



RECURSOS HÍDRICOS DEL SALAR DE ATACAMA

RECURSOS HÍDRICOS DEL SALAR DE ATACAMA

ISBN:

978-956-227-589-7

AUTORES:

Víctor Parra, José Luis Arumí,
Amaya Alvez, Fernanda Álvarez-Amado
y Leopoldo Gutiérrez.

EDITORAS:

Sujej Hormazábal M.
Belén Bascur R.

DISEÑO EDITORIAL

Okey Comunicaciones

IMPRESIÓN:

Trama Impresores S.A.

AGRADECIMIENTOS:

Centro de Recursos Hídricos para la
Agricultura y la Minería (CRHIAM)
ANID/FONDAP/15130015
ANID/FONDAP/1523A0001

Victoria 1295, Barrio Universitario,
Concepción, Chile.
Teléfono: +56 41 2661570

www.crhiam.cl

Prohibida la reproducción total o parcial
de esta obra por cualquier medio.



Universidad de Concepción

RECURSOS HÍDRICOS DEL

SALAR DE ATACAMA

Víctor Parra, José Luis Arumí, Amaya Alvez,
Fernanda Álvarez-Amado y Leopoldo Gutiérrez



CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001



RECURSOS HÍDRICOS DEL

SALAR DE

ATACAMA

ÍNDICE

PRÓLOGO	7
DEFINICIONES	8
CAPÍTULO 1: LOS SALARES EN CHILE	11
▶ Cuenca endorreica	16
▶ ¿Qué es un salar?	17
CAPÍTULO 2: FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE UNA CUENCA ENDORREICA	21
▶ Recarga por precipitación	22
▶ Evaporación desde el suelo	23
▶ Evaporación desde lagunas	23
▶ Evapotranspiración en áreas con vegetación	23
CAPÍTULO 3: CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA	27
▶ Características hidrológicas del Salar de Atacama	30
▶ Características hidrogeológicas de la cuenca del Salar de Atacama	32
▶ Recursos hídricos superficiales de la cuenca	37
▶ Recursos hídricos subterráneos de la cuenca	38
CAPÍTULO 4: CHILE Y EL DEBATE POR UNA REFORMA A LA REGULACIÓN DE LAS AGUAS Y SU IMPACTO EN LAS ACTIVIDADES PRODUCTIVAS (MINERÍA)	41
▶ Importancia de los recursos hídricos en la cuenca	42
▶ Derechos de agua y extracciones de aguas	44
CAPÍTULO 5: EFECTO DE LAS EXTRACCIONES SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA	49
▶ Balance hídrico del Salar de Atacama	50
▶ Sostenibilidad social y territorial: el involucramiento de las comunidades	53
▶ Desafíos y oportunidades en la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Salar de Atacama	54
REFERENCIAS	57



RECURSOS HÍDRICOS DEL
SALAR DE
ATACAMA

PRÓLOGO

En el altiplano chileno existen más de 50 salares, que se caracterizan por estar en cuencas sin afluentes normales, con climas áridos que producen una alta evaporación y, por ende, una concentración mayor de sales. El más extenso de todos, con impresionantes 15.000 km², es el Salar de Atacama, salar preandino que se encuentra ubicado en la Región de Antofagasta. Al oeste limita con la Cordillera de Domeyko y al este con la Cordillera de los Andes. En tanto, al norte limita con las serranías del Tatio, y la serranía de Lila al sur.

Bajo el salar existe un vasto embalse de agua subterránea, que se alimenta por un acuífero procedente de un curso paralelo al río San Pedro. Este salar es un ecosistema que tiene una gran diversidad de recursos hídricos, con un alto valor ambiental, social, económico, cultural y turístico, por lo que se requiere de una visión multidisciplinaria para entender y gestionar los recursos hídricos.

Sumado a esto, cuenta con las mayores reservas de litio del mundo, que es usado en industrias de alta tecnología. Incluso, se estima que produce aproximadamente el 25% del litio para baterías del planeta.

En el marco de la Estrategia Nacional del Litio de Chile, el Salar de Atacama ha sido designado como un activo estratégico, lo que significa que cualquier desarrollo comercial requerirá una empresa conjunta con una entidad estatal que posea una participación mayoritaria (51%). Este vínculo se ha concretado con el anuncio de un acuerdo de cooperación público-privado entre las mineras Codelco y SQM para desarrollar en conjunto actividades productivas y comerciales en el salar, relativas a la explotación del litio, el cual se extenderá hasta 2060.

En este contexto, resulta crucial conocer las características del salar, y por ello, este libro tiene como objetivo describir el escenario hídrico actual de la cuenca del Salar de Atacama y su relación con factores ambientales, sociales y económicos, con el fin de aportar a la discusión de políticas públicas en torno a la gestión sostenible de los recursos hídricos de este importante ecosistema.



DEFINICIONES

▶ **ACUÍFERO:**

Formación geológica que puede almacenar y transmitir agua.

▶ **CAUCE O RÍO:**

Un cauce o río es una corriente superficial de agua que fluye desde su nacimiento hasta su desembocadura en otro río, lago o en el mar.

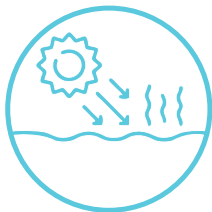


▶ **CUENCA HIDROGRÁFICA:**

Es un territorio delimitado por la línea de cumbres o cerros (llamada divisoria de aguas) que drena las aguas superficiales hasta un punto de control o salida por medio de cauces o ríos.

▶ **ESCORRENTÍA SUPERFICIAL:**

Fracción de la precipitación líquida (lluvia) que escurre por la red de drenaje hasta alcanzar la red fluvial.



▶ **EVAPORACIÓN:**

Es la transformación del agua líquida en gas cuando se mueve desde la tierra o las fuentes de agua hacia la atmósfera. La fuente de energía para la evaporación es principalmente la radiación solar. La evaporación en zonas con vegetación incluye la transpiración de las plantas. En conjunto se le llama evapotranspiración.

▶ **GRADIENTE HIDRÁULICO:**

Se define como la pérdida de energía o cambio en el nivel piezométrico entre dos puntos.



► **INFILTRACIÓN:**

Es el agua de la superficie de la tierra que penetra en el suelo (sub-superficie). Una vez infiltrada, el agua pasa a formar parte de la humedad del suelo o del agua subterránea.

.....

► **NIVEL FREÁTICO:**

Nivel superior de la zona de saturación del agua subterránea en las rocas permeables. Este nivel puede variar estacionalmente debido a las precipitaciones y la evaporación.

.....



► **NIVEL PIEZOMÉTRICO:**

Corresponde a la presión existente sobre un punto del acuífero. En un acuífero no confinado o libre el nivel piezométrico coincide con el nivel freático.

.....

► **PRECIPITACIÓN:**

Es el vapor de agua condensado que cae a la superficie de la Tierra. La mayor parte de la precipitación se produce como lluvia, aunque también incluye la nieve, el granizo y el goteo de la niebla.

.....



► **PERCOLACIÓN:**

Paso de agua a través de medios porosos.

.....

► **RECARGA:**

Es el agua infiltrada que percola hasta llegar a la zona saturada del acuífero.

.....

► **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.



RECURSOS HÍDRICOS DEL
SALAR DE
ATACAMA

01 CAPÍTULO

LOS SALARES EN CHILE

Víctor Parra¹ y
Leopoldo Gutiérrez^{2 y 3}

¹ Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.

² Facultad de Ingeniería,
Universidad de Concepción.

³ Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM).

En el norte de Chile el clima árido y la existencia de cuencas cerradas (cuencas endorreicas), favorecen la formación de lagunas y salares. Las cuencas endorreicas y los salares que se forman en ellas son sistemas complejos y dinámicos donde el nivel freático se encuentra a centímetros o metros por debajo de la superficie del suelo (Marazuela *et al.*, 2019). Estos sistemas, debido a la condición de clima árido que caracteriza al norte de Chile, presentan escasas precipitaciones, no obstante, son sistemas de un importante almacenamiento de aguas subterráneas, las cuales permiten cubrir las necesidades y demandas de agua para consumo humano, agrícola, e industrial (e.g., minero). Las escasas precipitaciones en estos sistemas, en contraste a la alta demanda de agua para diferentes usos, originan un comportamiento dinámico que depende de las diferentes entradas de agua (precipitación, escorrentía superficial y recarga de aguas subterráneas) y de las salidas (descarga de aguas subterráneas, evaporación/evapotranspiración y extracciones antrópicas), entre otras propiedades (Uribe *et al.*, 2015).

Los salares en Chile son de gran relevancia económica, ya que estos son una fuente importante de minerales como el litio, boro, cloruro de sodio, potasio y magnesio (Munk *et al.*, 2016). De estos elementos, uno de los más importantes es el litio, el cual es esencial para fabricar baterías de teléfonos celulares y autos eléctricos (Vikström *et al.*, 2013). Estos metales se pueden encontrar en rocas y arcillas (Australia y China) o disueltos en aguas con una elevada salinidad (salmuera) almacenadas en los depósitos salinos de los salares (Chile, Argentina y Bolivia). Sernageomin señala que Chile cuenta con un potencial geológico privilegiado para la explotación del litio: 63 ambientes salinos que a su vez considera 45 salares y 18 lagunas salinas (Sernageomin, 2013). En Chile, estos metales se encuentran en la salmuera (una mezcla de agua y sales), por lo tanto, su obtención se efectúa mediante pozos de extracción de salmuera, donde la solución bombeada se transporta por canaletas a distintas pozas de evaporación solar para su mayor concentración y posterior procesamiento químico (Amphos 21, 2021).

Este proceso requiere del consumo de grandes cantidades de agua, lo que en una zona donde la recarga de aguas subterráneas es baja (debido a la escasez de precipitaciones), pone en riesgo la disponibilidad de agua para otras actividades que se desarrollan en la zona norte de Chile (ganadería, agricultura y el turismo). Existen también comunidades de pueblos originarios que habitan estas zonas y que deben ser consultados con antelación al inicio de las actividades extractivas. Además, la ley 19.253 del año 1993 reconoce los derechos de aguas ancestrales a las comunidades indígenas andinas (Art 64). Adicionalmente, en estos sistemas se generan ambientes donde habitan especies vulnerables de conservación (por ejemplo, flamencos), por lo que presentan una gran relevancia ambiental (Quintana, 2016).

En el norte de Chile existen aproximadamente 60 salares documentados (Valdivia, 2018), de los cuales el Salar de Atacama, ubicado en la cuenca del Salar de Atacama en la Región de Antofagasta, es el de mayor extensión (aproximadamente 3000 km²; Figura 1). El Salar de Atacama es una de las reservas de litio, potasio y boro más importante a nivel mundial, por lo cual existen distintos operadores, actualmente privados, que explotan y extraen salmuera y agua dulce desde la cuenca. Por otro lado, en la cuenca del Salar de Atacama existe una serie de ecosistemas que se desarrollan principalmente en los bordes del Salar (zona marginal), los cuales están sujetos a protección ambiental debido a su biodiversidad, relación al patrimonio cultural y como puntos de interés turístico (Amphos 21, 2021). De la superficie total de salares se considera que un porcentaje muy bajo es sometido a evaluación de impacto ambiental a pesar del delicado equilibrio hidrogeológico de los salares y solamente un 7,5% se encuentra bajo alguna figura de protección legal (Gobierno de Chile, 2023).

La Constitución de 1980 regula esta temática como una excepción al derecho de propiedad individual privada. Reconoce en este punto potestad regulatoria al Estado. Señala expresamente en el art 19 N° 24 inc. 10: “que la exploración, explotación o el beneficio de los yacimientos que no sean susceptibles de concesión serán ejecutados directamente por el Estado o por sus empresas”. El estatus jurídico del litio es una excepción en el sistema concesional minero chileno. La legislación, mediante el DL N° 2886 de 1979 (con las excepciones de CORFO en el Salar de Atacama y Codelco en Pedernales), lo reservó para el Estado, dejándolo fuera de las sustancias mineras susceptibles de concesión. En los mismos términos están consagrado en la ley N° 18.907 de 1982 y en el Código de Minería de 1983.

En 2023 el Estado de Chile presentó la primera “Estrategia Nacional del Litio” (Gobierno de Chile, 2023), en la cual se destaca la creación de una empresa nacional del litio, colaboración pública-privada para exploración, explotación y creación de valor agregado, uso de nuevas tecnologías para minimizar los impactos en los ecosistemas de los salares y participación de comunidades. Debido a la existencia de diferentes actores (sociales, culturales, económicos, etc.), ecosistemas y la intención del Estado de continuar con la exploración y explotación en la cuenca del Salar de Atacama resulta fundamental comprender el funcionamiento hidrogeológico que integre todas las componentes del sistema para poder asegurar un resguardo sustentable de la cuenca. Por esta razón, el objetivo de esta serie comunicacional es describir y dar a conocer el funcionamiento hidrogeológico y balance hídrico actual del Salar de Atacama, con el fin de entregar antecedentes que aporten a la discusión de políticas públicas en torno a la gestión hídrica de la cuenca.

RECURSOS HÍDRICOS DEL SALAR DE ATACAMA

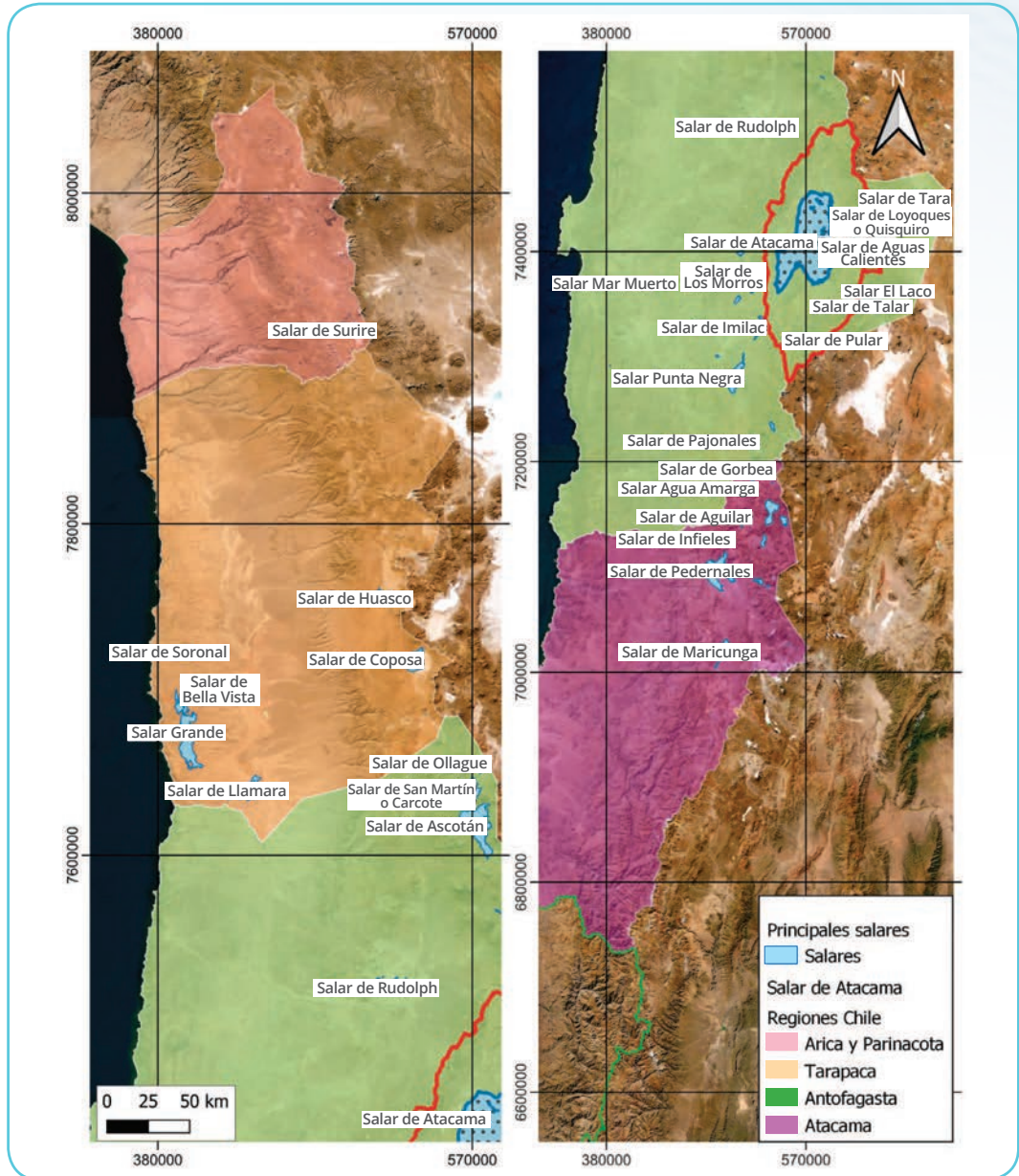


Figura 1. Principales salares de Chile. Los salares se ubican en la zona norte de Chile, en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama. **Fuente:** Elaboración propia.

Cuenca Endorreica

En simples palabras, son cuencas hidrográficas cerradas donde la red de drenaje (compuesta por múltiples cauces) no tiene conexión o salida a otra red fluvial o al océano, por lo que las aguas superficiales desembocan en lagos, lagunas o salares (Figura 2). Este tipo de cuencas se encuentran comúnmente en zonas áridas. Por ejemplo, en el Altiplano Andino de Chile, Argentina y Bolivia en América del Sur, en el sur de Australia y en el norte de África, entre otros lugares del mundo.

Los principales procesos hidrológicos que ocurren en este tipo de cuencas corresponden a la precipitación, infiltración (recarga), escorrentía subterránea, evaporación y escorrentía superficial. Este último proceso, se produce generalmente de forma esporádica, luego de la ocurrencia de precipitaciones significativas, que suelen tener lugar principalmente en la alta cordillera. Como las cuencas endorreicas se forman principalmente en zonas áridas donde la evaporación es mayor a la precipitación es muy común la existencia y formación de lagunas salinas o salares.

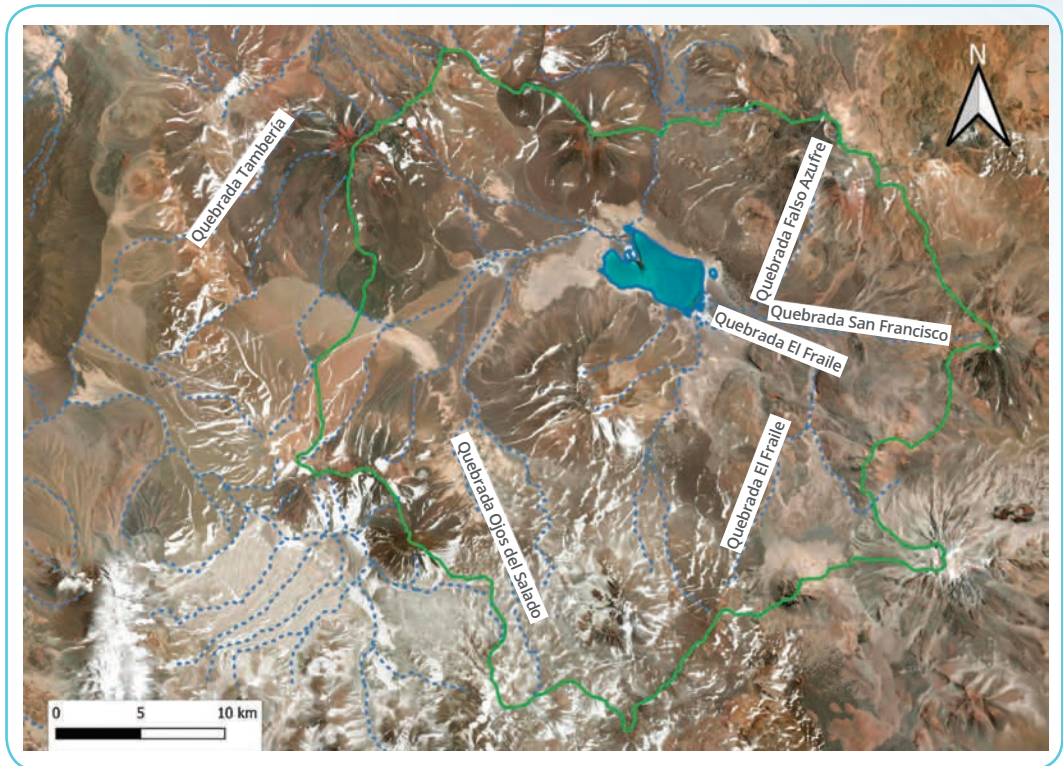


Figura 2. Ejemplo de delimitación de cuenca endorreica. La figura muestra la cuenca Laguna Verde, cuenca altoandina, ubicada en la Región de Atacama, Chile. **Fuente:** Elaboración propia.

¿Qué es un salar?

Un salar es un sistema que se forma en la depresión central de una cuenca endorreica como una laguna terminal extremadamente somera (de la Fuente & Niño, 2010), como resultado de la acumulación de agua asociada a la escorrentía superficial y afloramientos de aguas subterráneas. La formación de un salar se produce en climas áridos o desérticos donde las tasas de evaporación (principal proceso de descarga de aguas) superan a

las de precipitación y esorrentía (principales procesos de recarga), lo que ocasiona una evaporación completa o parcial del agua de la laguna terminal concentrando sales o evaporitas (de la Fuente *et al.*, 2021).

De acuerdo con Cervetto (2012), los salares están formados localmente por una fracción líquida correspondiente a salmueras, una fracción salina representada por la depositación de diferentes sales transportadas en solución a la cuenca, y una fracción sólida constituida por distintos niveles de arena, limo y arcilla.

De acuerdo con lo anterior, se pueden definir 3 áreas principales que forman un salar. En primer lugar, el borde del salar (también llamado zona marginal) formado por sedimentos arenosos y donde descargan las aguas superficiales y subterráneas, permitiendo la formación de vegas y humedales. En segundo lugar, la zona de playa formada por limos y arcillas con mayor concentración de sales. Finalmente, en los salares maduros, el depósito central o núcleo del salar que contiene la mayor concentración de sales y minerales. La Figura 3 muestra un ejemplo de concentraciones de sales que se forman en un salar.



Figura 3. Ejemplo de concentraciones de sal en los márgenes de una laguna formada en la cuenca del Salar de Atacama. Fotografía de una de las 7 lagunas del complejo de Lagunas de Baltinache en la Región de Atacama, Chile. **Fuente:** Fotografía tomada por Víctor Parra.

The image shows the cover of a report. The background is a photograph of a vast, flat, cracked salt flat under a blue sky with scattered white clouds. In the distance, a range of low mountains is visible. The title is overlaid on the upper half of the image. The text 'RECURSOS HÍDRICOS DEL' is in a smaller, white, sans-serif font. Below it, 'SALAR DE' is in a large, white, outlined sans-serif font. At the bottom of the title, 'ATACAMA' is in a large, solid white, sans-serif font. In the bottom left corner, there are three decorative, wavy teal lines.

RECURSOS HÍDRICOS DEL
SALAR DE
ATACAMA

02 CAPÍTULO

FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE UNA CUENCA ENDORREICA

Víctor Parra¹ y
José Luis Arumí^{2 y 3}

¹ Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.

² Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción.

³ Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM).

Las cuencas endorreicas (cerradas) presentan un funcionamiento hidrogeológico que involucra diferentes procesos, los cuales a su vez intervienen como componentes de entrada y salida en el balance hídrico de la cuenca (Figura 4).

En general, el principal componente de entrada en el balance hídrico de una cuenca endorreica corresponde a la recarga por precipitación. Algunas cuencas endorreicas pueden presentar conexión subterránea con cuencas vecinas, lo que origina una componente de entrada adicional asociada a flujos laterales subterráneos provenientes de las cuencas adyacentes (e.g., cuenca Laguna Verde que recibe aportes subterráneos desde cuenca Quebrada Las Amarillas y Piedra Pómez en la Región de Atacama, Informe SIT 398 DGA, 2016). Por otro lado, las componentes de salidas corresponden principalmente a la evaporación desde el suelo, evaporación desde lagunas y evapotranspiración desde áreas con vegetación.

La formación de las lagunas y salares en cuencas cerradas es normalmente el resultado de la acumulación de aguas superficiales que llegan a la depresión central de la cuenca, junto con afloramientos de agua subterránea en dicha zona. Por lo anterior, los afloramientos de aguas subterráneas son un proceso importante en el funcionamiento hidrogeológico en estas cuencas.

Recarga por precipitación

Corresponde a la fracción de precipitación que se infiltra en zonas de alta permeabilidad. La recarga por precipitación se compone de la recarga directa al acuífero y la recarga del frente de montaña (RFM).

La recarga directa corresponde a la precipitación que se infiltra en zonas de rellenos sedimentarios. Esta recarga se ve favorecida por eventos de lluvia de gran envergadura que son capaces de saturar el suelo y conducir el agua hasta el acuífero por el suelo no saturado (DGA-DIHA PUC, 2009). Por otro lado, la recarga del frente de montaña (RFM) corresponde a los aportes del bloque montañoso en la recarga de los acuíferos sedimentarios adyacentes (Wilson y Guan, 2004).

La RFM se divide en dos componentes: el flujo subterráneo desde la montaña adyacente (recarga del bloque de montaña) y la infiltración en cauces cercanos al frente de montaña. Con esta definición, la RFM incluye una entrada de agua al acuífero por la zona saturada y por la zona no saturada. La entrada a la zona saturada ocurre a través de fracturas, fallas y cavidades que conectan el agua subterránea del bloque montañoso con el acuífero sedimentario. Por otro lado, la entrada por la zona no saturada corresponde a los escurrimientos superficiales y subsuperficiales generados a la salida del frente de montaña que infiltran al llegar al relleno sedimentario. Los dos componentes de la RFM

pueden ocurrir de forma enfocada (ríos y fallas principales) como de forma difusa (quebradas y fallas menores).

Evaporación desde el suelo

Corresponde a la evaporación que se produce desde el suelo, donde el nivel freático se ubica cercano a la superficie del terreno. Esta depende de la conexión hidráulica entre la superficie del suelo y la zona saturada, por lo que la tasa de evaporación depende de la profundidad a la cual se encuentra el nivel freático. La tasa de evaporación disminuye en profundidad hasta un punto donde se hace nula, la cual se denomina profundidad de extinción (Muñoz-Pardo *et al.*, 2004).

Evaporación desde lagunas

La evaporación desde lagunas corresponde a la evaporación de agua superficial, la que ocurre principalmente desde la lámina libre de lagunas y/o lagunillas existentes en la cuenca, donde el agua se transforma a vapor y es liberada a la atmósfera. Esta depende de factores meteorológicos como la radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura.

Evapotranspiración en áreas con vegetación

La evapotranspiración corresponde al proceso conjunto de evaporación y transpiración de la vegetación. La vegetación requiere de aguas para poder crecer y subsistir, no obstante, la vegetación retiene solo una parte del agua que consume desde el suelo por medio de sus raíces. El agua no retenida es transpirada hacia la atmósfera desde sus hojas. De acuerdo con lo anterior,

cuando el suelo está cubierto de vegetación, es muy difícil diferenciar entre evaporación y transpiración, por lo que en suelos cubiertos por vegetación se habla de evapotranspiración.

A continuación, se resumen las componentes de entrada y salida del balance hídrico de una cuenca endorreica:

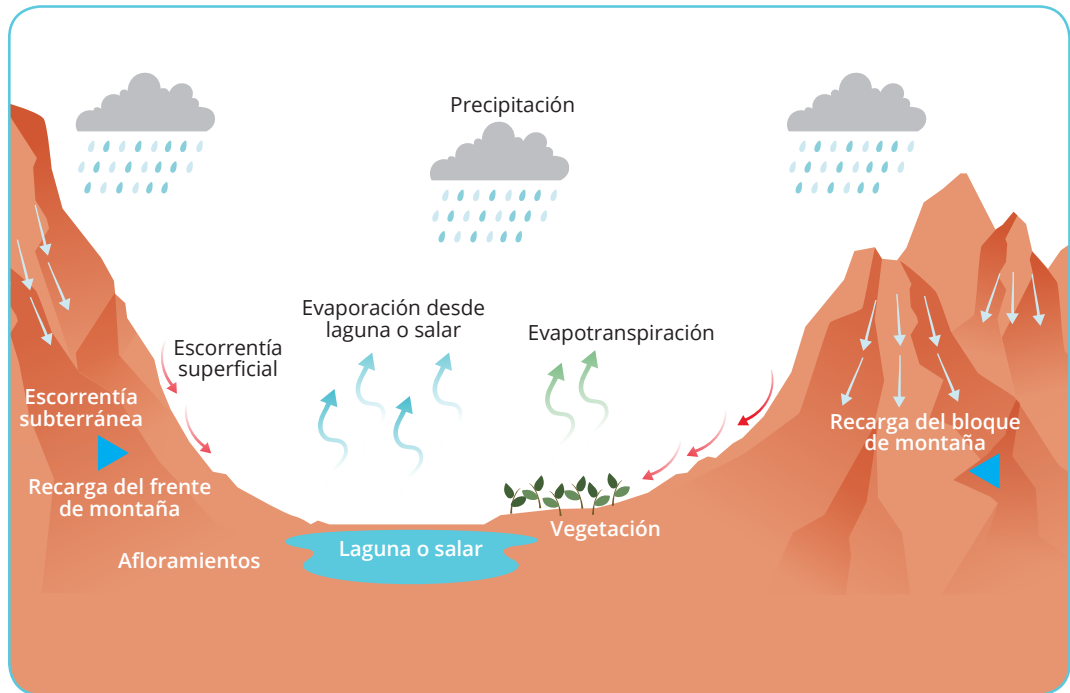


Figura 4. Esquema conceptual del funcionamiento hidrogeológico de una cuenca endorreica.

Fuente: Elaboración propia.

RECURSOS HÍDRICOS DEL
**SALAR DE
ATACAMA**





RECURSOS HÍDRICOS DEL
SALAR DE
ATACAMA

03 CAPÍTULO

CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA

Víctor Parra¹ y
Fernanda Álvarez-Amado^{2 y 3}

¹ Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.

² Facultad de Ciencias Químicas,
Universidad de Concepción.

³ Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM).

La cuenca del Salar de Atacama corresponde a una cuenca endorreica que se ubica en la Cordillera de los Andes, aproximadamente a 150 km al sudeste de la ciudad de Calama, Chile. La cuenca tiene una extensión de aproximadamente 17.000 km² y se caracteriza por tener el Salar de Atacama en la parte más baja, el cual es el de mayor extensión de Chile y el tercero en el mundo.

La cuenca se caracteriza por un clima extremadamente seco y una precipitación anual baja. Sin embargo, a pesar de estas condiciones adversas, cuenta con una serie de fuentes de agua que son esenciales para los ecosistemas locales y las actividades humanas en la zona.

La red hidrográfica de la cuenca del Salar de Atacama se conforma principalmente por una serie de cauces en el sector norte y oriente (ICASS, 2014), los cuales forman un total de 17 subcuencas aportantes al salar (SGA, 2015; Amphos 21, 2021). En el sector norte destacan el río San Pedro y Vilama, los cuales

son los principales cursos superficiales de la cuenca. Estos presentan escurrimiento permanente con caudales promedios de aproximadamente $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ (río Vilama) y $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (río San Pedro). Estos ríos, junto a numerosas quebradas ubicadas en la zona oriental, alimentan el Salar de Atacama ubicado en el centro de la cuenca. De las quebradas que existen, algunas presentan escurrimiento esporádico (solo presentando caudal cuando existen precipitaciones), mientras que otras quebradas presentan escurrimiento permanente, debido a que existen afloramientos de aguas subterráneas en ellas (Figura 5).

RECURSOS HÍDRICOS DEL SALAR DE ATACAMA

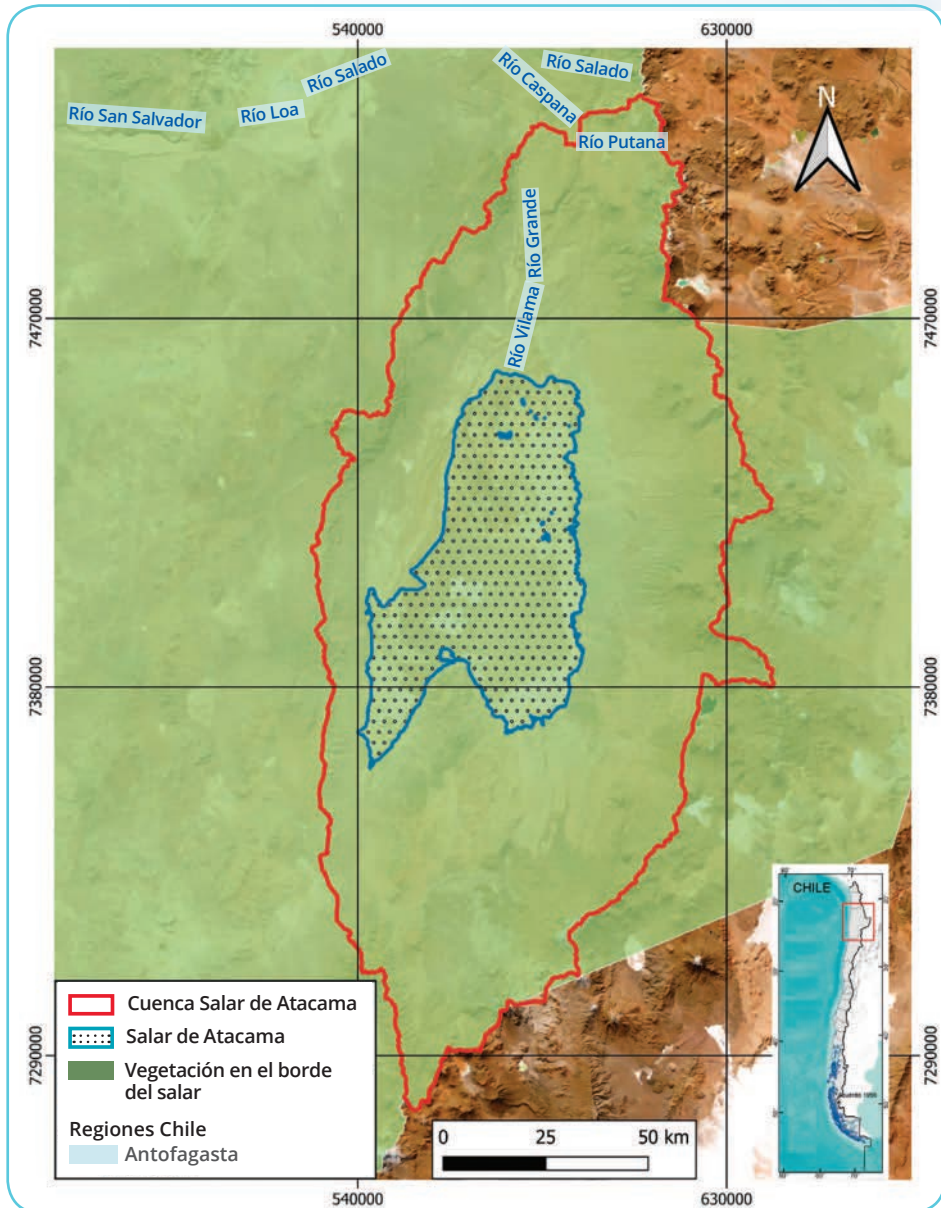


Figura 5. Ubicación de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia.

La escorrentía superficial y afloramientos de aguas subterráneas que llegan al centro de la cuenca han formado en los bordes del salar numerosos sistemas lacustres que actúan como hábitats vitales para diferentes especies, por ejemplo, aves migratorias y flamencos andinos.

Características hidrológicas del Salar de Atacama

La cuenca del Salar de Atacama presenta características hidrológicas que están asociadas a una precipitación media anual extremadamente baja, una alta tasa de evaporación y la presencia de acuíferos que aportan aguas subterráneas. Estas características limitan la disponibilidad de agua superficial, lo que afecta directamente los recursos hídricos en la cuenca.

La precipitación de la zona alta, asociada al Invierno Altiplánico, es superior a 100 mm/año, mientras que en el centro y zona oeste del salar la precipitación media es inferior a 25 mm/año. De acuerdo con Amphos 21 (2021) la precipitación en la cuenca presenta diferentes características como: 1) tiene un origen amazónico, 2) las mayores precipitaciones ocurren durante el verano, 3) presenta un régimen cíclico asociado al fenómeno del niño-niña y 4) la precipitación es del tipo convectiva. Estas características causan que la precipitación en la cuenca no sea uniforme, generando un incremento no lineal de la precipitación con la altura (Figura 6) y según dirección noreste (ladera de la Cordillera de los Andes).

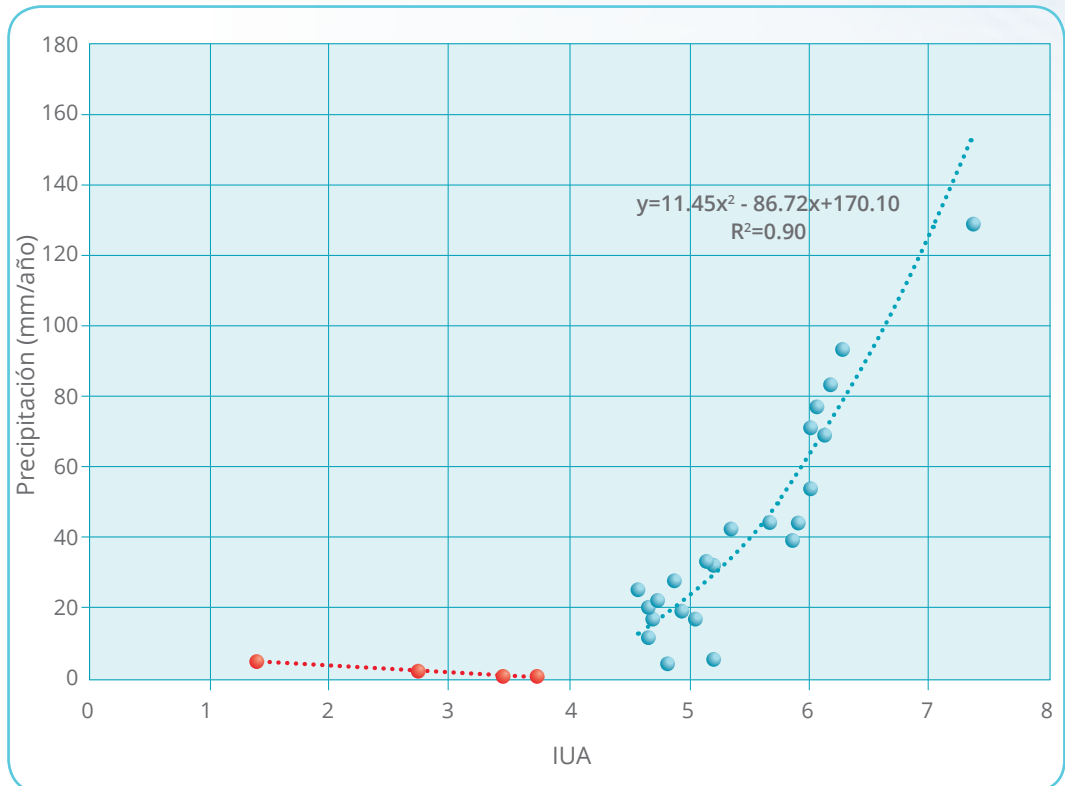


Figura 6. Relación de índice de ubicación y altura (IUA) contra la precipitación media anual de estaciones dentro (● color azul) y fuera (● color rojo) del Salar de Atacama.

Fuente: Figura obtenida de "Informe Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico" desarrollado por Amphos 21, (2021).

Por otro lado, la cuenca del Salar de Atacama presenta una alta tasa de evaporación. Las altas temperaturas de la zona causan una importante evaporación de las aguas superficiales de ríos y de las aguas que llegan al salar. Producto de la evaporación se forman concentraciones de sales y minerales en el Salar de Atacama, principalmente, en forma de costras de sal y salmueras. Las costras contienen depósitos de litio, potasio, boro y otros

minerales valiosos, lo que convierte al salar en una importante fuente de recursos minerales. La evaporación también influye en la disponibilidad de agua dulce en la cuenca, ya que reduce la cantidad de agua superficial en los ríos y la cantidad de agua que se infiltra en los acuíferos subterráneos.

Características hidrogeológicas de la cuenca del Salar de Atacama

Las características hidrogeológicas de la cuenca del Salar de Atacama tienen una importancia fundamental para los recursos hídricos de la zona. Las formaciones geológicas existentes en la cuenca junto con la infiltración de la precipitación en la parte alta y baja de la cuenca favorecen la formación de acuíferos que almacenan importantes recursos de aguas subterráneas (agua dulce y salina), debido a la existencia de gradientes hidráulicos que mueven las aguas infiltradas desde las partes altas a bajas de la cuenca.

Amphos 21 (2021) realizó una zonificación que detalla las zonas hidrogeológicas de la cuenca del Salar de Atacama, que contribuyen al acuífero principal de la cuenca. De forma simplificada, a partir de esta zonificación, se pueden distinguir 5 grandes sectores:

- i) Sector Cordillera
- ii) Sector Norte
- iii) Sector Este
- iv) Sector Sur
- v) Núcleo del salar

RECURSOS HÍDRICOS DEL SALAR DE ATACAMA

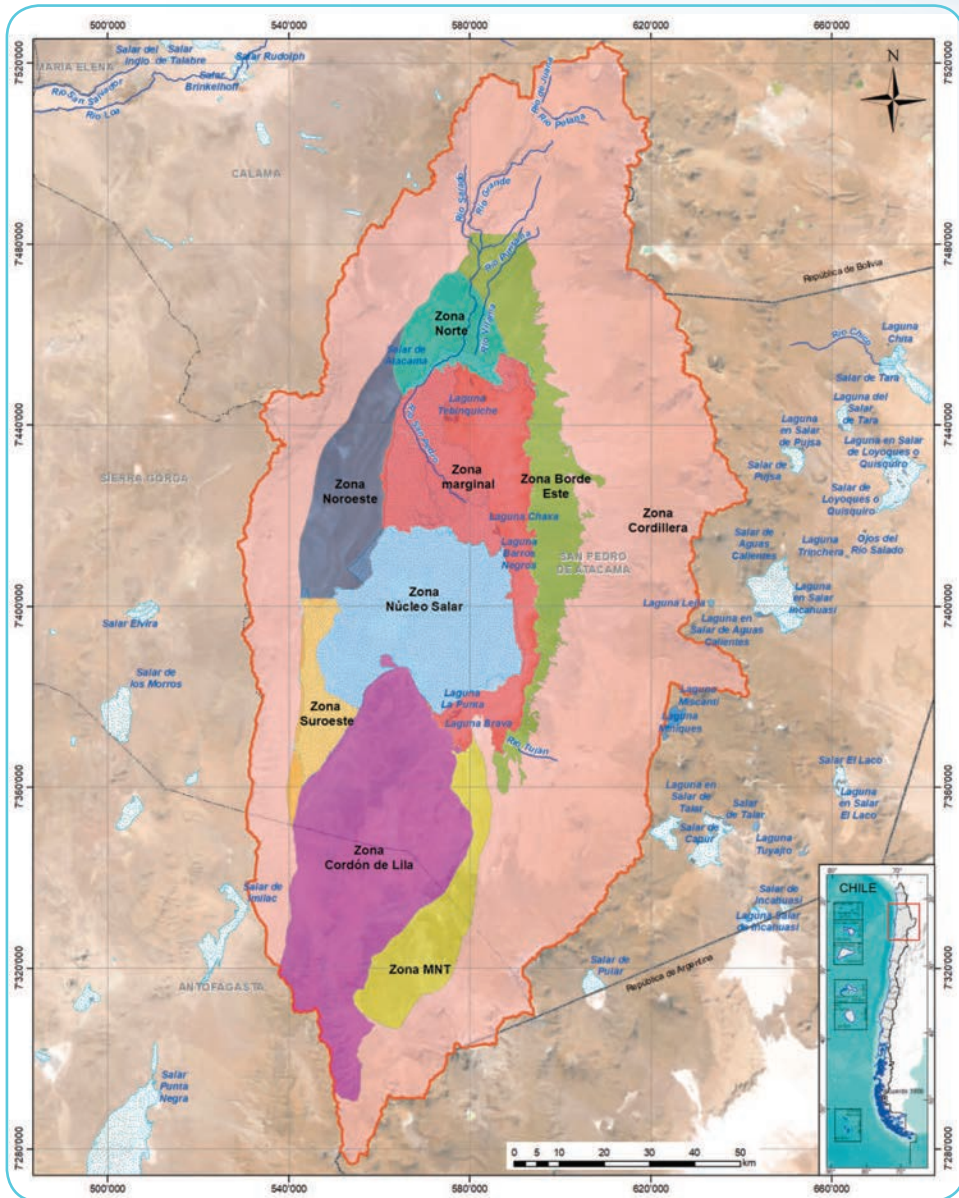


Figura 7. Zonificación de la cuenca del Salar de Atacama elaborada por Amphos 21.

Fuente: Figura obtenida de “Informe Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico” desarrollado por Amphos 21, (2021).

SECTOR CORDILLERA

Este sector se compone de todo el manto montañoso que delimita la cuenca, caracterizado por una secuencia de rocas volcánicas, principalmente ignimbritas, y volcanosedimentarias. También se encuentran rocas intrusivas. Estas unidades alcanzan espesores entre 25 a 2500 m y conductividades hidráulicas menores a 1 m/día.

SECTOR NORTE

En el sector Norte de la cuenca se encuentran diferentes unidades hidrogeológicas que componen diferentes acuíferos. La litología que conforman las unidades hidrogeológicas del sector Norte (entre el núcleo del salar y el sector Cordillera) corresponden a ignimbritas, arcillas, limos y depósitos aluviales (gravas y arenas con intercalaciones de arenas, limos y arcillas). Esta zona presenta rangos de permeabilidades hidráulicas entre 10^{-4} a 20 m/día.

Por otro lado, la zona marginal del sector Norte está formado principalmente por costras salinas de sulfatos, costra salina de cloruros y sulfatos con limos. Estos depósitos no tienen un espesor definido y la conductividad hidráulica de la zona marginal norte puede variar entre 0,0001 a 3000 m/día.

SECTOR SUR

De acuerdo con ICASS (2014) en este sector se ponen en contacto dos acuíferos, el acuífero del núcleo y el acuífero salobre Monturaqui- Negrillar. La diferencia entre las densidades de estos acuíferos define una zona de interfaz entre ellos, lugar donde aflora el agua salobre formando lagunas. En el borde sur predominan depósitos aluviales, gravas y arenas con intercalaciones de arenas, limos y arcillas.

SECTOR ESTE

El sector Este se encuentra formado principalmente por depósitos aluviales (gravas y arenas con intercalaciones de arenas, limos y arcillas), mientras que la zona marginal está formada por costras salinas de sulfatos, costra salina de cloruros y sulfatos con limos. Esta zona presenta rangos de conductividades hidráulicas entre 1 y 200 m/día, mientras que en la zona marginal del sector Este la conductividad hidráulica puede llegar hasta los 3.000 m/día. A partir de los análisis hidrogeológicos se ha identificado posibles afloramientos desde el núcleo del salar hacia la zona marginal entre el sector sur y este (subsector Sureste).

SECTOR OESTE

El sector Oeste corresponde al sector occidental del núcleo del salar y presenta una extensión menor que los otros sectores. Se encuentra formado principalmente por halita con una porosidad de aproximadamente 6%. Por otro lado, presenta un amplio rango de conductividad hidráulica con valores entre 0,1 y 500 m/día.

NÚCLEO DEL SALAR

El núcleo del salar de la cuenca del Salar de Atacama es donde se encuentra la mayor concentración de sales y las salmueras más concentradas en profundidad. Esta área se caracteriza por la presencia del “acuífero del núcleo”, que contiene una alta concentración de sales minerales y litio. Este acuífero se desarrolla principalmente en el espacio entre los cristales de halita del Núcleo y presenta permeabilidades hidráulicas entre 0,01-10 m/día.

En general, el Salar de Atacama presenta un sistema hidrogeológico complejo, con la presencia de acuíferos de agua salobre y salmuera. La explotación de estos recursos hídricos subterráneos, especialmente la salmuera rica en litio ha sido un foco importante de la industria minera en la zona. Sin embargo, la sobreexplotación y el manejo inadecuado de los recursos hídricos plantean desafíos significativos en términos de sustentabilidad y protección del medio ambiente en la cuenca.

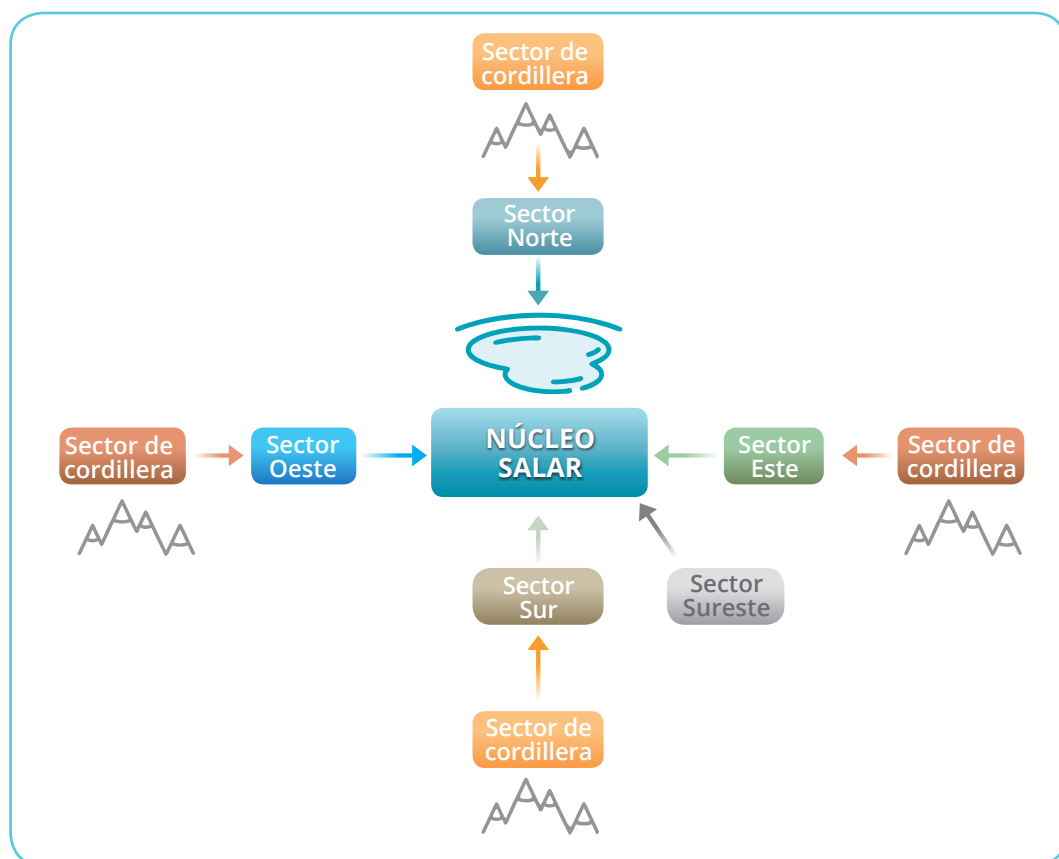


Figura 8. Esquema conceptual simplificado de las áreas aportantes al Salar de Atacama.
Fuente: Basado en zonificación realizada por Amphos 21, (2021).

Recursos hídricos superficiales de la cuenca

Como se ha descrito previamente, en la cuenca no existen ríos o cauces con caudales superficiales significativos. Esto se debe, principalmente, a las bajas precipitaciones que ocurren en la zona, las cuales se evaporan rápidamente debido a las altas temperaturas y a la baja humedad ambiental, lo que resulta en una limitada disponibilidad de agua superficial en la cuenca.

El caudal de los ríos principales refleja las condiciones hidrológicas de la cuenca. Los ríos San Pedro y Canal Vilama, cuya ubicación se presenta en la Figura 5, muestran caudales relativamente constantes durante el año, lo que indicaría que existen aportes de aguas subterráneas que mantienen un caudal base relativamente constante en los cursos de aguas superficiales (Figura 9).

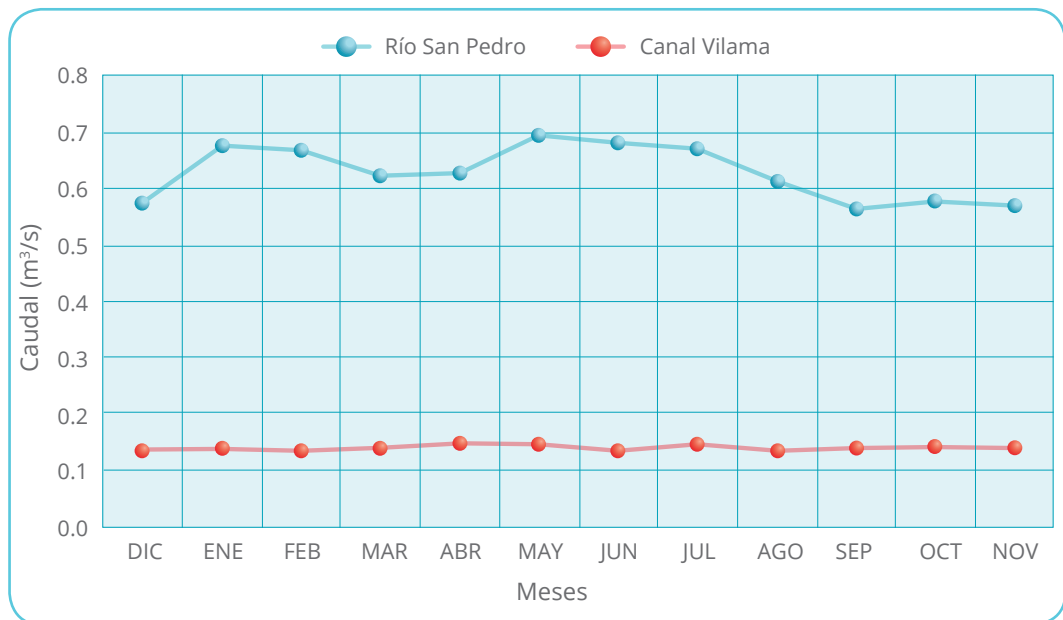


Figura 9. Curva de variación estacional de caudales asociada a una probabilidad de excedencia del 50 %. **Fuente:** Basado en Amphos 21, (2021).

Recursos hídricos subterráneos de la cuenca

La precipitación que no se evapora en la cuenca escurre superficialmente, y el resto se infiltra en el bloque de montaña y centro de la cuenca. El agua infiltrada se mueve sub-superficialmente o subterráneamente hacia el centro de la cuenca. Esta infiltración recarga los acuíferos, permitiendo almacenar importantes volúmenes de aguas subterráneas. Estos acuíferos son esenciales para la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca, ya que complementan la limitada disponibilidad de recurso hídrico superficial para el consumo humano, la agricultura y las actividades mineras.

Los acuíferos de la cuenca del Salar de Atacama se encuentran principalmente en estratos profundos de la cuenca y del salar. El agua subterránea en los acuíferos se encuentra dulce en los bordes del salar, mientras que en el centro (núcleo) del salar se encuentra en forma de salmuera.

RECURSOS HÍDRICOS DEL
**SALAR DE
ATACAMA**





RECURSOS HÍDRICOS DEL
**SALAR DE
ATACAMA**

04 CAPÍTULO

CHILE Y EL DEBATE POR UNA REFORMA A LA REGULACIÓN DE LAS AGUAS Y SU IMPACTO EN LAS ACTIVIDADES PRODUCTIVAS (MINERÍA)

Víctor Parra¹ y Amaya Alvez^{2 y 3}

¹ Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción.

² Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales, Universidad de Concepción.

³ Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM).

El modelo institucional en materia de agua en Chile presenta como características la rigidez en la aplicación de reglas, la centralización en la toma de decisiones, y un bajo nivel de participación local (Sánchez *et al.*, 2018). Estos problemas y la gobernanza de las aguas en Chile hoy profundizan desigualdades en el acceso, e impiden el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la efectiva vigencia de los derechos humanos de habitantes en los sitios de impacto socioambiental (Alvez *et al.*, 2021).

Recientemente ha habido importantes modificaciones legislativas que han abordado aspectos relevantes de la regulación del agua. Así por ejemplo la ley 21.435 del año 2022 modifica el Código de Aguas y busca asegurar el derecho humano al agua estableciendo prioridades de usos: consumo humano, usos domésticos de subsistencia, saneamiento y la preservación ecosistémica. Esto evidentemente podría traer nuevos desafíos a la utilización de los recursos hídricos en la zona.

Destaca, además, la adhesión de Chile al Acuerdo de Escazú el año 2022 que tiene efectos en materia de acceso a la información, la participación ciudadana y el acceso a la justicia en materias ambientales. Se ha establecido la necesidad de planes estratégicos de recursos hídricos (PERH) por cuenca y la existencia de Comités Regionales. En estos mismos PERH se establecen estándares de participación en la toma de decisiones ambientales.

Importancia de los recursos hídricos en la cuenca

Considerando que la mayoría de los ríos o quebradas que drenan en la cuenca del Salar de Atacama son esporádicos o presentan caudales continuos bajos, las aguas subterráneas son la principal fuente de recursos hídricos en la cuenca. Alonso y Risacher (1996) mencionan que los aportes de aguas subterráneas provienen principalmente desde la vertiente andina de la cuenca.

Los recursos hídricos son fundamentales para sustentar diferentes actividades en la cuenca (Figura 10). A continuación, se mencionan algunas de las principales actividades que requieren de aguas subterráneas para su desarrollo en el Salar de Atacama:

- ▶ **Agua potable:** Las aguas subterráneas del salar son una fuente importante de agua potable para las comunidades locales. El acceso a agua dulce de calidad es esencial para el consumo humano y el desarrollo de la vida cotidiana en la región.
- ▶ **Agricultura y ganadería:** Las aguas subterráneas del Salar de Atacama son utilizadas para el riego de cultivos en áreas donde el agua superficial es escasa o inexistente. Además, el recurso hídrico se usa para reproducción de animales domésticos con fines de producción para el consumo humano. La disponibilidad de agua subterránea permite la agricultura en la cuenca, contribuyendo a la seguridad alimentaria y al desarrollo económico local.

- ▶ **Minería:** La minería es una actividad económica importante en el Salar de Atacama, especialmente para la extracción de litio y otros minerales. Las aguas subterráneas proveen agua para los procesos industriales y la operación de las instalaciones mineras, lo que es esencial para garantizar la sostenibilidad y viabilidad de esta industria.
- ▶ **Biodiversidad:** Las aguas subterráneas del Salar de Atacama influyen en la biodiversidad general de la región. Las aguas subterráneas contribuyen a la existencia de algunos ecosistemas acuáticos locales, como lagunas o humedales. Proporcionan hábitats para diversas especies, incluidas plantas, animales y microorganismos, contribuyendo a la preservación de la diversidad biológica en un entorno desafiante.

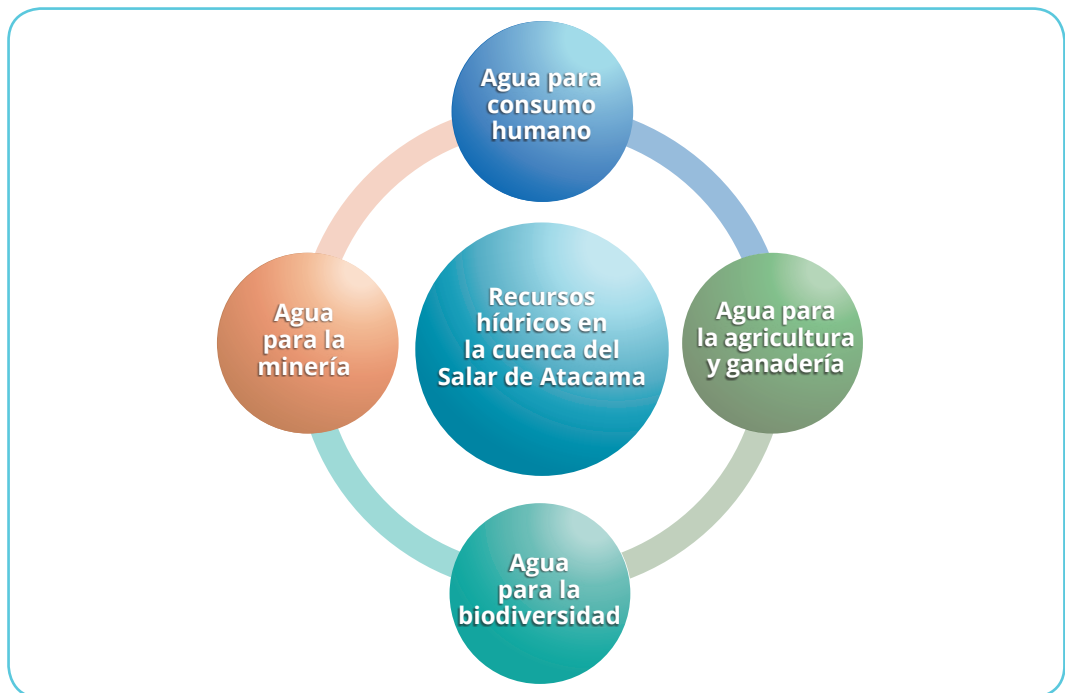


Figura 10. Principales actividades en la cuenca del Salar de Atacama que requieren de agua en cantidad y calidad. **Fuente:** Elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, la gestión adecuada de las aguas subterráneas del Salar de Atacama es fundamental para asegurar su disponibilidad a largo plazo. Dado que la región donde se ubica la cuenca enfrenta escasez de agua y sobreexplotación de los recursos hídricos, es esencial implementar medidas de conservación, monitoreo y regulación para preservar la calidad y cantidad de estos.

La principal actividad relacionada con los recursos hídricos subterráneos en el Salar de Atacama es la extracción de agua para la minería del litio, la cual requiere de grandes cantidades de agua para su proceso productivo. En este tipo de minería se explotan dos acuíferos distintos: el de salmuera y el de agua dulce, los cuales pueden llegar a estar físicamente conectados. Por esta razón, es importante tener en cuenta que la extracción de agua subterránea en el Salar de Atacama plantea preocupaciones sobre la sustentabilidad y el impacto ambiental, ya que puede afectar el equilibrio hídrico de la cuenca. Si bien el análisis del ciclo de vida ambiental de la minería de salmuera de litio ha cuantificado el consumo de energía y las emisiones de carbono, ha pasado por alto los impactos en el ciclo del agua.

Derechos de agua y extracciones de aguas

En la cuenca del Salar de Atacama existen derechos constituidos de agua superficiales y subterráneos (Figura 11). De acuerdo con la información publicada por la DGA y analizada recientemente por el estudio elaborado por Amphos 21 (2021), en la cuenca se tienen derechos de aprovechamientos de aguas subterráneas que suma 3.873 l/s, mientras que los derechos de aguas superficiales ascienden a 2.114,8 l/s. Los titulares de los derechos subterráneos son principalmente empresas mineras que operan en el salar, no obstante, existen derechos de aguas asociados a otros sectores (comunidades,

abastecimiento, turismo, etc.) que poseen aproximadamente 150 l/s. Por otro lado, los titulares de los derechos superficiales son principalmente comunidades indígenas y particulares de la cuenca.

Los derechos de aguas subterráneas descritos corresponden a agua dulce (o dulce-salobre), donde la mayor cantidad de aguas subterráneas se extrae desde las proximidades del núcleo del salar (bordes y zona marginal). Aunque los operadores de la cuenca poseen caudales asociados a derechos de aprovechamiento, las extracciones netas están limitadas a aprobación ambiental para que las extracciones no afecten de manera significativa el almacenamiento y el ecosistema.

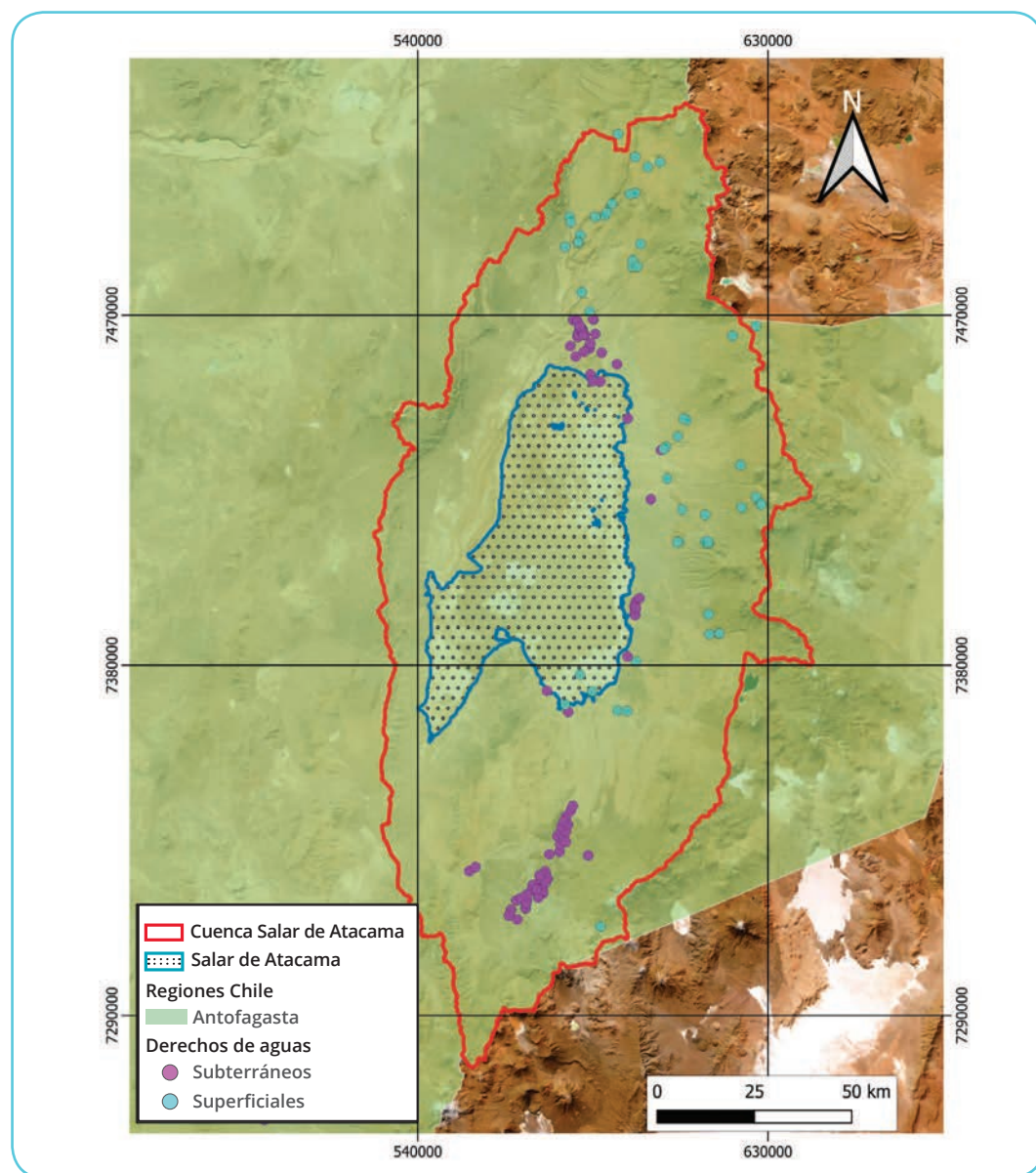


Figura 11. Derechos de aguas superficiales y subterráneas. **Fuente:** Elaboración propia a partir de registros de la DGA.

De acuerdo con la aprobación ambiental, las extracciones autorizadas por los operadores ascienden aproximadamente a 2.150,9 l/s de un total de 3.025,15 derechos de agua otorgados (RCA N°1/1997, Amphos 21, 2021). A raíz de esto, el consumo de agua dulce alcanza un factor de uso de aproximadamente un 41% respecto a los derechos de aguas subterráneas autorizados.

Por otro lado, en el núcleo del Salar de Atacama existen extracciones de salmuera, de las cuales no se tiene el dato de la cantidad de derechos de agua autorizados. Las extracciones de salmuera han aumentado con el tiempo desde aproximadamente 50 l/s en 1983 hasta 2.042 l/s en el 2020 (Amphos 21, 2021). De acuerdo con CSIC (2017) se espera que las extracciones aumenten aproximadamente 100 l/s entre 2026 y 2032.

Tabla 1. Extracciones de agua dulce aprobadas ambientalmente respecto a derechos de aguas autorizados.

TIPO DE CAUDAL	AGUA DULCE (l/s)
Con aprobación ambiental	2.150,9
Con derecho de agua otorgado	3.025,15
Factor de uso	41%

Fuente: Elaboración a partir de datos reportados por Amphos 21, (2021).



RECURSOS HÍDRICOS DEL

SALAR DE

ATACAMA

05 CAPÍTULO

EFFECTO DE LAS EXTRACCIONES SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA

Víctor Parra¹, José Luis Arumí^{2y4}
y Amaya Alvez^{3y4}

¹ Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.

² Facultad de Ingeniería,
Universidad de Concepción.

³ Facultad de Ciencias Jurídicas
y Sociales,
Universidad de Concepción.

⁴ Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM).

Las extracciones subterráneas de agua dulce y salmuera, realizadas principalmente por la industria minera, han causado conos de depresión debido al bombeo de aguas subterráneas. De acuerdo con lo anterior, en el reciente estudio realizado por Amphos 21 “Modelo Hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Atacama. Informe Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico” se identificó un descenso en el sector sur (sector Monturaqui) de la cuenca, donde se extrae agua dulce, de aproximadamente 32 m desde 1997 a 2019. Por otro lado, en el borde Este, donde se extrae agua dulce-salobre, se identificó un descenso de aproximadamente 1 m entre 2008 y 2019. Respecto a las extracciones de salmuera, se identificaron descensos de 9,8 m entre 1996 y 2019 (en la zona denominada Cordón de Lila) y de 4 m entre el 2001 y 2019 (al este del Cordón de Lila).

Los sistemas lagunares existentes en la zona marginal del salar no se han visto afectados por las extracciones de aguas subterráneas (agua dulce y

salmuera), ya que han mostrado variaciones estacionales naturales de acuerdo con los análisis de superficies lagunares.

Balance hídrico del Salar de Atacama

El balance hídrico actual de la cuenca del Salar de Atacama se compone de las entradas y salidas de agua del sistema hidrogeológico o acuífero. Recientemente se estableció el balance hídrico en régimen de explotación (entre 2000 y 2019) en el “Modelo Hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Atacama. Informe Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico” desarrollado por Amphos 21 en el año 2021.

El balance hídrico se basó en el principio de conservación de masa que establece, en palabras simples, que “la diferencia entre las entradas y salidas de un sistema son iguales al cambio en el volumen almacenado”. En este caso, el sistema es el acuífero de la cuenca del Salar de Atacama, mientras que las entradas y salidas del sistema que se identificaron en el citado estudio se describen a continuación.

ENTRADAS AL SISTEMA

- ▶ **Recarga por precipitación:** En este caso se considera la recarga por precipitación directa (sobre suelo permeable), recarga por precipitación indirecta o lateral (bloque de montaña) y la recarga del frente de montaña (infiltración de escorrentía por medio de cauces). La suma de la recarga que se estimó en 2021 se encuentra entre 5.200 l/s y 7.025 l/s.

SALIDAS DEL SISTEMA

- ▶ **Evaporación en el Salar:** Esta corresponde a la evaporación desde la lámina libre de agua y desde el suelo. Amphos 21 (2021) estimó un rango de 3.200 a 4.575 l/s para el escenario de régimen de explotación.
- ▶ **Evapotranspiración en áreas con vegetación:** Corresponde a la evapotranspiración que ocurre en las áreas con vegetación en la cuenca Salar de Atacama (vegas y humedales). Esta componente varía entre 1.675 l/s y 2.050 l/s.
- ▶ **Extracciones antrópicas:** Corresponde a las extracciones de aguas subterráneas que se están efectuando en el salar desde el año 2000 al 2019. Estas son extracciones mineras de agua dulce (1.450 l/s y 1.625 l/s) y salmuera (1.050 l/s y 1.175 l/s).

El balance hídrico durante el período de explotación del Salar de Atacama, entre los años 2000 y 2019, muestra que las salidas de aguas subterráneas superan a las entradas, generando una variación en el almacenamiento del acuífero. En este contexto, las extracciones antrópicas es uno de los factores principales que contribuye a las salidas en el sistema acuífero (~32% de las salidas). Es importante destacar que este desequilibrio en el balance hídrico puede tener implicaciones significativas para la sostenibilidad del recurso hídrico en la región, manifestando la necesidad de una gestión hídrica del sistema acuífero mediante acuerdos entre todos los actores y usuarios de los recursos hídricos del Salar de Atacama.

Tabla 2. Balance hídrico en el Salar de Atacama en régimen de explotación en el periodo 2000 a 2019.

ENTRADAS (l/s)		SALIDAS (l/s)	
Recarga	5.200 a 7.025	Evaporación en el salar	3.200 a 4.575
		Evapotranspiración en áreas de vegetación	1.675 a 2.050
		Extracciones antrópicas	2.550 a 2.850
Total entradas	5.200 a 7.025	Total salidas	7.425 a 9.475

Fuente: Elaboración a partir de datos balance hídrico realizado por Amphos 21, (2021).



Figura 12. Esquema conceptual del balance hídrico del acuífero en régimen de explotación (periodo 2000 a 2019). La flecha azul indica la entrada al sistema, mientras que las flechas verdes indican las salidas. **Fuente:** Adaptado de Amphos 21, (2021).

Sostenibilidad social y territorial: el involucramiento de las comunidades

Existe un desafío de diálogo a través de consultas previas con los habitantes de las comunidades impactadas. Este diálogo se debe enmarcar en acuerdos internacionales ratificados y vigentes en Chile (Convenio 169 OIT para Pueblos Indígenas y Tribales, Acuerdo de Escazú, entre otros). Normalmente estos diálogos son propuestos y supervisados por organismos públicos: CONADI, Ministerio de Desarrollo Social, Ministerio de Medioambiente y DGA, entre otros. Existe también un actuar privado entre empresas mineras y grupos de interés.

Sin embargo, hay un creciente número de acuerdos privados que se obtienen entre empresas y comunidades indígenas con antelación a la evaluación ambiental estatal, los cuales quedan amparados por una perspectiva contractual en el ámbito de la libre determinación de los pueblos indígenas (Barros y Schönsteiner, 2014). En la práctica, se ha traducido principalmente en otorgamiento de beneficios económicos, acuerdos que tienen asociadas, en ocasiones, cláusulas de confidencialidad.

El problema de estos acuerdos es su falta de regulación. Así, por ejemplo, en algunas evaluaciones ambientales como la realizada en “Salares Norte” en que una vez iniciado el proceso de consulta indígena la comunidad afectada comunicó su intención de no participar por mantener una relación directa con la empresa y que se habrían adoptado medidas ambientales voluntarias ante impactos considerados por ellos menores (SEA, Región de Atacama, Res. Exenta N°45/2019 de fecha 4 de abril de 2019). Parte del problema es reducir al ámbito privado temáticas públicas, que podrían ser claramente vistas como obligaciones medioambientales del Estado de Chile, así como el cumplimiento de estándares nacionales e internacionales de participación indígena y ciudadana.

Desafíos y oportunidades en la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Salar de Atacama

De acuerdo con la disponibilidad hídrica existente en la cuenca del Salar de Atacama, la gestión de los recursos hídricos enfrenta varios desafíos importantes. Las escasas precipitaciones de la cuenca condicionan la disponibilidad de recursos superficiales y la recarga a los acuíferos. Esta situación, junto con la explotación de aguas subterráneas por parte de la industria minera y otros usuarios, se ha manifestado en una disminución importante de los niveles de aguas subterráneas en los últimos 25 años.

Este impacto en las reservas subterráneas puede intensificarse a largo plazo por el posible aumento de la demanda por los recursos hídricos, debido al probable ingreso de nuevos operadores que exploten litio u otro mineral (como Codelco) en el salar. Por ejemplo, el proceso de extracción de litio requiere de grandes cantidades de agua, por lo que una sobreexplotación podría aumentar los conflictos con las comunidades como también repercutir en impactos negativos para el ecosistema. Por esta razón, es crucial implementar medidas de monitoreo y regulación efectivas para evitar la extracción excesiva.

A pesar de los desafíos, existen oportunidades para abordar la gestión de los recursos hídricos del Salar de Atacama. Las recientes modificaciones legales y la implementación de políticas de gestión integrada del agua, que involucren a todas las partes interesadas, puede ayudar a equilibrar las demandas de diferentes sectores y garantizar un uso eficiente y equilibrado del agua.

Es fundamental establecer prácticas responsables de gestión del agua en la industria minera y fomentar la investigación y el desarrollo de tecnologías más eficientes.

La conservación y restauración de los ecosistemas hídricos del salar, como las lagunas y los humedales, son fundamentales para mantener la biodiversidad y la calidad del agua. Por último, fomentar educación ambiental puede ser clave para promover prácticas sostenibles y la participación de la comunidad en la protección de estos recursos hídricos.





RECURSOS HÍDRICOS DEL
SALAR DE
ATACAMA

REFERENCIAS

- ▶ Alonso, H. y Risacher, F. 1996. Geoquímica del Salar de Atacama, parte 1: origen de los componentes y balance salino. *Revista Geologica de Chile*, 23 (6), 113-122.
- ▶ Amphos 21. 2021. Modelo hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Atacama. Informa Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico.
- ▶ Cervetto, M. 2012. Caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica de las cuencas: Salar de Aguas Calientes 2, Puntas Negras, Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa las Tecas y Salar el Laco, II región de Chile. Tesis para optar al título de Geóloga. Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- ▶ CSIC. 2017. Cuarta actualización del modelo hidrogeológico del Salar de Atacama. SQM Salar S.A.
- ▶ De la Fuente, A. y Nino, Y. 2010. Temporal and spatial features of the thermohydrodynamics of shallow salty lagoons in northern Chile. *Limnology and Oceanography* 55(1), 279-288.
- ▶ DGA-SIT 398. 2016. Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la región de Atacama, fase 3. Realizado por Amphos 21 Consulting Chile Ltda.
- ▶ De la Fuente, A., Meruane, C., Suárez, F. 2021. Long-term spatiotemporal variability in high Andean wetlands in northern Chile. *Science of The Total Environment*, 756.

- ▶ ICASS. 2014. Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama. Informe Final.
- ▶ Marazuela, M.A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., Palma, T. 2019. Hydrodynamics of salt flat basins: The Salar de Atacama example. *Science of The Total Environment*, 651.
- ▶ Munk, L.A., Hynek, S.A., Bradley, D., Boutt, D.F., Labay, K., Jochens, H. 2016. Lithiumbrines: a global perspective. *Society of Economic Geologist*. 18, 339–365.
- ▶ Muñoz-Pardo, J., Ortiz-Astete C., Mardones-Pérez, L., de Vidts-Sabelle, P. 2004. Funcionamiento hidrogeológico del acuífero del núcleo del salar de Atacama, Chile. *Ingeniería Hidráulica en México*, 19, 3, 69-81.
- ▶ Uribe, J., Muñoz, J.F., Gironás, J. Oyarzun, R., Aguirre, E., Aravena, R. 2015. Assessing groundwater recharge in an Andean closed basin using isotopic characterization and a rainfall-runoff model: Salar del Huasco basin, Chile. *Hydrogeological Journal* 23, 1535–1551.
- ▶ Quintana, A. 2016. Balance hídrico de la cuenca del Salar del Huasco Mediante el Modelo hidrológico de simulación TOPMODEL usando información de reanálisis atmosférico. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- ▶ RCA N° 1/1997. 1997. Lixiviación de Óxidos de Cobre y Aumento de la Capacidad de Tratamiento de Mineral Sulfurado, de Minera Escondida Limitada (MEL). Bases Generales del Medio Ambiente. Comisión Regional del Medio Ambiente. Región de Antofagasta.

- ▶ SGA. 2015. Solución en Gestión Ambiental. Adenda 5. Estudio Hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.
- ▶ Valdivia, L. 2018. Hidrogeología y potencial de Litio en el Salar de la isla, III región. Memoria de título para optar al título de Geología, Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- ▶ Vikström, H., Davidsson, S., Höök, M. 2013. Lithium availability and future production outlooks. *Applied Energy* 110, 252–266.
- ▶ Wilson, J.L., Guan, H. 2004. Mountain-block hydrology and mountain-front recharge. In: Hogan, J.F., Phillips, F.M., Scanlon, B.R. (Eds.), *Groundwater Recharge in a Desert Environment: The Southwestern United States*. 9, pp. 113–137 American Geophysical Union.



CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

RECURSOS HÍDRICOS DEL SALAR DE ATACAMA

ISBN: 978-956-227-589-7



9 789562 275897



Universidad de Concepción



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia

