



## Review



# Direct lithium extraction technologies and their applicability in Bolivian salt flats

Tecnologías de extracción directa de litio y su aplicabilidad en los salares bolivianos

Elvis T. Ochoa Choque<sup>1,2\*</sup> · Pamela Goytia<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Mayor de San Andres, Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, La Paz, Bolivia

<sup>2</sup> Universidad Nacional "Siglo XX", Carrera Ingeniería de Evaporíticos y Litio, Llallagua, Bolivia

\* Corresponding author: [etddy.ochoa@gmail.com](mailto:etddy.ochoa@gmail.com) (E.T. Ochoa Choque)

Received: 21 September 2025. Accepted: 21 October 2025. Published: 5 December 2025.

## Abstract

Global battery consumption demand has increased considerably over the past ten years following the rise of lithium-ion batteries. Traditional lithium extraction methods based on evaporation ponds present notable disadvantages for recovering lithium from brines. In response to this issue, new direct lithium extraction (DLE) technologies have emerged as an alternative, offering an opportunity to selectively and more efficiently recover lithium from salars. Through a systematic review covering literature from the last 10 years, DLE methods with higher technological maturity (TRL) were analyzed, highlighting their efficiency, level of technological development, and existing limitations. Despite their significant advantages, it remains unclear whether these new methods can be successfully applied in Bolivian salars due to the lack of complementary studies that could ensure their success within a sustainable project. These technologies represent a strategic opportunity for the country to modernize lithium production and minimize environmental impacts, provided that technology transfer, water management, and institutional transparency are strengthened.

**Keywords:** Brine; environment; sustainability; selectivity; Uyuni.

## Resumen

La demanda de consumo de baterías en el mundo a incrementado de manera considerable en los últimos 10 años, tras el auge de las baterías de ion litio. Los métodos tradicionales de extracción de litio por piscinas presentan desventajas notables para su recuperación a partir de salmueras, tras este problema surgen como alternativa las nuevas tecnologías de extracción directa de litio (EDL) que representan una oportunidad para recuperar de manera selectiva y mas eficiente el litio de los salares. A través de una revisión sistemática que abarca a literatura de los últimos 10 años, se analizaron métodos EDL con mayor madurez tecnológica (TRL), resaltando su eficiencia, nivel de desarrollo tecnológico y las limitaciones que presentan. A pesar de sus notables ventajas, aun no queda claro si estos nuevos métodos pueden aplicarse con éxito en los salares bolivianos, debido a la falta de estudios complementarios que puedan garantizar su éxito a un proyecto sostenible. Estas tecnologías representan una oportunidad estratégica para el país, para modernizar la producción de litio y minimizar los impactos ambientales, siempre que se fortalezcan la transferencia de tecnología, la gestión del agua y la transparencia institucional.

**Palabras clave:** Medio ambiente; selectividad; salmuera; sostenibilidad; Uyuni.

### Abreviaturas:

EDL: Extracción directa de litio

TRL: Nivel de madurez tecnológica

## Introducción

Las baterías de iones de litio (LIB) han incrementado su demanda en los últimos años debido a la rápida adopción en aplicaciones como vehículos eléctricos (EV) y de sistemas de almacenamiento de energía en red (ESS). Esto conlleva a un incremento considerable de la demanda global de litio, un recurso que es considerado clave para la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles (Farahbakhsh et al., 2024; Guo et al., 2026; Krishnan & Gopan, 2024; Moshkova et al., 2025). Hasta el 2030 el consumo mundial de litio lograra duplicarse, superando la capacidad de producción actual y llevando a una presión creciente sobre las fuentes de suministro. Entre los yacimientos de litio del mundo, las salmueras constituyen más del 60 % de las reservas globales de este metal (Guo et al., 2026).

Dentro de estos tipos de recursos, los salares de la región andina de Sudamérica, particularmente el Salar de Uyuni Boliviano, destacan por su gran tamaño y relevancia estratégica. Sin embargo, su explotación industrial ha sido limitada por la baja concentración de litio y el alto contenido de magnesio en la composición química de sus salmueras, lo que dificulta la separación selectiva del ion  $\text{Li}^+$  (Moshkova et al., 2025). Los métodos tradicionales basados en evaporación solar presentan largos tiempos de procesamiento, una eficiencia de recuperación muy limitada a la calidad de la salmuera y alta dependencia climática. Como cualquier operación minera, la explotación del litio puede generar impactos ambientales significativos, tales como el agotamiento de acuíferos y la acumulación de residuos sólidos y otros (Farahbakhsh et al., 2024; Kim et al., 2025; Moshkova et al., 2025).

Ante este escenario, las tecnologías de extracción directa de litio (EDL) desde hace algunos años, han sido consideradas como alternativas prometedoras, ofreciendo procesos más rápidos, eficientes y menos dependientes del clima, o en algunos casos con menor consumo de agua (Guo et al., 2026). Sin embargo, la diversidad de métodos actuales (adsorción selectiva, intercambio iónico, membranas, procesos electroquímicos y precipitación química) y la compleja variabilidad fisicoquímica de las salmueras bolivianas dificultan identificar cual será la tecnología más adecuada. Por ello, planteamos desarrollar una revisión sistemática que sintetice los avances, compare la eficiencia de los métodos y evalúe su viabilidad en el contexto boliviano y contribuya a responder ¿Qué método de extracción es más adecuado a la química del Salar de Uyuni? Esta base de síntesis de información proporcionará información crítica para orientar futuras investigaciones y decisiones estratégicas en la industria local.

## Metodos

Con el objetivo de identificar los principales avances, desafíos y aplicaciones de las tecnologías de extracción directa de litio (DLE) y su posible implementación en los salares de Bolivia, la presente revisión sistemática siguió las directrices establecidas en la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Page et al., 2021), garantizando un enfoque adecuado en la selección y análisis de la literatura. La búsqueda se efectuó en la base de datos científica tales como ScienceDirect (ELSEVIER), American Chemical Society, (ACSPublications), Research Gate, Nature, MPDI, SemanticScholar y otros seleccionados por su cobertura multidisciplinaria y acceso abierto a publicaciones recientes.

Se aplicaron términos de búsqueda como “extracción directa de litio”, “tecnologías de litio”, “salar de Bolivia”, “avances DLE” y combinaciones de las mismas. No se establecieron límites geográficos, pero se priorizamos la literatura en español e inglés publicada entre 2015 y 2025. Consideramos todos los estudios sobre avances tecnológicos y evaluación socioambiental de la extracción directa de litio y excluimos estudios que no tuvieron relación con la región del Triángulo del Litio o que no contaban con acceso al texto completo. Se identificaron 250 publicaciones potenciales entre artículos originales, artículos de revisión, comunicaciones breves y reportes, luego de la revisión del título y los resúmenes, se seleccionaron 23 artículos para la revisión completa. Tras una lectura exhaustiva, se excluyeron 12 estudios, quedando 12 documentos para la revisión final.

## Resultados

### Tecnologías DLE en salares

En la **Tabla 1** se resumen los estudios consultados que destacan por su enfoque en tecnologías de extracción directa de litio aplicadas a salares. Con el propósito de comparar las tecnologías tradicionales con las nuevas alternativas de extracción directa, se presenta un esquema del proceso de evaporación típicamente utilizado en proyectos que procesan salmueras mediante esta ruta (**Figura 1**). Como se mencionó previamente, estos métodos presentan diversas dificultades y limitaciones, por lo que se consideran procesos de extracción no selectivos.

**Tabla 1.** Tecnologías de extracción directa de litio aplicadas a salares

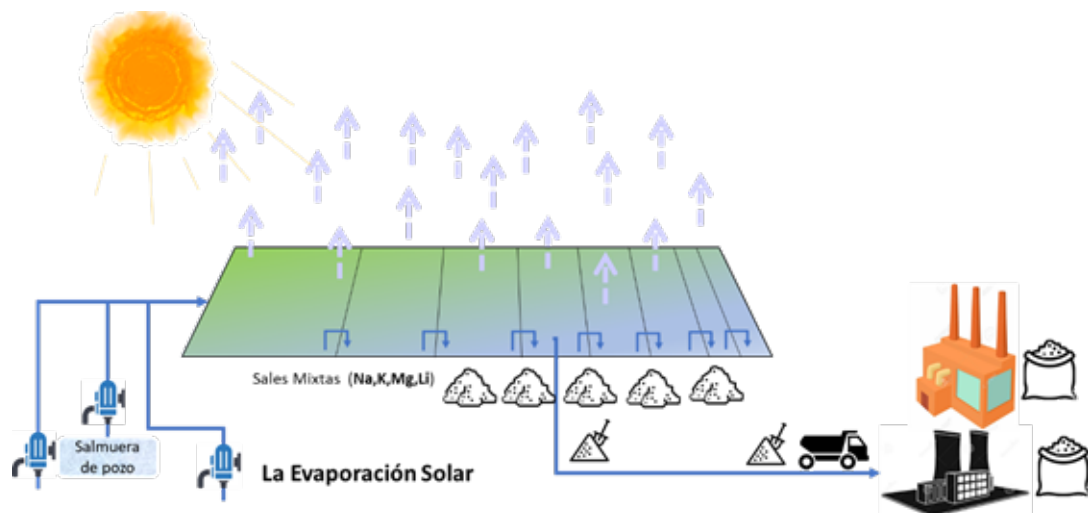
Titulo	Resumen	Metodología	Ref.
Técnica de precipitación directa de aluminato con una estrategia de transformación de fase para la extracción selectiva de litio de la salmuera de Uyuni	Estudian una nueva técnica de precipitación de aluminato y transformación de fase de litio selectivamente de la salmuera de Uyuni	Precipitación directa de aluminato y transformación de fase para extraer selectivamente litio de la salmuera	(Kim et al., 2025)
Extracción directa de litio: Un nuevo paradigma para la producción de litio y el aprovechamiento de sus recursos	Revisión de la Extracción Directa de Litio (DLE) como un paradigma sostenible para la rápida producción de litio desde recursos acuosos	Se realizó una revisión exhaustiva de las tecnologías DLE: fundamentos, principios, aplicaciones y desafíos	(Farahbakhsh et al., 2024)
De la tecnología a la economía: Una evaluación de la ingeniería en la extracción directa de litio	Evalúan la extracción directa de litio (DLE) de salmueras técnica y económicamente para su viabilidad industrial	Revisión integral de ingeniería DLE, comparando ventajas, desventajas, desempeño y economía de aplicaciones industriales reales	(Moshkova et al., 2025)
Membranas selectivas de litio para la extracción directa de litio de salmueras complejas	Analizan membranas que permiten extracción directa de salmueras complejas, clasificadas por tamizado y afinidad de unión	La metodología clasifica membranas selectivas de litio por tamizado de tamaño, afinidad de unión y mecanismos híbridos	(Guo et al., 2026)
Extracción de litio basada en sorción de diversas salmueras utilizando adsorbentes a base de aluminio	La extracción de litio por adsorción de aluminio varía en salmueras debido a sólidos disueltos totales y cationes presentes	Adsorción de litio en salmueras simuladas usando adsorbente de aluminio, se estudiaron isoterma, cinética y termodinámica	(Farrokhrouz et al., 2025)
Métodos de extracción directa de litio (DLE) y su potencial en el reciclaje de baterías de iones de litio	DLE evalúa métodos para extraer litio de baterías EV recicladas, minimizando pérdidas	Evaluar DLE, optimizar pretratamiento (pirólisis/trituración/flotación) y flujos hidrometalúrgicos para mínima pérdida de Li	(Saleem et al., 2025)
Revisión de los avances recientes en la extracción de litio de salmueras subterráneas	Litio de salmueras subterráneas necesita DLE. Tamices iónicos y nanofiltración son claves para recuperación eficiente	Recopilación de datos de salmueras/tecnologías (1960–2023), mapeo, cribado y clasificación taxonómica para análisis	(Disu et al., 2024)
Bases técnicas para el diseño conceptual sustentable para la producción de carbonato de litio de las salmueras del salar de COIPASA	La extracción de litio en Coipasa es difícil por alta Mg/Li y baja evaporación. Se propone extracción directa: adsorción y membranas	La metodología propuesta es extracción directa con adsorción, desorción, membranas y ósmosis inversa para LiCO <sub>3</sub>	(Zamora et al., 2024)
Extracción e industrialización del litio: oportunidades y desafíos para América Latina y el Caribe	El litio, recurso estratégico de Latinoamérica para la transición, exige mejor industrialización, sostenibilidad ambiental y captura de renta	El informe utiliza un análisis sintético de dimensiones clave para evaluar oportunidades y desafíos del litio	(Unidas, 2023)
Análisis: Solución de salmuera: Estado actual, gestión futura y desarrollo tecnológico	Revisión de gestión de salmuera de desalación, impacto, eliminación y tecnologías híbridas para recuperación de recursos	Análisis de métodos convencionales, membranas, térmicos, y sistemas híbridos para gestión de salmuera	(Backer et al., 2022)
Revisión sistemática de la extracción de litio de salmueras de lagos salados mediante métodos de precipitación.	La precipitación, método rentable y ecológico, es crucial para extraer litio de salmueras, superando Mg/Li altos	Evaporación, cristalización y precipitación (aluminato/magnesio) son clave, controlando dosis, pH y temperatura para extraer litio	(Zhang et al., 2019)
Recuperación de magnesio de la salmuera del salar de Uyuni como carbonato de magnesio hidratado	Se recuperó carbonato de magnesio hidratado de alta pureza de salmueras de Uyuni por precipitación selectiva	Se elimina Ca con oxálico, se remueve exceso de oxalato, luego se precipita Mg con carbonato	(Tran et al., 2016)

## Tipo de tecnologías de extracción directa de litio comerciales y precomerciales

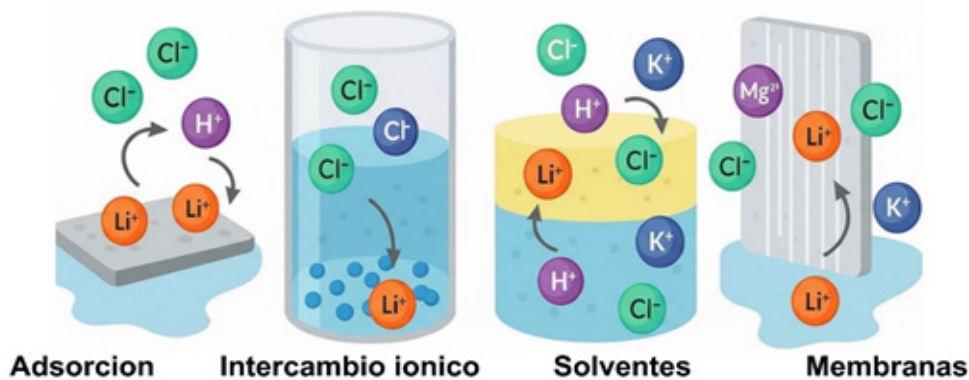
Como una alternativa a los procesos tradicionales, los métodos de Extracción Directa de Litio se presentan como una tecnología innovadora diseñada para extraer litio de fuentes de salmuera de manera selectiva. Entre los principales métodos comerciales están la Precipitación, Solventes Líquido-Líquido, Membranas, Adsorbentes Sólidos y Procesos Electroquímicos (Marcinov et al., 2023). Un esquema representativo de estos procesos se resume en la **Figura 2**. Si bien actualmente hay una gran variedad de métodos EDL en distintas etapas de desarrollo, en la industria se busca que alguna de ellas haya alcanzado un alto nivel de madurez tecnológica. Este criterio para evaluar la madurez tecnológica se basa en la escala TRL (Technology Readiness Level - Nivel de Preparación Tecnológica) donde las tecnologías comerciales deben alcanzar una puntuación entre 8 y 9 (Moshkova et al., 2025).

### Adsorbentes basados en aluminio

La adsorción con aluminio ha alcanzado un nivel comercial disponible para la Extracción Directa de Litio, presenta el Nivel de Madurez Tecnológica más alto (TRL 9) (Farahbakhsh et al., 2024). Este método funciona al poner en contacto una solución rica en litio con un adsorbente que actúa como una "esponja" para capturar selectivamente los iones de litio (Krishnan & Gopan, 2024).



**Figura 1.** Esquema de un circuito de piscinas de evaporación clásica para procesamiento de salmueras.



**Figura 2.** Representación de los principales métodos de recuperación selectiva de litio (Adsorción, Intercambio iónico, extracción por solventes y membranas respectivamente).

La recuperación de litio se realiza mediante la recirculación de agua a través del sistema, el cual se obtiene en forma de Cloruro de Litio ( $\text{LiCl}$ ) denominado eluato. El sorbente sólido empleado es un hidróxido laminar doble de Litio y Aluminio [ $\text{LiCl} \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ], que destaca por su bajo consumo energético y proceso de fabricación amigable ambientalmente (Yersaiynova et al., 2025). Esta técnica, además, tiene altos niveles de retención y selectividad del litio, gracias a la excelente difusividad en el aluminio (Disu et al., 2024), asegurando un rendimiento del 80–90% a través de diversas salmueras, lo que demuestra su versatilidad.

### Intercambio iónico (Tamices iónicos)

Considerado también un método de adsorción que se emplea para purificar litio a partir de fuentes acuosas como las salmueras de lagos salados y el agua geotérmica (Gu et al., 2025). El proceso de recuperación de litio se realiza en dos etapas, la primera es la adsorción selectiva por intercambio de iones desde la salmuera y posteriormente la elución de iones de litio. Los materiales que normalmente se emplean son sólidos inorgánicos, óxidos de manganeso o titanio. La recuperación del litio atrapado se realiza empleando ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ). Un ejemplo comercial destacado es el sistema Lilac IEX, que logra recuperar hasta 99% de  $\text{Li}$  (Alghamdi et al., 2025). Entre otros avances, también se emplean materiales como las zeolitas, compuestas de aluminosilicato, pueden actuar como tamices moleculares y sitios de intercambio iónico para los cationes de litio (Disu et al., 2024).

### Extracción por solventes (líquido-líquido)

Presenta ventajas notables para separar selectivamente iones metálicos de soluciones lixiviadas. El proceso se compone de tres etapas, extracción, separación de fases y recuperación de litio. Su aplicación para recuperación de litio de salmueras depende de elegir los extractantes adecuados para lograr la eficiencia requerida. Sistemas sinérgicos, como la combinación de tributyl phosphate (TBP), queroseno y  $\text{FeCl}_3$ , han demostrado ser efectivos en la extracción de litio de salmueras con relaciones altas de  $\text{Mg}/\text{Li}$ .

La tecnología comercial Tenova LiSX™ reporta alta recuperación de litio del 99.9% y una pureza del producto también del 99.9% (Alghamdi et al., 2025). Los avances en esta tecnología están centrados en la búsqueda de una más alta selectividad de las especies químicas, por ejemplo, la extracción de litio y sodio se logra utilizando derivados de 4-acil-5-pirazolonas y óxido de tri-n-octilfosfina (TOPO), lo que resulta en recuperaciones elevadas. A pesar de sus notables ventajas, un aspecto que debe de analizarse es la disposición de los residuos orgánicos de proceso sumado al riesgo de fugas que pueden ocasionar un gran impacto ambiental en los salares (Guo et al., 2026).

## Membranas

Las tecnologías de membranas, como la electrodiálisis y la nanofiltración, tienen un alto potencial para recuperar litio de las salmueras de lagos salados. Destacan por su eficiencia energética y su capacidad de operación continua (Alera et al., 2024). La nanofiltración, por ejemplo, utiliza el impedimento estérico y el principio de exclusión de Donnan, donde una membrana cargada rechaza selectivamente iones multivalentes, permitiendo el paso de cationes monovalentes como el litio, aunque para una aplicación industrial exitosa, los materiales deben garantizar una alta selectividad, bajo consumo energético y un rendimiento de ciclado robusto (Alera et al., 2024). En el caso de membranas asistidas por electricidad, la electrodiálisis de membrana bipolar (BMED) genera H<sup>+</sup> y OH<sup>-</sup> durante su proceso, esto permite la remoción y recuperación simultánea de iones como el litio (Park et al., 2025).

En la **Tabla 2** se sintetizan las características más relevantes de cada tecnología, mostrando el grado de madurez y los principales desafíos para su aplicación en salmueras de baja ley como las del Salar de Uyuni:

**Tabla 2.** Principales características de las tecnologías mas avanzadas aplicables a salmueras continentales

Tecnología	Madurez tecnológica	Rango (Li)	Desafíos	Ref.
Adsorción	(TRL: 7-9)	80-99%	-Generalmente requiere temperaturas superiores a 40 °C. -Alto consumo de agua. -Capacidad de adsorción relativamente baja, lo que resulta en concentraciones más bajas de LiCl en el eluato.	(Alghamdi et al., 2025)
Intercambio iónico	(TRL: 7-9) Precomercial	75-99.9%	-Uso de productos químicos peligrosos -Posible degradación del sorbente debido a la exposición repetida al ácido -Altos costos operativos (OPEX) y de capital (CAPEX).	(Backer et al., 2022)
Extracción por solventes	(TRL: 7-8) Precomercial	80-99.9%	-Uso de solventes orgánicos (riesgos ambientales, riesgos para la salud, riesgos de incendio con salmueras a alta temperatura, etc.) -Corrosión de los equipos -Alta generación de residuos -Costoso en comparación con otras tecnologías	(Wu et al., 2025)
Membranas	(TRL:4-6) Precomercial	80%	Obstrucción de la membrana por impurezas de la salmuera; -Alto consumo de energía para sistemas impulsados por presión; -Eficiencia de recuperación de Li limitada en salmueras complejas.	(Tufa et al., 2025)

## Aplicación de EDL a salmueras

Es necesario, además de presentar el aspecto novedoso y tecnológico de las nuevas tecnologías de extracción de litio, la evaluación socioambiental de la aplicación de las EDLs en salmueras. En el Triángulo del Litio, la huella hídrica es un tema crítico, los patrones de agua y las sequías prolongadas a menudo ponen en riesgo el factor de sostenibilidad del agua en regiones áridas (Díaz Paz et al., 2025; Krishnan & Gopan, 2024). Otro aspecto que la mayoría de los estudios debaten, es sobre el argumento que la salmuera no debería ser tratada como agua, ya que no es adecuada para riego o consumo sin procesos de alta energía, una postura que impacta en la gestión de los recursos (Dowling & Otero, 2025). En el caso de informes de impacto ambiental en Argentina, los mismos indican que la huella hídrica total varía considerablemente según el tipo de proyecto (Olaroz 51.0 m<sup>3</sup>/ton vs. Fénix 135.5 m<sup>3</sup>/ton de Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> grado batería) (Díaz Paz et al., 2025).

Hoyos López et al. (2025) analizaron la huella hídrica y los retos de sostenibilidad que enfrenta la extracción de litio en los salares. Sus estudios destacan que el modelo que se basa en la evaporación de salmueras demanda grandes cantidades de agua en una región árida, lo que podría poner en riesgo los acuíferos y los ecosistemas que la rodean (Hoyos López et al., 2025). También mencionan que la presión sobre este recurso hídrico genera un dilema entre la soberanía tecnológica y la sostenibilidad ambiental, un aspecto crucial para el desarrollo industrial de los países como Bolivia.

## Contexto geopolítico y presencia de empresas chinas

El análisis de **González Jáuregui (2024)** pone de relieve la creciente influencia de empresas chinas, como CBC, en la cadena de suministro de litio del Sur Global. Este fenómeno también se observa en Bolivia a través de acuerdos bilaterales y asociaciones público-privadas (**González Jáuregui, 2024**). La autora subraya la tensión entre el deseo de industrialización nacional y la dependencia de tecnología externa, un tema que es muy relevante en el contexto actual de Bolivia.

## Estado de Bolivia ante las EDLs y las oportunidades

Bolivia trabaja para consolidar la extracción de litio como pilar fundamental de su estrategia industrial. El país se centra en el control estatal de este valioso recurso y busca adoptar tecnologías de extracción directa para minimizar el impacto ambiental y aumentar la eficiencia. Los acuerdos con Uranium One y CBC subrayan el compromiso de acelerar la industrialización del salar mediante la transferencia de tecnología y la inversión extranjera, con el objetivo de posicionar a Bolivia como líder regional en la producción de baterías.

Ante este contexto, en 2024, Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB) firmó contratos con Uranium One Group (Rusia) y CBC Investment Limited (China) para producir 49.000 toneladas anuales de carbonato de litio mediante tecnología EDL. Sin embargo, estos acuerdos aún pendientes de aprobación legislativa, han sido cuestionados por su falta de transparencia, posibles vulneraciones legales, ausencia de control estatal y riesgos ambientales y económicos. Aunque podrían generar empleo y posicionar a Bolivia en el mercado del litio, expertos advierten que el país asumiría altos costos y baja rentabilidad, sin garantizar transferencia tecnológica ni sostenibilidad hídrica y ambiental (**Mondaca, 2024**).

## Implicancias técnicas, ambientales y económicas para el salar de Uyuni

Los proyectos a gran escala en el Salar de Uyuni conllevarían costos ambientales significativos, particularmente lo relacionado al uso del agua y la posible alteración de los acuíferos, según lo señala **Hoyos López (2025)**. No obstante, también presentan oportunidades económicas para diversificar la matriz productiva, generar empleos industriales y fortalecer la soberanía energética, siempre y cuando se gestionen con criterios de sostenibilidad y control social (**Mondaca, 2022**).

La industrialización del litio en Bolivia está atravesando un nuevo capítulo, impulsado por la apertura a inversiones extranjeras y la incorporación de tecnologías de vanguardia. Esto trae consigo importantes repercusiones técnicas, económicas y ambientales (**Campanini et al., 2025; Hoyos López et al., 2025**). A lo largo de su historia, Bolivia ha mantenido un enfoque de soberanía estatal, gestionando sus vastos recursos de litio, que representan el 21.9% de las reservas globales, a través de Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB) (**Geological Survey, 2024**). Sin embargo, los desafíos técnicos del método evaporítico tradicional y la lenta ejecución de los proyectos estatales han llevado al gobierno a buscar colaboraciones con grandes actores globales, como los consorcios chinos CBC (CATL, BRUNP-CMOC) y CITIC Guoan, así como la rusa Uranium One Group, para implementar la tecnología de Extracción Directa de Litio (**Campanini et al., 2025; Hoyos López et al., 2025**).

La principal causa de una posible dependencia de conocimiento extranjero, se debe a la complejidad de procesar el litio boliviano, que tiene un alto contenido de magnesio. Además, aun queda en duda sobre la eficacia de la EDL a gran escala. En términos ambientales, el Salar de Uyuni es un ecosistema frágil y árido, y el modelo de explotación en Bolivia, incluso con la promesa de la EDL, podría dejar una huella hídrica enorme. Esto compromete los acuíferos de recarga lenta y pone en peligro la estabilidad geomorfológica del salar debido a la subsidencia. En el ámbito económico, la estrategia soberana ha tenido un desempeño financiero limitado. Aunque el Estado busca asegurar ingresos fiscales, la meta de fabricar baterías o vehículos eléctricos localmente sigue siendo un sueño lejano. Además, el auge del reciclaje de litio como un recurso valioso en las naciones desarrolladas, con China a la cabeza, representa una amenaza geopolítica y económica a largo plazo para productores primarios como Bolivia, a menos que el país exija a sus socios invertir en el reciclaje de baterías a nivel local (**Martinelly, 2024**). Esto refuerza la necesidad de una política nacional que equilibre la soberanía sobre el recurso con la cooperación tecnológica y la gestión sostenible del agua.

## Discusión

Los resultados del análisis sistemático brindan una visión clara de las potenciales tecnologías con mayor madurez tecnológica disponibles para extraer litio de materia selectiva, presentando ventajas como su mayor recuperación, buena eficiencia cuando se procesan salmueras con altas relaciones de Mg/Li, menor costo de producción y otros aspectos técnicos relevantes comparadas con las tradicionales piscinas de evaporación (**Stringfellow & Dobson, 2021**).

Los métodos basados en la tecnología de adsorción con hidróxidos dobles de aluminio y litio destacan por su gran adaptabilidad a salmueras de concentraciones bajas y altas. Sin embargo, representa un reto en cada caso particular desarrollar un proyecto a nivel de pilotaje que demuestre que los niveles de consumo de agua son sostenibles para el ecosistema del salar. Esto conlleva a su principal desventaja frente a las demás tecnologías EDL, su alto consumo de agua para los procesos de desorción (**Farahbakhsh et al., 2024; Zamora et al., 2024**). A pesar de esta desventaja, esta tecnología es la única que ha alcanzado una escala industrial de aplicación en yacimientos de salmueras.

Cuando se trata de salares con baja disponibilidad de recurso hídrico, como el caso de Bolivia, las tecnologías basadas en intercambio iónico con óxidos de litio y manganeso parecen ser una alternativa bastante buena. Esta tecnología destaca por su bajo consumo de agua por tonelada de producto producido; no obstante, para los procesos de recuperación de litio consume grandes cantidades de ácidos como el clorhídrico (**Moshkova et al., 2025; Murphy & Haji, 2022**), lo que lleva a cuestionar si, para un país que no tiene desarrollada la industria de la química básica, es viable la importación de enormes volúmenes de estos químicos desde otros continentes. Esto podría repercutir negativamente en los costos de producción.

Los métodos por solventes constituyen la tercera opción. A pesar de que aún no están desarrollados a una alta escala de madurez tecnológica, han demostrado en varios trabajos de investigación que su selectividad ante otros iones es más efectiva cuando se aplica la combinación apropiada de extractantes, disolventes y coextractantes. Esto plantea otra cuestión importante de carácter tecnológico: la química de cada salar es diferente, lo que conlleva a realizar trabajos de investigación extensos para analizar qué combinación de agentes extractantes (de entre una variedad de combinaciones y opciones) es más eficiente para la química del salar de Uyuni. Otro aspecto que no se puede dejar de lado con esta tecnología es el impacto ambiental que puede ocasionar la mala gestión de los residuos químicos (principalmente orgánicos) y su cantidad. Dado el ciclo de vida limitado de los agentes extractantes y las cantidades que se demandarán para la producción de carbonato de litio, es inevitable que, en una etapa próxima, sea considerable la cantidad de residuos que se deberán disponer de manera correcta para no dañar el ecosistema del salar (**Sun et al., 2021**).

En cuanto a las alternativas basadas en membranas, aún tienen un bajo nivel de madurez tecnológica (**Saleem et al., 2025**). A pesar de que la investigación en los últimos años se ha intensificado para mejorar sus dificultades, aún no son consideradas como método principal cuando se trata de recuperar litio. No obstante, han ganado gran atención como métodos secundarios para concentrar las salmueras, separar el litio del magnesio en etapas posteriores a procesos como la adsorción o intercambio iónico, o incluso recuperar el agua de procesamiento de la línea de producción. Sin embargo, no se posicionan aún como método EDL principal en los proyectos de gran escala (**Farahbakhsh et al., 2024**).

A pesar de que estas tecnologías ya han sido probadas a escala industrial o de pilotaje en proyectos en Argentina y China principalmente, para los estudios relacionados con el salar de Uyuni, gran parte de los autores trabajaron con salmuera sintética o artificial (**Disu et al., 2024; Farrokhrouz et al., 2025; Kim et al., 2025; Murphy & Haji, 2022**), preparada a partir de sustancias puras para replicar la composición natural del salar. Esto implica la necesidad de validar tanto las ventajas como las desventajas de cada tecnología con salmuera natural de los salares bolivianos, a una escala aceptable para tener mayor certidumbre en los indicadores técnicos, económicos y ambientales para los posibles proyectos basados en la aplicación de las nuevas tecnologías selectivas EDL.

Un factor común en las nuevas tecnologías EDL es que todas generan salmuera de cola o empobrecida, la cual en los proyectos actuales aún se analiza en términos de medidas de disposición final que puedan generar un mínimo impacto ambiental. Los métodos de disposición de salmuera empobrecida van desde la reinyección al mismo salar hasta la contención en piscinas, cual sea la ruta requiere de estudios extensos y sistemas adecuados de regulación, que demuestren que el ecosistema del salar no será afectado a largo plazo (**Mondaca, 2022, 2024; Zamora et al., 2024**).

Dado que se trata de una química particular en cada salar del mundo, con climas y condiciones geográficas únicas, y procesos totalmente nuevos aplicados a cada química del salar, los proyectos desarrollados principalmente en Argentina nos dan un panorama de que los estudios necesarios para definir la inversión en un proyecto de minería de litio toman un tiempo mayor a los 10 años en desarrollarse, desde las etapas exploratorias, el desarrollo del pilotaje, la certificación de reservas y el diseño final del proyecto (**González Jáuregui, 2024; Mondaca, 2022; Naciones Unidas ECLAC, 2023**).

Por su parte, Bolivia también tiene que analizar aspectos como la logística (rutas de transporte de insumos y productos terminados a puerto), la infraestructura (carreteras, edificaciones y facilidades) y

la energética (generación y distribución de energía y potencia en el Salar) para poder adoptar en el salar de Uyuni proyectos que demandarán en gran medida estos aspectos para su buen desarrollo. De esta manera, el gobierno (por el modelo de soberanía) deberá promover políticas de desarrollo de inversión en Uyuni (Flores & Bautista-Quisbert, 2024; Lunasco et al., 2024).

Todos estos aspectos analizados en la presente revisión apuntan a la necesidad de contar con un proyecto de factibilidad definitivo para tomar la decisión final de inversión, lo cual es bastante especial cuando se trata de minería del litio a partir de salmueras, por tres motivos fundamentales: la química de cada salar es única en el mundo, no hay tecnologías convencionales EDL específicas o patentadas para cada salar (un proceso aplicado a un salar en Bolivia nunca será igual a uno en salares de Argentina o Chile), al tener una química compleja de elementos el diseño y los costos de inversión y operación también se verán afectados y deben analizarse con un enfoque sostenible, y por último, los impactos ambientales particulares derivados del cada proyecto con medidas de mitigación adecuadas.

Sin duda, las tecnologías revisadas ofrecen un potencial enorme para aprovechar la química única del Salar de Uyuni, pero está claro que, para avanzar en proyectos futuros, conviene priorizar opciones que ya hayan alcanzado un nivel de madurez comercial sólida. Al hacerlo, no podemos ignorar los desafíos ambientales, logísticos y económicos que hemos discutido, como el consumo de agua, la gestión de residuos o la necesidad de adaptar procesos a la composición específica de las salmueras locales. En definitiva, una selección cuidadosa y bien fundamentada será clave para garantizar que estos avances no solo impulsen el desarrollo, sino que también respeten el delicado equilibrio del ecosistema y las particularidades de Bolivia.

### Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés financieros, personales ni profesionales que puedan haber influido de forma inapropiada en la realización o interpretación de los resultados del presente estudio.

### Contribución de los autores

**E.T.O.C.**, Conceptualizo el estudio, diseño metodológico, conducción de la búsqueda bibliográfica, análisis e interpretación de los datos y redacción del borrador inicial del manuscrito. **P.G.**, Valido el análisis, revisión crítica de la metodología y aportes sustantivos en la discusión.

### Referencias

- Alera, A. C., Benitez, J. P., Fernandez, R. J., Pascual, C. K., Policarpio, F., & Lopez, E. C. R. (2024). Recent Advances in Lithium Extraction †. *Engineering Proceedings*, 67(1). <https://doi.org/10.3390/engproc2024067052>
- Alghamdi, M., Altmann, T., & Das, R. (2025). Direct Lithium Extraction from Seawater Brine: An Assessment of Technology and Existing Commercial Systems. In *Minerals* (Vol. 15, Issue 5). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/min15050512>
- Backer, S., Bouaziz, I., Kallayi, N., Thomas, R., Preethikumar, G., Takriff, M., Laoui, T., & Atieh, M. A. (2022). Review: Brine Solution: Current Status, Future Management and Technology Development. *Sustainability* (Switzerland), 14(11). <https://doi.org/10.3390/su14116752>
- Campanini, O., Azamar Alonso, A., Seeger, M., Nava, P., Gudynas, E., Marconi, P., Garzón, P., Tejerina, J., Berger, L., Borda, J., Martínez, B., Rodríguez, M. E., & Grinsztejn, C. (2025). El rol de China en la extracción del litio en América Latina.
- Díaz Paz, W. F., Seghezzo, L., Salas Barboza, A. G., Escosteguy, M., Arias-Alvarado, P. V., Kruse, E., Hufty, M., & Iribarnegaray, M. A. (2025). The water footprint of lithium extraction technologies: Insights from environmental impact reports in Argentina's salt flats. *Heliyon*, 11(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42523>
- Disu, B., Rafati, R., Sharifi Haddad, A., Mendoza Roca, J. A., Iborra Clar, M. I., & Soleymani Eil Bakhtiari, S. (2024). Review of recent advances in lithium extraction from subsurface brines. In *Geoenery Science and Engineering* (Vol. 241). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213189>
- Dowling, C., & Otero, G. (2025). Mirages or miracles? Lithium extraction and the just energy transition. In *Energy Research and Social Science* (Vol. 119). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103862>
- Farahbakhsh, J., Arshadi, F., Mofidi, Z., Mohseni-Dargah, M., Kök, C., Assefi, M., Soozanipour, A., Zargar, M., Asadnia, M., Boroumand, Y., Presser, V., & Razmjou, A. (2024). Direct lithium extraction: A new paradigm for lithium production and resource utilization. In *Desalination* (Vol. 575). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117249>
- Farrokhrouz, M., Madelatparvar, M., Boroumand, Y., Sarmadi, A., Khiadani, M., & Razmjou, A. (2025). Sorption-based Lithium extraction from diverse brines using aluminium-based adsorbent. *Journal of Water Process Engineering*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107593>
- Flores, V., & Bautista-Quisbert, E. (2024). Producción de carbonato de litio en Bolivia, Chile y Argentina: Estrategias, evolución y perspectivas. *Revista Ciencia Tecnología & Sociedad*, 2, 13. <https://doi.org/10.70598/wesa4747sf69c>
- Geological Survey, U. (2024). Mineral Commodity Summaries 2024. <https://doi.org/10.3133/mcs2024>

- González Jáuregui, J. (2024). La presencia de empresas chinas en el sector argentino del litio: implicaciones para el desarrollo económico y la inserción internacional en el escenario geopolítico y geoeconómico actual. *Desarrollo, Estado y Espacio*, 3(1), e0039. <https://doi.org/10.14409/rdee.2024.1.e0039>
- Gu, J., Liang, B., Luo, X., Zhang, X., Yuan, W., Xiao, B., & Tang, X. (2025). Recent Advances and Future Prospects of Lithium Recovery from Low-Grade Lithium Resources: A Review. In *Inorganics* (Vol. 13, Issue 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/inorganics13010004>
- Guo, Z. Y., Wang, J., Zhan, P., Wang, L., Lai, Z., & Ji, Z. Y. (2026). Lithium selective membranes for direct lithium extraction from complex brine. In *Progress in Materials Science* (Vol. 156). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2025.101582>
- Hoyos López, M. E., Mamani Alemán, J. C., & Ibarra Guerrero, F. L. (2025). Entre la soberanía y la sustentabilidad: La explotación del litio en el Salar de Uyuni frente a los desafíos de la huella hídrica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(4), 2063–2081. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i4.18782](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i4.18782)
- Kim, H. S., Suh, Y. J., Kim, D. W., Yoo, H., Hong, H. J., & Park, I. S. (2025). Direct aluminate precipitation technique with a phase transformation strategy for selective lithium extraction from Uyuni brine. *Chemical Engineering Journal*, 505. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159220>
- Krishnan, R., & Gopan, G. (2024). A comprehensive review of lithium extraction: From historical perspectives to emerging technologies, storage, and environmental considerations. In *Cleaner Engineering and Technology* (Vol. 20). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100749>
- Lunasco, M., Arce, L., Salas, B., & Choquecallata, R. (2024). Desafíos y oportunidades del litio en Bolivia: Modelo estatal, impactos ambientales y competitividad global. *Revista Ciencia Tecnología & Sociedad*, 2, 18. <https://doi.org/10.70598/aqzd4694qw27b>
- Marcinov, V., Klimko, J., Takáčová, Z., Pirošková, J., Miškuřová, A., Sommerfeld, M., Dertmann, C., Friedrich, B., & Oráč, D. (2023). Lithium Production and Recovery Methods: Overview of Lithium Losses. In *Metals* (Vol. 13, Issue 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/met13071213>
- Martinelly, A. (2024). Litio geopolítica y reciclaje en Bolivia. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13834705>
- Mondaca, G. (2022). No todo lo que brilla blanco es litio. <https://www.cedib.org/wp-content/uploads/2022/05/ExtraccionDierctaDelLitio-6-5-22.pdf>
- Mondaca, G. (2024). Contrato URANIUM ONE GROUP - YLB Extracción sin soberanía y aspectos por considerar. CEDIB. <https://www.cedib.org/wp-content/uploads/2024/09/Cedib-Infoma-Septiembre-litio-uranium-one-1.pdf>
- Moshkova, M. A., Doroshenko, I. V., Filippova, I. S., Mi, X., Krivoschapkin, P. V., & Krivoschapkina, E. F. (2025). From technology to economy: An evaluation of engineering in direct Lithium extraction. In *Desalination* (Vol. 616). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119332>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. In *BMJ* (Vol. 372). BMJ Publishing Group. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Park, J., Lee, J., Shim, I. T., Kim, E., Nam, S. H., Koo, J. W., & Hwang, T. M. (2025). Electrochemical Direct Lithium Extraction: A Review of Electrodialysis and Capacitive Deionization Technologies. In *Resources* (Vol. 14, Issue 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/resources14020027>
- Saleem, U., Wilhelms, A., Sottmann, J., Knuutila, H. K., & Bandyopadhyay, S. (2025). Direct lithium extraction (DLE) methods and their potential in Li-ion battery recycling. *Separation and Purification Technology*, 361. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131315>
- Tran, K. T., Han, K. S., Kim, S. J., Kim, M. J., & Tran, T. (2016). Recovery of magnesium from Uyuni salar brine as hydrated magnesium carbonate. *Hydrometallurgy*, 160, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.12.008>
- Tufa, R. A., Santoro, S., Flores-Fernández, C., Zegeye, R. B., Fuentealba, D., Aquino, M., Barraza, B., Inzillo, B. M., Nasirov, S., D'Andrea, G., Troncoso, E., Straface, S., Estay, H., & Curcio, E. (2025). Advances in integrated membrane processes for sustainable lithium extraction. *Desalination*, 610. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.118899>
- Unidas, N. (2023). Lithium extraction and industrialization: opportunities and challenges for Latin America and the Caribbean. <https://www.semanticscholar.org/paper/Lithium-extraction-and-industrialization-and-for-Transport/736ff823ffb87f0ced89b56c6f4dbe8f0e8c4c76>
- Wu, F., Shivakumar, K. R., Konhauser, K. O., & Alessi, D. S. (2025). Lithium resources and novel strategies for their extraction and purification. *Npj Materials Sustainability*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s44296-025-00069-5>
- Yersaiynova, A. A., Karshyga, Z. B., Kenzhaliyev, B. K., Sukurov, B. M., Yessengazyev, A. M., Orynbayev, B. M., & Saulebekkyzy, S. (2025). Adsorption equilibrium of lithium sorption process using synthesized inorganic sorbents. *Results in Engineering*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106720>
- Zamora, G., Gutierrez, J., & Conde, O. (2024). Bases técnicas para el diseño conceptual sustentable para la producción de carbonato de litio de las salmueras del salar de COIPASA. *Revista de Medio Ambiente Minero y Minería*, 9 (1), 61.
- Zhang, Y., Hu, Y., Wang, L., & Sun, W. (2019). Systematic review of lithium extraction from salt-lake brines via precipitation approaches. In *Minerals Engineering* (Vol. 139). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105868>