UNIVERSIDAD DE CHILE

amtc ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

POLICY PAPER

Reinyección de salmueras procesadas en salares andinos

Consideraciones técnicas para una implementación sostenible de la extracción directa de litio (DLE)

POLICY BRIEF | VERSIÓN TÉCNICA

Reinyección de salmueras procesadas en salares andinos

Consideraciones técnicas para una implementación sostenible de la extracción directa de litio (DLE)

Documento orientado a los países andinos del Triángulo del Litio, con especial énfasis en Chile, basado en la revisión publicada en la revista Cleaner Engineering and Technology (CLET).

Santiago Montserrat[1], Yarko Niño[1,2], Álvaro Henríquez[3], Julietta Zamora[4] y Humberto Estay[1] |

Octubre de 2026

[1] Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile, Av. Tupper, 2007, Santiago, Chile

[2] Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Av. Blanco Encalada, 2002, Santiago, Chile

[3] Galan Lithium LTD., Level 1, 50 Kings Park Road WA6005, Perth, Australia

[4] Facultad de Ingeniería, Universidad del Desarrollo, Av. La plaza, 680, Santiago, Chile

Mensajes Claves

1. Eliminar las pozas de evaporación no garantiza por sí solo una DLE sostenible. Qué hacer con la salmuera procesada y cómo mantener el balance hídrico y de masa en el salar son aspectos clave para la sostenibilidad de la DLE.

2. Reinyectar no significa simplemente devolver al salar lo que se extrajo. La salmuera procesada puede tener una composición, densidad y comportamiento diferentes a la salmuera original, con efectos hidráulicos, geoquímicos y ambientales que deben ser evaluados.

3. No existe una solución de reinyección única para todos los salares. La factibilidad depende de las características de la salmuera, la hidrogeología, la formación receptora y los ecosistemas que se busca proteger.

4. La reinyección masiva debe estar respaldada por evidencia y validación previa. Investigación, modelación, experimentación y pruebas piloto son necesarias para reducir las incertidumbres antes de avanzar hacia una implementación a gran escala.

5. El término de la extracción no necesariamente significa el término de la reinyección. En sistemas áridos, de recuperación lenta, la reinyección puede ser necesaria durante el cierre y post-cierre hasta alcanzar las condiciones o umbrales ambientales definidos.

Resumen ejecutivo

La extracción directa de litio (DLE) promete aumentar de manera importante la recuperación de litio y reducir las grandes pérdidas de agua asociadas a la evaporación de salmuera en pozas. Sin embargo, reducir las pérdidas de agua depende en gran medida de que la corriente residual del proceso de DLE sea gestionada adecuadamente y mantenida dentro del sistema del salar. La DLE genera una corriente de salmuera procesada y empobrecida en litio que debe ser gestionada como parte integral del proceso. Su volumen y sus características fisicoquímicas —densidad, composición iónica, pH y estado de saturación mineral, entre otras— dependen de la tecnología DLE, del balance de agua del proceso, de las etapas de purificación, de los reactivos utilizados, de las corrientes de purga y de eventuales etapas de concentración de salmuera de litio (LBC). La gestión de la salmuera procesada es, por lo tanto, un aspecto central para evaluar la sostenibilidad de la DLE en los salares andinos.

La reinyección al acuífero del salar es una alternativa para gestionar esta salmuera, ya que permite devolver al sistema parte del fluido extraído en lugar de disponerlo mediante evaporación u otros mecanismos. Además, puede contribuir a compensar parcialmente los cambios producidos por la extracción sobre el almacenamiento subterráneo, las cargas hidráulicas y las descargas naturales del salar, como los flujos evaporativos naturales. Sin embargo, reinyectar no equivale a restituir la salmuera original ni a recuperar automáticamente el régimen hídrico previo a la extracción. Las diferencias entre la salmuera procesada y la salmuera nativa pueden generar flujos controlados por diferencias de densidad, mezcla, precipitación o disolución de minerales, cambios en la porosidad y permeabilidad, y migración de salmueras modificadas hacia receptores sensibles. Estos procesos también pueden afectar la operación de los pozos por incrustación y colmatación. Por ello, los beneficios de la reinyección deben evaluarse y demostrarse para las condiciones hidrogeológicas y geoquímicas particulares de cada salar.

Desde el punto de vista regulatorio, la reinyección debe evaluarse como una intervención activa y de largo plazo sobre el sistema subterráneo, y no solo como una forma de disposición de una corriente residual del proceso de DLE. Su factibilidad requiere demostrar la compatibilidad entre la salmuera a reinyectar, la formación receptora y los ecosistemas que se busca proteger. Esto supone avanzar por etapas: caracterización de línea base; modelación hidrogeológica y de transporte reactivo; validación en laboratorio y terreno; pruebas piloto; escalamiento progresivo; monitoreo y gestión adaptativa; y criterios explícitos para el cierre y post-cierre.

El Triángulo del Litio, conformado por Argentina, Bolivia y Chile, concentra una parte importante de los recursos mundiales de litio y es una región donde el desarrollo de la DLE plantea el desafío de gestionar y eventualmente reinyectar grandes volúmenes de salmueras procesadas. Sin embargo, los salares andinos presentan una alta heterogeneidad hidrogeológica e hidroquímica, por lo que no resulta adecuado basar su regulación únicamente en límites generales. Para los países del Triángulo del Litio, y especialmente para Chile, se propone combinar requisitos mínimos comunes con criterios y umbrales de desempeño definidos para cada salar. Estos deben vincularse con indicadores hidrogeológicos, hidroquímicos, operacionales y ambientales que puedan medirse y verificarse durante el proyecto.

Proponemos ordenar la discusión sobre la reinyección a partir de cinco preguntas fundamentales: ¿qué reinyectar?, ¿cómo?, ¿dónde?, ¿cuándo? y ¿por cuánto tiempo? Aunque aparentemente simples, detrás de cada una hay decisiones que pueden determinar tanto la viabilidad de la reinyección como sus efectos sobre el salar.

1. Desafíos claves para la reinyección sostenible

La salmuera disponible para reinyección es el resultado del conjunto de etapas que componen el proceso de extracción. Por ello, no solo importa su composición final, sino también el volumen que efectivamente puede ser devuelto al salar. Este depende del balance completo de agua y masa del proceso, incluyendo la salmuera de alimentación, el aporte de agua fresca, el agua recuperada, las corrientes de purga, la recuperación de otros elementos y las pérdidas asociadas al tratamiento (Figura 1). Un proceso puede prescindir de la evaporación de salmuera en pozas y, aun así, requerir aportes relevantes de agua externa o generar una corriente de retorno cuyo volumen difiera del volumen originalmente extraído.

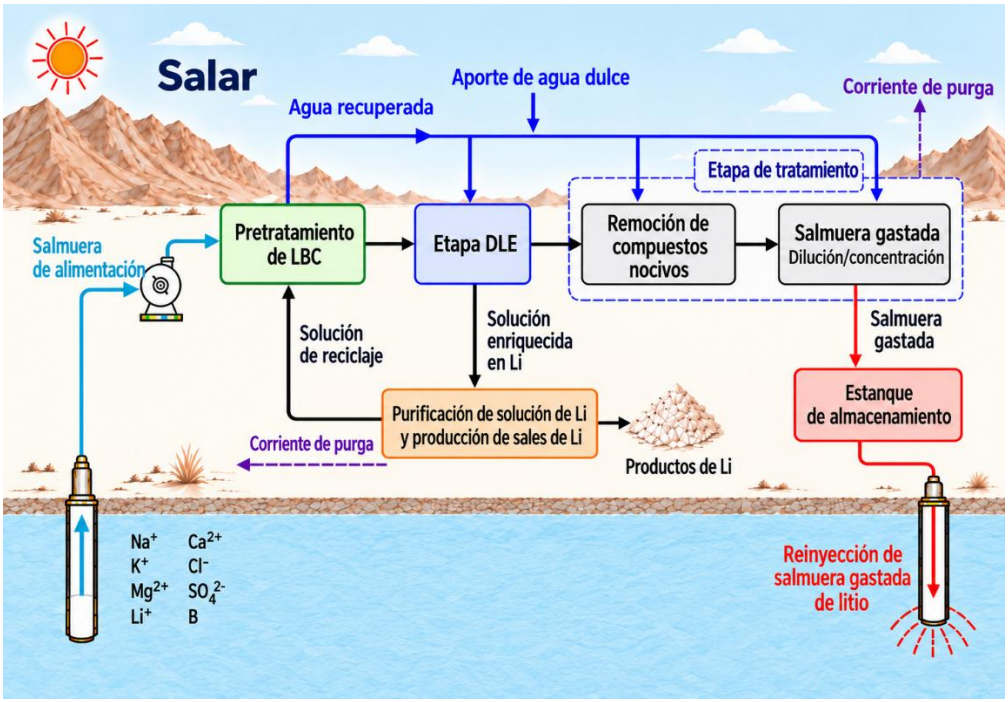

Figura 1. Esquema general del proceso de extracción de litio desde salmueras, incluyendo etapas opcionales de LBC, DLE, purificación, tratamiento o acondicionamiento de la salmuera procesada y reinyección.

Las propiedades de la salmuera tampoco pueden deducirse únicamente a partir de la disminución de la concentración de litio. Entre las variables relevantes se encuentran la densidad, los sólidos disueltos totales (TDS), la composición y proporción de iones mayoritarios, el pH, la actividad del agua, la temperatura, los elementos traza, los reactivos residuales, los compuestos incorporados o generados durante el proceso y los índices de saturación mineral.

Estas propiedades dependen de la tecnología DLE utilizada y de las etapas de concentración de salmuera de litio (LBC), purificación o acondicionamiento que formen parte del proceso. La adsorción, el intercambio iónico, la extracción por solventes, la precipitación y los procesos electroquímicos pueden modificar el pH y las proporciones entre iones mayoritarios, además de incorporar reactivos residuales, compuestos derivados del proceso o elementos traza que no estaban presentes originalmente en la salmuera. Los procesos LBC también pueden modificar la salinidad, la densidad y la composición iónica al remover agua o determinados iones. La caracterización debe realizarse, por lo tanto, para la configuración de proceso efectivamente seleccionado.

La compatibilidad con la formación receptora es igualmente importante. Una salmuera sobresaturada puede precipitar sales en tuberías, filtros, pozos y en el propio acuífero. Esto puede disminuir la inyectividad, aumentar los requerimientos de bombeo y reducir la vida útil de los pozos; en la formación, puede además disminuir la porosidad y la permeabilidad y modificar las trayectorias de flujo. Una salmuera subsaturada puede producir el efecto contrario: disolver minerales evaporíticos, aumentar la porosidad, modificar la conductividad hidráulica e incluso afectar la estabilidad mecánica del medio.

Cuando la salmuera procesada no sea compatible con la formación receptora, puede ser necesario acondicionarla antes de su reinyección, por ejemplo, mediante la remoción de compuestos potencialmente dañinos, ajuste de pH, control de sólidos suspendidos o gases, o modificación de su salinidad y densidad. Estas alternativas también podrían tener efectos sobre el balance global del proceso. La necesidad de dilución de la salmuera procesada aumenta la demanda de agua fresca, mientras que la necesidad de concentrarla generaría una corriente de rechazo que habría que dispone o evaporar, reincorporando las pérdidas de agua que la DLE busca reducir.

Calidad de la salmuera a reinyectar | No es adecuado definir un único límite de concentración aplicable a todos los salares. Los criterios deben establecer un rango de compatibilidad específico para el sitio, considerando densidad, estado de saturación, iones mayoritarios, elementos traza y compuestos asociados al proceso, junto con las características de la formación receptora.

1.2 ¿Cómo reinyectar? Métodos y condiciones operacionales

Actualmente, una parte importante de las salmueras residuales de las operaciones de litio se dispone superficialmente en lagunas o pozas, donde predomina la evaporación. Sin embargo, este tipo de disposición no corresponde a una reinyección al acuífero y, en Chile, la nueva guía del SEA no la reconoce como tal. La reinyección puede realizarse mediante infiltración superficial o somera o mediante inyección directa en pozos. La primera puede contribuir a mantener localmente los niveles de agua, pero reproducir un nivel no necesariamente reproduce los flujos ascendentes, la composición química ni los gradientes naturales que sostienen humedales y lagunas. La inyección en pozos permite incorporar la salmuera directamente al acuífero y, dependiendo de la profundidad y permeabilidad de la formación receptora, puede requerir sistemas presurizados. En estos casos, es necesario controlar las presiones y mantener la inyectividad en el tiempo.

El diseño operacional debe definir los caudales y presiones de inyección, la cantidad y configuración de los pozos y las condiciones necesarias para mantener su funcionamiento en el tiempo. La precipitación de minerales, la acumulación de sólidos finos y otros procesos de colmatación pueden reducir progresivamente la inyectividad, aumentando las presiones y los requerimientos de energía y haciendo necesarias medidas de mantenimiento o rehabilitación.

La selección del método no puede separarse de las características de la salmuera ni de la formación receptora. Una estrategia técnicamente viable debe permitir recibir los caudales previstos sin generar presiones incompatibles con el acuífero o los pozos y mantener una inyectividad suficiente durante la vida útil del proyecto.

1.3 ¿Dónde reinyectar? Ubicación, profundidad y objetivos de la reinyección

La ubicación de la reinyección depende tanto de la estructura hidrogeológica del salar como del objetivo que se busca alcanzar. La reinyección puede utilizarse para compensar parcialmente la disminución de presión asociada a la extracción, limitar hidráulicamente el área afectada, controlar el desplazamiento de la interfaz entre agua dulce y salmuera o contribuir a mantener determinadas condiciones hidráulicas en sectores ambientalmente sensibles (Figura 2).

La reinyección cerca de los pozos de extracción puede mejorar el control de presión, pero también adelanta la llegada de salmuera empobrecida en litio a los pozos de producción (Figura 2c). A mayor distancia, este retorno se retrasa, aunque disminuye la eficacia de la reinyección como medida de control de presión. La ubicación debe evaluarse, por lo tanto, de manera conjunta con el diseño de la extracción.

En los márgenes del salar, la reinyección puede utilizarse como barrera hidráulica para controlar el desplazamiento de la interfaz salina o contribuir a mantener sistemas dependientes del agua subterránea (Figura 2d). También puede considerarse la recarga somera, siempre que se mantengan las trayectorias de flujo y las condiciones hidroquímicas necesarias para los ecosistemas (Figura 2e). Esta última podría constituir, además, una alternativa para la disposición de salmueras diluidas generadas por ciertos procesos de DLE.

La diferencia de densidad entre la salmuera reinyectada y la salmuera nativa es especialmente relevante para definir la ubicación y profundidad de la reinyección. En acuíferos permeables, diferencias relativamente pequeñas pueden modificar de manera importante las trayectorias de flujo. Una salmuera menos densa tenderá a ascender y podría alcanzar sectores someros o receptores sensibles, mientras que una salmuera más densa tenderá a descender y podría acumularse en sectores profundos. La dispersión, la difusión, la heterogeneidad del acuífero y la formación de flujos preferenciales o *fingering* pueden modificar adicionalmente estas trayectorias.

Por estas razones, la ubicación y configuración de la reinyección deben definirse en función de su objetivo, de las características de la salmuera y de la respuesta esperada del sistema.

1.4 ¿Cuándo reinyectar? Temporalidad y variabilidad estacional

La reinyección debe considerar la variabilidad temporal del salar. La recarga, las precipitaciones, la evaporación y la posición de la zona de mezcla entre agua dulce y salmuera pueden variar estacionalmente, modificando la respuesta del sistema y de los ecosistemas. La estrategia de reinyección debiera buscar mantener una operación continua, adaptando los caudales y, cuando sea necesario, utilizando distintos puntos de reinyección a lo largo del año de acuerdo con las condiciones del sistema.

Además, interrupciones en el tratamiento de la salmuera, mantenciones o problemas en los pozos pueden impedir temporalmente la reinyección. Por ello, se debe contar con capacidad de almacenamiento temporal para enfrentar estas contingencias**.**

Por lo tanto, definir cuándo reinyectar requiere integrar la continuidad del proceso productivo con la variabilidad natural del sistema y con los objetivos ambientales definidos para cada sector del salar.

1.5 ¿Por cuánto tiempo reinyectar? Duración, cierre y post-cierre

La duración de la reinyección no necesariamente debe coincidir con la duración de la operación de extracción de litio. En cuencas hiperáridas, los tiempos de respuesta y recuperación del sistema subterráneo pueden ser largos. Si la reinyección contribuye a mantener determinadas condiciones hidráulicas o forma parte de las

medidas destinadas a proteger un cierto ecosistema, su interrupción al finalizar la extracción podría ser incompatible con esos objetivos.

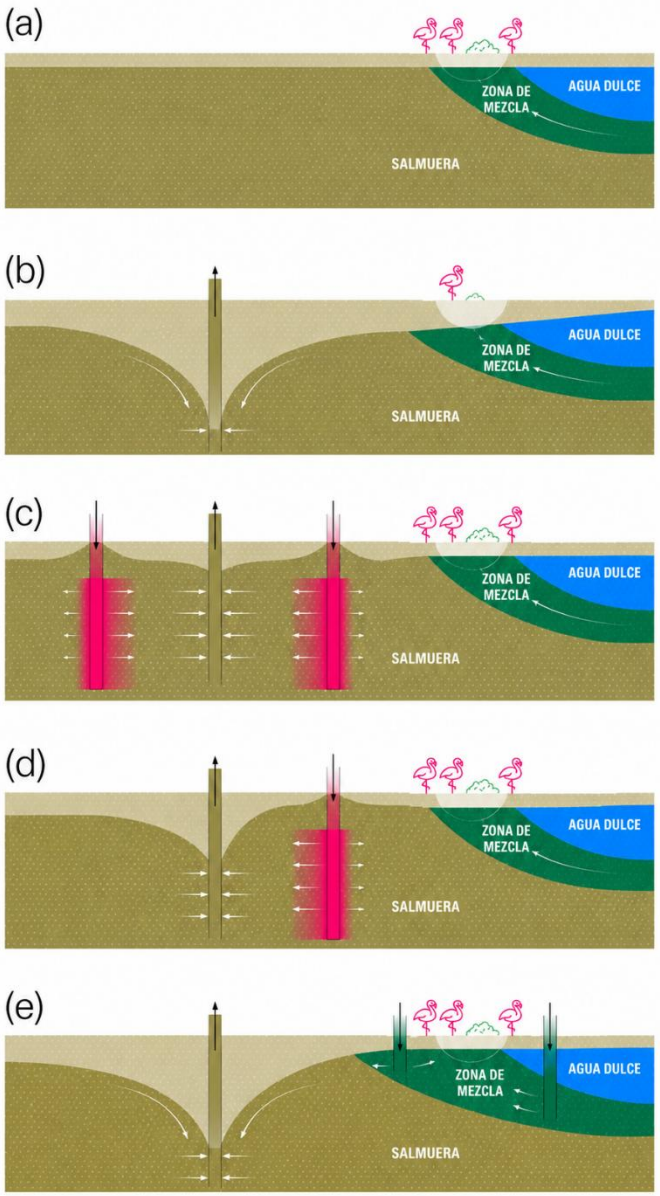

Figura 2. Ubicaciones y objetivos de reinyección: (a) sistema no perturbado; (b) extracción sin reinyección; (c) control de presión en torno a la extracción; (d) barrera hidráulica; y (e) control superficial o subsuperficial de zonas marginales.

La necesidad de continuar reinyectando debe evaluarse, por lo tanto, como parte de la planificación del cierre y post-cierre. En lugar de establecer a priori una fecha de término asociada al fin de la producción, deberían definirse criterios de desempeño que permitan determinar cuándo reducir progresivamente los caudales y cuándo es posible finalizar la reinyección sin superar los umbrales establecidos.

2. Desafíos de la modelación hidrogeológica y del transporte reactivo

La factibilidad de la reinyección depende de la arquitectura y heterogeneidad del acuífero, su almacenamiento y permeabilidad, la conectividad hidráulica y los efectos de las diferencias de densidad. Estos factores controlan la propagación de los cambios de presión, la migración de la salmuera y la existencia de vías preferenciales hacia humedales, lagunas, otras operaciones u otros receptores. Por ello, la evaluación debe partir de un modelo hidrogeológico conceptual desarrollado específicamente para el salar.

La modelación numérica debe integrar el flujo subterráneo y el transporte dependiente de la densidad y, cuando las interacciones geoquímicas puedan modificar la calidad de la salmuera o las propiedades hidráulicas del medio, incorporar la hidroquímica y el transporte reactivo. Los modelos deben representar conjuntamente la propagación de presión, la migración y mezcla de la salmuera, la disolución y precipitación de minerales, los cambios de porosidad y conductividad hidráulica y la evolución de la composición química. El transporte reactivo constituye el vínculo entre la hidrogeología, la química de la salmuera procesada y la inyectividad.

La incertidumbre debe formar parte explícita de la evaluación. Los modelos se han desarrollado mayoritariamente para operaciones específicas, mientras que los modelos integrados a escala de salar son escasos o inexistentes. Sin embargo, una representación a escala de cuenca es necesaria para establecer un marco conceptual común para evaluar el balance hídrico, definir las condiciones de borde de modelos operacionales de mayor resolución y evaluar impactos sinérgicos entre usuarios y operaciones. Los resultados deben expresar sus rangos de incertidumbre y contrastarse con los datos de monitoreo a medida que avanza el proyecto.

3. Hoja de ruta para para la reinyección sostenible La reinyección a gran escala requiere un desarrollo gradual, orientado a reducir las incertidumbres antes de avanzar hacia su implementación a escala industrial. La hoja de ruta propuesta aborda el ciclo de vida completo del proyecto, desde sus etapas iniciales de desarrollo hasta el cierre y post-cierre. Según el nivel de conocimiento disponible, integra investigación, modelación, validación experimental, pruebas piloto, monitoreo y gestión adaptativa, junto con el desarrollo progresivo de criterios ambientales y regulatorios (Figura 3).

3.1 Investigación inicial y caracterización

La primera etapa debe reunir la información necesaria para construir una representación conceptual del salar e identificar las principales incertidumbres asociadas a la reinyección. Esto incluye la caracterización de la hidrogeología y el funcionamiento hidrológico del salar, la salmuera nativa y la generada por el proceso, las posibles formaciones receptoras y los ecosistemas sensibles. Esta información permite establecer una línea base, evaluar preliminarmente la factibilidad de la reinyección e identificar los principales riesgos y brechas de conocimiento. A partir de ella también deben definirse indicadores y criterios preliminares de desempeño que orienten la modelación, los estudios experimentales, el monitoreo y las etapas posteriores. El alcance de esta etapa dependerá del conocimiento ya disponible para cada proyecto.

Desde las etapas iniciales deben identificarse también los receptores ambientales y los usos del territorio que puedan verse relacionados con la reinyección. Esto es especialmente relevante en los salares del Triángulo del Litio, donde los sistemas hidrogeológicos albergan ecosistemas sensibles, algunos de ellos habitados y utilizados por comunidades locales.

3.2 Integración y validación de modelos

La información generada debe integrarse progresivamente en un modelo de transporte reactivo, que constituye un elemento central de la hoja de ruta al incorporar la hidrogeología del salar, las características químicas de las salmueras nativa y procesada, sus interacciones con la formación receptora y las condiciones de operación. Este modelo permite evaluar distintas estrategias de reinyección antes de su implementación en terreno y anticipar la respuesta del sistema a escala de salar. Su desarrollo debe apoyarse en experimentos de laboratorio y ensayos controlados en terreno, e incorporar progresivamente la nueva información disponible.

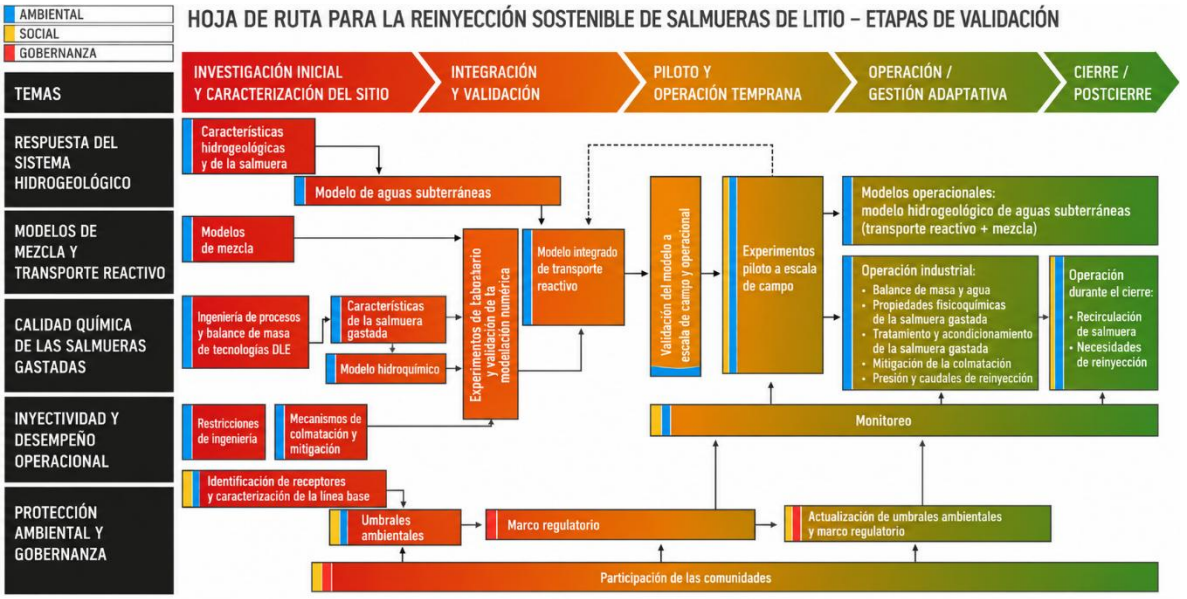

Figura 3. Hoja de ruta para la implementación sostenible de la reinyección de salmueras procesadas.

En paralelo, la evidencia generada debe permitir avanzar desde criterios ambientales preliminares hacia umbrales y condiciones de operación específicos para cada salar. De esta forma, los criterios de evaluación y regulación se desarrollan progresivamente junto con el conocimiento del sistema. En esta etapa también es importante comenzar a involucrar a las comunidades locales y otros actores relevantes, incorporando el conocimiento local y promoviendo la transparencia sobre los estudios y criterios que sustentarán la futura reinyección.

3.3 Pruebas piloto y operación inicial

Las pruebas piloto constituyen una etapa crítica antes del escalamiento. Su objetivo no es solo demostrar que es posible reinyectar, sino comprobar en terreno las hipótesis y predicciones desarrolladas en las etapas anteriores. Sus resultados deben utilizarse para validar y actualizar los modelos, revisar los criterios de desempeño, reducir las incertidumbres e identificar y abordar las brechas que persistan antes de avanzar hacia una operación de mayor escala.

Esta etapa permite además validar la estrategia de monitoreo en condiciones reales y refinar los umbrales ambientales y criterios de evaluación antes del escalamiento. Los resultados del monitoreo deben comunicarse

de manera transparente y accesible, manteniendo el involucramiento de las comunidades locales y otros actores relevantes iniciado en las etapas anteriores.

3.4 Operación y gestión adaptative

El inicio de la operación industrial no representa el término del proceso de evaluación. El monitoreo debe utilizarse para contrastar continuamente la respuesta observada con la esperada, actualizar los modelos y ajustar la estrategia de reinyección cuando sea necesario. La gestión adaptativa es, por lo tanto, parte integral de la operación y no únicamente una respuesta frente a desviaciones o contingencias.

A medida que se genera nueva evidencia, los criterios y umbrales ambientales, las condiciones de operación y el marco regulatorio deben poder revisarse y ajustarse. Los resultados del monitoreo y el cumplimiento de los criterios ambientales deben ser accesibles y trazables. Mecanismos de monitoreo participativo pueden complementar el seguimiento técnico, especialmente en sectores ambiental o territorialmente sensibles, contribuyendo a la transparencia y a la confianza en el seguimiento y fiscalización de los proyectos.

3.5 Cierre y post-cierre

La misma lógica debe mantenerse durante el cierre y post-cierre. En sistemas de muy baja recarga, como los salares andinos, la recuperación hidrogeológica puede extenderse más allá de la vida útil del proyecto. Por ello, la reducción o término de la reinyección debe basarse en la respuesta observada del sistema y en el cumplimiento de los criterios de desempeño establecidos. Cuando estos no se hayan alcanzado, puede ser necesario mantener el monitoreo, la gestión adaptativa y, eventualmente, la reinyección activa después del término de la extracción.

La información y los indicadores relevantes deben mantenerse disponibles durante esta etapa, permitiendo verificar el cumplimiento de los criterios establecidos para el cierre y post-cierre.

4. Conclusiones

La reinyección es una de las principales alternativas para gestionar la salmuera procesada generada por la DLE y puede, además, contribuir a mitigar algunos de los efectos hidráulicos y ambientales asociados a la extracción. Sin embargo, reinyectar un volumen similar al extraído no implica por sí solo recuperar las condiciones del salar. La respuesta dependerá de las características de la salmuera procesada, la hidrogeología y geoquímica del salar, las condiciones de reinyección y la sensibilidad de los ecosistemas y otros receptores frente a los cambios generados en el sistema.

La reinyección debe evaluarse de manera gradual y para las condiciones particulares de cada salar. La caracterización de línea base, los balances de agua y masa, la modelación hidrogeológica y de transporte reactivo, la validación experimental y las pruebas piloto deben entregar la evidencia necesaria antes de avanzar hacia una operación a mayor escala. Durante la operación, el monitoreo debe permitir verificar la respuesta del sistema, actualizar los modelos y ajustar la estrategia de reinyección cuando sea necesario. Esta evaluación debe extenderse al cierre y post-cierre cuando la recuperación del sistema o la protección de los ecosistemas requieran mantener medidas de gestión.

Para la evaluación ambiental y la regulación, se propone combinar requisitos mínimos comunes con criterios y umbrales específicos para cada salar. Estos deben considerar la cantidad y calidad de la salmuera reinyectada,

la respuesta hidrogeológica e hidroquímica, el desempeño de la reinyección y la protección de receptores sensibles. Los criterios deben revisarse a medida que se disponga de nueva evidencia proveniente de los pilotos y del monitoreo durante la operación.

La participación de las comunidades locales, los reguladores y otros actores relevantes debe acompañar las distintas etapas de desarrollo de los proyectos. La información generada por los estudios, las pruebas piloto y el monitoreo debe ser accesible y trazable, permitiendo incorporar conocimiento local, transparentar la respuesta observada del sistema y generar confianza en las decisiones adoptadas. La evaluación debe considerar también los efectos acumulativos de distintas operaciones y usos del agua a escala de salar, particularmente cuando estos puedan afectar ecosistemas o territorios de interés para las comunidades locales.

La reinyección es clave para la sostenibilidad de la DLE. Su viabilidad requiere demostrar que se puede implementar sin comprometer las condiciones hidrogeológicas y geoquímicas del salar ni sus ecosistemas, en un proceso transparente y que genere confianza entre los distintos actores involucrados.

Fuente

Este policy brief se basa en el artículo de revisión “Lithium brine re-injection in salar environments: perspectives for a sustainable implementation of direct lithium extraction (DLE) technologies”, de Santiago Montserrat, Yarko Niño, Álvaro Henríquez, Julietta Zamora y Humberto Estay, publicado en la revista Cleaner Engineering and Technology (CLET). El documento está dirigido principalmente a los países andinos del Triángulo del Litio, con especial énfasis en Chile, y sintetiza los principales desafíos técnicos y la hoja de ruta de investigación e implementación desarrollados en el artículo. El artículo completo puede ser descargado en el siguiente link: https://doi.org/10.1016/j.clet.2026.101309

Financiamiento

Esta investigación fue financiada por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID), a través del proyecto ANID AMTC CIA250010.