



Estudio sobre el agua de litio



Resumen de la investigación

Condiciones hidrológicas e impactos de la producción de litio en salares de Sudamérica: Resultados y Desafíos

Por la Universidad de Massachusetts, Amherst, y el Grupo Conjunto de Investigación en Hidrogeología y Geoquímica de la Universidad de Alaska Anchorage

D.F. Boutt, L.A. Munk, B. Moran, S. McKnight, D. Corkran, J. Jenckes, A. Kirshen, A. Russo

Índice

| | |
|---|----|
| Introducción | 3 |
| Importancia del litio como recurso | 4 |
| Distintas fuentes de agua asociadas a reservas ricas en litio | 5 |
| Preocupación por el bombeo de agua subterránea para la extracción de litio | 6 |
| Apoyo a iniciativas de investigación para la extracción responsable de litio en Sudamérica | 6 |
| Alcance del trabajo | 7 |
| Antecedentes | 8 |
| Geografía y uso actual del agua..... | 9 |
| Panorama regional..... | 9 |
| Salar de Atacama | 9 |
| Salar del Hombre Muerto | 9 |
| ¿Cómo afecta la extracción de salmuera a ecosistemas de agua dulce como lagunas, humedales y vertientes? | 11 |
| Introducción | 12 |
| Métodos | 12 |
| Principales hallazgos | 13 |
| Vista general | 13 |
| Salar de Atacama | 13 |
| Salar del Hombre Muerto | 16 |
| ¿Como influyen los cambios de almacenamiento de agua dulce y salmuera en la descarga de aguas subterráneas del acuífero?..... | 17 |
| Introducción | 19 |
| Marco geológico & hidrogeológico para la simulación del flujo de aguas subterráneas..... | 19 |
| Hallazgos..... | 20 |
| Análisis de descarga de agua subterránea..... | 20 |
| Análisis del tiempo de respuesta | 20 |
| Evolución especial de la salmuera..... | 20 |
| Implicancias para la sostenibilidad de las aguas subterráneas | 20 |
| Impactos de la eliminación de salmuera en SdHM..... | 21 |
| Introducción | 22 |
| Métodos | 22 |
| Hallazgos..... | 23 |
| ¿Cómo difiere el consumo de agua entre las distintas técnicas de producción de litio?..... | 25 |
| Introducción | 26 |
| Métodos | 26 |
| Evaluación del consumo de agua dulce de diferentes extracciones de litio..... | 26 |
| Evaluación de la escasez de agua en el Triángulo del Litio | 26 |
| Hallazgos..... | 27 |
| Conclusiones | 28 |
| Apéndice..... | 30 |
| Artículo de revistas revisados por pares | 31 |
| Definiciones | 32 |
| Mapas de las cuencas SdA y SdHM | 33 |



Introducción

Importancia del litio como recurso

El litio impulsa la transición energética como materia prima esencial en la producción de baterías para vehículos eléctricos. Han surgido interrogantes sobre el impacto de la extracción de litio en el medio ambiente y las comunidades locales. Los científicos contribuyen a la investigación de estas cuestiones para construir un futuro más responsable del litio. Una de las dos formas principales de producir litio, la otra es la minería de roca, consiste en bombear "salmuera"¹, un tipo de agua que contiene al menos 3 veces más sal que el agua de mar, desde acuíferos ricos en litio². Nos centramos en la extracción de litio de un grupo de salares, o "Salares"³, que se encuentran en las mesetas y cuencas del altiplano desértico del centro-norte de los Andes (Figura 1). Esta zona se conoce como el "Triángulo del Litio", donde existen más de la mitad de las reservas mundiales de litio.

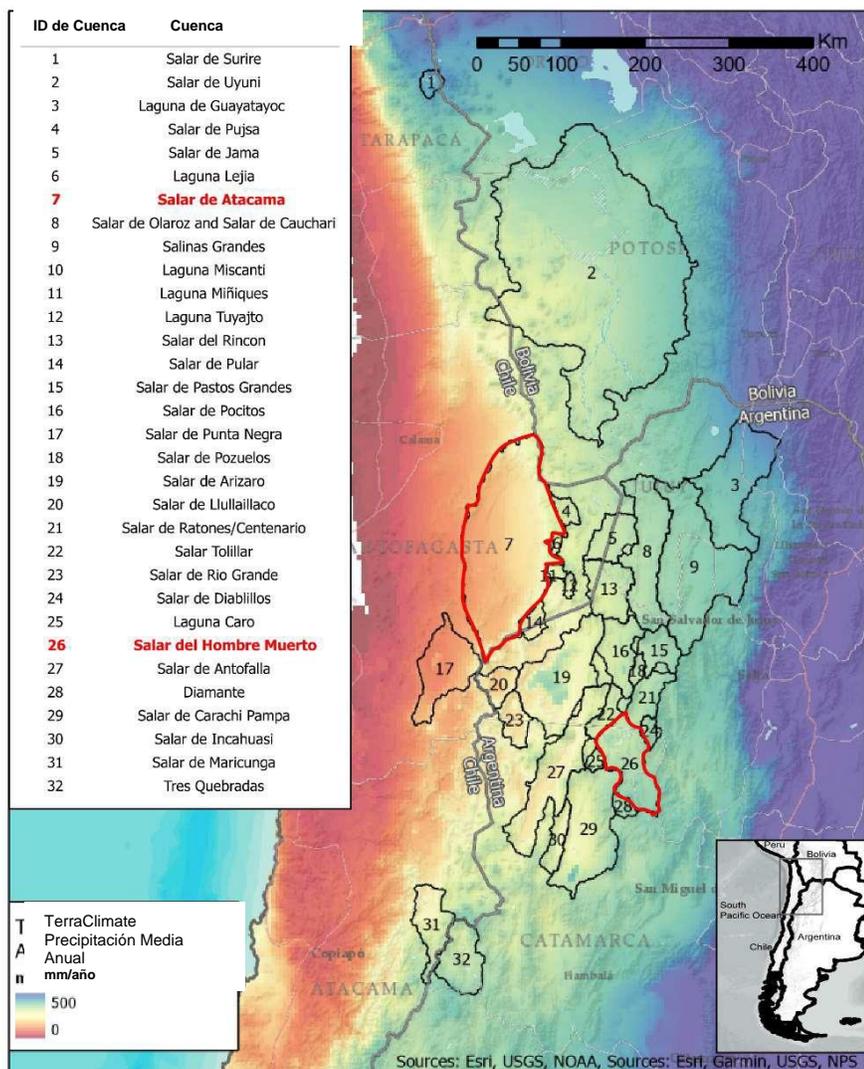


Figura 1. Mapa de la región del Triángulo del Litio de Sudamérica. Las principales cuencas de salares con salmuera productoras de litio aparecen en negro y la precipitación media anual se muestra en una escala de colores. Las principales cuencas en las que se centra este informe aparecen en rojo.

¹ *Salmuera*: Agua subterránea altamente salina, al menos 3 veces más salada que el agua de mar, no apta para beber, regar o abreviar el ganado. En el apéndice figura una lista de todos los términos clave y sus definiciones.

² *Acuífero*: formación geológica que contiene agua

³ *Salares*: depósitos salinos ubicados en el fondo de las cuencas endorreicas

Distintas fuentes de agua asociadas a reservas ricas en litio

Las aguas subterráneas⁴ en el Triángulo del Litio difieren ampliamente en concentración de sales y minerales, dependiendo de la ubicación de las *aguas subterráneas* en relación con los *Salares* y la evaporación. La mayoría de los valles y cuencas no tienen arroyos que drenen el agua, por lo que la evaporación es la principal vía de salida del agua de las cuencas. Dado que la evaporación supera a la lluvia y la nieve, el agua restante sin evaporar acumula con el tiempo mayores concentraciones de sales y minerales en un proceso conocido como *evapoconcentración*⁵. Esto da lugar a un tipo de agua salada, conocida como *salmuera*, que contiene litio. La *salmuera* rica en litio se bombea a la superficie y se concentra para su uso en baterías de iones de litio. Mientras tanto, el *agua dulce subterránea* fluye desde el borde de las cuencas hacia el fondo de estas, donde a través de la *evapoconcentración* se vuelve gradualmente más salada "*agua salobre*"⁶ y finalmente transiciona a *salmuera* dentro de los *acuíferos* en el fondo de la cuenca (**Figura 2**). Dada la importancia del litio y de la preservación del *agua dulce subterránea*, es importante comprender el movimiento del *agua subterránea* a través de estos ecosistemas únicos.

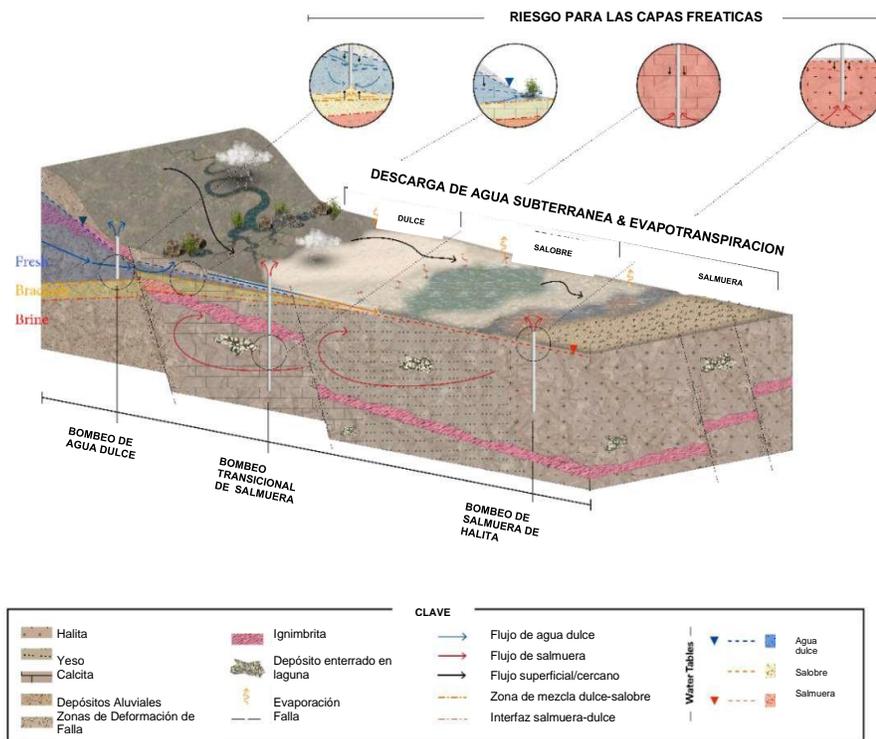


Figura 2. Ilustración conceptual de los sistemas hidrológicos del Salar, con el agua dulce (azul) fluyendo hacia el fondo de la cuenca y sobre la *salmuera* (rojo). El agua dulce *subterránea* pasa a salobre (amarillo) y luego a *salmuera* en el fondo de la cuenca. Las burbujas del recuadro superior muestran los detalles de un punto clave de entrada de agua dulce y los posibles puntos de bombeo de *aguas subterráneas*.

⁴ *Agua subterránea*: Agua que se encuentra en el subsuelo o bajo la superficie de la Tierra

⁵ *Evapoconcentración*: Proceso de evaporación progresiva que aumenta la concentración de sales en el agua

⁶ *Agua salobre*: Agua moderadamente salada, entre agua apta para abreviar el ganado y hasta 3 veces más salada que el agua de mar. No es apta para beber ni para regar.

Preocupación por el bombeo de aguas subterráneas para la extracción de litio

Existen dudas sobre el impacto de la minería del litio en la disponibilidad de aguas dulces *subterráneas* y superficiales. Los cuerpos de agua superficial, comúnmente conocidos como "*Lagunas*"⁷, proporcionan zonas de alimentación y hábitats para la fauna. *Las lagunas* se forman en la frontera entre los humedales (*Vegas*⁸) y el *Salar*, donde existe un delicado equilibrio entre la afluencia de agua dulce y el agua subterránea *salobre*. La ubicación de las *lagunas* también depende del lugar donde se encuentre el *agua subterránea salobre*, ya que la *salmuera*, mucho más densa, impide que el *agua subterránea dulce*, más ligera y boyante, se desplace hacia los acuíferos *salobres* del fondo de la cuenca. Como resultado, *las lagunas* se forman aguas abajo de donde aflora el agua subterránea dulce. Como la lluvia o la nieve son escasas, las *lagunas* se nutren principalmente de estas *aguas subterráneas*. Preocupa el bombeo de *salmuera* para la extracción de litio y de agua dulce *subterránea* para las operaciones mineras. Además, el agua *dulce*⁹ se utiliza para la agricultura, el turismo, el uso doméstico de las comunidades locales y otras actividades mineras. Dado que el bombeo extrae agua del subsuelo, preocupa que la disminución de los niveles de agua *dulce* y *salmuera* pueda provocar una desestabilización de la posición de las *Lagunas* y de los *acuíferos de agua dulce* y, en última instancia, que fluya menos agua hacia las *Lagunas*. Es necesario investigar los efectos del bombeo de agua subterránea y los impactos relacionados con el clima en el flujo de *agua subterránea* para responder a las preocupaciones de las comunidades locales y de la industria.

Apoyo a las iniciativas de investigación para la extracción responsable de litio en Sudamérica

Comprender la disponibilidad de agua asociada a la extracción de litio es importante para la producción responsable de automóviles eléctricos. El Grupo BMW y BASF financiaron un proyecto de investigación dirigido por científicos de la Universidad de Massachusetts Amherst y la Universidad de Alaska Anchorage para comprender mejor el flujo de *las aguas subterráneas* en entornos ricos en litio y cuantificar el impacto ambiental del bombeo tanto de *salmuera* como de *agua dulce subterránea*. Los científicos que participan en este proyecto son expertos en el estudio del flujo de *aguas subterráneas*, la hidrología y el clima en el Triángulo del Litio. El proyecto de investigación forma parte del compromiso de BMW Group y BASF para comprender los impactos de la producción de litio en la disponibilidad de agua en el *Salar de Atacama (SdA)* en el norte de Chile y el *Salar del Hombre Muerto (SdHM)* en Argentina, que complementa el trabajo de la Responsible Lithium Partnership, una plataforma de múltiples partes interesadas, de la que ambas empresas son miembros.

⁷ *Lagunas*: Cuerpos de agua superficiales situados en el borde de un *salar*

⁸ *Vegas*: Humedales alimentados por *aguas subterráneas* que se encuentran en el borde de salares o cerca de cuerpos de agua superficiales permanentes

⁹ *Agua dulce*: Agua poco o nada salada apta para el consumo, el riego y la ganadería

Alcance del trabajo

La investigación analiza las conexiones entre los sistemas *acuíferos* dulce, salobre y *salmuera* para evaluar el impacto ambiental de la producción de litio. Se utilizaron tecnologías de teledetección (vía satélite) para documentar las condiciones hidrológicas y medioambientales pasadas y actuales de los *Salares*. Los autores también utilizan mediciones físicas terrestres, isótopos del agua y simulaciones numéricas para describir la distribución y el movimiento de las aguas *subterráneas* y superficiales. El resultado es un marco basado en datos que evalúa la extracción de litio en estas regiones desérticas y las respuestas a estas influencias humanas en el contexto de las influencias naturales. El trabajo se llevó a cabo en cuatro paquetes de trabajo con distintos alcances y hallazgos, por lo que los resultados se presentan en ese formato.

Para asegurarse de que la investigación se ha realizado de forma independiente, ya que ha sido financiada por la industria, los resultados de la investigación se publican a través de un conjunto de artículos de investigación (descritos en el Apéndice) que se someten a un amplio y crítico proceso de revisión por pares en la comunidad científica.

El proyecto de investigación se centró en las siguientes cuestiones de interés para *SdA*, *SdHM* y toda la región. Las respuestas a estas preguntas se describen a continuación en la sección de hallazgos de cada capítulo.

1. ¿Cuáles son los principales impulsores de los cambios hidrológicos observados en estas cuencas?
2. ¿Cómo están conectados hidráulicamente los sistemas acuíferos dulce, salobre y salmuera?
3. ¿Cuál es el impacto de la extracción de litio histórica, actual y potencial?

Las respuestas a las preguntas 1, 2 y 3 se encuentran en los capítulos 4, 5 y 7, respectivamente. El capítulo 6 se centra además en las preguntas 1, 2 y 3 para el *Salar* del Hombre Muerto como caso de prueba específico.



Antecedentes

Geografía y uso actual del agua

Panorama regional

Las principales actividades de extracción y procesamiento de *salmuera* de litio a escala industrial se concentran actualmente en *SdA*, en Chile, y en *SdHM*, en Argentina (*Figura 1*). Las minas dependen de diferentes tipos de agua, desde el propio recurso de *salmuera* hasta el agua dulce necesaria para los procesos industriales y los usos relacionados con la mina (saneamiento, bebida, etc.). Debido a la naturaleza variada de los tipos de agua y al entorno desértico, la disponibilidad de agua depende en gran medida de la salinidad y de la proximidad a manantiales de *agua dulce*, humedales y acuíferos (*Figura 2*). Las empresas mineras eligen los emplazamientos en función del acceso a los recursos de litio y al suministro de *agua dulce* y *salobre*.

Salar de Atacama

El *SdA* es el mayor salar de Chile y cubre 3.000 km², lo que lo convierte en el tercero más grande del mundo. Su altitud media es de unos 2.300 m sobre el nivel del mar, al borde del desierto de Atacama. En algunas partes de este desierto no ha llovido desde que se tienen registros. Sin embargo, bajo la superficie yace una gran cantidad de *salmuera*. El *Salar* contiene la mayor reserva de litio del mundo y las actividades mineras en sus dos minas de litio activas se han expandido sustancialmente. Estas minas de litio extraen *salmuera* del *Salar* y *agua dulce subterránea* de su margen. Los miembros de las comunidades locales, la agricultura, una importante industria turística y una industria minera del cobre utilizan agua adicional en la cuenca, todas las cuales utilizan *agua dulce subterránea* directa o indirectamente. La cuenca también contiene humedales de importancia internacional según la definición de la Convención de Ramsar, y estos humedales dependen de las *aguas subterráneas* que fluyen hacia la cuenca. El Apéndice A1 incluye un mapa detallado de la cuenca y sus características importantes.

Salar del Hombre Muerto

SdHM es un gran *salar* (~600 km²) de Argentina, en el departamento de Antofagasta de la Sierra, en la frontera entre las provincias de Salta y Catamarca. *SdHM* se encuentra a 4.000 m sobre el nivel del mar cerca del borde oriental de la meseta y está rodeado de montañas, incluyendo volcanes con cumbres que superan los 5.000 m sobre el nivel del mar. La *cuenca*¹⁰ del *SdHM* tiene una superficie de 4.000 km² la mitad de la cual está drenada por el Río de Los Patos, de 150 km de longitud, que constituye la principal fuente de *agua dulce* de la cuenca. Este río entra en el *Salar* por el este, pero nace en la Caldera de Galán, al sur del *Salar* y abastece la Laguna Catal y los humedales cercanos. El otro río importante pero más pequeño es el Río Trapiche que fluye hacia el *Salar* desde el sur. Los humedales (*Vegas*) Trapiche y Hombre Muerto se encuentran en el margen sur del *Salar* y también existen extensos humedales en los bordes del Río Los Patos. El lado occidental de la cuenca es muy seco, con muy poca agua superficial permanente. El *SdHM* es una cuenca hidrológicamente cerrada sin salidas de drenaje, por lo que toda el agua que sale del *SdHM* lo hace por evaporación o transpiración de las plantas, denominadas colectivamente *evapotranspiración*. La mina Fénix, explotada y propiedad de Livent Corporation, es actualmente la única mina de litio en producción de *SdHM* y se encuentra en la parte occidental de la cuenca. El consumo de agua de esta mina constituye solo una pequeña parte de la *evapotranspiración* natural total (la única salida) de la cuenca y de la cantidad total de *agua dulce* (entrada) que fluye hacia la cuenca.

¹⁰ *Cuenca hidrográfica*: El área dentro de la cual todas las precipitaciones de lluvia o nieve que caen drenan en última instancia a un punto o área específica

“El Salar de Atacama contiene la mayor reserva de litio del mundo”

El gobierno argentino regula el consumo de agua y Livent mantiene registros de consumo de agua. El uso total de *agua dulce* fue de aproximadamente $\frac{1}{4}$ de las extracciones totales de *salmuera* durante el período 2015 a 2020. Como se explica con más detalle en el capítulo 4, Livent gestiona el consumo de agua dulce de un embalse superficial (presa) del río Trapiche de forma estacional, por lo que se utiliza un mayor porcentaje de agua superficial en los meses más húmedos y un mayor porcentaje de *agua subterránea* en los meses más secos. El Apéndice A1 incluye un mapa detallado de la cuenca y sus características.



¿Cómo afecta la extracción de salmuera de litio a ecosistemas de agua dulce como lagunas, humedales y vertientes?

Introducción

Los salares son entornos dinámicos en los que el agua dulce que fluye hacia las cuencas interactúa con *la salmuera* que contiene litio para formar humedales de agua superficial dulce y salobre (*Vegas*) y *Lagunas* (**Figura 2**). Debido a la posible sensibilidad de estos humedales y *Lagunas* tanto a la extracción de *salmuera* como de *agua dulce*, los cambios en la cantidad de agua en estas características de agua superficial son una métrica clave del cambio medioambiental. *Las lagunas* y los humedales que las rodean son hábitats valiosos y suelen estar protegidos por la legislación nacional e internacional. Sin embargo, para atribuir los cambios en el comportamiento hidrológico de *lagunas* y *vegas* a actividades humanas específicas (por ejemplo, el uso de *salmueras* y *agua dulce*) es importante comprender cómo responden a la variabilidad climática natural en diferentes escalas temporales. Para abordar estas cuestiones se definieron las siguientes preguntas, cuyas respuestas se describen a continuación en las secciones de hallazgos clave.

1. ¿Cuáles son las tendencias en las extensiones de aguas superficiales en cada cuenca?
2. ¿Apoyan los datos la preocupación por la degradación de las aguas superficiales?
3. ¿Cuáles son las principales causas de los cambios en la extensión de las aguas superficiales?

“Los cambios en la cantidad de agua de estas aguas superficiales son una métrica clave del cambio medioambiental”

Métodos¹¹

Se utilizaron múltiples conjuntos de datos de teledetección para evaluar los regímenes hidrológicos y climatológicos de *SdA* y *SdHM*. Entre ellos se incluyen imágenes de satélite de alta resolución, estimaciones de precipitaciones derivadas de satélites y estaciones meteorológicas y datos de anomalías gravimétricas derivadas de satélites. Para evaluar los cambios en las condiciones hidrológicas se utilizaron mediciones del caudal, la precipitación y el nivel de las *aguas subterráneas* en distintos puntos de estas cuencas y de la región circundante. Los datos disponibles sobre el consumo de agua en las cuencas del *SdA* y *del SdHM* se compilaron en una evaluación exhaustiva del consumo humano de agua en toda la cuenca. La combinación de estos conjuntos de datos permitió analizar los cambios registrados en estos entornos en las últimas décadas. En el artículo publicado figura una descripción detallada de estos métodos.

¹¹ En la publicación ["Relic Groundwater and Prolonged Drought Confound Interpretations of Water Sustainability and Lithium Extraction in Arid Lands"](#) se presenta una descripción detallada y exhaustiva de estos hallazgos y de los métodos utilizados

Principales hallazgos

Vista general

La extracción de *salmuera de litio* en los *salares* sudamericanos tiene varios impactos potenciales sobre los recursos hídricos y los ecosistemas. Dado que los recursos de *salmuera de litio* de alta calidad se generan en condiciones de estrés hídrico natural (donde la evapotranspiración potencial supera con creces la recarga), las cuencas con *salmuera* rica en litio están intrínsecamente limitadas en agua. El consumo humano y las influencias climáticas más allá de la extracción de litio también pueden afectar a la disponibilidad de agua, aunque los usos contrapuestos pueden complicar las observaciones de la disponibilidad de agua. Por ejemplo, tanto la región de *SdA* como la *de SdHM* experimentaron una prolongada *sequía*¹², lo que complica las interpretaciones de los impactos de la extracción de litio sobre el agua y los ecosistemas (**Figura 3**).

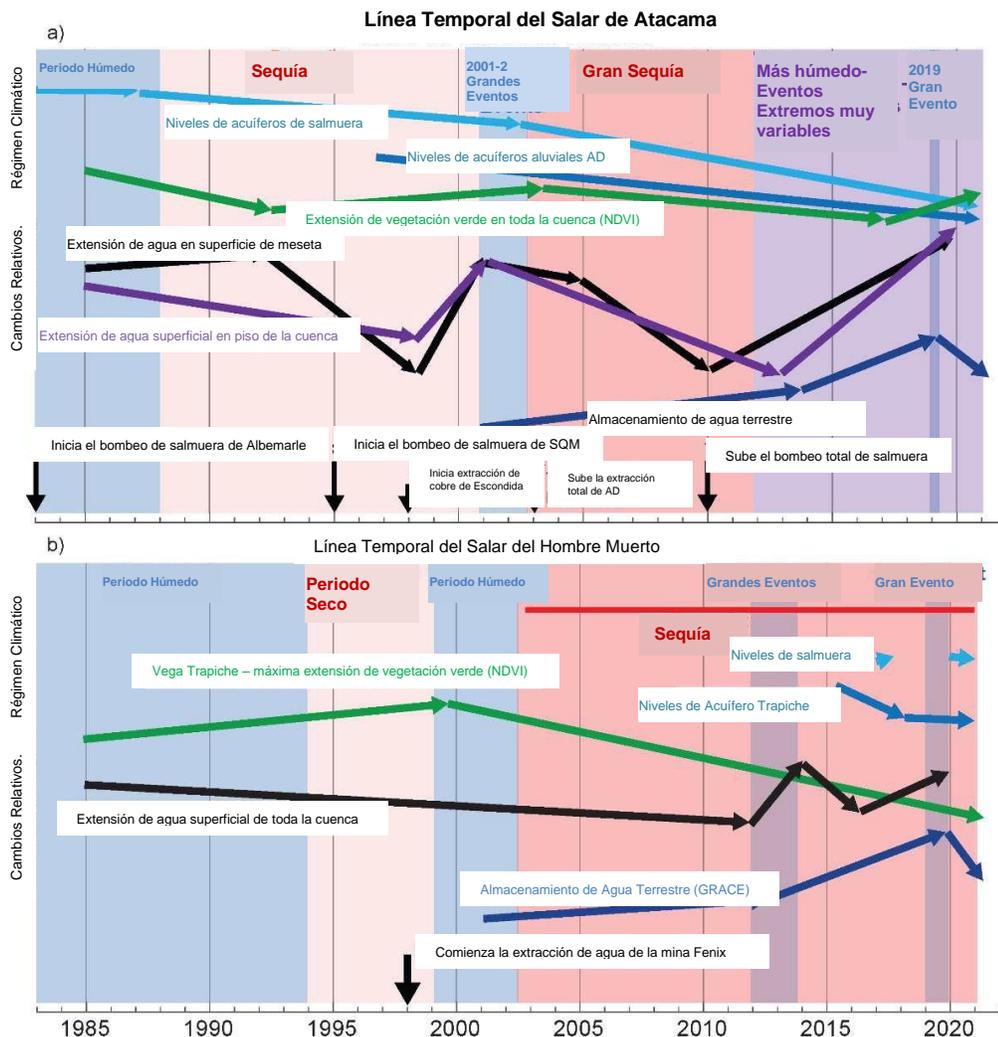


Figura 3. Tendencias hidroclimáticas relativas en las cuencas *SdA* (a) y *SdHM* (b). Las líneas de color indican el análisis de tendencias a partir de un conjunto de datos diferente, identificado en recuadros blancos. Los intervalos climáticos en los pisos *del Salar* se indican con barras verticales y se muestran los principales eventos de extracción.

Este estudio demuestra que en ambas cuencas la extracción de *agua dulce* para la minería del litio representa una pequeña parte de la disponibilidad total de *agua dulce* natural de la cuenca. También documenta la primera cuantificación de alta resolución de los cambios en la extensión de las aguas superficiales en ambos *Salares* y sus *cuencas hidrográficas*. Contradiendo las afirmaciones de que *Salares* como *SdA* y *SdHM* se están secando, este estudio revela que, a pesar de la minería intensiva de litio, ambos son más húmedos en general que hace 5-10 años. Los resultados muestran un impacto limitado en las características de las aguas superficiales, con cuerpos de agua superficiales (es decir, *Lagunas*) que muestran más sensibilidad a los cambios climáticos y a las extracciones de *agua dulce* que a la extracción de *salmuera de litio*. Así pues, la huella de la extracción de *salmuera de litio* no está presente en las *Lagunas* y el aumento de la extracción de *salmuera* no se correlaciona con los cambios del pasado (**Figura 3**). Este trabajo establece un conjunto clave de observaciones de las aguas superficiales que ayudan a determinar su comportamiento. Es importante destacar que estos hallazgos muestran que los impactos de la variabilidad climática y el uso de *agua dulce* son mucho más significativos que el consumo de *salmuera*.

Salar de Atacama

Variaciones climáticas

El *régimen climático*¹³ en *SdA* desde 1985 se caracterizó combinando datos obtenidos por satélite y datos terrestres (**Figura 3**). Esto proporciona un marco para interpretar los cambios hidrológicos y ecológicos de las últimas décadas. Debido a la importancia y a la naturaleza regional de la prolongada *sequía* entre 2003-2012, tal y como se ha caracterizado en este [estudio](#), cualquier análisis de los cambios hidrológicos desde el inicio de esta *sequía* debe tener en cuenta el impacto que ha tenido en el sistema natural. Desde entonces, el clima en *SdA* se ha vuelto más húmedo y errático, con varios episodios de grandes precipitaciones y años de precipitaciones por encima de la media seguidos de años de precipitaciones por debajo de la media.

Cambios en las aguas superficiales

Los cambios observados en los sistemas de humedales, como las aguas superficiales, la vegetación y el caudal de los arroyos, guardan una estrecha correlación con los principales *periodos climáticos*¹⁴. El mayor arroyo que desemboca en la cuenca, el Río San Pedro, también muestra una tendencia general decreciente a lo largo del registro. El impacto de *las sequías* en el río puede durar varios años después de que termine la escasez de precipitaciones, debido a los desfases naturales en el sistema de *aguas subterráneas*. Tanto las *sequías* como el uso agrícola del agua aguas arriba del aforo del río podrían estar causando un descenso a largo plazo del caudal.

Uso del agua

El agua dulce sirve para diversos fines en la cuenca *del SdA*, como la minería, la agricultura y el uso doméstico. La mayoría de los permisos de uso de agua se concedieron a empresas mineras de cobre y sólo el 10% a empresas mineras de litio. En 2020, se retiraron los permisos de uso de agua a la mayor empresa minera de cobre, y se puso fin a ese consumo de agua (**Figura 4**). El consumo real de esta agua permitida se calculó antes y después de que la mina de cobre dejara de consumirla. Cabe destacar que el uso minero del litio se mantuvo en torno al 8% del total. El uso agrícola de *agua dulce* procede principalmente de aguas superficiales situadas a mayor altitud que las extracciones de la minería del litio, por lo que los recursos de agua dulce superficial no se ven afectados por la minería, y son principalmente sensibles a la variabilidad climática.

¹² *Sequía*: Periodos en los que la lluvia y la nieve son inferiores a la media

¹³ *Régimen climático*: El patrón de los periodos climáticos en una región a lo largo de un periodo de tiempo determinado

¹⁴ *Periodo climático*: Periodo en el que prevalecen características climáticas similares (por ejemplo, sequía, grandes episodios de lluvia, etc.)

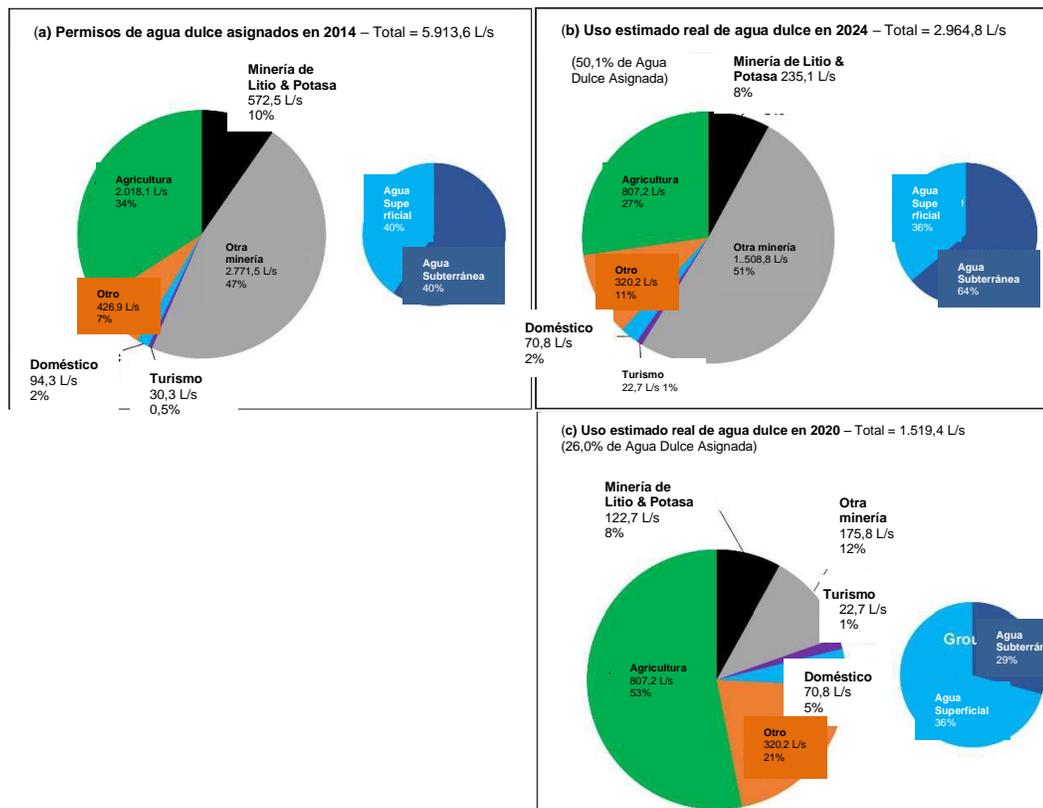


Figura 4. Permisos de *agua dulce* asignados en la cuenca del SdA en 2014, desglosados por usuario y por tipo de agua (a); uso real estimado de *agua dulce* en 2014 (b); y (c) uso real estimado de *agua dulce* en 2020.

Impacto de la extracción

Entre los posibles factores de cambio de las características de las aguas superficiales se encuentran las fluctuaciones estacionales de la evaporación, las precipitaciones, la afluencia de *aguas subterráneas* y la ubicación y forma de la *interfaz salmuera-agua dulce*¹⁵. La extensión de las aguas superficiales de las *Lagunas* está estrechamente relacionada con las fluctuaciones estacionales de la evaporación. Los déficits acumulados de precipitaciones, como los ocurridos durante la prolongada *sequía*, afectan a las aguas superficiales y a los humedales al disminuir la afluencia de *aguas subterráneas* en el margen del *Salar*. Existe una fuerte correlación entre el cambio en la afluencia de *aguas subterráneas* y el cambio en la extensión de las aguas superficiales. Un análisis de las elevaciones del nivel freático entre 2007 y 2016 muestra que los mayores cambios se produjeron (2 metros de descenso) en el *acuífero* sur, donde las minas de cobre han extraído grandes cantidades de *agua dulce*. En el resto de la cuenca, los niveles de agua se han mantenido estables o han descendido menos de 0,3 metros.

Los resultados muestran que los *regímenes climáticos* anteriores y/o las extracciones de *agua dulce subterránea* aguas arriba de las *Lagunas* pueden tener un impacto retardado sobre la afluencia de *agua subterránea* y los cambios en la extensión de las aguas superficiales. La fuerte correlación entre la afluencia de *aguas subterráneas* y la extensión de las aguas superficiales indica que las variaciones climáticas han sido el motor principal de los cambios en la extensión de las aguas superficiales en las últimas décadas. La comparación entre la variabilidad de las precipitaciones a largo plazo y la extensión de las aguas superficiales corrobora esta afirmación.

¹⁵ *Interfaz salmuera-agua dulce*: El límite donde las *aguas subterráneas* dulces interactúan con las *aguas subterráneas salobres*

Hallazgos clave en SdA:

- La gran *sequía* que tuvo lugar entre 2003 y 2012 es el factor que más ha influido en el cambio de la vegetación y las aguas superficiales en el SdA desde que se tienen registros.
- Es probable que el período más reciente de precipitaciones extremas sea, en parte, consecuencia directa del cambio climático en curso, por lo que los cambios observados pueden ser más frecuentes en el futuro.
- La extensión total de agua superficial en la cuenca del SdA ha aumentado un 13% desde 2000.
- Los cambios en la extensión de las aguas superficiales adyacentes a las extracciones de *salmuera* y de *agua dulce* son indistinguibles de los cambios en la meseta de la parte elevada de la *cuenca hidrográfica* donde no se han producido extracciones.
- *El consumo de agua dulce* para la minería del litio supuso aproximadamente el 8% del consumo total de la cuenca en la última década.
- La evaporación impulsa los cambios estacionales que se manifiestan en la expansión y contracción de la(s) *Laguna(s)*.
- No se encontró ninguna relación estadísticamente significativa entre las extracciones de *salmuera* y los cambios en la extensión de las *Lagunas*.

Salar del Hombre Muerto

Variaciones climáticas

El *régimen climático* de SdHM se caracterizó combinando datos de satélite y terrestres para identificar cambios y fenómenos importantes (**Figura 3**). Al igual que en SdA, hay un periodo de *sequía* que comienza aproximadamente en 2002 y continúa hasta la actualidad. Al igual que en SdA, se han producido varias precipitaciones importantes desde 2012. A diferencia de SdA, todo el periodo se define como *sequía* porque la precipitación anual se mantiene por debajo de la media a largo plazo durante todo el periodo. La *sequía* en SdHM no fue tan pronunciada como en SdA, pero está relacionada con el mismo periodo de *sequía* a escala continental. Esta *sequía* y el aumento de grandes eventos en los últimos años han tenido un impacto importante en el régimen hidrológico natural de la cuenca.

Cambios en las aguas superficiales

Los cambios observados en la extensión total de agua superficial dentro de la cuenca (excluyendo los cuerpos de agua creados artificialmente) están bien correlacionados con el *régimen climático* descrito anteriormente. El análisis de los cambios de vegetación en la pequeña vega cercana a la mina Fénix muestra que se perdió la correlación con las precipitaciones después de principios de la década de 2000, poco después de que empezara a aumentar el bombeo de *agua dulce* en la mina Fénix. En general, la vegetación ha disminuido más de la mitad desde antes del desarrollo. Esta reducción también coincide con el desarrollo de una *laguna* artificial sobre el humedal natural, cuyo tamaño creció rápidamente a principios de la década de 2000, presumiblemente en respuesta a la práctica de Livent de devolver una mezcla de *agua dulce* y *salmuera* a la superficie del *salar*. Según las imágenes de satélite y las observaciones sobre el terreno, una zona de vegetación permanente que existía aguas abajo del embalse del río Trapiche parece haberse degradado considerablemente, ya que la mayor parte de la vegetación se secó poco después de su creación a mediados de la década de 1990.

Uso del agua

En SdHM, hay muy pocos residentes de larga duración (es decir, <20 personas), por lo que la mayor parte del consumo de agua se debe a la minería. Desde 1997, Livent Corp es el único productor de litio

SdHM y consumen más del 99% de la *salmuera* extraída y del *agua dulce*. Aunque el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible argentino regula el consumo de agua, Livent Corp. mantiene registros de consumo de agua. Las extracciones totales de *agua dulce* han oscilado entre 90 y 120 l/s, mientras que las de *salmuera* fueron de 300 a 450 l/s (2015-2020). Del consumo de *agua dulce*, el 80-85% se extrajo como agua subterránea del *acuífero* de Trapiche, mientras que el *agua dulce* restante se ha extraído del agua superficial creada por el embalse. Por lo tanto, la mayor parte de la extracción de *agua dulce* se produce en una zona espacialmente confinada dentro del *acuífero* del Trapiche.

Impactos de la extracción

Se dispone de registros de los niveles de *salmuera* de 2016 a 2021, pero debido a la duración relativamente corta y a las incoherencias en los datos disponibles, no es posible establecer tendencias estadísticamente significativas en los niveles de *salmuera en SdHM*. Se evaluaron los niveles de *agua dulce* en 15 pozos de monitoreo ubicados en el *Acuífero* Trapiche medidos entre 2015 y 2020. Durante este tiempo, los niveles de *agua subterránea* en el *Acuífero* Trapiche disminuyeron 0,9 m en promedio. Para contextualizar, este cambio se ha producido dentro de un gran acuífero de unos 7 por 4 km, donde el nivel freático es bastante profundo (entre 20 y 60 metros por debajo de la superficie) y tiene hasta 150 metros de espesor. Los cambios en la calidad del agua del *acuífero* del Trapiche pueden deberse a la extracción de *agua dulce*. La salinidad, como medida de la calidad del agua, se evaluó en pozos de monitoreo ubicados en el *Acuífero* Trapiche medidos entre 2016 y 2021. Se encontró una tendencia creciente de la salinidad en 6 pozos, una tendencia decreciente en 3 pozos y ninguna tendencia en los 6 pozos restantes. Esto indica una reducción de la calidad del *agua dulce subterránea debido al afloramiento de salmuera* en algunos sectores del *acuífero*. El afloramiento sostenido de *salmuera* aumentará en gran medida el riesgo de reducción del *agua dulce subterránea* disponible en el *acuífero* del Trapiche durante el bombeo, lo que constituye una perspectiva de futuro a tener en cuenta en el bombeo planificado. Con este fin, Livent gestiona activamente su programa de extracción de *agua dulce* para mitigar el afloramiento de *salmuera* procedente del bombeo en zonas concentradas, lo que incluye la instalación de nuevos pozos de producción, el desmantelamiento de otros pozos y el ajuste de las tasas de bombeo de pozos individuales.

Hallazgos clave en SdHM:

- Se identificaron *períodos climáticos* en la región y dentro de la cuenca, que se correlacionan bien con los cambios hidrológicos superficiales observados desde la década de 1980.
- La presencia de aguas superficiales en la cuenca *del SdHM* ha aumentado un 97% desde 2000.
- En *SdHM*, la extracción actual de agua está vinculada principalmente a la minería.
- Desde antes de la explotación, la vegetación de la zona húmeda cercana al campamento de la mina Fénix se ha reducido en más de la mitad.
- La infiltración de *salmuera* y *agua dulce* procedente de las actividades mineras de litio ha formado una *Laguna artificial* en las inmediaciones de un antiguo humedal natural.
- En promedio, las elevaciones de *las aguas subterráneas* en el *acuífero* Trapiche disminuyeron ligeramente y algunas secciones del *acuífero* se volvieron más salinas de 2015 a 2020.
- Los cambios tanto en el clima como en las extracciones de *agua dulce* afectan a los niveles de *las aguas subterráneas* y a la extensión de las aguas superficiales; el clima es el principal impulsor de los cambios hidrológicos observados en el SdHM.



¿Cómo influyen los cambios en el almacenamiento de aguas subterráneas en la descarga de aguas subterráneas del acuífero?

Introducción

Este capítulo se centra en la relación entre el movimiento de las aguas subterráneas y las tensiones sobre su disponibilidad. El agua dulce *subterránea* reabastece las *Lagunas*, y la extensión de la *salmuera* determina su ubicación, pero se sabe poco sobre cómo el bombeo de *salmuera* o de agua dulce *subterránea* afecta a las *Lagunas* a lo largo del espacio y del tiempo.

1. ¿Cuál es la conexión hidráulica entre la salmuera y el agua dulce?
2. ¿Qué controla la extensión de las Lagunas de agua dulce?
3. ¿Cómo influiría la evolución de la zona de transición en las Lagunas?
4. ¿Cuál es el papel de la variabilidad climática en los cambios de la extensión de la Laguna?
5. ¿Cuáles son los plazos de respuesta al bombeo de agua dulce y salmuera?

Marco geológico e hidrogeológico para las simulaciones del flujo de aguas subterráneas

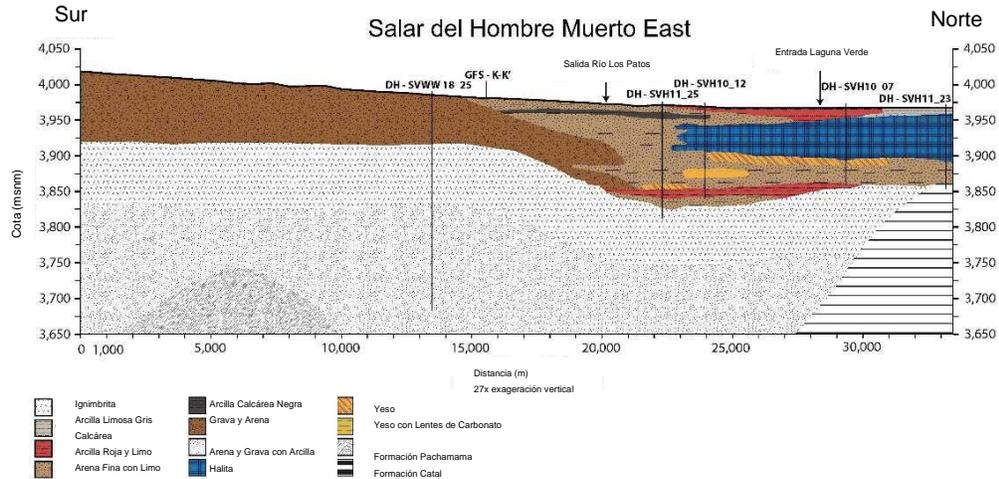


Figura 5. Vista bidimensional del modelo geológico conceptual de la cuenca oriental del SdHM con las unidades geológicas superficiales coloreadas. Los sitios de datos utilizados para construir el modelo están etiquetados.

Las simulaciones y los modelos geológicos son la clave para predecir con mayor exactitud el flujo de *aguas subterráneas*. A partir de los datos de los testigos de perforación de la SdA y la SdHM, se desarrollan interpretaciones geológicas bidimensionales (**Figura 5; Apéndice A2**). El análisis adicional de las pruebas hidráulicas de campo define la velocidad a la que puede fluir el agua a través de las rocas estudiadas. Los resultados combinados proporcionan la base para las simulaciones por ordenador del flujo de *agua subterránea* para cada sección hidrogeológica bidimensional. Los modeladores aplican diferentes tasas de bombeo para las *aguas subterráneas salobres* y dulces. Los resultados de las simulaciones proporcionan información sobre el tiempo y la cantidad de cambio en el flujo de *agua subterránea* en respuesta a diferentes escenarios de bombeo.

¹⁶ Almacenamiento de agua subterránea: Cantidad de agua almacenada en un acuífero en un momento dado

¹⁷ Descarga de aguas subterráneas: Agua que fluye de forma natural desde el subsuelo hasta la superficie terrestre

Hallazgos

Análisis de la descarga de aguas subterráneas

En nuestros análisis, definimos la descarga de *aguas subterráneas* como la cantidad de agua dulce *subterránea* que sale del *acuífero* a la superficie. La *descarga de agua subterránea* es un importante predictor de la cantidad de agua que potencialmente entra en las *Lagunas* en cada *Salar*. Los resultados de los experimentos de simulación de agua subterránea sugieren que la descarga de agua *subterránea* disminuye significativamente durante el bombeo de agua *subterránea dulce*. Cuando se bombea agua subterránea *salobre*, la *cantidad de descarga de agua subterránea* permanece relativamente inalterada. Dado que algunos productores de litio están planeando bombear *agua subterránea* de la zona de transición (**Figura 2**), los escenarios también incluyen el bombeo de las zonas salobres del *acuífero* donde el *agua subterránea dulce* hace la transición a *salmuera*. Las simulaciones mostraron un aumento de las tasas de *descarga de aguas subterráneas* en la zona de *aguas subterráneas salobres*, mientras que las tasas disminuyeron en la zona de *aguas subterráneas dulces*. Esto pone de manifiesto la importancia de la disponibilidad de agua dulce para la descarga de *aguas subterráneas* y por tanto, para las *lagunas* de gran valor ecológico.

Análisis del tiempo de respuesta

Para cada modelo, se analizó el tiempo que tarda el flujo de *aguas subterráneas* en responder a distintos escenarios de bombeo. La *descarga de agua subterránea* cambió más rápidamente cuando se bombeó desde la zona de transición y *agua subterránea dulce* y más lentamente cuando se bombeó *salmuera*. Esta observación se debe probablemente a las diferencias en las propiedades físicas de cada tipo de agua: la *salmuera*, más densa, subyace a las *aguas subterráneas dulces* y actúa como un fluido más estable, mientras que las *aguas subterráneas dulces*, más boyantes, pueden aflorar a la superficie y moverse con mayor rapidez. Estas simulaciones corroboran la idea de que los sistemas de *salmuera* y de *agua dulce subterránea* del *acuífero* se comportan de manera muy diferente y están desconectados entre sí.

Evolución espacial de la salmuera

Los escenarios del modelo muestran cómo se movería la zona de transición entre la *salmuera* y el *agua dulce subterránea* en respuesta al bombeo. Todos los escenarios muestran que la zona de transición migra más cerca de las zonas ricas en *salmuera* del *acuífero*. Sin embargo, la zona de transición se extiende más hacia la *salmuera* tanto en el escenario de bombeo de *salmuera* como en el de la zona de transición. Esta expansión de la zona de transición es importante porque sugiere que las *Lagunas*, que existen allí donde el *agua subterránea dulce* se *descarga* y se acumula, pueden migrar bajo la extracción de litio.

Implicancias para la sostenibilidad de las aguas subterráneas

Mientras que el bombeo de *salmuera* puede influir en la localización de las *Lagunas*, el bombeo de *agua dulce* influye principalmente en la extensión de las *Lagunas*. Como resultado del diferente comportamiento del flujo en la *salmuera* frente al *agua dulce subterránea*, las actividades de bombeo que se producen en una zona del *acuífero* no afectan fácilmente a la *descarga de agua subterránea* en otra parte del *acuífero*. Sin embargo, es importante que el bombeo, especialmente en las zonas de *agua subterránea dulce* del *acuífero*, disminuya potencialmente las extensiones de agua superficial al disminuir la *descarga de agua subterránea*. Dado que se prevé que las temperaturas sigan aumentando debido al cambio climático global, cabe señalar que es probable que aumenten las tasas de evaporación. La extensión de las *lagunas* también puede disminuir como resultado del aumento de la evaporación de las aguas superficiales y de la disminución de la *recarga* neta de *agua dulce subterránea*¹⁸.

¹⁸ *Recarga de aguas subterráneas*: Agua que se infiltra desde la superficie y vuelve a llenar los acuíferos



Impactos de la eliminación de salmuera y agua dulce en SdHM

Introducción

La magnitud de los impactos y la sostenibilidad medioambiental dependen de las características específicas del sistema hidrogeológico y de las tensiones hidrológicas sobre el agua de las cuencas. Este capítulo se centra en las influencias climáticas, los cambios en el funcionamiento/condiciones hidrológicas debidos a la extracción de litio, así como en las tasas actuales y futuras de uso del agua por parte de los distintos productores de litio. Para abordar estas cuestiones se plantearon las siguientes preguntas, cuyas respuestas se describen a continuación en la sección de Hallazgos Clave.

1. ¿Hasta qué punto son responsables las extracciones actuales y previstas de salmuera y agua dulce subterránea asociadas a la extracción de litio en el Salar del Hombre Muerto?
2. ¿Cuáles son las posibles repercusiones de este uso del agua en el medio ambiente?
3. ¿Cuáles son los umbrales de impacto y cómo se comparan con los del Salar de Atacama?

Aunque el proyecto de Livent es actualmente la única mina de litio que funciona en SdHM, se espera que otras dos estén operativas en los próximos años, Allkem y Galan. Una tercera es POSCO, en el extremo norte de la cuenca y fuera del dominio del modelo. En este capítulo se evalúa la posibilidad de que las extracciones *de salmuera* y *agua dulce* afecten a los sistemas acuáticos y de humedales de cada subcuenca. En la subcuenca oriental *del SdHM*, el Río Los Patos es un sistema fluvial que fluye hacia el norte y el oeste, antes de infiltrarse en el salar cercado *la Laguna Catal*. A lo largo de su curso de agua, el Río Los Patos fluye a través de una serie de *lagunas* y alberga una variedad de humedales y hábitats acuáticos que van desde la calidad del agua dulce a la *salobre*. La subcuenca occidental se encuentra a menor altitud y es generalmente más seca que la oriental. En la subcuenca occidental, el río Trapiche fluye hacia el noroeste, donde se infiltra en el *acuífero* del Trapiche. En el apéndice A2 figura un mapa en el que se describen estas características.

“La magnitud de los impactos [...] depende de las características específicas del sistema hidrogeológico”

Métodos

Los impactos relativos de las extracciones sobre la cantidad y la calidad del agua en torno a los sistemas acuáticos y de humedales críticos de la subcuenca oriental *del SdHM* se definen utilizando un modelo de flujo de *aguas subterráneas* tridimensional, numérico y dependiente de la densidad (Figura 6).

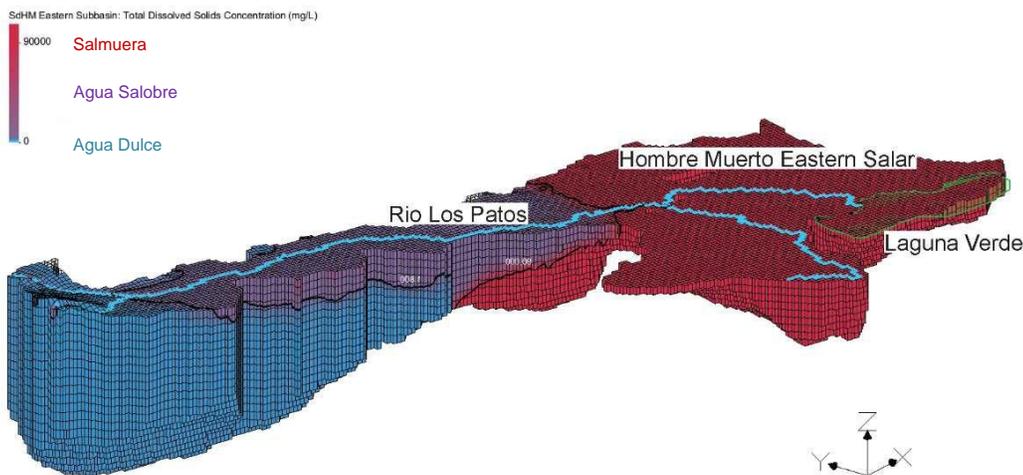


Figura 6. Salinidad de simulación numérica en la subcuenca oriental *del SdHM* mostrando la posición y distribución de las aguas dulces (azul), *salobres* (púrpura) y *salmuera* (rojo) en los *acuíferos* debajo del Río Los Patos y la subcuenca oriental del *Salar* después de las extracciones simuladas.

En la subcuenca occidental, se investigan las interacciones entre *las aguas subterráneas* y las aguas *superficiales* para identificar las zonas de posible impacto ambiental. Se investigó el movimiento del agua en toda la cuenca y su *divisoria de aguas*, así como las precipitaciones, la *recarga de las aguas subterráneas* (infiltración), el caudal de los arroyos y la evaporación.

Los modelos se diseñaron para visualizar las condiciones naturales actuales del sistema hidrológico de la cuenca. Para predecir los posibles impactos de las operaciones mineras en el futuro, se definieron un total de seis escenarios de extracción con tasas actuales (Livent) y dos intervalos de proyección futura. La fase final de extracción de cada escenario se prolongó durante 30 años (hasta 2059).

1. Sólo Livent
2. Sólo Allkem
3. Sólo Galan
4. Todos los usuarios a la vez
5. Todos los usuarios, escenario mínimo (suponiendo que Galán no inicie la producción en 2030)
6. Todos los usuarios a la vez en un escenario de alta extracción – todas las tasas multiplicadas por 3

Los datos de rastreo de la edad del agua de los ríos, manantiales y *aguas subterráneas* proporcionan una valiosa información sobre las fuentes y el transporte a lugares específicos y apoyan las interpretaciones de los resultados del modelo. El isótopo radiactivo tritio (^3H) permite distinguir entre la proporción de precipitación reciente y agua relativamente antigua (>70 años) en la masa. Entre 2019 y 2021 se tomaron muestras en unos 30 sitios de la cuenca *del SdHM*, lo que proporcionó un estudio preciso de las principales masas de agua de cada cuenca. Una descripción más detallada de estos métodos se puede encontrar en la próxima publicación, "Resilient brine and freshwater extraction for lithium resources in the Salar del Hombre Muerto basin".

Hallazgos

A partir de este análisis, los principales hallazgos de este trabajo se organizan en torno a las preguntas planteadas en la introducción:

1. *¿Hasta qué punto son responsables las futuras extracciones de salmuera y agua dulce subterránea asociadas a la extracción de litio en el Salar del Hombre Muerto?*
 - La expansión de la actividad extractiva en la subcuenca oriental dará lugar a descensos localizados del nivel de las aguas *subterráneas* de menos de 1 metro y probablemente no tendrá impactos observables *a escala de acuífero* en los niveles de *las aguas subterráneas* durante los próximos 100 años.
 - Es improbable que la expansión de la actividad extractiva en la subcuenca oriental, con las tasas previstas de extracción de *salmuera* y *agua subterránea dulce*, provoque impactos significativos en el caudal del Río Los Patos o en los caudales de entrada a *Laguna Verde* y *Laguna Catal* en los próximos 100 años.
 - Según las previsiones actuales, se espera que las extracciones de *agua dulce* de la subcuenca occidental disminuyan con el tiempo, por lo que no se esperan impactos significativos adicionales a los ya documentados en el *acuífero* del Trapiche.
2. *¿Cuáles son las posibles repercusiones de este uso del agua en el medio ambiente?*
 - El impacto de las operaciones mineras en uno de los dos humedales y hábitats acuáticos del *acuífero* del Trapiche documentado en el capítulo 4 se produjo debido a su dependencia de las aguas superficiales en lugar de *las subterráneas*, y su restauración depende del restablecimiento de los flujos naturales de aguas superficiales.
 - En la actualidad no se dispone de datos suficientes sobre otras pequeñas *Vegas de la* subcuenca oriental para estimar el impacto futuro que tendrán en ellas las extracciones

de *salmuera*, pero las tasas de extracción y otros resultados de modelamiento del capítulo 5 y del modelo de la subcuenca oriental de este capítulo 6 no indican nuevos impactos en esta zona.

3. *¿Cuáles son los umbrales de impacto y cómo se comparan con los del Salar de Atacama?*

- Los resultados del trazador de edad en *SdHM* y *SdA* muestran que las *aguas subterráneas* de la cuenca se componen principalmente de aguas relictas (antiguas), amortiguando cualquier impacto de los cambios humanos y naturales.
- Las aguas superficiales (arroyos y *lagunas*) contienen una mayor cantidad de agua joven, lo que significa que estas masas de agua son más sensibles a los impactos de las alteraciones del caudal y también de los cambios climáticos.
- Dado que la dirección del flujo del Río Los Patos es descendente hacia el *acuífero* en la mayor parte del dominio del modelo de la subcuenca oriental, los efectos del bombeo de *aguas subterráneas* sobre el caudal de los arroyos serán mínimos. Sin embargo, esta conclusión pone de manifiesto la mayor sensibilidad del sistema a los cambios relacionados con el clima y a las posibles alteraciones del uso del suelo en las aguas superficiales.
- La vega baja del Trapiche, situada a lo largo de una estrecha franja en el margen del *Salar*, que ya ha disminuido como se documenta en el capítulo 4, es poco probable que se recupere en los escenarios de desarrollo previstos.



¿Cómo difiere el consumo de agua entre las distintas técnicas de producción de litio?

Introducción

Mientras que la extracción de litio requiere el bombeo de *salmuera*, el refinamiento del litio para su uso en baterías requiere distintas cantidades de *agua dulce*. La determinación del consumo de agua dulce es imprescindible para comprender plenamente las repercusiones medioambientales de la producción de litio. Por ello, este proyecto de investigación aborda las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es el uso de agua dulce de las explotaciones mineras de litio en relación con la producción de carbonato de litio e hidróxido de litio?
2. ¿Cuál es el impacto del uso del agua dulce y cómo depende de las tensiones hidrológicas en las cuencas?

Este trabajo se centró específicamente en los dos procesos principales que se utilizan actualmente en el Triángulo del Litio. Uno de los procesos utiliza principalmente piscinas/estanques de evaporación de *salmuera* bombeada para concentrar el litio hasta que alcanza un grado suficiente para su transporte a una instalación de procesamiento externa. El segundo proceso consiste en un conjunto de métodos conocidos como Extracción Directa de Litio (EDL), en los que la *salmuera* se bombea y el litio se extrae y procesa directamente in situ. Actualmente se están desarrollando varias técnicas DLE que requieren cantidades variables de agua dulce. Aquí se evaluó el único proceso de este tipo que funciona actualmente en el triángulo del litio y que utiliza un método conocido como adsorción. La demanda de agua dulce y energía de estos dos métodos principales se compara con la extracción de litio a partir de roca dura.

Métodos

Se aplican dos métodos para caracterizar los impactos de las diferentes técnicas de producción de litio: una evaluación directa del consumo de *agua dulce subterránea* y una comparación del consumo de *agua dulce* en el contexto de la escasez de agua para las cuencas en las que se está produciendo la producción de litio.

Evaluación del consumo de agua dulce en la extracción de litio

Los investigadores se centraron en aclarar las demandas de consumo de agua dulce *subterránea* de cada tipo de producción comparando la cantidad de *agua dulce* utilizada para desarrollar un kilogramo de producto de litio apto para baterías. Al comparar las opciones de menor consumo energético de las piscinas de evaporación y la DLE, se observa una clara diferencia entre las demandas de *salmuera* y de *agua dulce*. En el caso de *la demanda de salmuera*, las piscinas de evaporación crean una relación 1:1 entre la tasa de producción de *salmuera* y las pérdidas de consumo a través de la evaporación a la atmósfera; mientras que la DLE, a través de su proceso de absorción, devuelve aproximadamente un 50-60% de la *salmuera* al *acuífero*. Sin embargo, en comparación con la *salmuera*, este método utiliza cinco veces más *agua dulce* que los estanques de evaporación. En general, las tecnologías actuales de extracción directa de litio (DLE) requieren mucha más *agua dulce* que los métodos convencionales. Aunque el consumo de *agua dulce* es menor en comparación con el de *salmuera*, dada su importancia a la hora de influir en la *descarga de aguas subterráneas* a las aguas superficiales, es importante señalar que el consumo de *agua dulce* depende del proceso de extracción.

Evaluación de la escasez de agua en el Triángulo del Litio

El método AWARE (Available Water Remaining) utilizado identifica el agua disponible después del consumo humano y de los ecosistemas sobre una base anual. Los hallazgos de todas las cuencas que presentan concentraciones elevadas de litio muestran zonas con una disponibilidad

“El refinamiento del litio para su uso en baterías requiere agua dulce”

de agua, una demanda y un remanente de agua relativamente mayores tras las tasas actuales de consumo de *agua dulce* (Figura 7). Centrándonos en las cuencas con los datos más disponibles, los hallazgos indican que SdA tiene un balance negativo de *agua dulce* remanente (sale más agua del sistema por evaporación y extracción de la que entra de forma natural) después de considerar todo el consumo estimado. Por el contrario, SdHM tiene un balance positivo de *agua dulce* restante, incluso después de considerar la cantidad de *agua dulce* subterránea utilizada para la producción de litio. Estas comparaciones muestran la importancia del impacto medioambiental de las técnicas de producción de litio y subrayan la importancia de tener en cuenta el estrés hídrico circundante en los proyectos actuales y futuros.

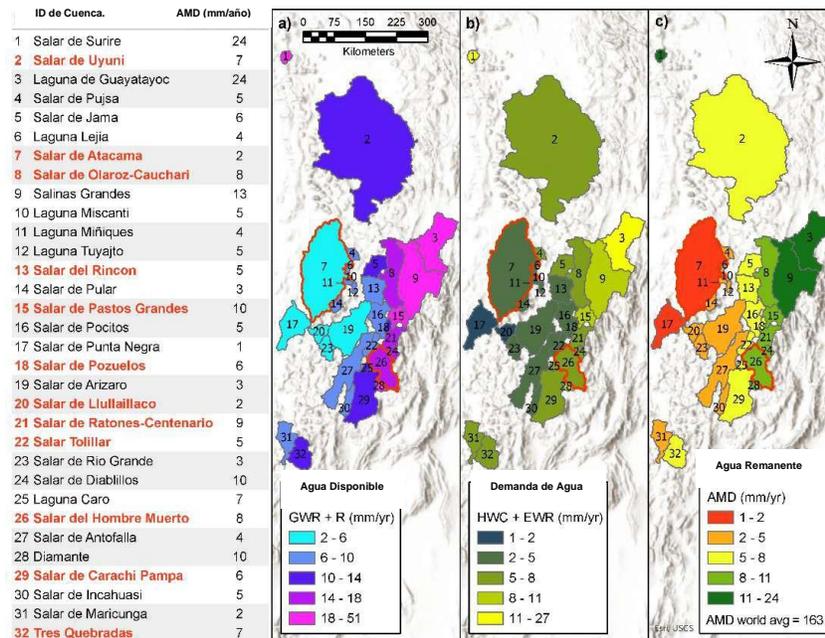


Figura 7. Entradas y salidas del método AWARE mostrando el agua disponible (a), la demanda de agua (b) y la disponibilidad menos la demanda (AMD) (c) para las 32 cuencas que estudiamos con proyectos de litio activos o potenciales en el triángulo del litio. Los componentes se definen como Recarga de Aguas Subterráneas (GWR), Escorrentía o caudal (R), Consumo Humano de Agua (HWC), y Requerimientos Ambientales de Agua (EWC). El texto en rojo de las cuencas en la parte izquierda de la figura resalta qué cuencas tienen proyectos activos o avanzados. La DMA de estas cuencas es extremadamente baja en comparación con la media mundial (163 mm/año). Las cuencas SdA y SdHM aparecen en rojo.

Hallazgos

Todos los tipos de producción de litio a partir de *salmuera* dependen del bombeo de *salmuera* y *agua dulce subterránea*, pero algunos métodos de refinamiento requieren más *agua dulce* que otros. Este trabajo compara dos tipos de refinamiento para el litio en agua: estanques de evaporación frente a DLE. Un hallazgo importante es la mayor cantidad de *agua dulce* necesaria para el DLE en comparación con el proceso de estanques de evaporación. Mientras que el método AWARE sugiere que algunas cuencas todavía tienen *agua dulce* disponible después de considerar todo el consumo estimado, es importante tener en cuenta que el bombeo de *agua dulce subterránea* tendrá un impacto en la *descarga de agua subterránea*, según lo considerado por el método AWARE.

Este trabajo pone de relieve la importancia de considerar no sólo las demandas de *agua dulce* durante la producción de litio y los factores de estrés hídrico en las cuencas. En lo que respecta a las evaluaciones del ciclo de vida (ECV) de las baterías de iones de litio, también es importante señalar que la consideración del consumo de *agua dulce* todavía no se tiene en cuenta habitualmente en la producción de baterías. Uno de los principales resultados de este paquete de trabajo es la necesidad de incorporar el consumo de *agua dulce* y, en concreto, de aplicar métodos como AWARE en las ECV.



Conclusiones

Conclusiones

La investigación sobre las cuencas desérticas sudamericanas ricas en litio arroja luz sobre el impacto del clima y las actividades mineras en la disponibilidad de recursos hídricos, importantes para los ecosistemas, las comunidades y la industria. Un hallazgo importante de la investigación es la importancia de la extracción de agua dulce *subterránea*, que influye en la disponibilidad total de *agua dulce* para los seres humanos y los ecosistemas que dependen de ella. La extracción *de salmuera tiene una* influencia limitada en las masas de agua superficiales que constituyen hábitats importantes. Las escalas temporales de los impactos difieren significativamente entre la extracción de agua *dulce* y la de *salmuera*, ya que los efectos de la extracción de *salmuera* tardan mucho más en producirse en comparación con la de *agua dulce*. El análisis subraya no sólo la necesidad de tener en cuenta el consumo de agua dulce en la producción de litio, sino también de contar con programas de control de *las aguas subterráneas* para seguir los cambios en los niveles de *éstas* durante largos periodos. Las variaciones climáticas desempeñan un papel clave en la disponibilidad de *agua dulce* y en las variaciones de tamaño de *lagunas* y humedales. La gran *sequía* entre 2003-2012 afectó a toda la zona del Triángulo del Litio, incluidos los Salares de Atacama y del Hombre Muerto, donde se pudo acceder a la mayoría de los datos. Los datos muestran un fuerte impacto de la *sequía* en los humedales *alimentados por aguas subterráneas* y en las masas de agua superficiales de estas zonas, lo que pone de relieve la importancia de tener en cuenta la influencia actual y futura del cambio climático global en estos entornos a la hora de evaluar los impactos de la minería relacionados con el agua.

Este estudio se realizó centrándose en las dos principales cuencas *productoras de salmuera* en la actualidad, *SdHM* y *SdA*. Cada *Salar del Triángulo del Litio* tiene unas características ecosistémicas y climáticas ligeramente diferentes que influyen en las concentraciones de *salmuera*, la disponibilidad de *agua dulce subterránea*, la posición de la zona de transición y la sensibilidad de los ecosistemas de humedales. Este estudio ofrece una metodología exhaustiva que puede reproducirse en otros *salares* y cuencas que tienen litio para investigar los impactos de la producción de litio en lugares específicos. Esto es especialmente importante para evaluar la responsabilidad de los nuevos productores de litio.



Apéndice

Artículos de revistas revisados por pares

Publicado en

1. “Relic Groundwater and Prolonged Drought Confound Interpretations of Water Sustainability and Lithium Extraction in Arid Lands” publicado el 12 de julio de 2022 en la revista “Earth’s Future” (<https://doi.org/10.1029/2021EF002555>)
 - Presenta las conclusiones del capítulo 4 de SdA. Las conclusiones de SdHM se incluyen en la publicación en preparación que figura a continuación.

En revisión

2. "Constraints on groundwater abstraction impacts in lithium brine systems" presentado el 16 de mayo de 2023 a la revista Nature Geoscience
 - Presenta los hallazgos y los métodos detallados del capítulo 5 para SdA y

SdHM

En preparación

3. “Hydrologic signatures on Laguna complexes & wetland inundation in the lithium triangle” - presentación prevista en la revista Nature Water en agosto de 2023
 - Presenta las conclusiones sobre las aguas superficiales, la vegetación y los cambios climáticos del capítulo 4 aplicadas a toda la región del Triángulo del Litio
4. “Estimates of freshwater availability in and across the Lithium Triangle: Implications of lithium brine extraction” - presentación prevista en la revista Nature Sustainability en agosto de 2023
 - Presenta los hallazgos del capítulo 7 aplicadas a toda la región del Triángulo del Litio
5. “Distinctions in surface water and groundwater interaction across a lithium brine producing basin: Implications for water resources” - presentación prevista a la revista PLOS Water en octubre de 2023
 - Presenta las conclusiones de los capítulos 4 y 6 de SdHM
6. “Resilient brine and freshwater extraction for lithium resources in the Salar del Hombre Muerto basin” - presentación prevista a la revista Scientific Reports en noviembre de 2023
 - Presenta las conclusiones del capítulo 6 de SdHM
7. “Drivers of changes in surface water extents of the Salar de Atacama watershed, Chile” - presentación prevista a la revista Hydrological Processes en noviembre de 2023
 - Presenta las conclusiones sobre aguas superficiales, vegetación y cambios climáticos del capítulo 4 con especial detalle en SdA

Definiciones

| | |
|--------------------------------------|--|
| Acuífero | Tierra subterránea que contiene agua |
| Agua salobre | Agua moderadamente salada, entre agua apta para abreviar el ganado y hasta 3 veces más salada que el agua de mar. No apta para beber ni para regar. |
| Salmuera | <i>Aguas subterráneas</i> muy salinas, al menos 3 veces más saladas que el agua de mar, no aptas para beber, regar o abreviar el ganado |
| Interfaz salmuera-agua dulce | El límite donde <i>las aguas subterráneas</i> dulces interactúan con las <i>aguas subterráneas salobres</i> |
| Periodo climático | Periodo en el que prevalecen características climáticas similares (por ejemplo, <i>sequía</i> , grandes episodios de lluvia, etc.) |
| Régimen climático | El patrón de los periodos <i>climáticos</i> en una región a lo largo de un periodo de tiempo determinado |
| Sequía | Períodos en los que la lluvia y la nieve son inferiores a la media |
| Evapoconcentración | Proceso de evaporación progresiva que aumenta la concentración de sales en el agua |
| Evapotranspiración | La combinación de evaporación y transpiración de las plantas |
| Agua dulce | Agua poco o nada salada apta para el consumo, el riego y la ganadería |
| Aguas subterráneas | Agua que se encuentra en el subsuelo o bajo la superficie terrestre |
| Descarga de aguas subterráneas | Agua que fluye de forma natural desde el subsuelo hasta la superficie terrestre |
| Recarga de aguas subterráneas | Agua que se infiltra desde la superficie y vuelve a llenar <i>los</i> acuíferos |
| Almacenamiento de aguas subterráneas | Cantidad de agua almacenada en un <i>acuífero</i> en un momento dado |
| Laguna/Lagunas | Cuerpos de agua superficiales situados en el borde de un <i>salar</i> |
| Salar/Salares | Salinas situadas en el fondo de cuencas |
| SdA | El <i>Salar</i> de Atacama, Chile |
| SdHM | El <i>Salar</i> del Hombre Muerto, Argentina |
| Vegas | Humedales alimentados <i>por aguas subterráneas</i> que se encuentran en el borde de <i>salares</i> o cerca de masas de agua superficiales permanentes |
| Cuenca hidrográfica | El área dentro de la cual todas las precipitaciones de lluvia o nieve que caen drenan en última instancia a un punto o área específicos |
| Presupuesto de agua | El balance entre toda el agua que entra en una cuenca y toda el agua que sale de ella en un periodo de tiempo determinado. Puede ser positivo o negativo |

Mapas de la cuencas SdA y SdHM

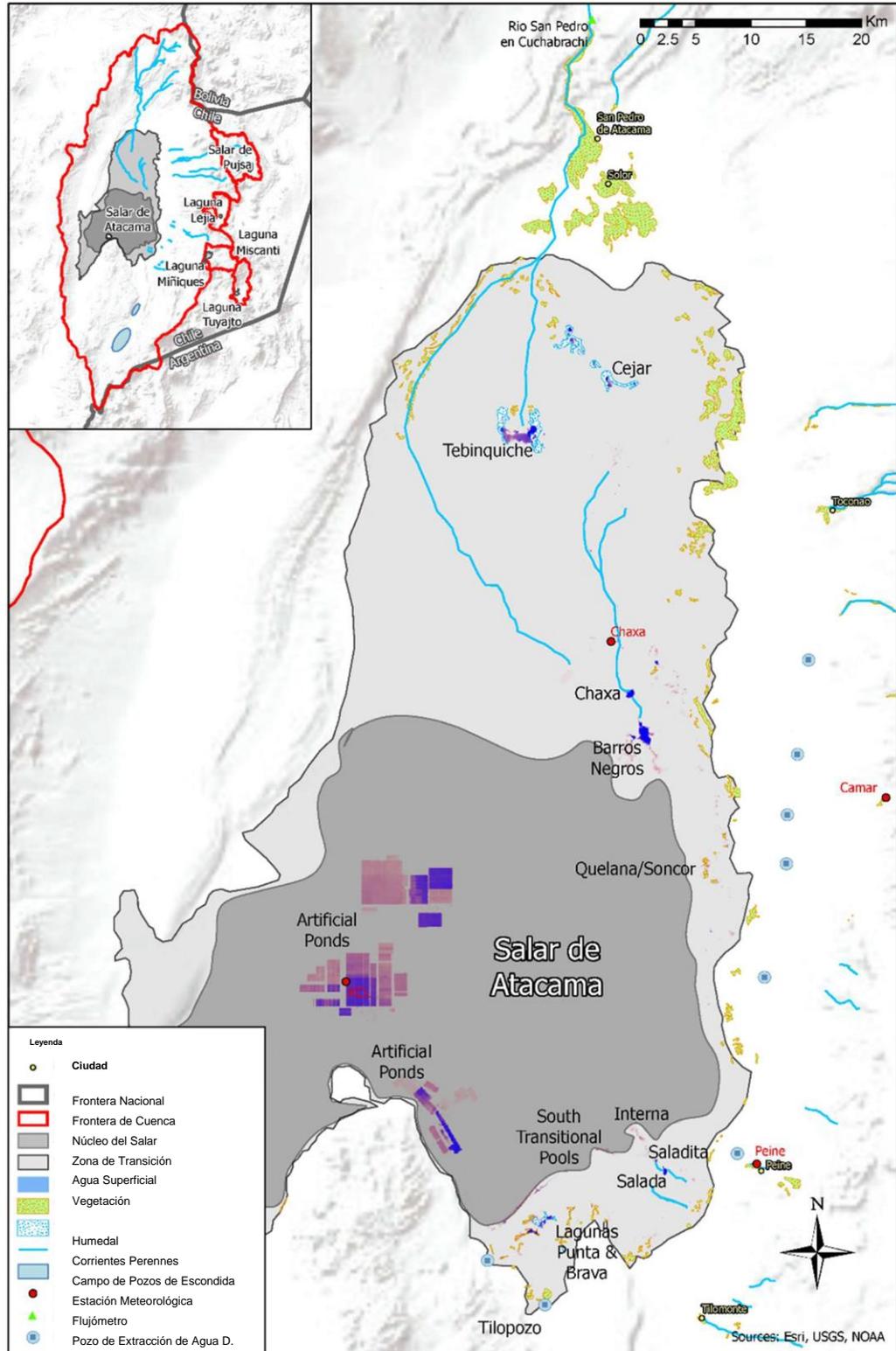


Figura A1. Mapa del SdA con las características identificadas de las aguas superficiales, la vegetación, las comunidades locales y las explotaciones mineras de la zona.

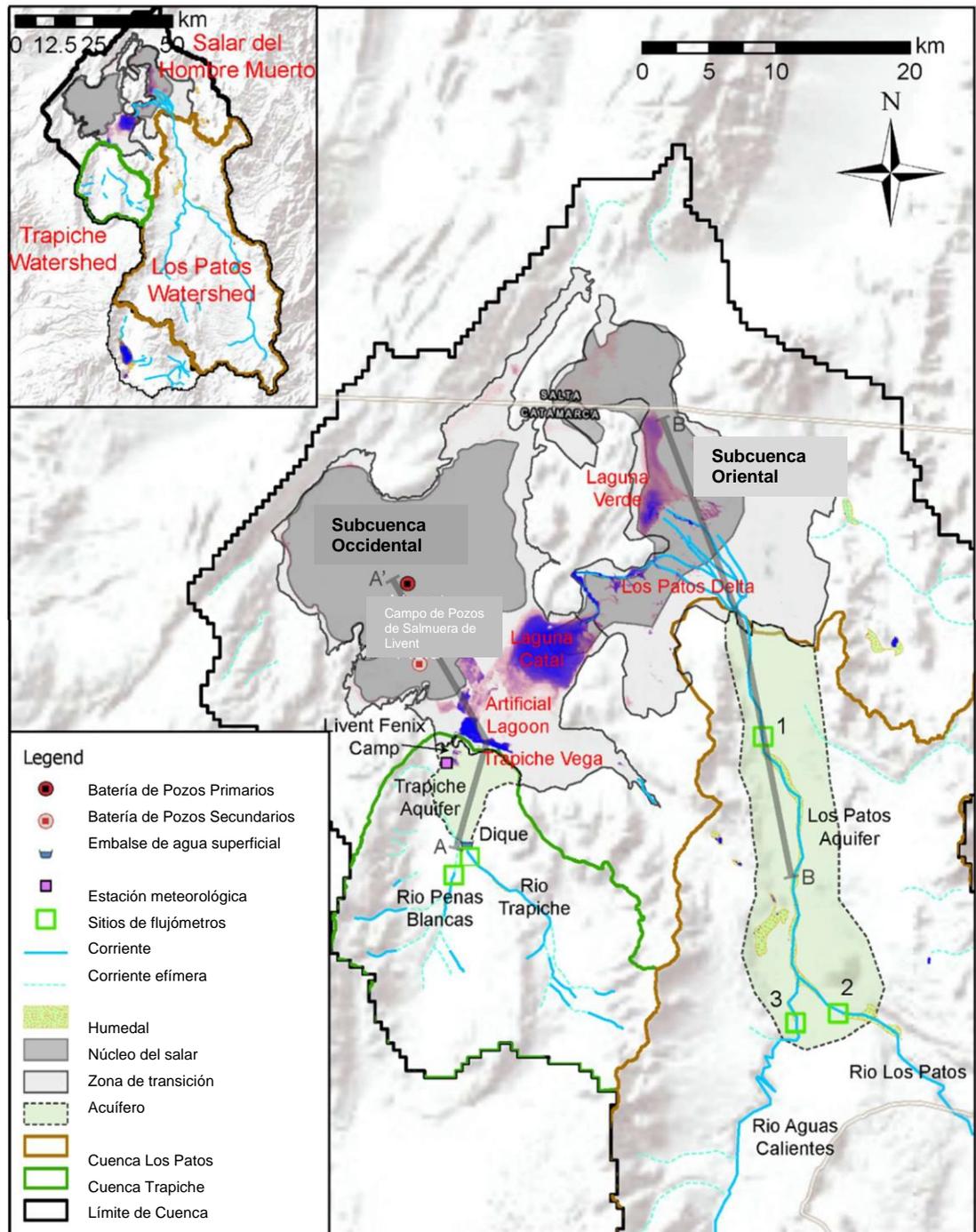


Figura A2. Cuenca del SdHM y sus dos subcuencas (Oeste y Este) con características hidrológicas importantes y lugares de seguimiento. Los transectos geológicos desarrollados en este trabajo se muestran como líneas grises, la línea B-B' se muestra en **la Figura 5** del documento anterior. La cuenca hidrográfica completa (línea negra en negrita) se muestra en el recuadro con las dos subcuencas principales (Trapiche y Los Patos). Los puntos de aforo numerados (cuadrados verdes) corresponden a los puntos de observación identificados en el documento.