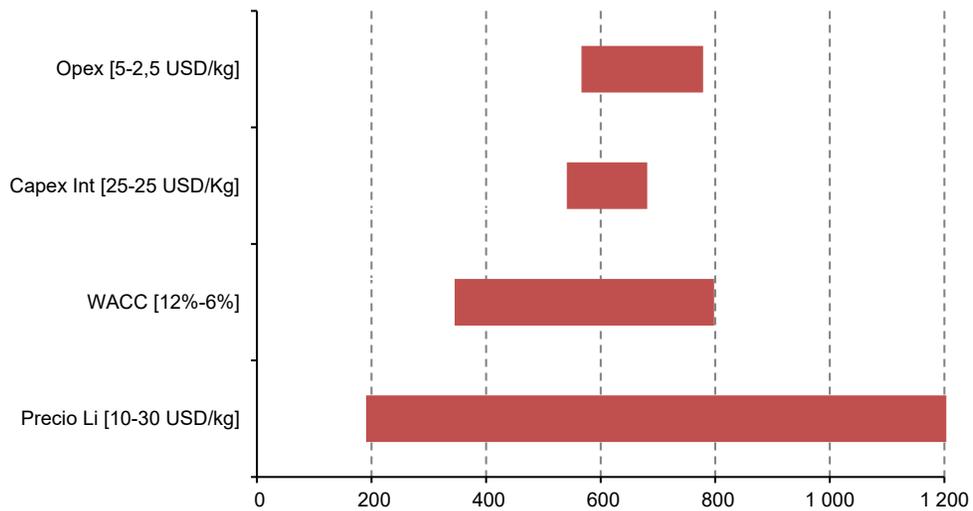
Análisis de sensibilidad valor presente neto proyecto de litio

Gráfico A1
Proyecto en Chile
(En millones de dólares)



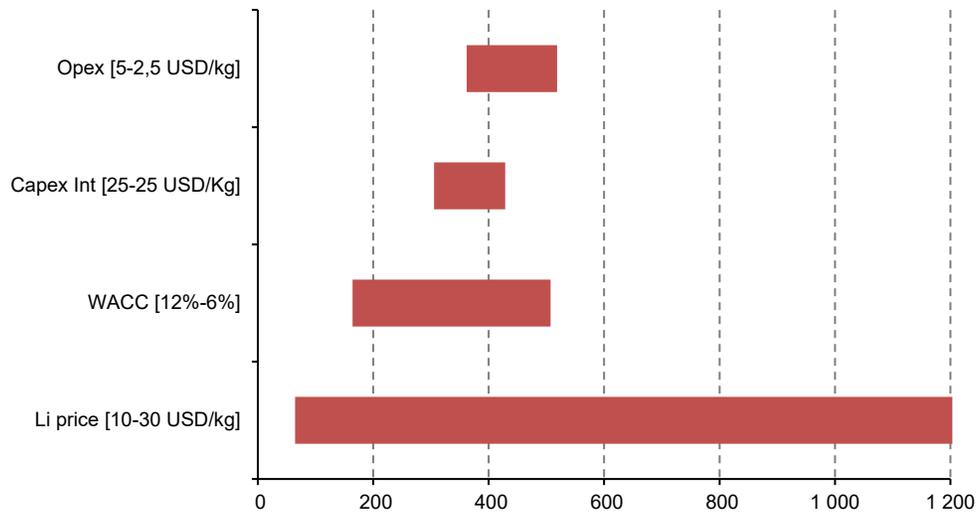
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico A2
Proyecto en Argentina
(En millones de dólares)



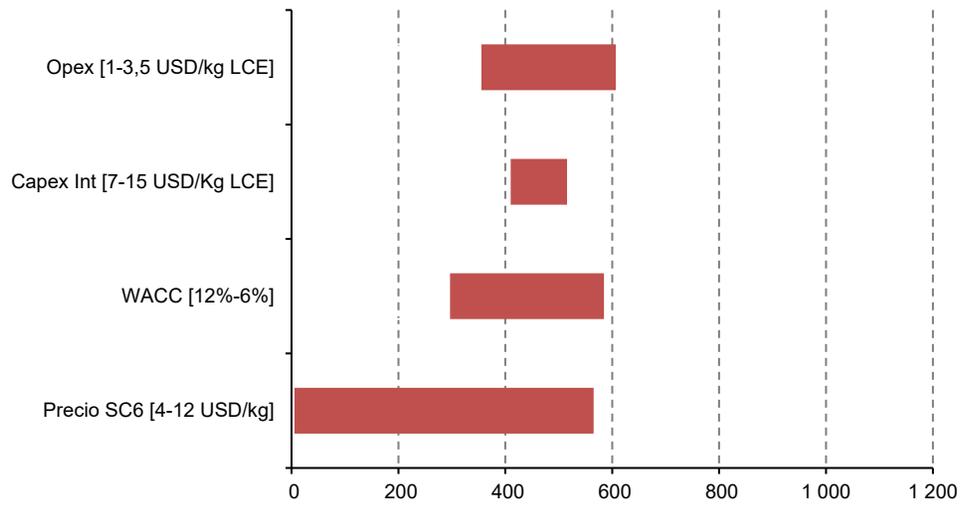
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico A3
Proyecto en Bolivia (Estado Plurinacional de)
(En millones de dólares)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico A4
Proyecto en Australia
(En millones de dólares)



Fuente: Elaboración propia.

La revolución energética y la electromovilidad están reemplazando paulatinamente el uso de motores de combustión interna, con lo que se incrementa el consumo de baterías. El litio es una materia prima clave en la producción de baterías de ion de litio. Su valor y demanda han aumentado de manera exponencial en los últimos años, y las proyecciones futuras son muy optimistas. El triángulo del litio, compuesto por la Argentina, Bolivia (Estado Plurinacional de) y Chile, se destaca en el mundo por contar con importantes reservas de este elemento. Los tres países buscan progresar en la minería del litio aprovechando la oportunidad para agregar valor, pero con trayectorias distintas debido a sus políticas y leyes respecto del tema. En el presente documento se analizan los ámbitos técnico, tecnológico, económico y legislativo de la producción en el triángulo del litio, y qué medidas podrían agregar valor a la producción de compuestos de litio, con especial énfasis en la cadena de valor hasta la producción de baterías. Además, se plantea que el reciclaje de litio afectará la demanda de litio minado y se destaca la urgencia de aumentar la producción en el corto plazo. En la producción de los distintos compuestos de litio, la de carbonato de litio del triángulo tendría una ventaja comparativa frente a la de Australia; en este documento se explica también por qué este país es un competidor importante.