



Universidad de Concepción

¿CÓMO SE FORMAN LAS AGUAS RICAS EN LITIO EN EL SALAR DE ATACAMA?

Fernanda Álvarez Amado / Camila Poblete González
Daniel Matte Estrada / Dilan Campos Quiroz / Daniele Tardani
Leopoldo Gutiérrez / José Luis Arumí



Serie Comunicacional CRHIAM

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

¿Cómo se forman las aguas ricas en litio en el Salar de Atacama?

Fernanda Álvarez Amado, Camila Poblete González,

Daniel Matte Estrada, Dilan Campos Quiroz, Daniele Tardani,

Leopoldo Gutiérrez y José Luis Arumí.

Junio 2023.

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos

para la Agricultura y la Minería

(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

¿CÓMO SE FORMAN LAS AGUAS RICAS EN LITIO EN EL SALAR DE ATACAMA?

Fernanda Álvarez Amado / Camila Poblete González / Daniel Matte Estrada
Dilan Campos Quiroz / Daniele Tardani / Leopoldo Gutiérrez / José Luis Arumí

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

PRESENTACIÓN

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

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

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

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Fernanda Álvarez Amado

Geóloga, Universidad de Chile.
Doctora en Ciencias, Mención Geología,
Universidad de Chile.
Profesora Asociada,
Departamento Ciencias de la Tierra,
Universidad de Concepción.
Colaboradora CRHIAM.



Camila Poblete González

Geóloga, Universidad de Concepción.
PhD(c) Doctorado en Ciencias Geológicas,
Universidad de Concepción.



Daniel Matte Estrada

Geólogo, Universidad de Concepción.



Dilan Campos Quiroz

Licenciado en Geología, Universidad de Concepción.
Investigador Junior en Geología en el
Centro de Excelencia Internacional del
Sustainable Minerals Institute SMI-ICE-Chile.

**Daniele Tardani**

Geologo, Università degli Studi di Firenze.
Profesor Asociado
Instituto de Ciencias de la Ingeniería,
Universidad de O'Higgins.
Doctor en Ciencias mención Geología,
Universidad de Chile.

**Leopoldo Gutiérrez**

Ingeniero Civil Metalúrgico.
Doctor en Procesamiento de Minerales,
University of British Columbia.
Profesor Asociado del Departamento de
Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de
Concepción.
Investigador Principal CRHIAM.

**José Luis Arumí**

Ingeniero Civil.
Doctor of Philosophy. Major on Engineering.
Profesor Titular
Departamento de Recursos Hídricos,
Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción.
Investigador Principal CRHIAM.

GLOSARIO

- **Cuenca Endorreica:** región geográfica que se caracteriza por ser una cuenca hidrográfica cerrada, es decir, que no tiene salida natural hacia el mar. Las aguas de lluvia y los ríos que fluyen dentro de una cuenca endorreica se acumulan en depresiones (por ejemplo: lagunas, humedales) o en lagos salinos. En estas cuencas, la evapotranspiración es mayor que la precipitación, lo que puede producir una alta concentración de sales y minerales.
- **Evaporitas / Sales evaporíticas:** rocas de origen sedimentario que se forman a partir de la precipitación de ciertos elementos que se concentran en el agua después de la evaporación, esto ocurre en una cuenca cerrada, tal como un lago o mar.
- **Procesos Hidrogeoquímicos:** procesos que involucran cambios en la composición química del agua, ya sea a través de reacciones químicas con los minerales del suelo o la roca, interacciones con la biota o la atmósfera, o mediante procesos físicos como la mezcla de aguas y la evaporación. Estos procesos son impulsados por la disolución, precipitación, oxidación, reducción, adsorción y otros procesos químicos y biológicos.
- **Recarga:** volumen de agua que entra en un acuífero a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua.
- **Salmuera:** solución acuosa altamente concentrada en elementos y sales disueltas (por ejemplo: cloruro de sodio, cloruro de calcio, litio, entre otros). La concentración de la salmuera depende de la cantidad de sales disueltas en el agua y puede variar ampliamente según su origen.
- **Solutos:** sales y otros compuestos químicos que se disuelven en un solvente para formar una solución. En ambientes salinos el solvente corresponde al agua que puede llegar a formar soluciones salinas o salmuera.
- **Sorción:** se refiere al proceso mediante el cual las sustancias se adhieren o se acumulan en la superficie de un material sólido o líquido. Este proceso incluye tanto la adsorción como la absorción.
- **Trazador:** en hidrogeología, un trazador es cualquier sustancia presente en las aguas o propiedades de la molécula de agua que puede medirse y utilizarse para inferir procesos medioambientales.

RESUMEN

El litio es un elemento crítico que es fundamental para las tecnologías verdes y la descarbonización global. Los recursos de litio se encuentran en pegmatitas y salmueras ricas en litio, siendo Chile y Bolivia los países con las mayores reservas y recursos de este metal en salmueras continentales. La extracción de litio en salmueras se produce en zonas áridas e hiperáridas con precipitaciones anuales menores a 2 mm, como el Salar de Atacama, que se encuentra en una cuenca cerrada con condiciones geológicas y climáticas óptimas para la acumulación de litio y otros compuestos. El Salar de Atacama representa una de las mayores reservas de este metal a nivel mundial, motivo por el cual ha sido extensamente estudiado por científicos de diferentes disciplinas. Sin embargo, los procesos geológicos y químicos que permiten el enriquecimiento extraordinario de litio en el Salar de Atacama continúan siendo controversiales. Esta serie comunicacional busca dar cuenta de los avances para entender los fenómenos de enriquecimiento a través de nueva herramienta metodológica: Isótopos de litio (Li), boro (B) y estroncio (Sr).

INTRODUCCIÓN

Garantizar el desarrollo sostenible, la seguridad energética y el abastecimiento de minerales para la descarbonización es el mayor desafío para la transición energética global. Dentro de este contexto, los elementos críticos o estratégicos son fundamentales para las tecnologías actuales. Entender el origen de estos elementos y cuáles son los procesos naturales que lo pueden reconcentrar en diferentes ambientes geológicos puede proporcionar conocimientos relevantes para mejorar la eficacia de las estrategias de exploración, y así aumentar el hallazgo de nuevos recursos.

Los elementos críticos son aquellos fundamentales para el desarrollo de tecnologías verdes, y su escasez de suministro es la principal amenaza a la descarbonización global (Mudd, 2021). Uno de los elementos críticos de mayor importancia para el país corresponde al litio (Li). Éste es un metal alcalino con características geoquímicas particulares (elevada conductividad eléctrica, baja viscosidad, y bajo coeficiente de expansión térmica) que le permite tener aplicaciones asociadas a diferentes tecnologías energéticas actuales y futuras (como la electromovilidad), cruciales para reducir las emisiones de carbono y mitigar el cambio climático antropogénico.

¿Cómo se forman las aguas ricas en litio en el Salar de Atacama?

Los recursos de litio se encuentran principalmente en dos tipos de yacimientos: en pegmatitas, un tipo de roca que contiene abundantes minerales de litio; y salmueras ricas en litio, que corresponden a soluciones acuosas extremadamente salinas (Figura 1). Canadá, China y Australia tienen importantes recursos de minerales de litio, mientras que en Chile y Bolivia dominan las salmueras de litio. En 2022 Chile fue el segundo productor mundial de litio con 39 mil toneladas métricas, solamente superado por Australia que produjo 61 mil toneladas métricas. Nuestro país posee las mayores reservas reportadas en salmueras continentales y es el tercer país con mayores recursos de litio con 11 millones de toneladas, precedido por Bolivia con 21 millones de toneladas y Argentina con 20 millones de toneladas (Mineral Commodity Summaries USGS, 2023).



Figura 1.

Yacimientos de Litio: en mineral espodumena en Mina Greenbushes, Australia y en salmueras en Salar de Atacama, Chile.

Fuentes: Talison lithium (Greenbushes Project) y SQM Lithium.

EL LITIO EN EL SALAR DE ATACAMA

El "triángulo del litio" del norte de Chile, el noroeste de Argentina y el suroeste de Bolivia es una reserva de clase mundial de este metal (Figura 2), pero el origen del extraordinario enriquecimiento de litio es controvertido y diferentes procesos han sido invocados a lo largo de los años para explicar las altas concentraciones en la zona. Algunos de los procesos propuestos para explicar el enriquecimiento de este elemento químico en la región incluyen las aguas geotermales asociadas con el vulcanismo activo, la lixiviación de

sales solubles en agua de rocas volcánicas, la lixiviación de arcillas ricas en litio y las fugas de aguas salinas de lagos ubicados en los Andes.

Sin embargo, el enriquecimiento extremo de litio en el Salar de Atacama requiere una combinación única de diferentes factores que juegan un papel importante en el transporte y la acumulación, y otros componentes solubles en la zona. Aunque se han propuesto diversos procesos para explicar el enriquecimiento de este metal en la región, aún no se ha llegado a un consenso sobre cuál es el proceso principal que contribuye al enriquecimiento de litio en el Salar de Atacama.

Su extracción en salmueras se produce en zonas áridas e hiperáridas que cuentan con precipitaciones anuales menores a los 2 mm. La principal fuente de litio en Chile corresponde al Salar de Atacama ubicado en la Región de Antofagasta. El salar se encuentra en una cuenca cerrada (reservorio endorreico), que reúne condiciones geológicas y climáticas óptimas para la acumulación de litio y otros compuestos. Su ambiente hiperárido, marcado por las altas tasas de evaporación y las escasas precipitaciones, permite importantes acumulaciones de sales evaporíticas y la formación de salmueras profundas, debido a la interacción de las aguas subterráneas, que ingresan desde las zonas periféricas del Salar de Atacama, con los depósitos salinos.

El salar tiene un área de aproximadamente 3.000 km², y se encuentra en una depresión limitando al este con la Cordillera de los Andes y al oeste con la Cordillera de Domeyko. Dentro del Salar de Atacama se distinguen dos zonas principales: un núcleo masivo de halita (NaCl) y zonas marginales clásticas y evaporíticas (Figura 2). Las salmueras del núcleo del salar se ubican a diferentes profundidades, desde unos pocos a cientos de metros, variando la concentración de litio y otros solutos. Las salmueras del núcleo poseen los contenidos de litio más altos, con una concentración promedio de este elemento químico de 1.400 mg/L y alcanzan hasta 5.000 mg/L en la parte sur del Salar de Atacama (Munk *et al.*, 2018). Estos valores van muy por encima de los valores de los fluidos de cuencas cerradas a nivel mundial que tienen concentraciones de litio mayoritariamente entre los entre 3,8 y 488 mg/L (Dugamin *et al.*, 2021).

La mayoría de los estudios en el Salar de Atacama se han centrado en las porciones sur y sureste, donde se han reportado las mayores concentraciones de litio. Sin embargo, para entender completamente la dinámica del sistema de cuenca salina y cómo se obtienen las actuales composiciones de las salmueras enriquecidas, también es relevante centrarse en los proce-

Los procesos hidroquímicos que ocurren en el margen y alrededores del salar, desde donde ocurre la recarga de agua en la cuenca hidrográfica, proveniente de precipitaciones y derretimientos de nieve y glaciares desde la Cordillera de Los Andes.

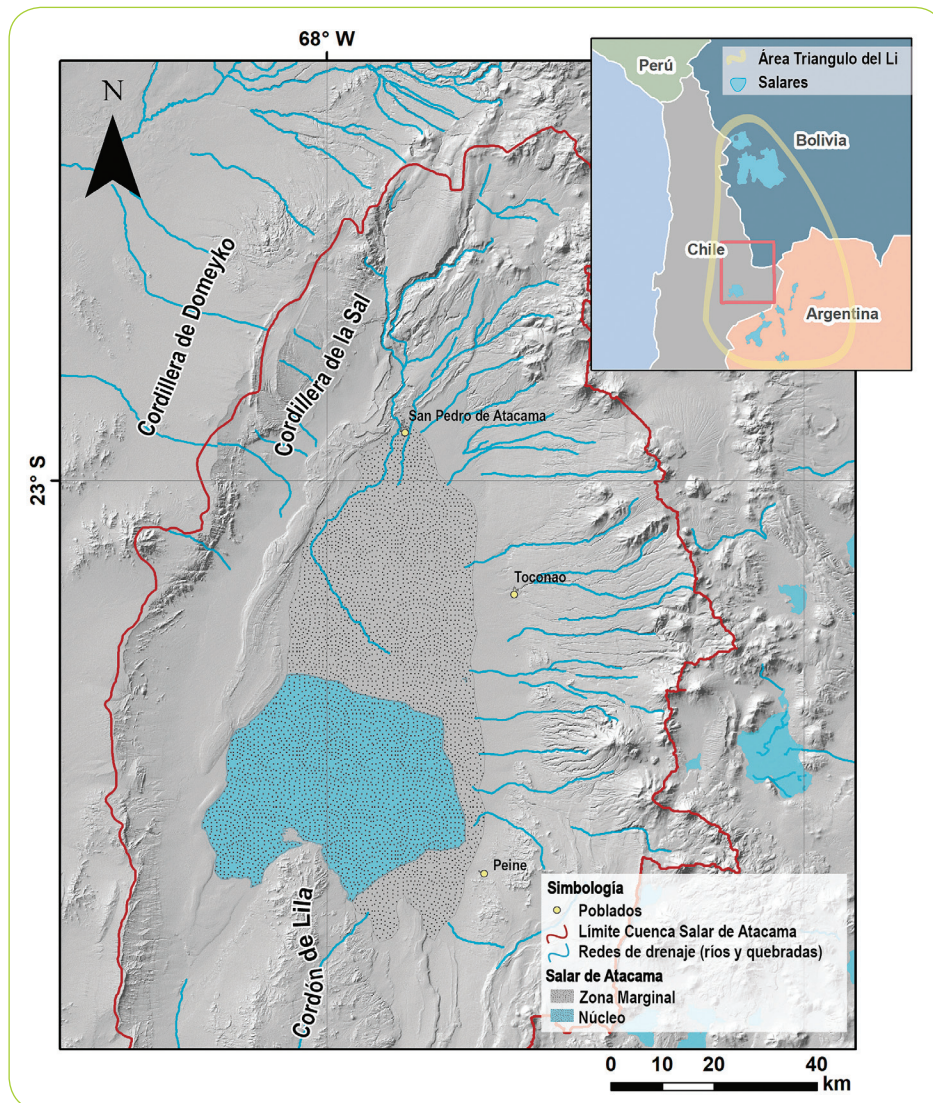


Figura 2.

Cuenca hidrográfica Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia.

PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS

En el norte de Chile se han investigado las características hidrogeológicas y los procesos hidrogeoquímicos que afectan los distintos tipos de agua, en su mayoría, a partir de datos hidrológicos, de elementos mayores (por ejemplo: sodio, calcio, magnesio, cloro) y trazas (por ejemplo: cobre, arsénico, boro), en conjunto con datos isotópicos de oxígeno, hidrógeno y carbono (Risacher *et al.*, 1999; Flores, 2010; Achurra, 2010; Tassi *et al.*, 2010).

Dentro de los procesos más relevantes se destaca la evaporación, interacción del agua con unidades de roca volcánica, disolución o precipitación de sales y la mezcla de fluidos (Figura 3). En esta Serie Comunicacional, a través de datos geoquímicos, se muestra la relevancia de cada uno de estos procesos en la formación de las salmueras del Salar de Atacama.

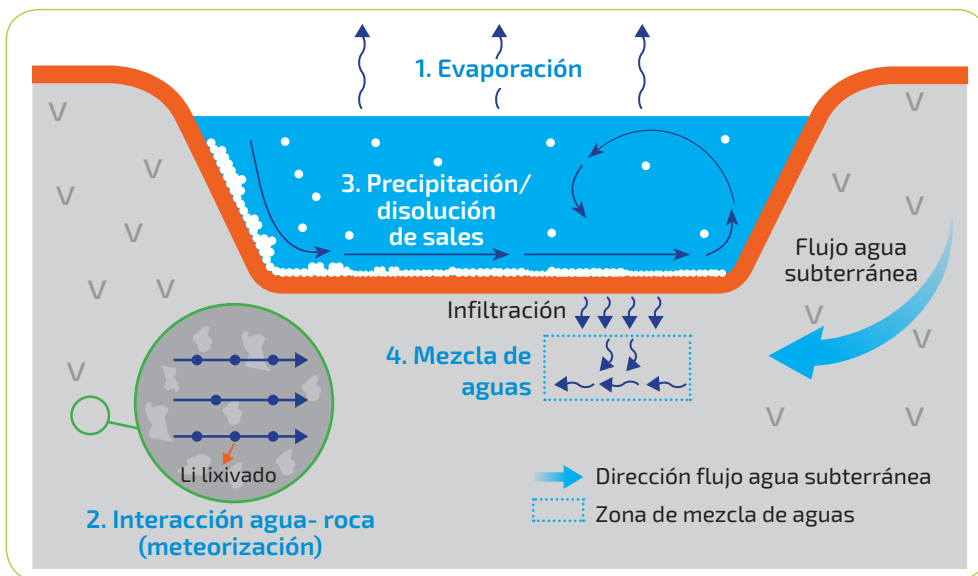


Figura 3.

Procesos Hidrogeoquímicos: 1. Evaporación, 2. Interacción agua-roca (meteorización), 3. Precipitación / disolución de sales y 4. Mezcla de aguas. Fuente: Elaboración propia.

En el caso analizado, la evaporación se refiere al cambio de fase desde estado líquido a gaseoso del agua. La evaporación permite la concentración de los solutos (iones disueltos) por pérdida del solvente (agua). Cabe destacar que, en el norte de Chile, al ser una zona muy árida y seca, se reportan tasas de evaporación muy altas, llegando hasta 2.300 mm al año.

La interacción agua-roca hace referencia a la reacción, entre los minerales de la roca y la solución acuosa. Esto involucra la alteración de minerales primarios, que conlleva a un proceso de liberación de elementos formadores de minerales en la solución (agua) y, en algunos casos, si las condiciones del sistema son las adecuadas, a la formación de minerales secundarios.

La precipitación de sales evaporíticas ocurre cuando existe una sobresaturación de los solutos en el agua (debido a las altas tasas de evaporación). La disolución de estas sales implica el proceso reverso, donde los cristales formados son disueltos en agua pasando a formar parte de la solución salina. Esta incorporación de elementos a la fase líquida puede ser parcial (reacción incongruente) o total (reacción congruente).

Finalmente, la mezcla de aguas se entiende como la combinación en proporciones variables de fluidos con características fisicoquímicas diferentes. Estos fluidos pueden ser superficiales o subsuperficiales. Así, resulta un nuevo fluido cuya composición es el reflejo de las diferentes proporciones de mezcla.

La utilización de los isótopos estables de litio (Li), boro (B) y estroncio (Sr) como trazadores de estos procesos hidrogeoquímicos, es una aplicación novedosa, que nos permite profundizar en la identificación de cómo los diferentes tipos de agua pueden llegar a tener su actual composición química.

Isótopos

Un isótopo se define como cada uno de los átomos de un mismo elemento químico, cuyo núcleo tiene el mismo número de protones, pero distinto número de neutrones. Es decir, un mismo elemento, pero con diferente masa, dada su diferencia en el número de neutrones (Figura 4).

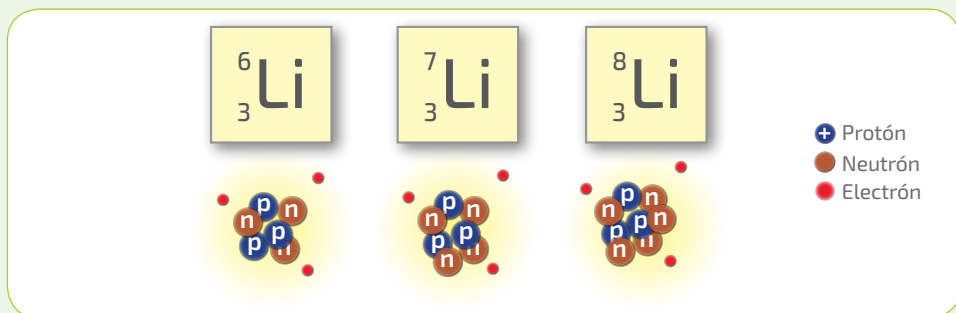


Figura 4.

Representación gráfica isótopos de Li. Fuente: Elaboración propia.

Particularmente si un isótopo emite radiación, se denominan "isótopo radiactivo" o "inestables", estos se desintegran para dar lugar a otros isótopos emitiendo partículas o radiación electromagnética; en caso contrario, se denominan "isótopos estables". Los isótopos estables se utilizan principalmente para analizar los recursos hídricos y edáficos.

La abundancia relativa del isótopo estable pesado de un elemento respecto del ligero (por ejemplo: comparación del isótopo ^7Li con el ^6Li) recibe el nombre de traza o firma isotópica y se representa en notación delta (δ) por medio de la relación de esta proporción en la muestra, respecto a estándares internacionales, expresando los resultados en tantos por mil (‰) (Figura 5).

$$\delta ^7\text{Li} = \left(\frac{\frac{^7\text{Li}}{^6\text{Li}}_{\text{muestra}}}{\frac{^7\text{Li}}{^6\text{Li}}_{\text{estándar}}} - 1 \right) \times 1000 \text{‰}$$

Relación entre los dos isótopos en la muestra

Relación entre los dos isótopos en el estándar

Figura 5.

Notación de firma isotópica.

Los isótopos, particularmente, se distribuyen en distintos reservorios naturales (por ejemplo: agua, minerales, rocas) por lo que en geología se utiliza la combinación de estos como trazadores de procesos geoquímicos, basados en la variación de la firma isotópica.

La distribución de los isótopos de litio se estudia a partir de la firma isotópica de $\delta^7\text{Li}$. Esta firma isotópica en primera instancia está influenciada por la meteorización, es decir, la alteración de los minerales debido a reacciones químicas entre los minerales de las rocas y elementos del medio natural como el agua, generando que el $\delta^7\text{Li}$ aumente en el agua. Este incremento en la firma isotópica de litio se potencia aún más cuando se forman minerales secundarios a partir de la alteración de otros minerales previos, lo que también aumenta el $\delta^7\text{Li}$ en el agua. Esto debido a que generalmente los minerales secundarios incorporan el litio liviano (^6Li), dejando mayor cantidad de litio pesado en el agua (^7Li), aumentando el $\delta^7\text{Li}$.

Por otra parte, de forma similar al litio, la firma isotópica de boro $\delta^{11}\text{B}$, compara la relación entre el isótopo ^{11}B con el isótopo del boro más liviano ^{10}B . El boro es particularmente sensible a la participación de la disolución o precipitación de minerales evaporíticos. Si existe precipitación de sales, aumenta el $\delta^{11}\text{B}$ en el agua, ya que las sales incorporan preferentemente el boro liviano (^{10}B). Luego, si existe disolución de evaporitas disminuye el $\delta^{11}\text{B}$ en el agua, ya que el boro liviano que estaba en las sales pasa a la fase líquida. A diferencia del litio, en el caso del boro el pH del agua influye mucho en los isótopos dominantes (^{11}B o ^{10}B) y consecuentemente en la firma isotópica.

Por último, los isótopos de estroncio (Sr) se utilizan como trazadores a partir de su razón directa entre el isótopo más pesado y el más liviano ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). Esta razón es muy útil para rastrear trayectorias de flujo del agua, y permite identificar las rocas por las que ha transitado o interactuado el agua. Esto debido a que, a diferencia de los dos sistemas anteriores, las razones isotópicas de estroncio no varían frente a procesos de interacción agua-roca (meteorización). De estas rocas puede provenir la mayoría de los elementos disueltos en el agua.

¿QUÉ PROCESOS GEOLÓGICOS E HIDROQUÍMICOS SE PUEDEN RECONOCER POR LA GEOQUÍMICA DE AGUAS?

Los procesos hidrogeoquímicos descritos anteriormente han sido estudiados por diversos autores en el norte de Chile, quienes han analizado la influencia de estos en la formación de los diferentes tipos de aguas encontrados en la zona. En particular, en esta Serie Comunicacional se muestran los principales resultados e implicancias del estudio de Álvarez-Amado *et al.*, (2022).

Evaporación

Como una primera aproximación para distinguir qué procesos podrían estar ocurriendo, se utilizan las concentraciones de litio, boro y bromo en las aguas. Se determinó que las concentraciones de litio y boro aumentan con respecto a las concentraciones de cloro para todas las muestras, lo cual indicaría que existe un proceso de evaporación gradual a medida que aumenta la salinidad, que permite que las concentraciones de estos elementos aumenten cuando el agua líquida se va convirtiendo a vapor.

En tanto, el bromo muestra una variación distinta a las anteriores. Debido a que el litio y el bromo poseen un comportamiento geoquímico similar, es esperable que varíen de la misma forma en respuesta a ciertos procesos como la disolución o precipitación de evaporitas. Por lo tanto, estos procesos no explican completamente las diferencias en las variaciones de ambos elementos, indicando que existen procesos adicionales que concentran litio relativo al bromo. Por ejemplo, otros autores han reportado pérdida de bromo a la atmósfera a altas elevaciones, otra posibilidad es que el bromo se incorpore preferentemente en la estructura cristalina de las sales (como la halita) por sobre el litio. Además, existen otras fuentes de este metal, como la gran cobertura de rocas volcánicas en la Cordillera de los Andes y, finalmente, fluidos geotermales que podrían interactuar con las aguas, los cuales presentan concentraciones de litio elevadas respecto a las de bromo. Con el fin de dilucidar cuáles de estos procesos están ocurriendo y en qué zonas, es que usamos los trazadores isotópicos.

Interacción agua-roca

Para estudiar este proceso se utilizan los isótopos de estroncio y litio. En la Figura 6 se muestra la distribución de los valores isotópicos de estroncio en aguas y rocas circundantes a través de una escala de colores. De esta forma, colores similares en las muestras de agua y roca indican que existe una relación genética entre ambas, es decir, que los fluidos pasaron e interactuaron con estas rocas. Por ejemplo, en la zona noreste, cerca del límite con Bolivia, se observan colores rosados-morados en todas las muestras, lo cual es indicativo de que la fuente del estroncio en las aguas corresponde a las rocas volcánicas cercanas, y demostrando así que el proceso de interacción agua-roca es un agente importante en el aporte de solutos a las aguas. Particularmente, todos los valores de estroncio se solapan con los valores reportados para rocas volcánicas en la zona.

¿Cómo se forman las aguas ricas en litio en el Salar de Atacama?

Al interior del Salar de Atacama se observa un cambio notorio en los isótopos de estroncio, hacia el norte predominan valores más altos (tonos rojos), mientras que hacia el sur se encuentran valores más bajos (tonos amarillos a anaranjados). Esto indicaría aportes desde diferentes fuentes en ambas zonas, donde la parte sur estaría recibiendo aportes de aguas más diluidas (caracterizadas por valores más bajos de isótopos de estroncio) desde las áreas sur y sureste, mientras que la zona norte del salar recibiría aportes desde fuentes con valores más elevados de la razón isotópica de estroncio.

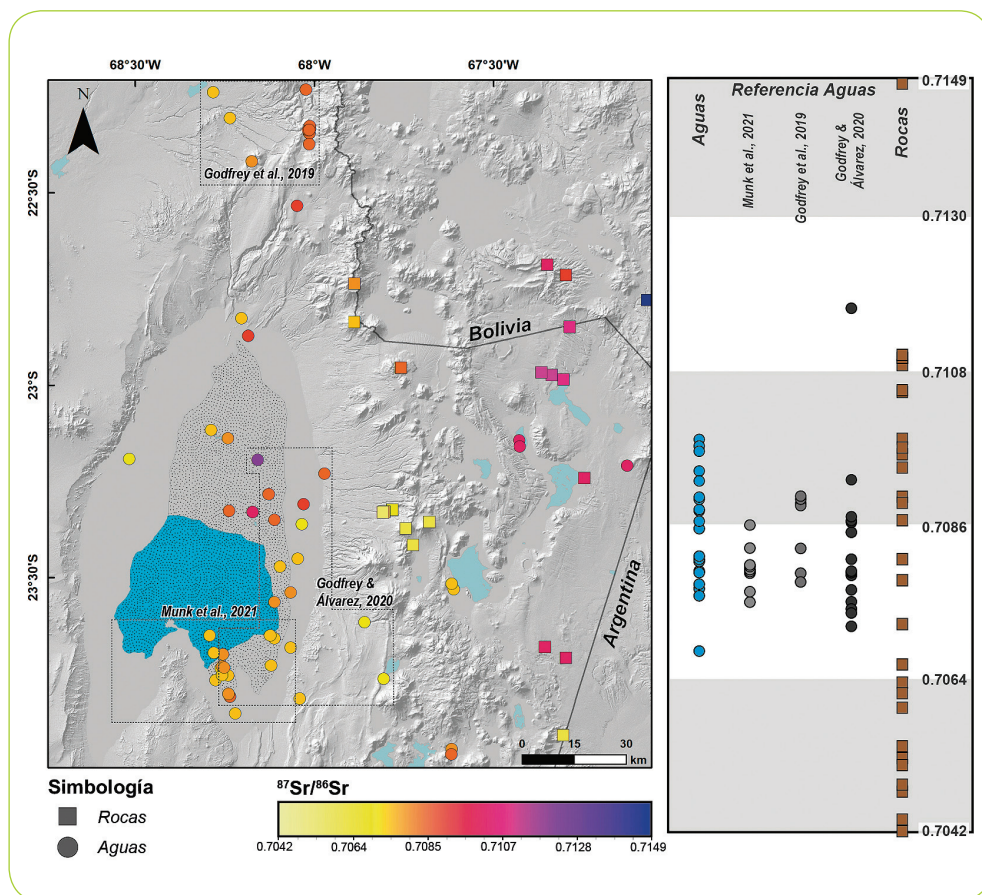


Figura 6.

Distribución espacial de firma isotópica de estroncio - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.
Fuente: Modificada de Álvarez-Amado et al., (2022).

En la Figura 7 se muestra la distribución de los valores isotópicos de litio en aguas y rocas a través de una escala de colores. En cuanto a la distribución de los isótopos de litio, se observa que los valores más elevados se encuentran en la parte sur y este del Salar de Atacama, en la zona marginal (colores morados), probablemente asociados con la sorción de litio debido a una importante presencia de arcillas en depósitos aluviales siliciclásticos. Las arcillas incorporan preferentemente el litio liviano (^6Li) a partir del agua, por lo tanto, el agua quedará con una razón isotópica más pesada, es decir mayores valores de $\delta^7\text{Li}$, que es lo que se observa en la zona sureste del salar.

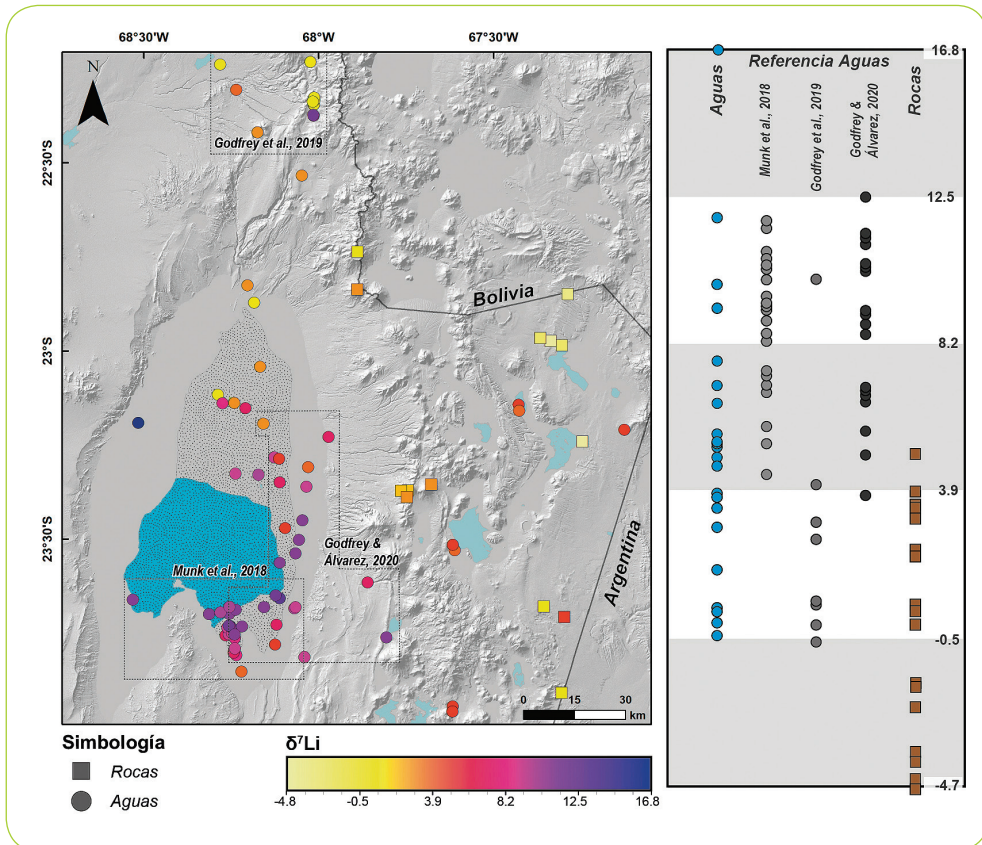


Figura 7.

Distribución espacial de firma isotópica de litio - $\delta^7\text{Li}$. Fuente: Modificada de Álvarez-Amado et al., (2022).

Disolución de sales

En la mayoría de los casos dentro de ambientes hiperáridos, las altas concentraciones de cloro en conjunto con altas razones de cloro por bromo (Cl/Br) indican que está ocurriendo de disolución del mineral halita (Alcalá y Custodio, 2008). Sin embargo, para la mayoría de las muestras de este estudio, los valores en la razón Cl/Br no alcanzan a ser tan elevados como para aseverar que existe disolución de evaporitas. Adicionalmente, sólo en dos muestras se reconocieron altas razones de Cl/Br en conjunto con bajos valores isotópicos de boro (Figura 8), esto indicaría que probablemente está ocurriendo una disolución de evaporitas que afectaría la composición química del agua. Ya que sólo dos de las muestras analizadas muestran un comportamiento así, se descarta que la disolución de rocas evaporíticas sea un proceso ubicuo en la alta cordillera. Más bien, si esto está ocurriendo sería de forma muy local.

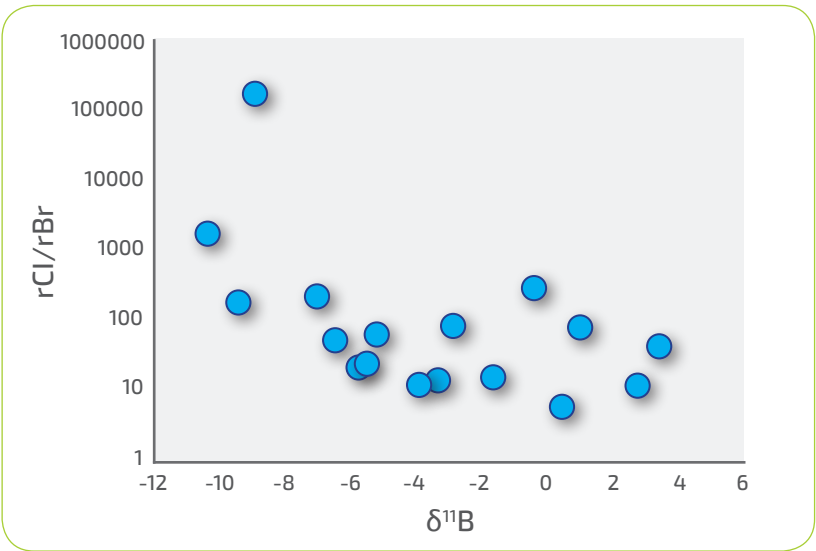


Figura 8.

Razones de Cl/Br vs valores isotópicos de boro (r: concentraciones en meq/L). Fuente: Álvarez-Amado *et al.*, (2022).

En la Figura 8 se observan muestras con bajos valores de isótopos de boro y relativamente bajas razones Cl/Br, estas signatures se asociarían más bien a diferentes aportes salinos que provendrían de fuentes diferentes a la disolución de evaporitas. Un probable aporte corresponde al escape de fluidos a partir del fondo de salares cordilleranos. En el norte de Chile, la Cordillera de Los Andes presenta diferentes lagos salinos en altas elevaciones, a partir del fondo de estos cuerpos de agua podrían escapar fluidos salinos que luego pasen al flujo subterráneo, que interactúa con las rocas volcánicas. Esto permitiría reproducir las actuales características geoquímicas de las muestras de agua analizadas (Figura 3).

Mezcla de aguas

Por otra parte, no existe ningún proceso de mezcla de aguas capaz de reproducir las composiciones de litio en aguas superficiales, por lo que probablemente el litio de estas aguas se eliminó debido a la presencia en los depósitos aluviales siliciclásticos de arcillas secundarias (Corenthal *et al.*, 2016), que capturan el isótopo más liviano (^6Li).

Muestras de aguas subterráneas muestran una evolución, coincidiendo con mezcla entre el 3 y el 5% de sales mixtas que influyen en las salmueras del Salar de Atacama. Este proceso sólo afectaría a las aguas subterráneas, indicando que existiría interacción con salmueras sedimentarias para los lagos salados de la Cordillera Occidental y apoyando la hipótesis de que existen aportes por infiltración de aguas a partir del fondo de salares y/o lagos salinos en la alta Cordillera hacia el flujo de aguas subterráneas. De acuerdo con datos reportados en la zona (Álvarez-Amado *et al.*, 2022) es necesaria una pequeña afluencia de agua afectada por la influencia de salmueras sedimentarias para reproducir la geoquímica del agua, causando un pre-enriquecimiento en las aguas que fluyen y finalmente actúan de recarga del Salar de Atacama.

¿Cómo se forman las aguas ricas en litio en el Salar de Atacama?

En la Figura 9 se observa la distribución de los diferentes procesos hidrogeoquímicos descritos en esta Serie Comunicacional y el grado con el que actúan en las diferentes zonas.

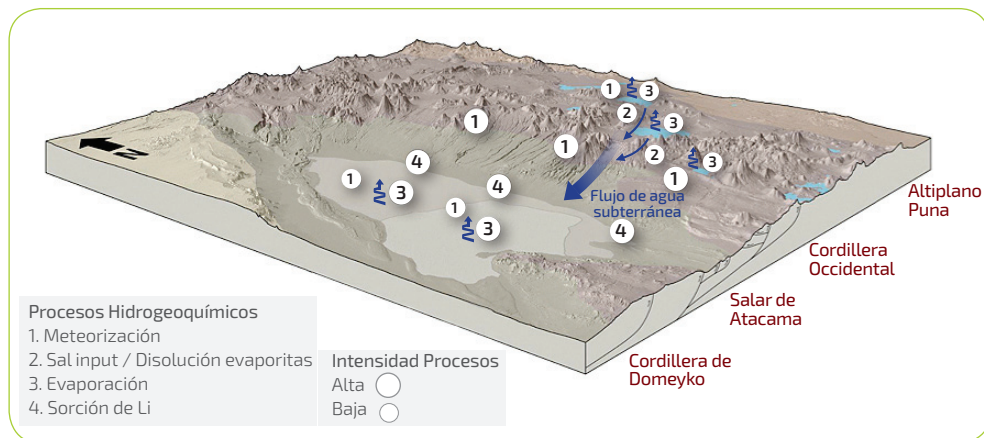


Figura 9.

Modelo conceptual de los procesos hidrogeoquímicos. Fuente: Modificada de Álvarez-Amado *et al.*, (2022).

CONCLUSIONES

El origen del litio en los diferentes tipos de agua del Salar de Atacama y sus alrededores se debe a la interacción de distintos procesos hidrogeoquímicos, además existe una conjunción de factores óptimos que conllevan a las extraordinarias concentraciones en la zona. Estas condiciones son particulares del Salar de Atacama y por eso se diferencia de otros salares en el triángulo de litio. La meteorización de la gran cobertura de rocas volcánicas de la Cordillera de Los Andes constituye uno de los procesos más importante en cuanto al origen del litio, donde las interacciones profundas agua-roca lixivian este elemento. Este proceso es potenciado debido a que estas interacciones ocurren a temperaturas más altas debido al gradiente geotermal y por la gran diferencia de altura entre la Cordillera y el Salar de Atacama (~2.000 m). Por otra parte, la mezcla de fluidos cumple un rol fundamental en la formación de las salmueras, donde existen fugas de lagos salinos cordilleranos que se unen al flujo subterráneo y terminan pre-enriqueciendo en litio las aguas subterráneas que interactúan con las rocas volcánicas y recargan el Salar de Atacama. Finalmente, las altas tasas de evaporación debido al clima hiperárido permiten el enriquecimiento extremo y la preservación de las salmueras.

Los procesos descritos en esta Serie Comunicacional ocurren a una escala temporal mayor que la de la vida humana, lo que significa que la formación de salmueras puede tardar de miles a millones de años. Por esta razón, el litio y otros commodities presentes en estos ambientes deben considerarse recursos no renovables a escala humana. Dado lo anterior, es crucial un manejo adecuado de la extracción en estos ecosistemas, especialmente en el contexto de la crisis hídrica, el cambio climático y la importancia del agua para los ecosistemas del norte de Chile. En definitiva, una gestión eficaz de la extracción de litio en ambientes salinos del norte de Chile requerirá la colaboración de diversos actores, incluyendo a la comunidad científica, los sectores gubernamentales, sociales e industriales.

REFERENCIAS

- Achurra, L. 2010. Estudio hidrogeoquímico sobre la interacción de aguas subterráneas profundas y someras en Pampa Lirima, Norte de Chile. Tesis de Máster en Hidrología Subterránea, Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica (Inédito): 107 pp. Barcelona.
- Alcalá, F.J., Custodio, E. 2008. Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal. *Journal of Hydrology*. 359, 189–207. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.06.028>.
- Álvarez-Amado, F., Tardani, D., Poblete-González, C., Godfrey, L., Matte-Estrada, D. 2022. Hydrogeochemical processes controlling the water composition in a hyperarid environment: New insights from Li, B, and Sr isotopes in the Salar de Atacama. *Science of The Total Environment*. 835, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155470>.
- Corenthal, L.G., Boutt, D.F., Hynek, S.A., Munk, L.A. 2016. Regional groundwater flow and accumulation of a massive evaporite deposit at the margin of the Chilean Altiplano. *Geophysical Research Letters*. 43, 8017–8025. <https://doi.org/10.1002/2016GL070076>.
- Dugamin, E.J.M., Richard, A., Cathelineau, M., Boiron, M.C., Despinois, F., Brisset, A. 2021. Groundwater in sedimentary basins as potential lithium resource: a global prospective study. *Scientific Report*. 11, 21091. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99912-7>.
- Flores, V. 2010. Modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca del Salar del Huasco. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería (Inédito): 180 pp. Santiago.
- Mudd, G.M. 2021. Assessing the availability of global metals and minerals for the sustainable century: From aluminium to zirconium. *Sustainability (Switzerland)*. 13(19). <https://doi.org/10.3390/su131910855>.
- Munk, L.A., Boutt, D.F., Hynek, S.A., Moran, B.J. 2018. Hydrogeochemical fluxes and processes contributing to the formation of lithium-enriched brines in a hyper-arid continental basin. *Chemical Geology*. 493, 37–57. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.013>.

- Munk, L.A., Boutt, D.F., Moran, B.J., McKnight, S.V., Jenckes, J. 2021. Hydro-geologic and geochemical distinctions in freshwater-brine systems of an Andean Salar. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 22, e2020GC009345. <https://doi.org/10.1029/2020GC009345>.
- Risacher, F., Alonso, H., Salazar Méndez, C. 1999. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III regiones - Chile.
- Tassi, F., Aguilera, F., Darrah, T., Vaselli, O., Capaccioni, B., Poreda, R. J., Delgado-Huertas, A. 2010. Fluid geochemistry of hydrothermal systems in the Arica-Parinacota, Tarapacá and Antofagasta regions (northern Chile). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 192 (1-2), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.02.006>.
- U.S. Geological Survey. 2023. Mineral Commodity Summaries 2023. <https://doi.org/10.3133/mcs2023>.



Universidad de Concepción

¿CÓMO SE FORMAN LAS AGUAS RICAS EN LITIO EN EL SALAR DE ATACAMA?



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia



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

Serie Comunicacional CRHIAM