

# Salmueras de litio en América del Sur: una hoja de ruta para la investigación destinada a facilitar la obtención rápida y responsable del litio

## Síntesis

### ***Necesidad del litio e importancia para la región***

El calentamiento global y el consiguiente cambio climático exigen el abandono de los combustibles fósiles y la transición energética hacia la descarbonización. Esta transición impulsa una creciente demanda de litio, requerido para las baterías de vehículos eléctricos y de almacenamiento de energía. En las próximas décadas, se prevé que la demanda de litio registre un marcado aumento que posiblemente supere la oferta y genere la urgente necesidad de incrementar la producción. El Servicio Geológico Británico (BGS), uno de los institutos geológicos más antiguos del mundo y un organismo declaradamente imparcial, está valiéndose de sus conocimientos para abordar este desafío de una manera abierta y transparente.

De la actual oferta mundial de litio (148,9 k de toneladas según cifras de 2024 del BGS), un importante porcentaje (34%) proviene de salares —grandes cuencas endorreicas— ubicadas en los países del Triángulo del Litio sudamericano: Argentina, Chile y Bolivia. Si bien estos salares constituyen una crucial fuente de litio, se encuentran en ambientes áridos con ecosistemas extremadamente complejos. Extraer de allí el litio presenta importantes desafíos que hacen necesaria una cantidad de recursos para entender cabalmente sus complejidades. Además, el proceso de extracción genera importantes inquietudes, desde el punto de vista social, ambiental y de la supervisión, que convierten al manejo sustentable del recurso en un tema clave para el futuro de la producción de litio. Estas complejas cuestiones solo pueden ser abordadas en su totalidad por una comunidad global que incluya tanto a actores locales como internacionales.

### ***El enfoque adoptado***

Por consiguiente, tenemos la necesidad de saber a qué ritmo incrementar la producción garantizando al mismo tiempo la extracción responsable del litio de los salares. A fin de mejorar nuestro nivel de conocimientos y trazar de manera conjunta un camino de investigación que pueda ser utilizado por la comunidad global, BGS organizó seis talleres con expertos locales para determinar qué nivel de conocimientos y qué incertidumbres existen, y procurar a la vez un mayor desarrollo de dicha comunidad global. Financiados por la Red de Ciencia e Innovación (SIN) del Gobierno del Reino Unido, los talleres tuvieron lugar en la Argentina (Buenos Aires y Salta) y en Chile (Santiago y Copiapó) y reunieron a especialistas de distintos ámbitos: gobierno nacional y local, sector académico, pueblos indígenas, empresas operadoras de minas, y consultores (ver diagrama más adelante). Todos estos especialistas intercambiaron conocimientos en condición de iguales y animados por un espíritu de cooperación.

Se aplicó el análisis PESTEL (político, económico, social, tecnológico, ecológico y legal) como marco metodológico para identificar los factores que podrían obstaculizar la producción rápida y responsable del litio (bloqueadores), pero también aquellos que podrían mejorarla (facilitadores). Como se realizaron talleres tanto en la Argentina como en Chile, se efectuó un análisis inicial para cada país por separado. Se identificaron nueve temas en común a partir del análisis PESTEL y se les asignó un orden de prioridad para identificar las

futuras actividades de investigación requeridas. Luego se profundizó el análisis de los resultados de los talleres, los cuales dieron lugar a la hoja de ruta de investigación que se sintetiza al final.

OFFICIAL



OFFICIAL

### **Resultados del análisis PESTEL**

Si bien se elaboraron resultados para cada país visitado por separado (ver sección 1.4), también se extrajeron de cada taller los temas en común para poder identificar los factores “bloqueadores” y “facilitadores” compartidos por todos los países en cada categoría del marco PESTEL, como figura en el siguiente cuadro:

| Categoría PESTEL | Bloqueador                                                                                                                               | Facilitador                                                                                                                                                                                |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Política         | Deseo de estabilidad a largo plazo y una mayor cooperación, además de tensiones entre los gobiernos central y locales.                   | Apoyo político al proceso de incrementar la producción de litio y las prácticas responsables, sumado a la existencia de instrumentos regionales y nacionales para apoyar dicho proceso.    |
| Económica        | Volatilidad del mercado (precio del litio) y gestión económica.                                                                          | Inversión en el sector y ampliación de conocimientos especializados. Desarrollo de cadenas locales de abastecimiento para aumentar el valor agregado en cada país.                         |
| Social           | Carácter variable de la comunicación y consiguiente falta de confianza, desigualdad regional y discrepancias con respecto al desarrollo. | Interés en el proceso, necesidad de participación social e impulso a las comunidades locales en virtud de la inversión entrante. Mejoramiento de las relaciones con los pueblos indígenas. |
| Tecnológica      | Falta de conocimiento preciso sobre los procesos                                                                                         | Oportunidades presentadas por las nuevas tecnologías. Solidez                                                                                                                              |

|           |                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                         |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           | en los salares e incertidumbre respecto de las futuras tecnologías de extracción y procesamiento (p.ej. la Extracción Directa de Litio o EDL).                    | de los conocimientos locales y los centros de investigación (p.ej. CONICET).                                                            |
| Ecológica | Falta de conocimiento holístico basado en datos de monitoreo de largo plazo. Impacto ambiental de los desechos/cierre de minas.                                   | Creciente conciencia y normativa ambiental, además del reconocimiento de la necesidad de proteger los salares y ambientes circundantes. |
| Legal     | Complejidad del sistema legal y de control, y falta de una reglamentación de la extracción de litio que resulte “apta para el fin”. Impacto del cambio climático. | Creciente aplicación de normas y marcos ambientales específicos para los salares de litio.                                              |

El análisis PESTEL destacó numerosos desafíos, entre ellos factores que escapan al control de la mayoría de las organizaciones, como por ejemplo la volatilidad del precio del litio. Sin embargo, también permitió identificar muchas áreas en las que los institutos y los proyectos de investigación pueden ejercer significativa influencia. Además, se identificaron muchos ejemplos de buenas prácticas tanto en la Argentina como en Chile. Uno de ellos es el acuerdo entre gobiernos provinciales de la Argentina para intercambiar datos y conocimientos. Estas prácticas positivas, sin embargo, son aisladas y deberían aplicarse de manera más uniforme en toda la región.

El estudio también confirmó el complejo panorama que existe en los países del triángulo del litio en cuanto a la diversidad de partes interesadas, debido a las múltiples organizaciones que en paralelo se dedican a la minería de salmueras. Un ejemplo de ello es el conocimiento científico de los procesos en los salares, el cual es requerido por actores locales como los pueblos indígenas para complementar su conocimiento tradicional, pero también por las empresas operadoras para el manejo de los pozos, por las autoridades regionales para la administración del recurso y la reducción de los efectos acumulativos, por el gobierno nacional para proporcionar la legislación ambiental adecuada, y por los entes reguladores para determinar el impacto ambiental. Suele existir una relación simbiótica, por ejemplo, entre los organismos gubernamentales y las empresas operadoras que proporcionan los datos y modelos con lo que se trabaja. Un ejemplo para destacar en materia de disponibilidad de datos es el Salar de Atacama, Chile, donde la empresa operadora, SQM, ofrece sus datos de monitoreo ambiental a través de un sitio web<sup>1</sup>. El desafío, por ende, es elaborar una hoja de ruta de investigación que sea utilizable y permita la ampliación de conocimientos, y que estos a su vez puedan influir en la resolución de la compleja problemática.

### ***Interconexión / temas identificados***

El análisis y los talleres PESTEL revelaron que esta problemática es altamente compleja y multifacética, lo que exige un enfoque multiinstitucional. Es esencial tomar en cuenta las diferentes escalas espaciales y disciplinas que se observan en las distintas jurisdicciones. La regulación ambiental requiere que existe, en una variedad de escalas (proyecto, salar,

<sup>1</sup> [www.sqmsenlinea.com](http://www.sqmsenlinea.com)

región, país) una sólida gestión de todas las partes interesadas y jurisdicciones asociadas, tanto nacionales como locales, y en todas las disciplinas.

Por otra parte, existe un reconocimiento de la interdependencia e interconexión entre categorías. Por ejemplo, para minimizar controversias se requiere compartir el conocimiento en condiciones de igualdad entre las partes, lo cual a su vez se basa en un modelo conceptual adecuado de los procesos en los salares, desarrollado por todos los actores interesados y comunicado de una manera que todos los que aportaron a ese conocimiento puedan entender.

Para contribuir a desarrollar la hoja de ruta de investigación y caracterizar la interconexión, se identificaron nueve temas a partir de los resultados del ejercicio PESTEL. Los temas fueron desarrollados aplicando los factores “bloqueadores” y “facilitadores” identificados por los participantes de los talleres realizados en la Argentina y Chile para cada categoría PESTEL. De los bloqueadores y facilitadores identificados se extrajeron temas en común. Estos resultaron ser los siguientes, ordenados según la escala espacial, desde el salario hasta el ámbito global:

- |                                                            |                              |
|------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 1. Procesos en los salares                                 | 5. Datos y transparencia     |
| 2. Desafíos ambientales                                    | 6. Supervisión               |
| 3. Nuevas tecnologías para la producción de litio          | 7. Cuestiones sociales       |
| 4. Infraestructura, cadenas de abastecimiento y desarrollo | 8. Normas y certificaciones  |
|                                                            | 9. Mercado mundial del litio |

Con la ayuda de los resultados de las conversaciones que tuvieron lugar durante los talleres, se identificaron las actividades requeridas para abordar los “bloqueadores” surgidos del análisis PESTEL. Cada actividad a su vez se vinculó con uno de los nueve temas. Sin embargo, se observó que algunas de las actividades se veían afectadas por influencias externas, por ejemplo geopolíticas, y se hallaban fuera del ámbito de la investigación. Por ende, para poder establecer el marco de investigación, las principales actividades de cada tema se dividieron según las categorías “basadas en la investigación”, “cocreaciones” y “poco influidas por la investigación”. Se las ordenó por prioridad dentro de cada tema en base a los distintos plazos: corto, mediano y largo, más aquellas de carácter recurrente (que comenzarían a la mayor brevedad posible y se reiterarían a lo largo del tiempo).

### **Recomendaciones**

Dada la urgente necesidad de una mayor oferta de litio y los breves plazos que existen para satisfacer la demanda, hemos sintetizado las actividades prioritarias para el corto plazo (< 3 años), como figuran más abajo. Este panorama de rápida variabilidad convierte a estas actividades en la base que permitirá desarrollar el resto de la hoja de ruta de investigación. Hemos procurado caracterizar los temas partiendo del ámbito del salario mismo pasando por la escala nacional hasta llegar al nivel de los mercados globales. Los temas figuran en el diagrama de cierre con su correspondiente síntesis. Si bien no todas las actividades sugeridas están basadas en la investigación, muchas de ellas requieren trabajo conjunto o “cocreación” entre partes interesadas e investigadores.

Por otra parte, ninguna organización puede asumir la totalidad de estas tareas y proporcionar los resultados requeridos. Dada la cantidad de partes interesadas y la complejidad de las actividades propuestas, es preciso que trabajen en conjunto organizaciones regionales (de Sudamérica) e internacionales. Un ejemplo podría ser la evaluación de la Extracción Directa de Litio (EDL) combinada con la reinyección (EDL/R), lo que requeriría que una variedad de organizaciones y expertos de distintas disciplinas, entre ellos ingenieros, ambientalistas, geólogos, hidrólogos e hidrogeólogos, trabajaran codo a codo con científicos sociales. Lo mismo puede decirse de aquellos procesos participativos en los que se requiere que una combinación de partes interesadas, incluidos los pueblos

indígenas, trabajen junto con científicos sociales y biofísicos y a la vez con organismos gubernamentales y actores industriales.

Se necesita un conocimiento científico básico de los procesos en los salares y aún no tenemos fecha para desarrollarlo. Por ende, es preciso generar este conocimiento además de crear un observatorio de salares para la región junto con la comunidad internacional de investigación. Tenemos que determinar cuál es el desafío ambiental derivado de la operación de los pozos y el impacto sobre los principales receptores ambientales. El uso de nuevas tecnologías como la Extracción Directa de Litio (EDL), especialmente si es utilizada en conjunto con la reinyección, requiere de investigación para poder conocerse su impacto. Una hoja de ruta tecnológica permitiría caracterizar y entender las nuevas técnicas de procesamiento de litio. Sería ventajoso contar con un centro piloto de EDL ubicado en una universidad o parque tecnológico de la región (preferentemente uno en cada país), financiado por organismos de investigación estatales/suscripciones, y disponible para los investigadores de distintas instituciones para evaluar las diversas tecnologías. Ejemplo de ello es el Centro de Industrialización de Baterías (BIC) del Reino Unido.<sup>2</sup>

Sería fundamental contar con infraestructura apta para el fin de llevar adelante múltiples operaciones, además de desarrollar infraestructura compartida, en conjunto con las comunidades locales, para facilitar la producción y a la vez garantizar el mínimo perjuicio al medio ambiente y el máximo beneficio. El conocimiento de las cadenas de abastecimiento locales con el mapeo de los actores pertinentes permitiría definir cuáles son los medios actuales e identificar carencias. Se requiere un enfoque holístico de la disponibilidad de datos e información. Reunir distintas fuentes de información y ponerlas a disposición de las partes interesadas de una manera apropiada para su contexto y formación científica tiene el potencial de reducir el conflicto además de facilitar el acceso de manera eficiente. A esto debería sumársele la posibilidad para todas las partes interesadas de visualizar la información disponible de una forma adecuada a su contexto y su formación.

El mapeo de actores también contribuiría a garantizar que se conozcan las interacciones entre actores de cada país y se caracterice el equilibrio de poderes entre ellos. A partir de allí podrían desarrollarse procesos consultivos y participativos adecuados al fin perseguido. Para minimizar el conflicto social, es preciso implementar procesos participativos y medidas para reducir controversias y aumentar la transparencia en la toma de decisiones. Es necesario encarar las posibles carencias en materia de capacidades dentro del sector minero, para luego incrementar la capacitación práctica en una cantidad de organizaciones.

Es importante asegurar la disseminación de buenas prácticas en materia de normas y certificaciones, desarrollo de recursos y estimaciones de las reservas de litio de salmueras. Es preciso evaluar los actuales marcos de sustentabilidad para identificar aquellos que son aptos para su fin, y realizar un seguimiento de normas y sistemas de certificación para evitar la innecesaria proliferación y duplicación. Además, es necesario posibilitar la interoperabilidad de normas y su aplicación conjunta.

Es importante que se actualice y se ponga a disposición de las partes un registro del panorama general del mercado de litio, de modo tal de poder realizar un seguimiento del precio del litio y el balance de masa para conocer la relación entre oferta y demanda. Esto asegurará que todos los decisores pertinentes dispongan de la información vinculada a la volatilidad del mercado, lo cual incrementará la estabilidad de la inversión. Es necesario desarrollar un conocimiento de la cadena de valor global del litio e identificar dónde existen oportunidades para realizar actividades intermedias (aquellas que tienen lugar entre la extracción del litio y la fabricación de baterías), ya que esto facilitaría el desarrollo de tecnología y el crecimiento de la producción en la región.

El último aspecto por considerar es la interconexión y el carácter integrado de estos desafíos, en los cuales avanzar en un área puede provocar efectos positivos en otras. Sin

---

<sup>2</sup> [www.ukbic.co.uk](http://www.ukbic.co.uk)

embargo, también puede suceder lo contrario, por lo cual solo si avanzamos hacia la superación de algunos de estos desafíos y el aprovechamiento de estas oportunidades podremos lograr la rápida adopción de una producción responsable del litio obtenido de las salmueras.

| Procesos en los salares                                    | Desafíos ambientales                                                         | Nuevas tecnologías de extracción y procesamiento de litio                   | Infraestructura y cadenas de abastecimiento                                                | Datos y transparencia                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Acordar modelo conceptual, con evolución continua (I)      | Evaluar el impacto ambiental de los pozos y los receptores ambientales (I)   | Hoja de ruta tecnológica para la extracción y el procesamiento de litio (C) | Capacitar mano de obra calificada que asista con los requerimientos de infraestructura (C) | Infraestructura y portales de datos para mejorar la accesibilidad y transparencia de los datos (I)                                    |
| Observatorio de salares, con desarrollo continuo (I)       | Reinyección para reducir el impacto ambiental. Cómo hacerlo (I)              | Comprensión de la EDL y evaluación de impacto ambiental (I)                 | Conocer la cadena de abastecimiento regional e identificar cuellos de botella (C)          | Mejorar la accesibilidad de datos. Involucrar a las partes interesadas y considerar sus necesidades (I)                               |
| Incrementar el conocimiento geológico e hidrogeológico (I) | Monitoreo de línea de base – desarrollo del monitoreo en zonas prístinas (C) | Centro de investigación y desarrollo para prueba piloto de EDL (I)          | Monitorear el impacto indirecto del desarrollo de infraestructura (C)                      | Mejorar los procesos de distribución de datos a fin de reducir la burocracia y el tiempo destinado a recolección e interpretación (I) |
|                                                            | Monitoreo continuo de impacto ambiental con perspectiva de ciclo de vida (C) |                                                                             | Longevidad e innovación responsable en el desarrollo de infraestructura (C)                |                                                                                                                                       |

| Gestión y supervisión                                    | Cuestiones sociales                                         | Normas y certificación                                                | Mercado global de litio                                                        |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Mapeo de actores – análisis de equilibrio de poderes (I) | Mejorar los procesos participativos y la toma de decisiones | Buenas prácticas basadas en las aquellas vigentes en la industria (C) | Pronósticos y análisis de hipótesis para prever el futuro mercado de litio (C) |

|                                                                                                                |                                                                                           |                                                                        |                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                | (participación d la comunidad) (C)                                                        |                                                                        |                                                                                                          |
| Colaboración intragubernamental para mejorar la supervisión (I)                                                | Capacitación laboral – no solo de parte del sector privado (C)                            | Normas sobre recursos y reservas para las salmueras de litio (C)       | Desarrollo de estrategia para aumentar la resiliencia económica y atraer nuevas inversiones (C)          |
| Determinar los ingresos de la minería y derivarlos a la producción responsable (C)                             | Buena comunicación entre actores (C)                                                      | Implementación de marcos de sustentabilidad, p.ej. SESA, URMS (C)      | Monitoreo continuo de la cadena de valor global del litio (C)                                            |
| Procesos continuos de consulta y participación (C)                                                             | Identificar controversias y verificar transparencia en los procesos (C)                   | Normas de monitoreo para identificar el uso y evitar la repetición (I) | Generar oportunidades para el desarrollo de cadenas de valor nacionales en etapas intermedia y final (C) |
| Estrategias y políticas que se extiendan más allá de los ciclos políticos y sean jurídicamente vinculantes (I) | Desarrollo de comunidades y manejo de demandas, p.ej. de recursos, de infraestructura (C) | Armonización e interoperabilidad de normas (C)                         |                                                                                                          |

**C** - Tareas colaborativas con aporte de las partes interesadas

**I** - Tareas de investigación

Prioridades de investigación de corto plazo para apuntalar la producción responsable de litio.