

# Investigaciones hidrogeológicas en la Laguna Tuyajto, en la Reserva Nacional de los Flamencos (Atacama, Chile)

Christian Herrera Lameli<sup>(1)</sup>, Javier Urrutia Meza<sup>(1)</sup>, Jorge Jódar Bermúdez<sup>(2)</sup>; Luis Javier Lambán Jiménez<sup>(3)</sup>, Emilio Custodio Gimena<sup>(4)</sup>, Carolina Gamboa Palacios<sup>(1)</sup>

(1) Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.  
cherrera@ucn.cl; jum002@ucn.cl; cgp010@alumnos.ucn.cl

(2) Aquageo Proyectos. Rambla Catalunya 54, 08007 Barcelona, España.  
jjb.aquageo@gmail.com

(3) Instituto Geológico y Minero de España, Unidad de Zaragoza, C/ Manuel Lasala, 44, 50006 Zaragoza, España.  
javier.lamban@igme.es

(4) Real Academia de Ciencias. Grupo de Hidrología Subterránea, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña. C/ Jordi Girona, 1 - 3 UPC Campus Nord, Edificio D2, 08034 Barcelona, España.  
emilio.custodio@upc.edu

## RESUMEN

La Laguna Tuyajto es un lago salino ubicado en la zona meridional de la reserva nacional de los flamencos (Atacama, Chile), en el Altiplano Andino del Norte de Chile. Esta laguna se encuentra a los pies del volcán Tuyajto. Está alimentada por una serie de manantiales que se encuentran en la zona Norte y Este de la laguna, que descargan agua procedente de un acuífero en materiales volcánicos recientes. El área se ubica en una zona árida donde las precipitaciones medias no exceden los 200 mm/año. El contenido en tritio de algunas muestras de agua indica la presencia en el acuífero de aguas de recarga con tiempos de tránsito cortos. Esta recarga procede de la infiltración del agua de fusión de nieve y en menor medida del agua procedente de eventos cortos pero intensos de precipitación en el verano austral. Los gradientes verticales de precipitación y su contenido isotópico ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) muestran que la zona de recarga de los manantiales ubicados al Norte de la laguna se encuentra en las laderas del volcán Tuyajto que están por encima de los 4900 m s.n.m., mientras que en los manantiales ubicados al Este de la laguna la recarga se produce a altitudes entre 4400 y 4700 m s.n.m. y procede de las cuencas aledañas de Pampa Colorada y Pampa Las Tecas. El agua de estos manantiales puede contener tritio medible. La composición química de las aguas subterráneas es el resultado de los procesos de evaporación de aguas meteóricas, interacción agua-roca a alta temperatura y la disolución de depósitos de antiguos salares enterrados. El nivel freático es somero, debido a la presencia de una capa ignimbrítica de baja permeabilidad que inhibe la formación de celdas convectivas de flujo de agua subterránea por efecto de alta densidad. A nivel local, el funcionamiento de la laguna de Tuyajto es de flujo de tránsito (*flow-through*) respecto el flujo regional del acuífero. La permanencia de los manantiales es esencial para la existencia de la lámina de salmuera y el mantenimiento de las condiciones ecológicas en cuanto a la avifauna.

Palabras clave: Agua subterránea, Hidrogeología volcánica, Zonas áridas, Laguna Tuyajto, Chile.

## ***Hydrogeological research in the Tuyajto Lake at the Flamingo National Reserve (Atacama, Chile)***

### ABSTRACT

*The Tuyajto Lake is a saline lake located in the Andean Altiplano of northern Chile, at the foot of the volcano of the same name. It is fed by springs located on its eastern and northern boundaries. These springs discharge groundwater from a volcanic aquifer. Arid conditions dominate in the area, with an average precipitation of less than 200 mm/year. The tritium content in some groundwater samples shows the contribution of modern recharge to the total groundwater flow. Recharge occurs by infiltration of snowmelt in the austral winter months and to a lesser extent by short but intense precipitation events during the summer. According to the*

*vertical gradients of precipitation and its rainfall isotopic content ( $\delta^{18}O$ ,  $\delta^2H$ ), the recharge zone of the springs is located at the northern area of the lake, above 4,900 m a.s.l., along the slopes of the Tuyajto volcano, whereas the recharge to the springs discharging on the eastern area of the lake originates in the adjacent basins of Pampa Colorada and Pampa Las Tecas, at altitudes of between 4,400 and 4,700 m a.s.l. The water of these springs may contain measurable tritium. The chemical composition of groundwater is the result of meteoric water evaporation processes, high temperature water-rock interaction and the dissolution of buried old salt flat deposits. The groundwater flow is shallow, due to the presence of a regional low permeability ignimbrite formation, which precludes the formation of deep convective groundwater flow cells due to the high density. At the local scale, the Laguna Tuyajto behaves as a flow-through system compared to the regional groundwater flow. The persistence of the springs is essential for the existence of the brine sheet and maintaining the ecological conditions for the waterfowl.*

*Keywords: arid area, groundwater flow, Laguna Tuyajto, National Park, volcanic formations.*

## Introducción

En el Altiplano Andino del Norte de Chile se concentran un gran número de cuencas endorreicas, en cuyas depresiones se localizan lagos salinos, lagunas y salares (Chong, 1988; Risacher et al, 2003). La mayoría de estas cuencas endorreicas están situadas en un ambiente volcánico activo, a altitudes que en la mayoría de los casos exceden los 4000 m s.n.m. (Fig. 1). Recientemente se ha incrementado el número de investigaciones en esta zona realizadas con el objetivo de aprovechar los recursos de agua disponibles para abastecer el desarrollo de centros urbanos y actividades agrícolas y mineras. La actividad minera es importante para el desarrollo del país y ha dado lugar a un número elevado de informes ambientales con el fin de conseguir permisos de explotación de agua subterránea para resolver sus necesidades de abastecimiento. En el año 2003 se inició un estudio en la cuenca de la Laguna Tuyajto, llevado a cabo por Water Management Consultants (WMC, 2006), para evaluar el balance hídrico de la Laguna mediante una aproximación multidisciplinaria, la cual incluía técnicas hidrológicas, hidrogeológicas, hidroquímicas e isotópicas ambientales.

Los acuíferos de la Laguna Tuyajto y sus alrededores se encuentran administrativamente protegidos, debido a que su funcionamiento natural permite la existencia de humedales alimentados por la descarga de aguas subterráneas. Estos humedales, conocidos localmente como vegas y bofedales, sostienen una gran diversidad biológica. Además, estos ecosistemas tienen una gran importancia social, cultural y económica, ya que desde tiempos ancestrales estos humedales proporcionan un recurso hídrico vital a las poblaciones originarias del Altiplano. A pesar de su importancia, poco se sabe del funcionamiento y del papel que juegan los diferentes procesos que condicionan el balance hídrico de estos sistemas hidrológicos.

El objetivo principal del presente trabajo es una aportación al entendimiento de la interacción de las aguas superficiales y subterráneas en una cuenca endorreica dentro del contexto volcánico activo de los Andes Centrales, tomando como caso de estudio la

Laguna Tuyajto. El modelo conceptual aquí presentado caracteriza el funcionamiento del sistema hidrológico compuesto por el acuífero y la laguna y establece un balance hidrológico que permite explicar tanto el origen de los solutos disueltos en el agua subterránea como las posibles transferencias laterales de agua entre cuencas hidrogeológicas vecinas. El buen conocimiento del funcionamiento del sistema hídrico es esencial para mantener los valores ecológicos asociados a la laguna salada y a la avifauna que soporta. El modelo conceptual puede extrapolarse a otras cuencas similares del Altiplano Andino (por ejemplo, el Salar de Pujsa), que por su importancia se han declarado sitio RAMSAR. Estas cuencas tienen, presumiblemente un comportamiento hidrogeológico similar debido a la configuración del relieve, marcada por las erupciones volcánicas desde hace 10 Ma hasta el presente, y a la variabilidad climática, caracterizada por lluvias durante el verano austral debido al llamado y característico "invierno altiplánico" y por nieve durante el invierno por frentes fríos del Océano Pacífico, aunque existen diferencias, principalmente en la geología.

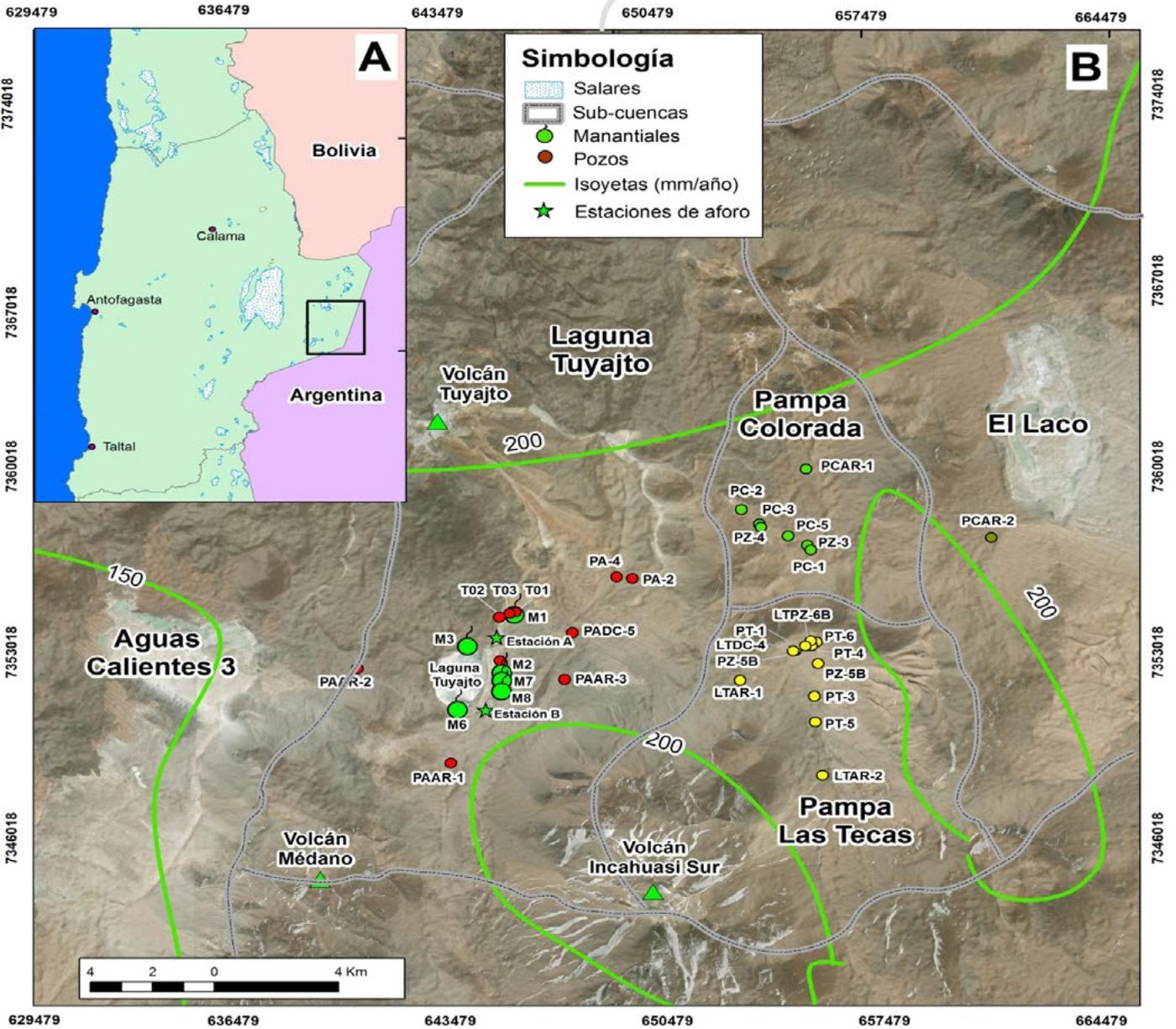
## Marco geográfico y climático

La cuenca de la laguna Tuyajto se ubica en el Altiplano Andino de la Región de Antofagasta (Fig. 1A). Es una cuenca endorreica que está limitada al Oeste por el Salar de Aguas Calientes 3 y al Este por las cuencas Pampa Colorada y Pampa Las Tecas. Una característica importante de esta zona es su clima árido, con una precipitación media entre 150 y 200 mm/año (DGA, 2009). El gradiente vertical de precipitación en la zona de estudio es de 6 mm/año/100 m. En la laguna Tuyajto la cota es de 4010 m s.n.m, la temperatura media es de 1°C y la evaporación potencial media es de 1500 mm/año (Risacher et al., 1999).

La cuenca de la Laguna Tuyajto (número 13 de la Fig. 1B) abarca un área total aproximada de 245 km<sup>2</sup>. En el centro de la cuenca se encuentra la laguna Tuyajto, que recibe aportes de la descarga de cuatro manantiales principales permanentes (M-1, M-2, M7 y M-8) y otros menores esporádicos. Todos ellos están ubicados en los sectores Norte y Este de la laguna.

La laguna es un cuerpo de agua libre salina con una profundidad media de 35 cm. La superficie de agua experimenta significativas variaciones estacionales; en los meses de otoño e invierno austral alcanza un máximo de 2,7 km<sup>2</sup>, mientras que en los meses de verano se reduce a 1,7 km<sup>2</sup>. Esta importante variación se debe a tres factores: a) la suave pendiente topográfica

desde la orilla hacia el centro de la laguna, lo que implica grandes variaciones de superficie con pequeños cambios del nivel, b) las variaciones estacionales de la descarga de los manantiales y c) la variación estacional de la evaporación, que durante los meses de invierno puede reducirse considerablemente cuando la superficie de la laguna está congelada.



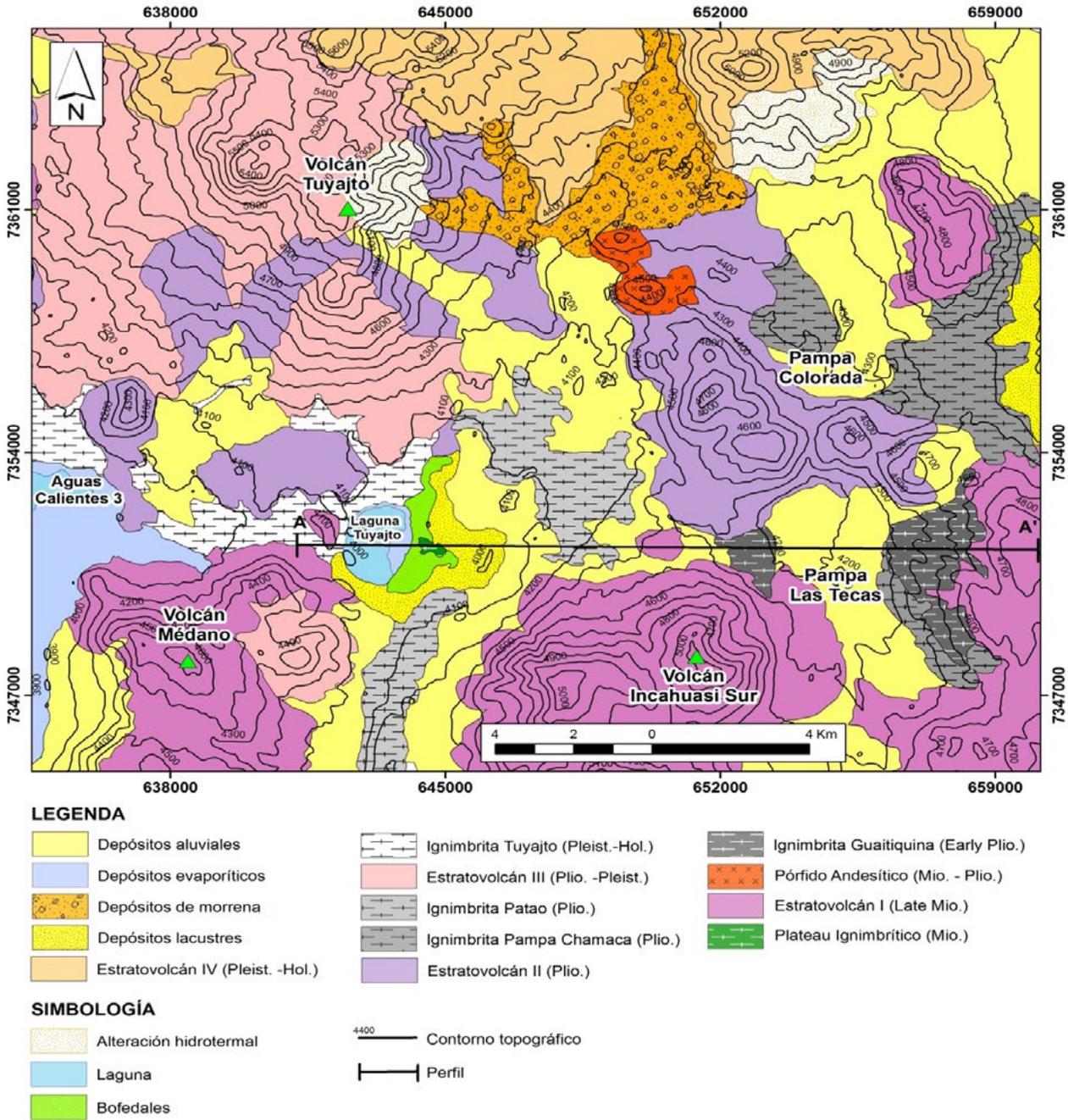
**Figura 1.** Mapa de ubicación del área de estudio. Situación de las cuencas significativas con salares o lagunas en condiciones áridas y semiáridas de los Andes Centrales. Los puntos rojos, amarillos y verdes indican pozos ubicados en las cuencas hidrográficas de Tuyajto, Pampa las Tecas y Pampa Colorada, respectivamente. Los datos de elevación de la zona de estudio se obtuvieron desde los ASTER Global Digital Elevation Models versión 2, con una cuadrícula de 1 arco-segundo (30 m), de publicaciones de elevación disponibles en el sitio web de US Geological Survey (USGS, 2015).

**Figure 1.** Location of the significant basins with salt flats or lakes in arid and arid-semi-arid conditions of the Central Andes. Red, yellow and green points indicate wells located respectively in the Tuyajto, Pampa las Tecas and Pampa Colorada watersheds. The elevation data of the study zone was obtained from the ASTER Global Digital Elevation Models version 2, with a 1 arc-second (30 m) grid of elevation postings available from the US Geological Survey website (USGS 2015).

**Marco geológico e hidrogeológico**

La geología del área de estudio está dominada por la actividad volcánica desarrollada desde el Mioceno al Presente (Fig. 2). La mayoría de los volcanes se encuentran bien conservados sobre una meseta formada por ignimbritas, de extensión regional, que puede

alcanzar los 100 m de espesor (Mardones, 1977; Stern et al., 2007). Esta ignimbrita se formó en el Mioceno Superior y se considera que está asociada a una gran caldera en los Andes Centrales llamada La Pacana (Backer, 1981; Ramírez y Gardeweg, 1982; Lindsay et al., 2001) (Fig. 2). Petrográficamente se distinguen cuatro tipos principales de lava: dacitas, andesitas



**Figura 2.** Mapa geológico del área de estudio, basado en Ramírez y Gardeweg, (1982). El perfil presentado en la Figura 3 se indica con las letras A-A'.

**Figure 2.** Geological map of the study area, based on Ramírez and Gardeweg, (1982). The profile shown in Figure 3 is indicated by the letters A-A'.

con alto contenido en hornblenda y/o biotita, andesitas con alto contenido en piroxeno y basaltos. Los estratovolcanes más importantes son el Incahuasi y el Médano Sur, ubicados al Sur del área de estudio y correspondientes al Mioceno Superior y el volcán Tuyajto, del Plioceno-Pleistoceno, que se encuentra justo al Norte de la Laguna Tuyajto. Las formaciones ignimbríticas asociadas al volcanismo reciente, posteriores a la gran formación antes mencionada, son la Ignimbrita Guaiquitina (Mioceno Superior) y la Ignimbrita Chacana (Plioceno Superior), reconocidas al Este del área de estudio en las cuencas Pampa Colorada y Pampa Las Tecas, y la Ignimbrita Tuyajto (Pleistoceno-Holoceno) correspondiente a una de las unidades más jóvenes de la zona (Ramírez y Gardeweg, 1982) y que aflora en la parte occidental de la Laguna Tuyajto.

La erosión que afecta a los diferentes volcanes ha producido una gran cantidad de depósitos de aluviones dispuestos en abanicos aluviales que bordean el límite Este de la Laguna Tuyajto. Asimismo, los depósitos lacustres en la misma área de la laguna indican que fue un lago profundo hace 8000 años, alcanzando 25 m de profundidad (Geyh et al., 1999).

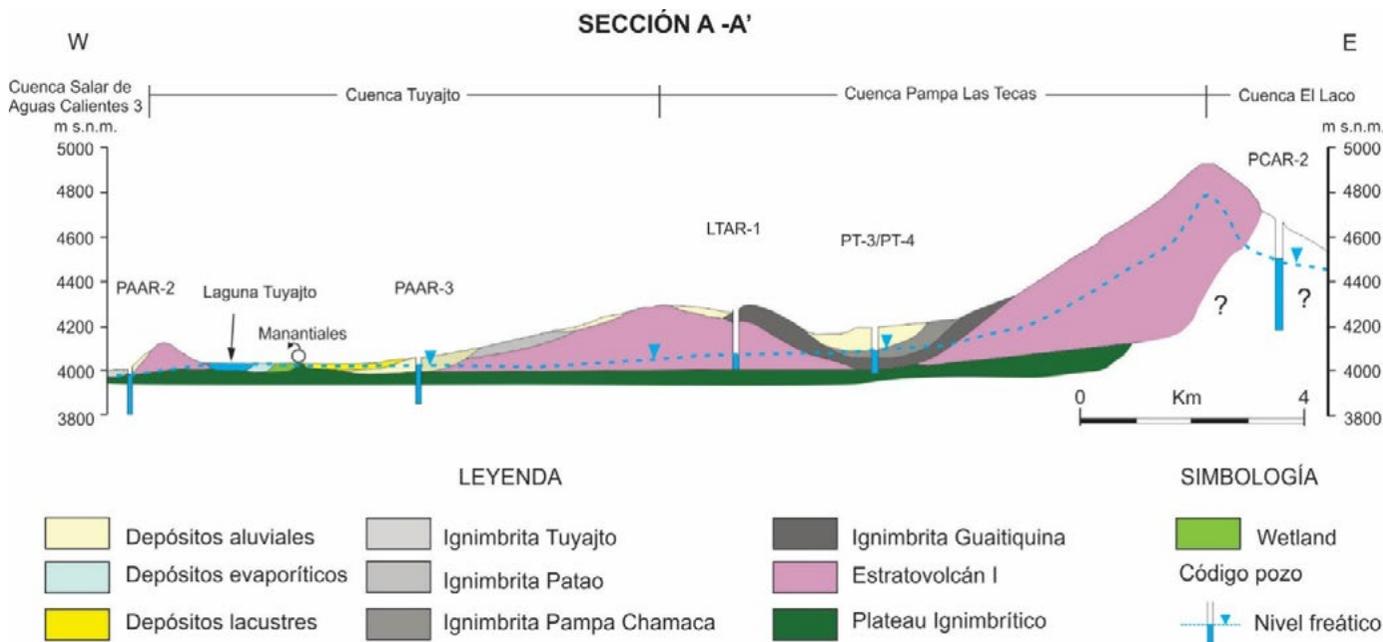
Como resultado de la interpretación de los ensayos de bombeo realizados durante diversas campañas de reconocimiento de aguas subterráneas en el Altiplano de la región de Antofagasta (WMC, 2006), se han obtenido valores de transmisividad hidráulica que varían entre 3 y 1000 m<sup>2</sup>/día. Los valores más elevados corresponden a pozos de la parte central de las cuencas de Pampa Colorada y Pampa Las Tecas y se atribuyen

a la existencia de abanicos aluviales con materiales no consolidados y con intercalaciones volcánicas. La base ignimbrítica regional parece funcionar como zócalo impermeable para el acuífero de la Laguna Tuyajto (Montgomery et al., 2003). En los reconocimientos geológicos de campo se ha comprobado que la presencia de esta ignimbrita basal genera la aparición de los manantiales anteriormente descritos (Fig. 3).

### Métodos y materiales

Para la caracterización hidrogeoquímica e isotópica del sistema hidrológico del Tuyajto se han muestreado las aguas de la laguna, el agua de los manantiales que descargan en el límite Este y Norte de la Laguna y el agua de los dos manantiales que hay en el Salar de Aguas Calientes 3. La temperatura (T), pH y conductividad eléctrica (CE) de estas muestras fueron medidas in situ. Los aniones se han analizado mediante cromatografía iónica (Cl, Br), espectrometría de absorción (SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>) y valoración de la alcalinidad del agua (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), y los cationes por espectrometría de absorción atómica.

Las muestras de agua de los manantiales de la cuenca de la Laguna Tuyajto (M-1, M-2, M-7, M-8 y M-6) fueron obtenidas por el equipo de investigación en diciembre de 2003, mientras que la de los manantiales del Salar de Aguas Calientes 3 (M-4 y M-5) lo fueron en marzo de 2004. Estas observaciones se han complementado con 31 análisis químicos e isotópicos



**Figura 3.** Sección geológica esquemática del área de estudio. Información obtenida mediante campañas de terreno propias, cartas geológicas regionales y descripción de pozos del estudio WMC (2006).

**Figure 3.** Schematic geological section of the study area. The information was obtained by means of field campaigns of the team, regional geological maps, and well descriptions from the WMC (2006) study.

realizados previamente por WMC (2006), los cuales incluyen muestras de agua de pozos en las cuencas Tuyajto, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas, obtenidas entre diciembre del 2004 y marzo del 2005. El error en el balance iónico de los análisis químicos es inferior a 10%. Todos los análisis de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  se han realizado en los laboratorios de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, con errores de medida de  $\pm 0.05\%$  para el  $\delta^{18}\text{O}$  y de  $\pm 1\%$  para el  $\delta^2\text{H}$ . Los valores se dan relativos al estándar V-SMOW.

La lluvia local se ha muestreado en tres emplazamientos diferentes: Salar de Aguas Calientes 3 (3900 m s.n.m.), Laguna Tuyajto (4040 m s.n.m.) y Pampa Colorada (4426 m s.n.m.). Las muestras corresponden a lluvia acumulada en toma-muestras con una capa de vaselina para evitar la evaporación del agua acumulada a lo largo del periodo de muestreo. Las muestras de lluvia corresponden a los meses de enero, marzo y mayo del 2004 y diciembre-enero de 2005. También se recuperaron muestras de nieve en julio (Laguna Tuyajto) y agosto (Laguna Tuyajto, Salar de Aguas Calientes 3, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas) de 2004. Se obtuvieron un total de 10 muestras de lluvia, en las que se analizaron los iones mayoritarios y el contenido isotópico de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ . Adicionalmente se han tomado tres muestras de nieve existente a lo largo de un transecto vertical que discurre a lo largo de la ladera del volcán Tuyajto, a altitudes de 4040, 4356 y 4412 m s.n.m, en las que solo se ha podido analizar el contenido isotópico. Estos registros fueron obtenidos en un contexto climático de Niño débil según la información entregada por NOAA, (2005).

El caudal de descarga de los manantiales se ha medido mensualmente durante un año, el año 2004, en las estaciones A, aguas abajo del manantial M-1, y B, que recibe los caudales combinados de los manantiales M-2, M-6, M-7 y M-8 (Fig. 1). El caudal de descarga del manantial M-3 se ha medido sólo en cuatro ocasiones debido a su descarga esporádica.

Se instaló un sensor de presión en la parte más profunda de la Laguna Tuyajto para obtener un registro continuo del nivel de la laguna. Para determinar la evaporación se utilizó un tanque de evaporación tipo A instalado a 4100 m s.n.m., al Norte del área de estudio.

## Resultados y discusión

### Balace de agua de la Laguna Tuyajto

La Laguna Tuyajto no tiene salidas superficiales. El mayor aporte de agua proviene de los manantiales ubicados en sus bordes Norte y Este. La descarga total de los manantiales fluctúa entre 74 y 245 L/s, con una contribución total estimada para el año 2004 de 4.4 hm<sup>3</sup> (Tabla 1). La disminución sostenida del nivel de la laguna registrada entre diciembre de 2003 y enero de 2004 (Fig. 4) es consistente con los bajos caudales medidos en los manantiales a fines de enero del 2004 (90 L/s) y con una mayor evaporación registrada durante estos meses. El ligero aumento del nivel registrado en febrero y a mediados de marzo de 2004 es consistente con un pequeño aumento del caudal de los manantiales (Tabla 1) y con algunos eventos de precipitación en febrero. Posteriormente se observa una tendencia ascensional desde finales de abril hasta septiembre del 2004, alcanzando hasta 62 cm de profundidad. Esto puede explicarse por la reducción de la tasa de evaporación en los meses del invierno austral (Tabla 2), en que las bajas temperaturas en algunos días de junio, julio y agosto congelan parcialmente la superficie de la Laguna, y por el aumento de los caudales registrados en las estaciones A y B, que se mantienen relativamente estables hasta septiembre, cuando empiezan a disminuir. El aumento del caudal puede explicarse por las lluvias ocurridas en febrero y la fusión de nieve que cayó durante los meses de julio y agosto. Finalmente, desde septiembre hasta fines de octubre del 2004 se observa una disminución del nivel de la laguna. Esta tendencia cambia a principios de noviembre, cuando se registra un aumento significativo de nivel, consistente con un aumento significativo del caudal de los manantiales, especialmente el M-1 (Estación A, Tabla 1).

### Flujo de agua subterránea

En la Fig. 5 se observa el mapa piezométrico elaborado para las cuencas Laguna Tuyajto, Pampa Las

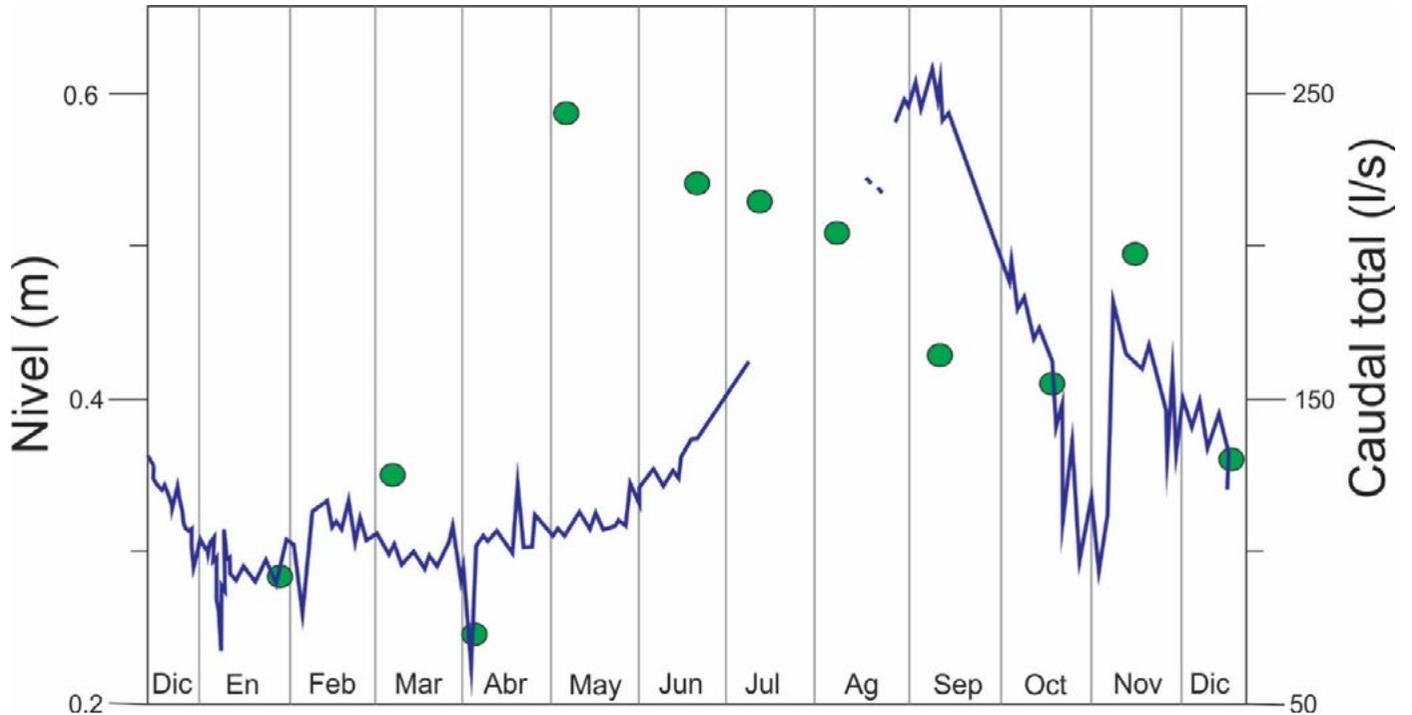
	Fecha de medición (mes/año) durante el año 2004.											Total (hm <sup>3</sup> )
	Descarga en L/s.											
	28/01	06/03	04/04	06/05	20/06	11/07	07/08	12/09	16/10	14/11	19/12	
Estación A	39	41	20	88	57	34	43	39	64	63	65	1.3
Estación B	51	91	54	156	162	183	160	122	90	134	64	3.1
M-3	nf	nf	nf	1	1	1	2	nf	nf	nf	nf	0.01
Total	90	132	74	245	220	218	205	161	154	197	130	4.4

**Tabla 1.** Caudales de los manantiales de Laguna Tuyajto. La estación A mide el manantial M-1 y la estación B mide el flujo conjunto de los manantiales M-2, M-6-M-7 y M-8. nf = sin flujo.

**Table 1.** Flow rates of Laguna Tuyajto springs. Station A gauges spring M-1 and station B gauges the joint flow of springs M-2, M-6-M-7 and M-8. Nf = no flow.

Tecas y Pampa Colorada para el año 2003. Los niveles indican la existencia de una conexión entre estas cuencas, con un flujo de agua con dirección

y sentido general de Este a Oeste y cuyas descargas se producen en el sector oriental de la Laguna Tuyajto. Los bajos gradientes piezométricos en



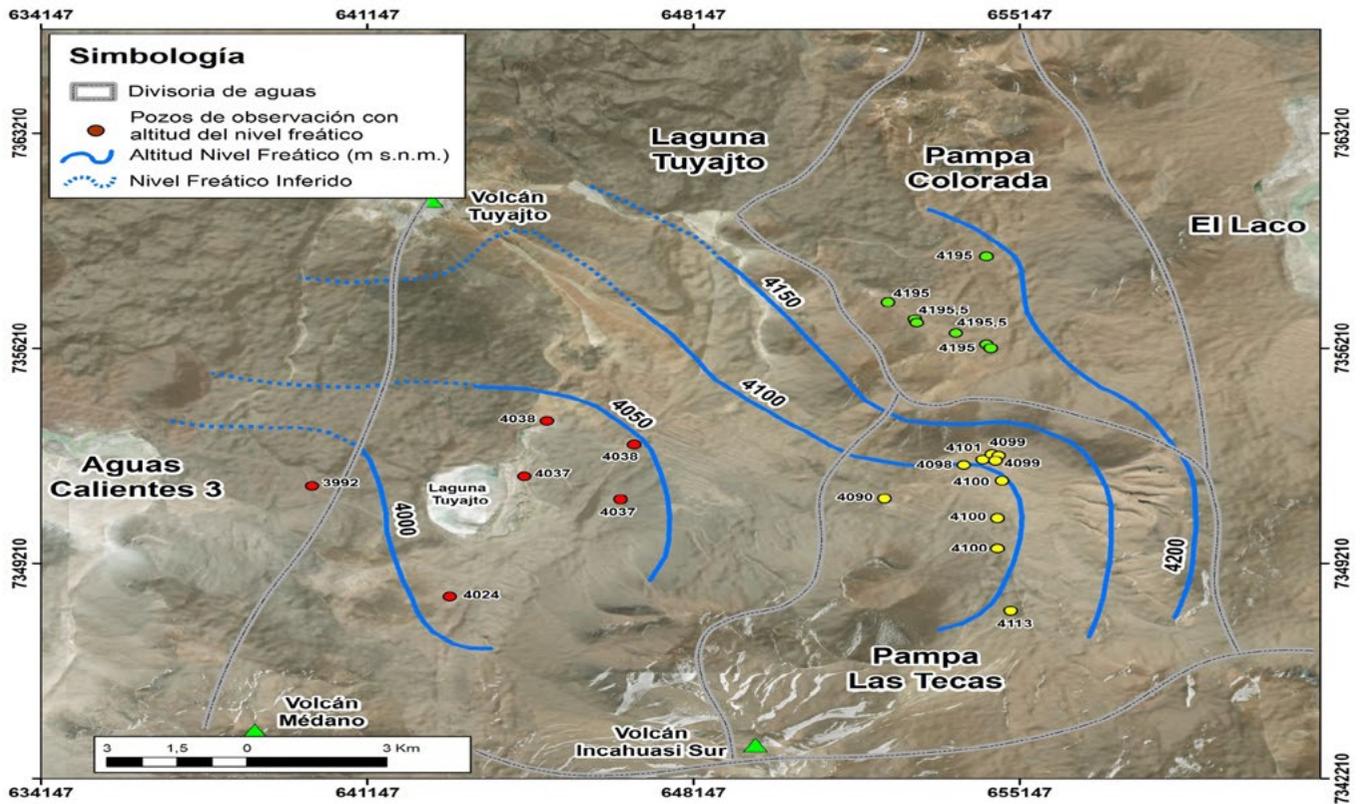
**Figura 4.** Fluctuación diaria del nivel de agua en la Laguna Tuyajto entre el 15 de diciembre de 2003 y el 19 de diciembre de 2004. Los niveles son relativos a una referencia altitudinal local.

**Figure 4.** Daily water level fluctuations in Laguna Tuyajto between December 15,,2003 and December 19, 2004. The levels are relative to a local altitudinal reference.

Mes/Año	Evaporación en un tanque tipo A (mm)	Evaporación corregida (mm)	Área de superficie del lago (10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	Volumen de agua evaporada (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )
Ene/2004	217	134	112	150
Feb/2004	179	110	209	231
Mar/2004	208	128	134	172
Abr/2004	186	115	151	173
May/2004	164	101	200 (*)	203
Jun/2004	132	82	240 (*)	196
Jul/2004	136	84	250 (*)	210
Ago/2004	167	103	260 (*)	268
Sep/2004	204	126	272	343
Oct/2004	257	159	247	392
Nov/2004	291	180	245	440
Dic/2004	298	184	200 (*)	368
Total	2439	1506		3147

**Tabla 2.** Evaporación media mensual de agua en la Laguna Tuyajto durante el año 2004. La evaporación corregida considera la salinidad del agua de la laguna. El área de la superficie de agua fue determinada a través de imágenes satelitales LANDSAT TM. (\*) Valores aproximados del área derivados de mediciones del nivel.

**Table 2.** Monthly average water evaporation in Laguna Tuyajto throughout 2004. The corrected evaporation is the result of considering lake water salinity. The surface area of water was determined through LANDSAT TM satellite images. (\*) Approximate value of surface water area derived from measured water levels.



**Figura 5.** Mapa piezométrico del área, mediante datos obtenidos en el 2003. El flujo de aguas subterráneas se produce desde áreas de mayor recarga hacia zonas deprimidas (Este a Oeste).

**Figure 5.** Piezometric map of the area, through data obtained in 2003. The groundwater flows from areas of higher recharge to depressed areas (east to west).

las cercanías de la laguna y en la zona central de las cuencas de Pampa Las Tecas y Pampa Colorada indican una transmisividad hidráulica elevada, asociada a los depósitos sedimentarios permeables, como gravas de antiguos abanicos aluviales. Esto es consistente con los resultados obtenidos de los ensayos de bombeo, los cuales indican transmisividades de hasta 1000 m<sup>2</sup>/d (WMC, 2006). El notable flujo puede explicar que no haya actualmente cuerpos salinos anteriores en las cuencas Pampa Las Tecas y Pampa Colorada y que los que pudiera haber habido ya han sido disueltos.

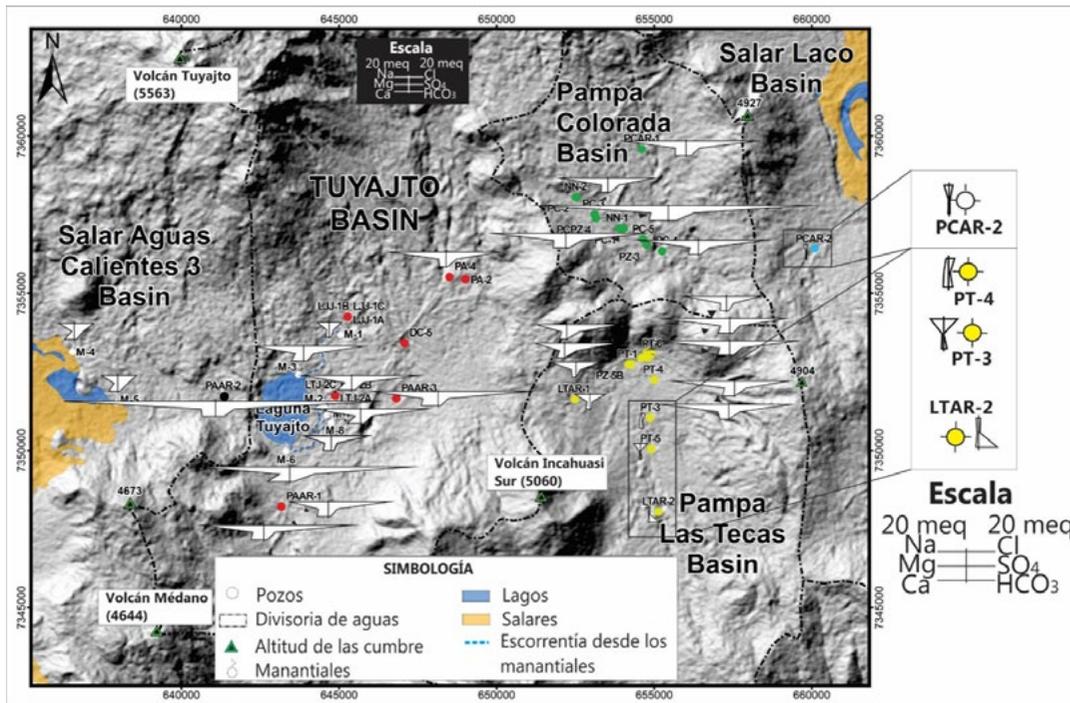
### Caracterización hidroquímica

Las aguas subterráneas son del tipo clorurado sódico, con un leve exceso de sulfato respecto a la relación marina SO<sub>4</sub>/Cl en algunas muestras. Las aguas de los manantiales ubicados en el sector Este de la Laguna Tuyajto también son del tipo clorurado sódico y tienen la misma marca química que las aguas subterráneas en pozos de las cuencas Pampa Colorada y Pampa Las Tecas, mientras que los manantiales ubicados al Norte de la Laguna Tuyajto (M-1 y M-3) y en el Salar de Aguas Calientes 3 (M-4 y M-5) son del tipo clorura-

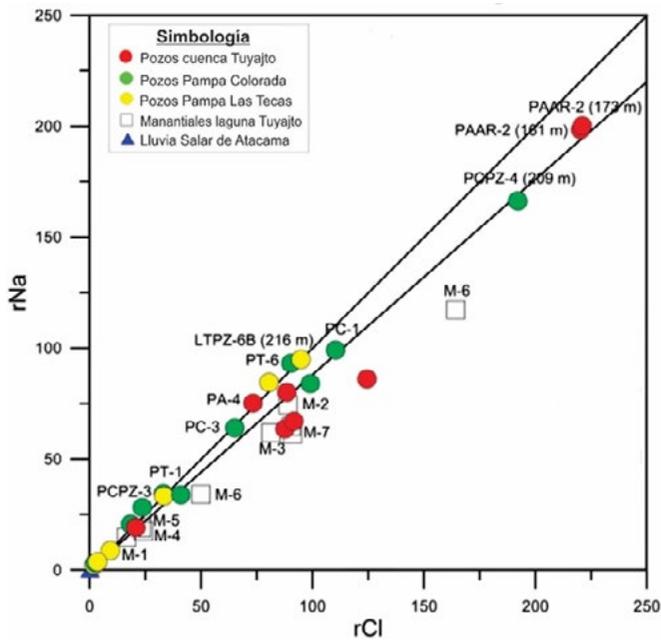
do-sulfatado sódico. Las variaciones espaciales de la composición química de las muestras se observan en los diagramas de Stiff modificados (Fig. 6).

Los contenidos de Na y Cl están correlacionados positivamente para las aguas de los manantiales y los pozos de Pampa Colorada y Pampa Las Tecas con salinidad baja y moderada. Sin embargo, existe un ligero exceso de cloruro respecto al sodio, especialmente para aguas con salinidad relativamente alta, que tiende a desaparecer en muestras con salinidad muy alta (Fig. 7). Los valores de la relación rCl/rBr en los pozos de Pampa Las Tecas y Pampa Colorada varían de 2000 a 10.000, lo que es característico de la disolución de halita (Fig. 8) (Custodio y Herrera, 2000; Alcalá y Custodio, 2008).

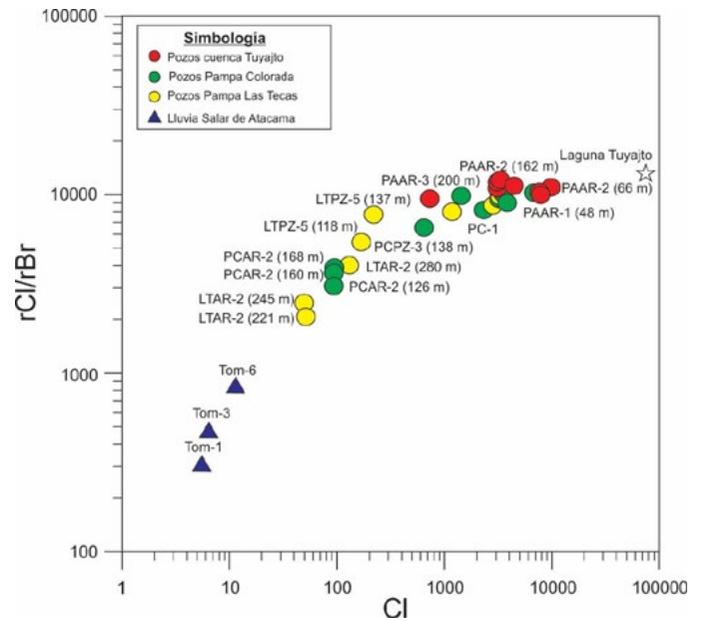
Los valores de la relación rSO<sub>4</sub>/rCl en muestras de lluvia varían de 0,26 a 0,28, mientras que en los manantiales tienen un rango mayor, de 0,16 a 0,54 (Fig. 9). Las aguas subterráneas presentan una mayor variación de esta relación, de 0,01 a 0,45. Las aguas con valores elevados de la relación rSO<sub>4</sub>/rCl que se encuentran en aguas diluidas pueden explicarse por meteorización de rocas volcánicas con sulfuros. Otros valores altos de rSO<sub>4</sub>/rCl, que no se encuentran en agua diluida, pueden ser producto de la difusión



**Figura 6.** Diagramas de Stiff modificados de las aguas de manantiales ubicados en la Laguna Tuyajto y en el Salar de Aguas Calientes y de aguas de los pozos en Pampa Colorado, Pampa Las Tecas y Laguna Tuyajto. La divisoria de aguas indica el límite de las distintas cuencas hidrográficas superficiales.  
**Figure 6.** Modified Stiff diagrams of water from springs located in the Tuyajto Lagoon and the Salar (salt flat) de Aguas Calientes and wells in Pampa Colorado, Pampa Las Tecas and Laguna Tuyajto. The water divide indicates the boundary between the surface watersheds.



**Figura 7.** Gráfico de  $rNa$  en función de  $rCl$  ( $r = meq/L$ ) de las aguas de manantial de la Laguna Tuyajto y de los pozos ubicados en las cuencas de Tuyajto, Pampa Colorado y Pampa Las Tecas, correspondientes a distintos momentos. Algunas muestras presentan una relación  $rNa/rCl$  menor que la relación 0,88 del agua oceánica media. La línea superior representa la relación 1:1, mientras que la inferior  $rNa = 0.88 rCl$ .  
**Figure 7.** Plot of  $rNa$  vs.  $rCl$  ( $r = meq/L$ ) of spring water of the Tuyajto lake and of the wells located in the Tuyajto, Pampa Colorado and Pampa Las Tecas basins, which correspond to different times. Some samples have an  $rNa/rCl$  ratio less than 0.88, which characterizes average oceanic water. The upper line represents the ratio 1:1, whilst the lower line  $rNa = 0.88 rCl$ .



**Figura 8.** Gráfico de la relación  $rCl/rBr$  en función del  $Cl$ . Muestra un aumento general de  $rCl/rBr$  al aumentar la salinidad. Se incluyen datos de lluvia del flanco Oeste del Salar de Atacama.  $r = meq/L$ . Los valores en paréntesis son la profundidad a la cual se tomó la muestra de agua.  
**Figure 8.** Plot of the  $rCl/rBr$  ratio versus  $Cl$ . It shows a general increase of  $rCl/rBr$  as salinity goes up. Rainfall data on the western flank of the Atacama salt flat is included.  $r = meq/L$ . Values in parentheses show the depth at which the water sample was taken.

atmosférica de  $\text{SO}_2$  de oxidación de azufre nativo en una zona de alteración solfatarica que existe en la cima del volcán Tuyajto o de aportes endógenos. Considerando el carácter termal del manantial M-1, localizado al Norte de la Laguna Tuyajto, no se puede descartar la disolución de HCl asociado al volcanismo reciente en la zona, como se ha reconocido en otras zonas volcánicas del Altiplano, como en los geiseres del Tatio (Cortecchi et al., 2005)

El  $\text{HCO}_3^-$  presenta valores relativamente pequeños en aguas de baja salinidad y asciende hasta aproximadamente 300 a 500 mg/L en aguas salinas y muy salinas. Las muestras de agua de pozos de Pampa Las Tecas y Pampa Colorada tienen un contenido elevado de  $\text{HCO}_3^-$  de aproximadamente 800 mg/L, que podría explicarse por la incorporación de  $\text{CO}_2$  volcánico de desgasificación de las cámaras magmáticas y su posterior reacción con la roca para producir  $\text{HCO}_3^-$ . Esto significaría que una parte del gas volcánico se transfiere al agua subterránea de manera directa o por descarga lateral de agua subterránea desde los núcleos volcánicos, aun cuando la mayor parte de dicho gas sea emanada a la atmósfera. No existen determinaciones de  $^{13}\text{C}$  para comprobar esta hipótesis.

### Isótopos estables de la molécula de agua

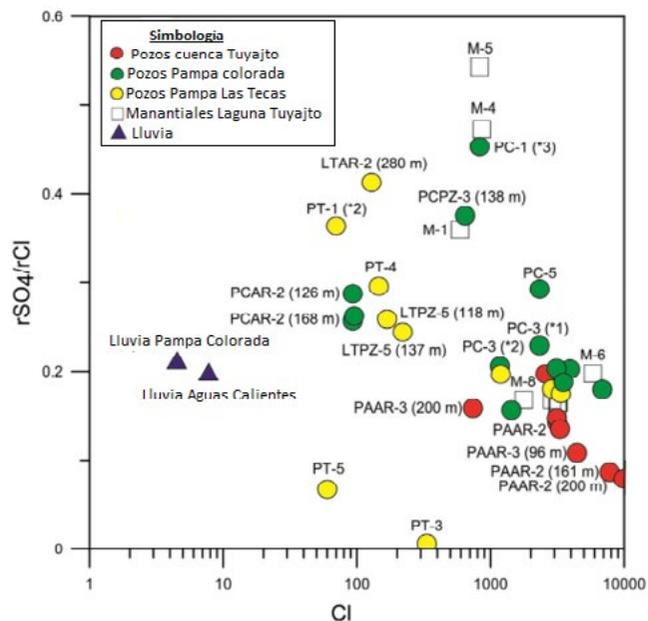
Como resultado de la escasez de lluvias en el Norte de Chile, es difícil hacer una caracterización detallada

del contenido isotópico de la precipitación. Para el transecto con grandes variaciones verticales en el que se ha muestreado la nieve, el  $\delta^{18}\text{O}$  varía entre -6,52 y -10,93‰, con un gradiente vertical isotópico de  $\delta^{18}\text{O}$  de -2 ‰/km, que es del mismo orden que los obtenidos en otras zonas de alta montaña, como los Alpes (Jódar et al., 2016a) o la cordillera Pirenaica (Jódar et al., 2016b). Las muestras de nieve son isotópicamente más ligeras que las de agua de lluvia, cuyo  $\delta^{18}\text{O}$  varía entre +1,84 y -10,31‰ (Fig. 10). En cualquier caso, los valores del contenido isotópico de las muestras de lluvia y nieve se encuentran entre la línea meteórica mundial y la línea meteórica local obtenida por Chaffaut (1998), de igual pendiente, y tienen un exceso de deuterio ( $d = \delta^2\text{H} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$ ) de 15,7‰.

El agua de los manantiales ubicados en la parte Norte de la Laguna Tuyajto y en el Salar de Aguas Calientes 3 (M-1, M-3, M-4 y M-5) tiene una composición isotópica cercana al agua meteórica, aunque muy ligera, lo que indica que el agua de recarga de estos manantiales procede mayoritariamente de la fusión de nieve en las laderas del volcán Tuyajto a cotas superiores a 4900 m s.n.m. El contenido isotópico del agua de los manantiales M-2, M-7 y M-6 apunta la existencia de un proceso de evaporación. El manantial M-6, teniendo en cuenta la piezometría (Fig. 5), podría resultar de un proceso de mezcla entre el agua de recarga y el agua de la laguna. Esto implicaría que la laguna del Tuyajto tendría un funcionamiento de tránsito (a través o *flowthrough*) (Sophocleous, 2009), esto es, el nivel de la laguna dependería de la descarga de los manantiales a la vez que recarga el acuífero subyacente, con flujo hacia otros lugares.

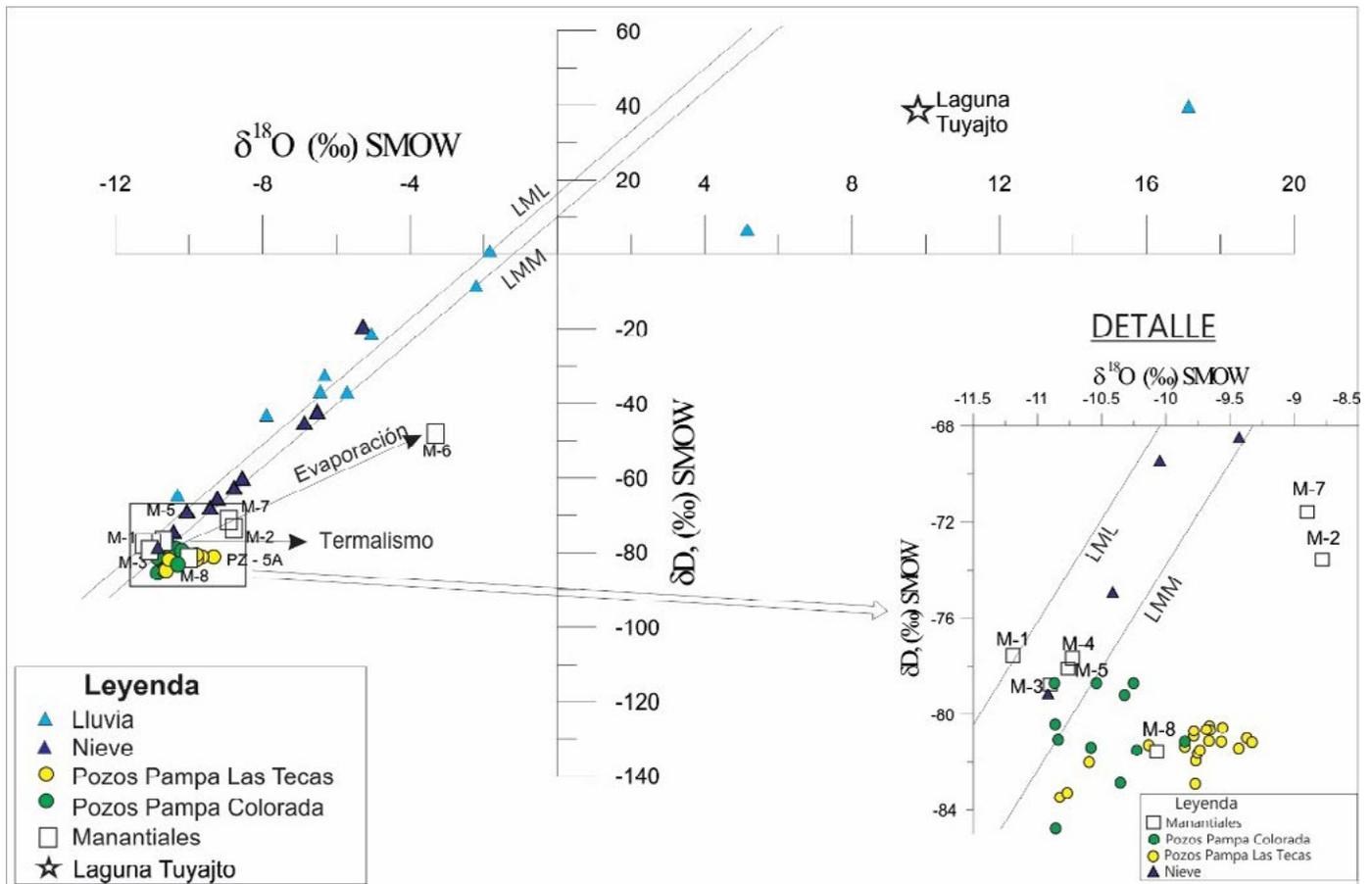
Las muestras de agua subterránea de Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y el manantial M-8 tienen composiciones isotópicas enriquecidas en  $\delta^{18}\text{O}$  con respecto al agua meteórica. Una explicación es que el agua meteórica original que recarga el sistema acuífero haya sido afectada por intercambio isotópico profundo de alta temperatura con la roca, lo que es plausible teniendo en cuenta el entorno volcánico del acuífero y la existencia de aguas termales en las cercanías de la Laguna Tuyajto. El valor más negativo de  $\delta^2\text{H}$  de algunas muestras obedecería a la composición isotópica más ligera del agua meteórica original. El contenido isotópico de  $\delta^{18}\text{O}$  en muestras de nieve en función de la altitud indican una recarga preferente para las aguas de manantiales entre 4100 y 4700 m s.n.m.

Considerando el  $\delta^2\text{H}$ , se obtienen altitudes de recarga preferente entre 4100 y 4600 m s.n.m. Estas altitudes hay que relativizarlas en función del efecto de ladera (efecto progresivo de recarga a cotas menores cuando la muestra representa todo el espesor acuífero), aunque en este caso el efecto nival se concentra en las alturas superiores.



**Figura 9.** Gráfico de la relación  $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$  ( $r = \text{meq/L}$ ) en función del  $\text{Cl}$  ( $\text{mg/L}$ ) de las aguas de los manantiales de la Laguna Tuyajto y de los pozos ubicados en las cuencas de Tuyajto, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas.

**Figure 9.** Plot of the  $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$  ratio ( $r = \text{meq/L}$ ) versus  $\text{Cl}$  ( $\text{mg/L}$ ) of spring water of the Tuyajto lake and of the wells located in the Tuyajto, Pampa Colorada and Pampa Las Tecas basins.



**Figura 10.** Composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  ( $\delta\text{D}$ ) de aguas de manantiales, precipitaciones en el área y de aguas de pozos. LMM: Línea meteórica mundial. LML: Línea meteórica local, paralela con un exceso de deuterio de +15,7‰ V-SMOW.

**Figure 10.** Isotopic composition of  $^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$  ( $\delta\text{D}$ ) of spring waters, precipitation in the area and well water. LMM: world meteoric line. LML: Local meteoric line, parallel with a deuterium excess of +15.7‰ V-SMOW.

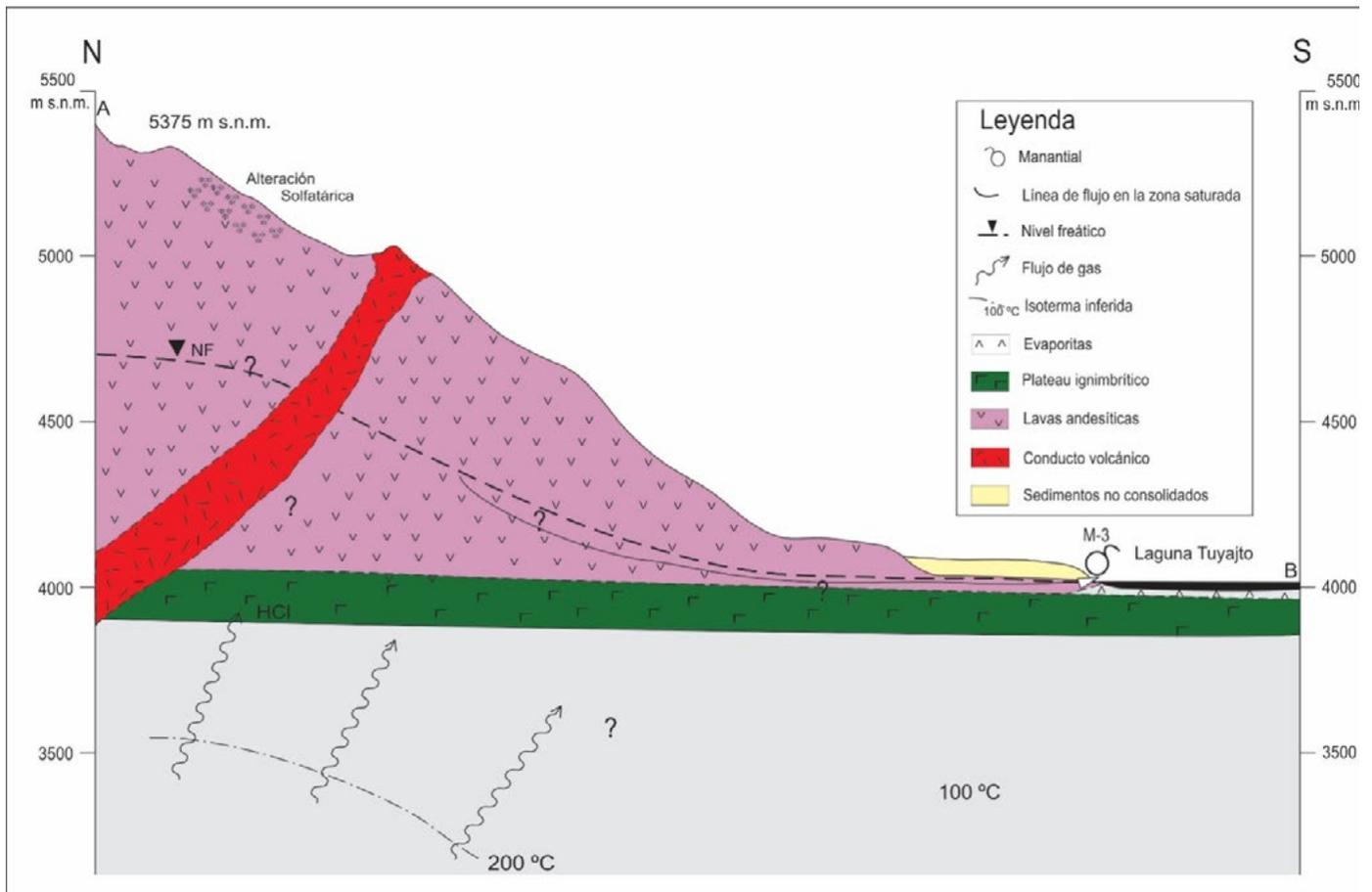
### Caracterización de la recarga

El caudal de los manantiales muestra que la recarga es importante, a pesar de la aridez imperante en la zona. Para una superficie de recarga entre 400 a 600 km<sup>2</sup> y una descarga media en manantiales de 3 hm<sup>3</sup>/año, la recarga media puede estimarse de forma aproximada entre 5 y 7,5 mm/año, lo que corresponde a un porcentaje de la precipitación media anual entre el 2% y el 4%. Este valor puede ser mucho más en las zonas de mayor altitud y bastante menor en las depresiones (Custodio, 2010). La precipitación promedio en la zona de estudio varía entre 150 y 200 mm/año. Teniendo en cuenta que la concentración promedio de ion cloruro en las muestras de agua de lluvia es de 5 mg/L (Risacher et al., 1999), se obtiene una tasa de deposición de cloruros entre 0,75 y 1 g m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>. Este valor parece alto si se considera que las precipitaciones tienen un origen Atlántico, ya que las masas de aire húmedo han de cruzar toda la cuenca del Amazonas antes de producir precipitación en la zona de estudio. Sin embargo, este valor es razonable si se con-

sidera que a) la recarga puede ser en parte debida a la fusión de nieve que precipita durante el invierno austral (Ammann et al., 2001) debido al paso de los sistemas frontales fríos provenientes del Pacífico (Vuille y Ammann, 1997) y b) a que la emanación de gases volcánicos del entorno puede aumentar localmente el contenido atmosférico en Cl, además de en S.

La composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  en las muestras de precipitación y aguas subterráneas del área muestra cómo la fusión de nieve que se deposita en las laderas del volcán Tuyajto juega un rol importante en la recarga del acuífero. Esta recarga se suma a la que produce la precipitación a lo largo de la pendiente. Como resultado, y favorecido por el efecto ladera (Custodio y Jódar, 2016), el agua que descarga en los manantiales a cotas bajas es menos salina e isotópicamente más ligera que el agua de la recarga local.

Las determinaciones de tritio reportadas por WMC (2006) para las aguas muestreadas en los pozos de las cuencas de Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Tuyajto indican que el periodo de renovación correspondiente podría ser de más de tres décadas, ya que la mayoría de



**Figura 11.** Esquema del modelo conceptual de la cuenca Tuyajto, desde el volcán Tuyajto hasta la laguna, mostrando el rol de la planicie ignimbrita de baja permeabilidad en el flujo de las aguas subterráneas.

**Figure 11.** Diagram of the conceptual model of the Tuyajto basin, from the Tuyajto volcano to the lagoon, showing the role of the low permeability ignimbrite plateau in the flow of the groundwater.

las muestras tienen concentraciones de tritio por debajo de 0,8 UT (1 UT = 1 unidad de tritio =  $10^{-18}$   $^3\text{H}/\text{H}$ ), que es el umbral de medición del contenido en tritio en el agua con las técnicas analíticas disponibles en el laboratorio. La Fig. 11 presenta un esquema del modelo conceptual desde el volcán Tuyajto hasta la laguna.

### Temperatura del agua subterránea

La temperatura del agua en los pozos de la cuenca Pampa Colorada y de los manantiales del borde Norte de la Laguna Tuyajto es superior a 20°C y en algunos casos es cercana a 40 °C. Estos valores elevados se encuentran cerca del volcán Tuyajto (especialmente los manantiales M-1 y M-3). Posiblemente son resultado de la reciente actividad magmática. Estas temperaturas son mayores a las medidas en los pozos de la cuenca Pampa Las Tepas, que se encuentran dentro del rango de 10 y 20°C. Adicionalmente, las aguas de manantiales que descargan en el borde oriental de la Laguna Tuyajto no muestran efectos hidrotermales claros, exceptuando el manantial M-8, aunque muestran valores

de  $\delta^{18}\text{O}$  con tendencia a contenidos más pesados (Fig. 10). Lo anterior puede indicar un intercambio isotópico de interacción agua-roca que se produce lejos del área de descarga y con enfriamiento a lo largo de su recorrido. Se podría obtener una estimación aproximada de la temperatura original mediante geotermómetros, cuando se cumplen las condiciones para ser aplicados (Custodio y Llamas, 1983, Sección 10). El geotermómetro de cuarzo no pudo ser aplicado por: 1) falta de equilibrio con cuarzo o cualquier forma de sílice, ya que las rocas dominantes en el área son andesitas y basaltos y 2) alta concentración de sales, como halita, cuya disolución en agua dificulta el uso de geotermómetros basados en cationes (Giggenbach, 1988).

### Relación entre la salmuera de la Laguna Tuyajto y el sistema de aguas subterráneas

La salmuera de la Laguna Tuyajto se encuentra cerca de la saturación con respecto a la halita. En acuíferos con un espesor importante, la alta concentración en sales disueltas en la capa superior en que se produce

la evaporación podría dar lugar a flujos de convección en la laguna, en cuyo caso provocarían un flujo descendente de la salmuera hacia aguas con menor concentración y menor densidad, desplazándolas como consecuencia de la diferencia entre las densidades (Fan et al., 1997). Este tipo de flujos son comunes en muchas regiones salinas (Duffy y Al-Hassan, 1988) y está caracterizado en el Salar de Atacama, al Oeste, que es el fondo de cuenca terminal de todo el sistema, Pero la escasa profundidad del agua y lo somero del nivel ignimbrítico de baja permeabilidad que conforma el fondo de la Laguna Tuyajto dificulta la generación de dichos flujos convectivos de la salmuera. Sin embargo, estos flujos convectivos se pueden producir en el acuífero a una escala mayor, que comprende el conjunto de las cuencas altiplánicas.

Puede existir una transferencia de agua desde la Laguna Tuyajto hacia el Salar de Aguas Calientes 3, debido a la diferencia topográfica entre ambas cuencas y a la alta concentración de cloruro sódico que se observa en el pozo PAAR-2 (Fig. 6.). Sin embargo, la alta acumulación de sales en la Laguna Tuyajto, así como la naturaleza del material volcánico que limita el Oeste de la cuenca, parecen indicar que esta transferencia es pequeña o nula. Lo anterior permite deducir un comportamiento tipo tránsito de la laguna respecto el flujo regional del acuífero.

## Conclusiones

La composición química de las aguas de manantiales de la Laguna Tuyajto y de los pozos de las cuencas Pampa Colorada y Pampa Las Tecas estaría controlada por la disolución actual o precedente de minerales evaporíticos previos, enterrados bajo depósitos volcánicos, y los más recientes derivados de los mismos, por la evaporación de aguas meteóricas y en parte por la interacción agua-roca a alta temperatura. El exceso de cloruro sobre el ion sodio respecto a la relación marina podría ser debido a cambios catiónicos, pero también cabe considerar que sea debido a la incorporación de HCl de desgasificación magmática, aunque esto aún está por estudiar.

El contenido isotópico de las muestras de agua correspondientes a los manantiales ubicados en el Noreste y Norte de la laguna de Tuyajto indica que el agua de recarga procede básicamente de la fusión de la nieve acumulada a altas cotas en la ladera Sur del volcán Tuyajto. Esta nieve procede en parte de los eventos de precipitación generados por los frentes fríos que parten desde el Pacífico y barren la zona de estudio en invierno. Adicionalmente y en menor medida, el agua de lluvia procedente de eventos intensos de precipitación que típicamente acontecen en verano también puede producir recarga a lo largo de la pendiente existente desde las zonas altas de la cuenca hasta el fondo de esta, donde se encuentra la laguna.

El agua muestreada en los manantiales ubicados en el lado Este de la Laguna Tuyajto es el resultado de un

proceso de mezcla entre el agua de recarga producida por la precipitación y aguas subterráneas procedentes de la transferencia lateral de las cuencas hidrológicas vecinas de Pampa Las Tecas y Pampa Colorada.

La laguna de Tuyajto muestra localmente un funcionamiento de tránsito respecto el flujo regional del acuífero. Su existencia y dinámica dependen esencialmente de las aportaciones de los manantiales y de la transferencia de agua desde las cuencas vecinas de Pampa Las Tecas y Pampa Colorada. La conservación de los valores ecológicos y de avifauna de la laguna Tuyajto estaría por lo tanto muy ligada a los cambios territoriales del entorno y en especial de la posible explotación de agua subterránea.

No se trata únicamente de un caso de estudio, sino del análisis de una situación relativamente frecuente en los Andes Centrales, aunque coexistiendo con otras condiciones, en función de la altitud, régimen pluvial y nival y tipo de terreno en superficie. En general faltan estudios de detalle y por esta razón este caso es de relevancia para caracterizar áreas altas, de más de 4000 m, con nieve temporal, terreno superficialmente permeable y con pequeña profundidad de extinción de la evaporación, como es el caso de recubrimientos piroclásticos recientes. Tal sucede también en los Andes de Tarapacá (Región 1 de Chile) y muy posiblemente también en las áreas altas de Tacna (Sur de Perú). Los aspectos en relación con la a veces alta salinidad del agua es algo superpuesto, bien sea por progresivo lixiviado de posibles depósitos salinos anteriores, enterrados bajo los depósitos volcánicos recientes y los que se derivan de la erosión y transporte de los mismos, o por la formación de pequeñas cuencas endorreicas intra-montañas actuales, por similares procesos. Estas cuencas endorreicas parecen no estar completamente cerradas, de modo que las salmueras finales de evaporación, frecuentemente enriquecidas en haluros de K, Mg y Li, pueden unirse a un flujo más regional y acumularse en los lugares más deprimidos, que son cuencas cerradas, como es el caso del Salar de Atacama.

## Agradecimientos

Esta investigación se ha llevado a cabo en el marco del Proyecto Anillo ACT1203 de la CONICYT de Chile. La investigación también fue financiada por una beca de doctorado CONICYT-PCHA / Doctorado Nacional / 2015-21150951 de J.U. y una beca de doctorado CONICYT-PCHA / Doctorado Nacional / 2016-21160152 de C.G.

## Referencias

- Alcalá, F.J, Custodio, E. (2008). Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal. *Journal of Hydrology*, 359 (1-2): 189-207.
- Ammann, C., Jenny, B., Kammer, K., Messerli, B. (2001). Late Quaternary glacier response to humi-

- dity changes in the arid Andes of Chile (18-29°S). *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 172(3-4): 313-326.
- Backer, M.C. (1981). The nature and distribution of upper Cenozoic ignimbrite centres in the Central Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1981; 11(2-4): 293-315.
- Chaffaut I. (1998) *Precipitations d'altitude, eaux souterraines et changements climatiques de l'Altiplano Nord-Chilien*. Thèse de Doctorat Université Paris XI Orsay: 1-274.
- Chong, G. (1988) The Cenozoic saline deposits of the Chilean Andes between 18 00' and 27 00' south latitude. In *The Southern Central Andes*, Springer Berlin Heidelberg: 137-151.
- Cortecci, G., Boschetti, T., Mussi, M., Herrera C., Mucchino, C. & Barbieri, M. (en prensa). New chemical and original isotopic data on waters from El Tatio geothermal field, northern Chile. *Geochemical Journal*, 39: 547-571.
- Custodio, E., Llamas, M.R. (1983). *Hidrología subterránea*. Editorial Omega, Barcelona: 1-2350.
- Custodio, E., Herrera, C. (2000). Utilización de la relación Cl/Br como trazador hidrogeoquímico en hidrología subterránea. *Boletín Geológico y Minero*, 111(4): 49-67.
- Custodio, E. (2010). Estimation of aquifer recharge by means of atmospheric chloride deposition balance in the soil. *Contributions to Science*, 2010, 6(1): 81-97.
- Custodio, E., Jódar, J., (2016). Simple solutions for steady-state diffuse recharge evaluation in sloping homogeneous unconfined aquifers by means of atmospheric tracers. *Journal of Hydrology*, 540: 287-305.
- DGA (Dirección General de Aguas) (2009). *Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas* (on line). Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile. <http://snia.dga.cl/BNAConsultas>.
- Duffy, C., Al-Hassan, S. (1988). Groundwater circulation in a closed desert basin: Topographic scaling and climatic forcing. *Water Resources Research*, 24: 1675-1688.
- Fan, Y., Duffy, C. J., Oliver, D. S. (1997). Density-driven groundwater flow in closed desert basins: field investigations and numerical experiments. *Journal of Hydrology*, 196(1): 139-184.
- Geyh, M., Grosjean, M., Nuñez, L., Schotterer, I. (1999). Radiocarbon reservoir effect and the timing of the Late-Glacial/Early Holocene humid phase in the Atacama Desert (Northern Chile). *Quaternary Research*, 52: 143-153.
- Giggenbach, W. (1988). Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52: 2749-2765.
- Jódar, J., Custodio, E., Liotta M., Lambán, J.L., Martos-Rosillo, S., Sapriza, G., Rigo, T., Herrera, C., (2016a): Correlation of the seasonal isotopic amplitude of precipitation with annual evaporation and altitude in alpine regions. *Science of the Total Environment*, 550: 27-37.
- Jódar, J., Custodio, E., Lambán, J.L., Martos-Rosillo, S., Herrera, C., Sapriza, G., (2016b): Vertical variation in the amplitude of the seasonal isotopic content of rainfall as a tool to jointly estimate the groundwater recharge zone and transit times in the Ordesa and Monte Perdido National Park aquifer system, north-eastern Spain. *Science of the Total Environment*, 573: 505-517.
- Lindsay, J.M., de Silva, S., Trumbulla, R., Emmermann, R., Wemmerc, K. (2001). La Pacana caldera, N. Chile: a re-evaluation of the stratigraphy and volcanology of one of the world's largest resurgent calderas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106: 145-173.
- Mardones, L. (1977). *Geología e hidrogeología de los salares de Ascotán y Carcote, II Región, Chile*. Universidad Católica del Norte. Memoria de Título: 1-234.
- Montgomery, E., Rosko, M., Castro, S., Keller, B., Bevacqua, P. (2003). Interbasin underflow between closed Altiplano basins in Chile. *Groundwater*, 41: 523-531.
- NOAA, 2008. National Oceanic and Atmospheric Administrations. National Data Buoy Center ([http://tao.ndbc.noaa.gov/proj\\_overview/pubs/outstand/mcph1720/mcph1720\\_ndbc.shtml](http://tao.ndbc.noaa.gov/proj_overview/pubs/outstand/mcph1720/mcph1720_ndbc.shtml)).
- Ramírez, C., Gardeweg, M. (1982). Hoja Toconao, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 54: 1-122.
- Risacher, F., Alonso, H., Salazar, C. (1999). *Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones - Chile*, Dirección General de Aguas: 1-461.
- Risacher, F., Alonso, H., Salazar, C. (2003). The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth-Science Reviews*, 63(3-4): 249-293.
- Sophocleous, M. (2009). Relationships between groundwater and surface water in the Prairie Wetlands of North America. IAH-Spanish Chapter. October 2009. Zaragoza.
- Stern, C., Moreno, H., López-Escobar, L., Clavero, J., Lara, L., Naranjo, J., Parada, M., Skewes, A. (2007). Chilean volcanoes. In: Moreno, T., Gibbons, W. (ed.), *Geology of Chile*, Geological Society of London: 289-308.
- USGS (2015) Earth Explorer. US Geological Survey, Reston, VA. <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Se accedió el 15 de Enero del 2017.
- Vuille, M., Ammann, C. (1997). Regional snowfall patterns in the high, arid Andes. *Clim. Change.*, 36: 413-423.
- WMC (2006). *Evaluación de impactos hidrológicos producto de la extracción de agua Subterránea - Proyecto Pampa Colorada*. Environmental Impact Study for Pampa Colorada (EIA Pampa Colorada). Water Management Consultants, for Minera Escondida Ltda.