



Universidad de Concepción

CORRE LITIO QUE TE PILLA EL SODIO

Pedro G. Toledo / Roberto E. Rozas / Rodrigo Yepsen / Leopoldo Gutiérrez

Serie Comunicacional CRHIAM

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Corre Litio que te pilla el Sodio.

Pedro G. Toledo, Roberto E. Rozas,

Rodrigo Yepsen y Leopoldo Gutiérrez.

Junio 2022

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

CORRE LITIO QUE TE PILLA EL SODIO

Pedro G. Toledo / Roberto E. Rozas / Rodrigo Yepsen / Leopoldo Gutiérrez

CORRE LITIO QUE TE PILLA EL SODIO

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU- Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Pedro G. Toledo

Ingeniero Civil Químico.
PhD in Chemical Engineering,
University of Minnesota, Estados Unidos.
Profesor titular, Departamento de Ingeniería
Química, Universidad de Concepción.
Subdirector e investigador principal CRHIAM.



Roberto E. Rozas

Ingeniero Civil Químico.
Doctor en Ciencias Naturales (Dr. rer. nat.),
Facultad de Matemáticas y Ciencias,
Universität zu Köln, Alemania.
Profesor Asociado del Departamento de Física,
Universidad del Bío Bío.
Investigador Adjunto CRHIAM.



Rodrigo Yepsen

Ingeniero Civil Metalúrgico.
Doctor en Ingeniería Metalúrgica,
Universidad de Concepción.



Leopoldo Gutiérrez

Ingeniero Civil Metalúrgico.
Doctor of Philosophy in Mineral Processing,
University of British Columbia, Canadá.
Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Metalúrgica,
Universidad de Concepción.
Investigador Principal CRHIAM.

RESUMEN

La presente Serie Comunicacional es una alerta sobre lo rápido que avanza el desarrollo de las baterías para autos eléctricos puros. El litio es clave en la transición a una economía verde con cero emisiones de carbono. Para muchos, Chile es privilegiado de contar con grandes reservas, que se encuentran entre las mayores del mundo. En algún momento se pensó en Chile como líder de la producción y contribuyente clave a la oferta de litio, sin embargo, no se pensó que la demanda crecería tan rápido.

Por diversos motivos que incluyen factores sociales, ambientales y políticos, la producción de este metal ha disminuido y continuará haciéndolo a la espera de decisiones de las autoridades del país. El precio del litio subió desde 6 mil dólares en 2018 a 60 mil dólares en 2022, un aumento de 450-500%, y continuará creciendo porque la oferta no tiene elasticidad suficiente para satisfacer las altas demandas.

En esta serie alertamos sobre el rápido avance de alternativas a las baterías de litio. Se trata de las baterías de sodio. La nueva batería de sodio almacena tanta energía como las baterías equivalentes de litio y mantiene más de 80% de su capacidad después de mil ciclos de carga y descarga. Se pensaba que este avance ocurriría en un horizonte de diez años, pero se adelantó. Aún no se puede decir que una batería de sodio reemplazará la de litio, pero la investigación en curso está demostrando que es viable y que incluso podría prescindir del cobalto, otro componente caro y escaso en las baterías. Es una buena noticia para el mundo que aspira a un ambiente limpio, pero para Chile puede representar una historia parecida a la de los nitratos (como el salitre), aunque esta vez no hay guerra de por medio en esta parte del mundo.

INTRODUCCIÓN

El litio juega un papel determinante en la transición a una economía verde o economía climática con cero emisiones de carbono. Las baterías de litio reemplazan al combustible fósil en los motores de combustión interna y, además, el litio es esencial para el almacenamiento de energía a gran escala. Este mineral tiene mucho que ver con el auge de las energías renovables y con el cumplimiento del Acuerdo de París de 2015 de disminuir el uso de combustibles fósiles.

En 2018, se realizó el EXPOMIN en Santiago de Chile, donde se llevó a cabo el I Seminario "Litio: Mercado y Tecnologías", con amplia participación de las empresas de litio del mundo. Se dijo que Chile tenía los mayores recursos y las mayores reservas comprobadas de litio a nivel mundial. Representantes de Australia, entre ellos el ilustre embajador, ungieron a Chile como el principal productor de litio del mundo a partir de 2019, en ese momento el mayor productor era Australia, que le quitó el primer lugar a Chile en 2017. Se prometió con bastante certeza que en 2023 las vitrinas de las automotoras ofrecerían los mismos modelos de auto a combustión y eléctrico al mismo precio, se auguró el fin adelantado del auto a petróleo. Como chilenos hoy vemos con frustración que ninguna de estas aseveraciones se hizo realidad.

De acuerdo con el Servicio Geológico de Estados Unidos, Chile ya no es uno de los países con las mayores reservas de litio. Hoy, los mayores recursos los tiene Bolivia con 21 millones de toneladas métricas y Argentina con 19.3 millones. Chile solo es tercero con 9.6 millones, seguido muy de cerca de Estados Unidos con 6.4 millones y China con 5.1 millones.

¿Que pasó entre 2018 y 2021? A continuación, siguen algunos datos y especulaciones. A diferencia de las reservas de Chile, no se sabe cuan comprobados son los recursos y reservas de Bolivia y Argentina, tampoco si se trata de litio extraíble. Lo que sí se sabe es que Chile no sigue explorando y por eso sus reservas permanecen estáticas en el tiempo. Chile tampoco alcanzó el estatus del mayor productor de litio del mundo, por más que Australia le hacía la venia. Esto también es frustrante porque el litio de Australia se encuentra en rocas y por tanto su producción es más difícil, más cara y posiblemente más contaminante, a diferencia del litio de Chile que ocurre en salmueras, que, si bien tiene sus propias complejidades, es considerablemente más barato y limpio de producir.

¿Qué ocurrió? Chile aceptó el desafío con júbilo, quiso liderar el *boom* mundial del litio, pero al mismo tiempo se embarcó en disputas sociales y políticas que estancaron el propósito indefinidamente y de paso empañaron la imagen de la minería chilena en general y del litio en particular. Australia sigue siendo el primer productor del mundo con 40 mil toneladas métricas, Chile es segundo con 18 mil, China tercera con 14 mil, y Argentina cuarta con 6.2 mil, Brasil, Zimbabue y Portugal aportan en conjunto unas 4 mil toneladas. En la EXPOMIN de 2018 también se anticipó una demanda desbordada producto de una gran "fiebre" por el litio, se advirtió sobre precios disparados si la oferta no crecía suficientemente rápido para atender una posible frenética demanda.

Esta suerte de presagio se ha ido cumpliendo, el precio de la tonelada de litio en la forma de carbonato de litio subió desde 6 mil dólares en 2018 a 60 mil dólares en 2022, un aumento de 450-500%, tendencia que para algunos analistas es irreversible porque la oferta está experimentando otras grandes dificultades para alcanzar la demanda, como el Covid y su impacto directo en la mano de obra, especialmente en Australia, interrupción de la producción por mantenimiento de plantas, restricciones anticontaminación en China, protestas medioambientales en Serbia, creciente cuestionamiento a las credenciales de sostenibilidad de los procesos de extracción en base a salmueras en los países sudamericanos, especialmente por el uso intensivo de agua, y actualmente la guerra en Ucrania que aleja a Rusia como proveedor.

En 2021, la demanda de litio superó la oferta por primera vez, y se prevé que la diferencia aumente. ¿Y qué pasa con la producción de litio en Chile? De cinco licencias disponibles para exploración y explotación del litio solo se asignaron dos, y actualmente están detenidas y en tribunales. La creación de una Empresa Nacional del Litio es vista con buenos ojos casi por todos, excepto por los que saben que el tiempo del Lito es ahora, no mañana.

El científico que sentó las bases para las baterías que se usan hoy, el ganador del Premio Nobel M. Stanley Whittingham, dijo "será litio por los próximos 10 a 20 años". Sin embargo este reinado del litio con seguridad será más corto, tal vez 10 años o menos. Con oferta insuficiente de litio, las baterías y los autos seguirán siendo anhelados, aunque inalcanzables para la mayoría, gran incentivo para los desarrolladores de baterías que buscan métodos y tecnologías de menor impacto que eviten el litio completamente. Un ejemplo es la batería de sodio que ya es una realidad, de aquí nace el "Corre Litio que

te pillar el Sodio" que titula esta serie. El sodio es mejor que el litio en todo menos en una propiedad importante para las baterías, almacena menos carga eléctrica, aunque se avanza a pasos agigantados para mejorar este aspecto.

FUENTES DE LITIO, MÉTODOS DE OBTENCIÓN Y APLICACIONES

El litio es el metal más liviano de los elementos sólidos de la tabla periódica. Características importantes incluyen alta conductividad eléctrica y térmica, baja viscosidad, y baja expansión térmica. Como es reactivo no es posible encontrarlo como metal puro, sino principalmente en minerales y salmueras desde donde es extraído y convertido a una amplia gama de compuestos. Las principales fuentes de litio son los salares (58%), rocas minerales (26%), arcillas ricas en litio (7%), salmueras provenientes de yacimientos de petróleo (3%), salmueras geotermales (3%) y zeolitas ricas en litio (3%) (de acuerdo con el Servicio Geológico de Estados Unidos, USGS).

Las salmueras enriquecidas en litio son de tres tipos: continentales, geotérmicas y de yacimientos de petróleo, siendo las continentales las más costo-efectivas para la extracción de litio. Las salmueras se encuentran principalmente en Sudamérica, Chile, Bolivia y Argentina, y en regiones de Estados Unidos, Canadá y China. Típicamente, la salmuera es bombeada a la superficie y depositada en piscinas grandes y someras para facilitar la evaporación solar y la concentración de salmuera de litio con contenido de litio entre 3 y 6%, que luego es procesado para obtener compuestos refinados para diversos propósitos.

Las rocas duras de litio son referidas como pegmatitas, originadas en procesos de enfriamiento y cristalización del magma. Existen tres tipos principales: espodumeno, que existe en Australia, Canadá, China, Brasil, Portugal; lepidolita, que existe y se procesa en China; y pentailita, que es menos rica en litio que el espodumeno. Las pegmatitas y el espodumeno en particular, son concentrados en una secuencia típica de procesos de molienda y flotación. Luego, los concentrados son procesados para obtener compuestos de litio para diversos procesos.

La Figura 1 muestra un diagrama que resume los procesos de extracción de litio desde las dos fuentes principales, pegmatitas y salmueras, los productos que se obtienen y las aplicaciones.

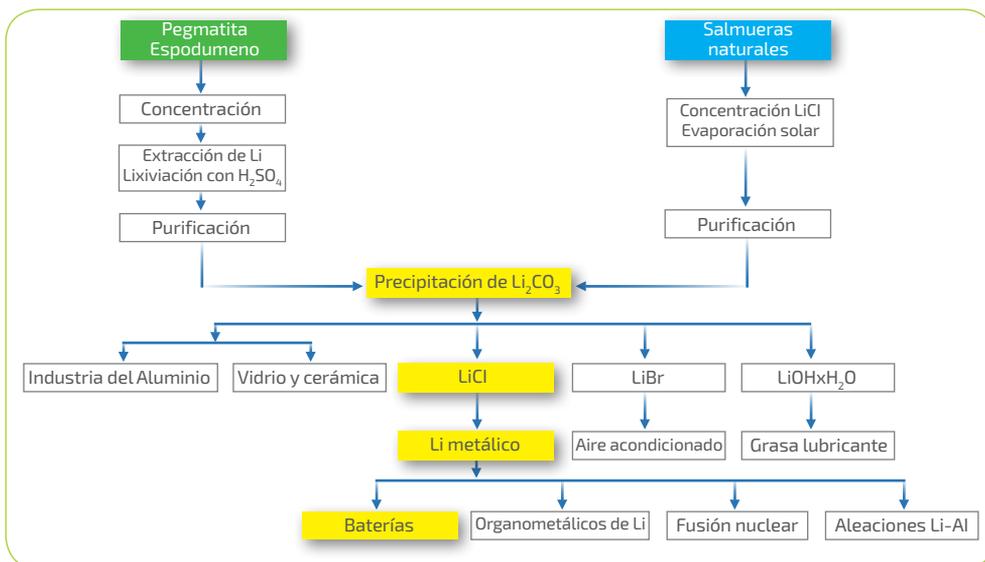


Figura 1.

Diagrama simplificado de los procesos de extracción de litio desde rocas y salmueras, subproductos y aplicaciones. En amarillo se destaca la ruta del litio para baterías. Fuente: Adaptado de Garcés, (2017).

DESAFÍOS DEL CAMINO A LA ENERGÍA LIMPIA EN CHILE

La creciente oposición a los nuevos contratos de litio es el último indicio de lo difícil que será para el mundo producir los componentes básicos de la transición a la energía limpia. Así se da la paradoja que personas que luchan por la reducción de la huella de carbón, dando paso a energías limpias, se oponen tenazmente a la extracción de litio elemento que es clave para la electromovilidad y el reemplazo del petróleo.

En 2021, Chile hizo pública una licitación de 400 mil toneladas más de litio metálico que quedarían a cargo de empresas privadas para aumentar la producción y recuperar la primera posición del país en los mercados internacionales. Sin embargo, solo se adjudicó un total de 160 mil toneladas, el 1.8% de las reservas comprobadas de Chile, a dos compañías que podrán extraer y comercializar el litio hasta el año 2050, la compañía china BYD

(80 mil toneladas) y la compañía chilena Servicios y Operaciones Mineras del Norte (80 mil toneladas). Las autoridades señalan que la participación de Chile en el mercado del litio cayó al 31% en 2021 y que no tiene nuevos proyectos, y que en 2030 la caída será al 17%, aunque la CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) proyecta que la caída en 2030 será al 15% debido a preocupaciones sociales, ambientales y políticas, y a una cartera pequeña de nuevos proyectos.

RECURSOS Y RESERVAS DE LITIO

Los recursos y reservas de litio en 2017, de acuerdo con USGS, se muestran en la Figura 2. En 2017 las reservas alcanzaron 15.6 millones de toneladas de litio, frente a 14.5 millones del 2016, crecimiento originado principalmente en Australia. Por su parte los recursos en 2017 fueron mayores en Argentina, Chile y, particularmente, en Australia que pasó de 2 a 5 millones de toneladas. En este tiempo se pensaba que las reservas de litio podrían satisfacer la demanda de 83 años, considerando que la demanda de 2017 se cuadruplicaría. El precio promedio del carbonato de litio e hidróxido de litio en Asia mostraba tendencia a la baja de acuerdo con el escenario de amplia oferta para la demanda en 2017. La Figura 3 muestra la evolución del precio entre 2015 y 2018.

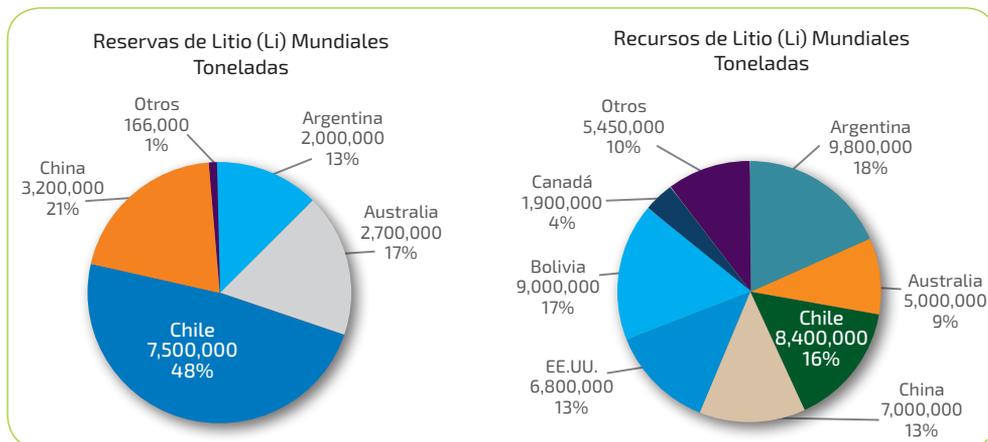


Figura 2.

Reservas y recursos de litio año 2017.

Fuente: Elaborado por Cochilco con datos de USCS.

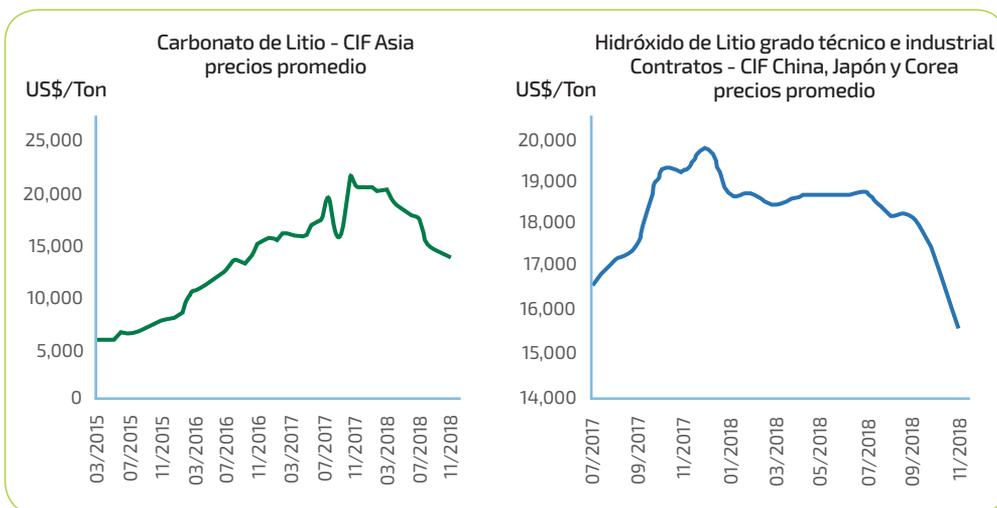


Figura 3.

Evolución de precio promedio de carbonato e hidróxido de litio en Asia a noviembre de 2018. Fuente: Elaborado por Cochilco con datos de USCS.

Hoy el escenario es otro, la demanda crece exponencialmente y la oferta no tiene elasticidad para satisfacerla, el precio en Asia ha aumentado en más de 400% en un solo año. La Figura 4 muestra que el mapa de los países con los mayores recursos de litio en el mundo ha cambiado significativamente. En 2017, Chile al igual que Bolivia y Argentina poseía unos 9 millones de toneladas de litio. En 2020, Chile pasó del primer lugar, compartido, al tercer lugar. En cuanto a producción, la Figura 5 muestra los países que lideran. Chile mantiene el segundo lugar, pero ha disminuido su producción de litio. En cuanto al precio, el litio ha subido a niveles impensados hace apenas 2 o 3 años. La Figura 6 da cuenta del *boom* de las baterías, las ventas de autos eléctricos puros (no híbridos) están disparadas en el mundo y, particularmente en China, va en aumento el precio del carbonato de litio, más de 300 mil yuanes por tonelada a fines de 2021, como muestran los datos de Asian Metal Inc.

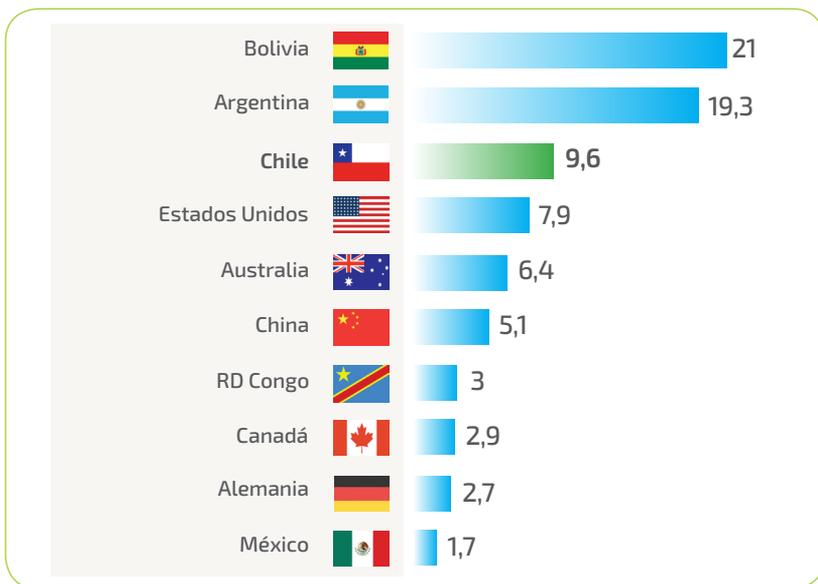


Figura 4.

Mayores recursos de litio en el mundo, en millones de toneladas métricas, año 2020. Fuente: Servicio Geológico de EE.UU.



Figura 5.

Principales países productores de litio, en toneladas métricas, año 2020. Fuente: Servicio Geológico de EE.UU.

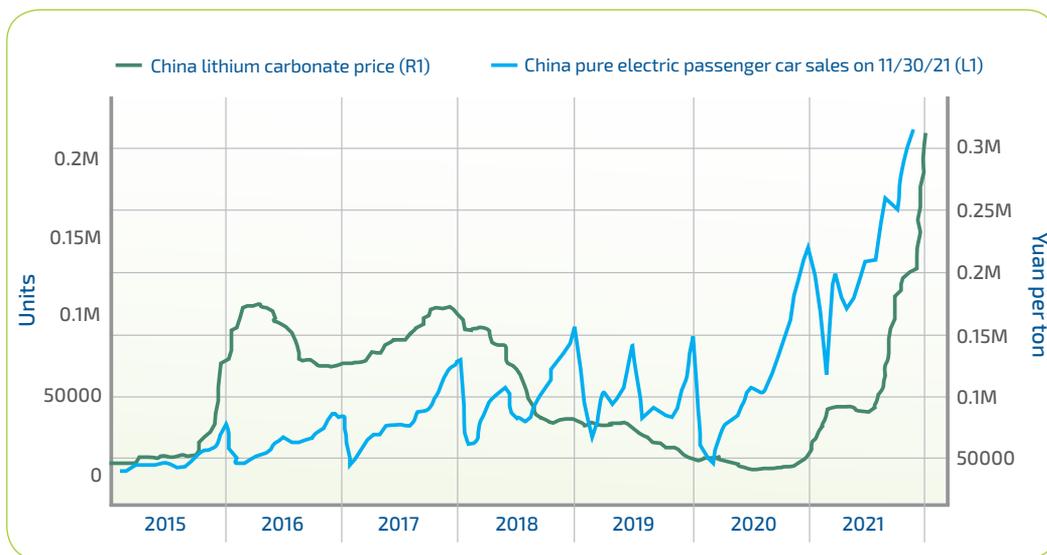


Figura 6.

Ventas de autos eléctricos puros (no híbridos) y precio del carbonato de litio en China al 30 de noviembre de 2021. 1 Yuan = 0.15 US\$, 1 US\$ = 6.36 Yuan. Fuente: Asian Metal Inc., China Automotive Information Net.

¿QUIÉNES QUIEREN EXPLOTAR EL LITIO?

Para el 2025 se espera que la demanda de litio se triplique y, si los precios suben lo suficiente, la oferta se estiraría para satisfacer el requerimiento. En tanto, para 2030 la expectativa es que la demanda global de baterías aumente 14 veces respecto a 2021 con una demanda de litio estimada en 1.8 millones de toneladas para ese año. Para 2040 la demanda de litio se multiplicaría por 40. En este escenario de aumento exponencial de la demanda de litio con precios altísimos todos los países quieren explotar litio.

Entre los países con salares y salmueras, Bolivia ha intentado impulsar una industria de litio en cooperación con Rusia y Alemania, aunque la crisis sanitaria y también algo de caos político ralentizó el intento. Recientemente en 2021 Bolivia y Alemania han retomado las negociaciones. Argentina por su lado atrae mucha inversión, y ahora Alemania dice tener un tesoro de litio bajo el río Rhin (salmuera). Entre los países que extraen litio desde roca

dura se encuentran Canadá, Australia, Portugal y Brasil que hacen esfuerzos ingentes para aumentar la oferta de litio. Europa, pese a ser uno de los grandes impulsores de la transición energética, prácticamente no produce litio. La Unión Europea cuenta con una ambiciosa normativa que busca el cambio completo a los vehículos de cero emisiones para 2035. Con esta perspectiva, la producción propia de litio adquiere relevancia y Europa busca su propia autonomía con la Alianza Europea de Baterías, especialmente de China y ahora de Rusia. Se trata de una alianza para crear su propia cadena de valor de fabricación de celdas de batería competitiva y sostenible e incluye el proceso de extracción de litio. Actualmente, la UE depende casi totalmente de países terceros pese a contar con unos 260 yacimientos de litio en el continente europeo. Por ahora, a Portugal se le ha atribuido el potencial de tener las mayores reservas de litio de Europa.

¿Y qué pasa con la producción de litio en Chile? De cinco licencias disponibles para exploración y explotación solo se asignaron dos, y actualmente están detenidas y en tribunales. Se trata de permisos para buscar litio en un plazo acotado y explotar hasta 80 mil toneladas cada una. No es claro por qué no se asignaron las cinco, especialmente si las autoridades coinciden en la importancia del litio para las arcas fiscales. La creación de una Empresa Nacional del Litio es vista con buenos ojos casi por todos, excepto por los que saben que el tiempo del litio es ahora, no mañana. Contra toda predicción en 2018, las exportaciones de litio en Chile en 2021 alcanzaron US\$ 883 millones, cifra que está por debajo de los registros que mostró la industria del vino (US\$ 1618 millones), las cerezas (US\$ 1807 millones), el hierro (US\$ 2411 millones), los salmones (US\$ 4857 millones), y muy lejos del cobre (US\$ 53 mil millones).

LAS BATERÍAS DE SODIO AMENAZAN EL REINADO DE LAS DE LITIO: ALGUNAS DE LAS RAZONES

¿Es el sodio realmente un candidato a reemplazar al litio como componente principal de las baterías? La Figura 7 muestra que litio y sodio son los primeros vecinos en el cuadro periódico y pertenecen al mismo grupo. Esto significa que ofrecen propiedades similares y, por tanto, ambos pueden usarse para la fabricación de celdas de baterías. A favor del sodio está casi todo, es barato, abundante (sexto elemento más abundante en la tierra)

y sostenible (se encuentra en océanos y corteza terrestre). En contra, las baterías de sodio no tienen tanta energía como las baterías de litio y también sufren degradación en los ciclos de carga-descarga. Aunque estas dos desventajas están siendo remediadas.

3 Li 6.940	4 Be 9.013				
11 Na 22.991	12 Mg 24.32				
19 K 39.098	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.90		
37 Rb 85.468	38 Sr 87.63	39 Y 88.92	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57 La 138.91	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.85

Figura 7.

Litio y sodio en el cuadro periódico. Fuente: Elaboración propia.

En una investigación en la Universidad de Washington State (WSU) (Song et al., 2020) se ha creado un nuevo cátodo de sodio en capas y un electrolito salino que elimina los dos inconvenientes de las baterías de sodio. La nueva batería de sodio almacena tanta energía como las baterías equivalentes de litio y mantiene más de 80% de su capacidad después de mil ciclos de carga y descarga. Se pensaba que este avance ocurriría en un horizonte de diez años, pero está adelantado. Aún no se puede decir que una batería de sodio reemplazará a la de litio, pero la investigación en curso está demostrando que es viable y que incluso podría prescindir del cobalto, otro componente caro y escaso en las baterías.

CONCLUSIONES

Chile enfrenta su propio Rubicón, si o no a la minería, si o no al litio. Resolver el dilema implica resolver la paradoja de personas que luchan por la reducción de la huella de carbón, pero que se oponen tenazmente a la extracción de litio, elemento que es clave para la electromovilidad y el reemplazo del petróleo. Para agregar más complejidad, la batería de sodio avanza a pasos agigantados, por eso la decisión sobre el litio es ahora, no mañana. Por eso "corre Litio que te pilla el Sodio".

La buena noticia es que comienzan a surgir alternativas hacia las energías limpias. En este momento, el litio está reinando en el mundo y se espera que los países que lo tienen lo exploten con apego a las normativas y regulaciones para avanzar al desarrollo, especialmente en países como los de Sudamérica, y para cumplir con las agendas sociales que la población espera anhelante.

REFERENCIAS

- Garcés, I. 2017. La industria del litio en Chile. Disponible en: [https://intranetua.uantof.cl/salares/litio y derivados.pdf](https://intranetua.uantof.cl/salares/litio-y-derivados.pdf)
- Song, J., Wang, K., Zheng, J., Engelhard, M. H., Xiao, B., Hu, E., Zhu, Z., Wang, C., Sui, M., Lin, Y., Reed, D., Sprenkle, V. L., Yan, P., Li, X. 2020. Controlling surface phase transition and chemical reactivity of O_3 -layered metal oxide cathodes for high-performance Na-ion batteries. *ACS Energy Lett.* 5(6), 1718–1725.



Universidad de Concepción

CORRE LITIO QUE TE PILLA EL SODIO

Pedro G. Toledo / Roberto E. Rozas / Rodrigo Yepsen / Leopoldo Gutiérrez

Serie Comunicacional CRHIAM



CRHIAM
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA
ANID/FONDAP/15130015



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia



Agencia
Nacional de
Investigación
y Desarrollo
Ministerio de Ciencia,
Tecnología, Conocimiento
e Innovación
Gobierno de Chile