

## **Antecedentes hidroquímicos del Salar de Aguas Calientes I (Chile)**

### **Hydrochemical background of the Salar de Aguas Calientes I (Chile)**

*Ingrid Garcés Millas<sup>\*1</sup>, Pedro López Julián<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería. Universidad de Antofagasta. Casilla 170 – Antofagasta, Chile.

<sup>2</sup>Campus la Almunia. Calle Mayor S/N. Universidad de Zaragoza 50100 - La Almunia, España.

(Recibido el 28 de enero de 2011. Aceptado el 17 de febrero de 2012)

#### **Resumen**

El Salar de Aguas Calientes I es un sistema salino del Altiplano chileno, situado a 4.280 m.s.n.m, expuesto a condiciones ambientales áridas. El presente trabajo da cuenta del estudio hidroquímico de las soluciones superficiales existentes en el salar, tanto de soluciones diluidas como concentradas en surgencias y acumulaciones lacustres, así como de la mineralogía de las sales precipitadas por evaporación de estas aguas lacustres. Los principales aportes de agua al salar ingresan por la zona norte y por el sector sur, siendo estos últimos de carácter termal. Los restantes aportes se limitan a escasas precipitaciones en forma de escorrentía superficial o subsuperficial. Todas estas aguas circulan hacia las zonas más bajas del salar, y se acumulan en distintos puntos a lo largo de su sector occidental como consecuencia de un ligero basculamiento en su superficie.

Los resultados del análisis químico indican que, a pesar de tratarse de aguas con grados de concentración variable y que oscilan entre muy diluidas y altamente concentradas, todas ellas pertenecen al tipo químico Na-Cl, debido a la interacción de las aguas con los depósitos salinos preexistentes en el salar, en los que predominan halita y yeso. Además, todas las soluciones mostraron elevados contenidos en elementos químicos asociados a actividad hidrotermal como son Li, B y As, encontrándose este último en rangos de toxicidad incluso en las muestras diluidas.

En el margen norte del salar, las aguas de una surgencia no termal caracterizadas por ser de muy baja concentración en sales minerales, discurren hacia el salar,

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 56 + 55 + 637 313, correo electrónico: igarcés@uantof.cl (I. Garcés)

alimentando una zona de bofedal en la que se desarrolla importante vida vegetal y sirven de sustento a los rebaños de camélidos del área. En cambio, las aguas de los sectores central y meridional (donde se encuentra una surgencia de carácter termal) son mucho más concentradas, acumulándose en lagunas desprovistas de desarrollo vegetal. El análisis mineralógico de las sales periféricas a las lagunas y el tratamiento de los datos fisicoquímicos de las aguas muestreadas, indican que los procesos activos de concentración por evaporación, dan lugar a la precipitación de halita y yeso.

A partir de de las características hidroquímicas del salar podemos enfatizar que, el sector norte es el más interesante desde el punto de vista ambiental, ya que constituye un refugio para comunidades vegetales y de camélidos, siendo éste el más sensible a cualquier cambio provocado en el futuro por la explotación de los recursos del salar, principalmente boratos.

----- *Palabras clave:* Aguas Calientes I, evaporitas, salar andino, actividad hidrotermal, hidroquímica

### **Abstract**

The salar “Aguas Calientes I” is a saline system located in the Chilean altiplane at 4.280 m.a.s.l, and exposed to arid climatic conditions. Chemistry of waters exposed in the salar surface has been studied in this work. During the field survey, several sectors with surficial waters were accurately located by means of GPS, and solutions in springs, wetlands, and saline ponds were sampled. Samples were adequately stored and carried to laboratory for chemical analysis. In several places, saline solid material was also collected for mineralogical analysis.

The main water inputs to the salar are situated in the northern and southern areas, this latter being thermal. Other inputs are the scarce precipitations that enter into the salar as surficial and/or subsurficial runoff. All these waters circulate towards the lowest areas of salar, being accumulated in several ponds along the western edge as consequence of a light tilting of salar surface.

The water chemistry indicate that all of them belong to the same chemical type, Na-Cl, despite the high dispersion in solute content. This is due to the interaction between solutions and underground saline deposits of salar, mainly composed of halite and gypsum. Moreover, concentrations of Li, B, and As were high for all samples, typical of waters related to hydrothermal activity. In the case of As all samples show concentrations above toxicity level, even in the most diluted. The non-thermal fresh spring waters outcropping in the northern margin flow towards the salar, feeding along their course an important wetland (locally named bofedal) and supplying fresh water to herds of camelids. On the contrary, waters present in central and southern areas of salar are highly concentrated in ponds without plants in their margins. Ponds are rimmed by saline minerals, whose mineralogical analysis together

with physicochemical calculations on water chemical data indicate an active process of mineral precipitation involving halite and gypsum.

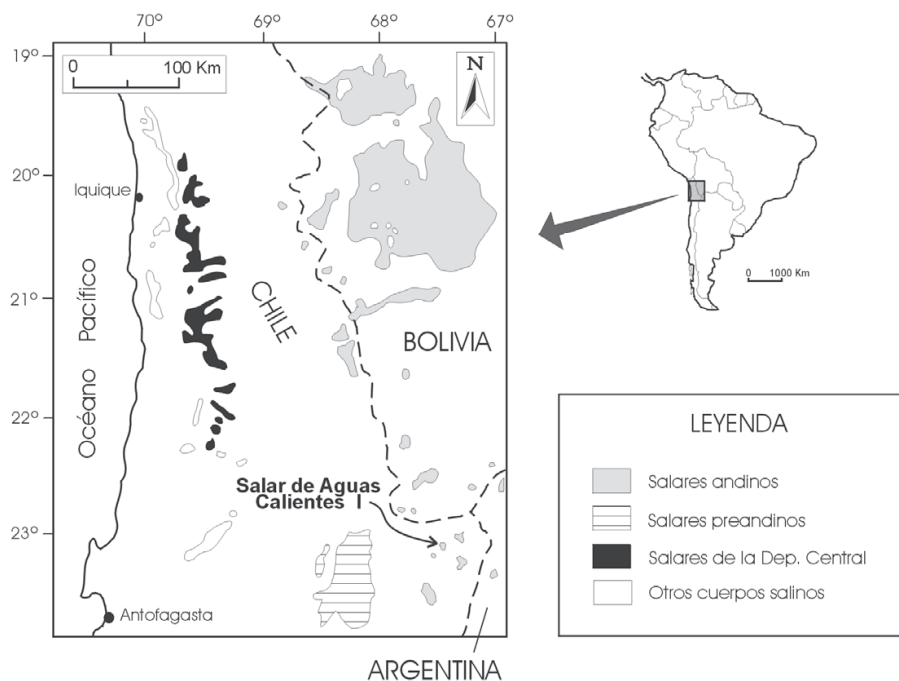
Hydrology and water chemistry show that the northern sector of salar is the most interesting from the environmental point of view, since it offers the most suitable conditions in the region for development and maintenance of plants and camelids. Nevertheless, it is the most vulnerable to any potential change related to future economic developments as, for example, borate extraction.

----- **Keywords:** Aguas Calientes I, evaporites, andean salar, hydrothermal activity, hydrochemistry

### Introducción

El Salar de Aguas Calientes I es un depósito evaporítico ubicado en las coordenadas 23°07'22''S y 67°26'W, situándose su cota de base a una alti-

tud de 4.280 m.s.n.m y con una extensión de unos 15 Km<sup>2</sup>. Drena a una cuenca endorreica de unos 281 Km<sup>2</sup>, con una orientación de su eje mayor NS de 6,5 Km y que en su parte más ancha tiene aproximadamente 2,4 Km (figura 1).



**Figura 1** Ubicación geográfica del salar

Los salares son el testigo de la existencia en la zona de lagos de profundidad variable que, en determinadas fases del Terciario y comienzos del Cuaternario, ocuparon las áreas más deprimidas de muchas cuencas cerradas de los Andes chilenos, argentinos y bolivianos. La evolución paleoclimática desde finales del Terciario,

tendente hacia una aridez cada vez mayor, junto con el cambio de régimen exorreico a endorreico provocado por la actividad tectónica, tuvo como consecuencia la transición gradual de lagos poco salinos a salobres y, finalmente, a hipersalinos, que dieron lugar a los actuales depósitos evaporíticos.

La actividad evaporítica actual en los salares se asocia a una elevada tasa de evaporación. La presencia de agua superficial está restringida a zonas reducidas y marginales en las que se acumulan las aguas procedentes de quebradas o donde aflora el agua subterránea, que en algunos casos es de carácter termal. El Salar de Aguas Calientes I es un salar de tipo playa, con lagunas superficiales de extensión variable que ocupa un área relativamente reducida de la depresión, que está recubierta por una costra de materiales salinos, mayoritariamente halita y yeso [1]. Esta situación obedece al balance hídrico actual, claramente deficitario, ya que las precipitaciones que recibe la cuenca de drenaje se sitúan en torno a 150 mm/año, siendo la evaporación estimada superior a 1.500 mm/año [2] lo que revela un ambiente marcadamente árido. La morfología superficial del salar es prácticamente plana, aunque un ligero basculamiento hacia el oeste condiciona que las aguas que acceden al mismo, discurren y se acumulen en su margen occidental.

El sustrato geológico de la zona donde se sitúa el salar está constituido principalmente por rocas ígneas de edad Plioceno. La más importante es la Ignimbrita Atana con un volumen de unos 2500 Km<sup>3</sup> de tobas dacíticas blancas, rosadas y grises [3] que pertenece a la zona geológica conocida como Complejo Volcánico Altiplano Puna (APVC). Esta unidad se sitúa estratigráficamente sobre otras unidades ignimbríticas más antiguas, asociadas a la actividad ígnea existente en este sector al menos desde el Mioceno Superior [4], asociada a la caldera de La Pacana, que se ha interpretado como la caldera de colapso más antigua del vulcanismo cenozoico en esta región.

La combinación de aridez climática y una elevada altitud se traduce en unas rigurosas condiciones ambientales entre las que destacan las siguientes: baja presión parcial de oxígeno y de dióxido de carbono, alta radiación solar, suelos pobremente desarrollados con baja disponibilidad de nutrientes, bajas temperaturas con una acusada oscilación diaria, distribución irregular de precipitaciones y periodos prolongados de aridez. En estas condiciones, el salar y su entorno constitu-

yen una reserva de agua crucial para el desarrollo de la vida en el altiplano, destacando las zonas de humedal que se localizan en los márgenes de los depósitos salinos y que en el altiplano reciben el nombre de “bofedales”. Se trata de zonas con saturación de agua prácticamente permanente y que sustentan una gran diversidad de flora y fauna, prosperando en los mismos una importante comunidad vegetal (principalmente cojines de ciperáceas). Además sirven como abrevadero del ganado de altura, constituido principalmente por camélidos (llamas, vicuñas y alpacas). Por ello, los bofedales tienen una importancia biológica y antropológica crucial, permitiendo el mantenimiento de unas formas de vida en condiciones totalmente adversas para su desarrollo, pero son ecosistemas muy frágiles, ya que dependen de condiciones de saturación permanente de agua con bajo grado de mineralización.

Desde el punto de vista económico, el salar posee importantes reservas de boratos, sales minerales altamente solubles, que están genéticamente relacionados con la actividad volcánica del Terciario Superior – Cuaternario [5]. El yacimiento de boro en este salar ha sido prospectado pero no explotado, quedando en la superficie de su zona central una serie de calcatas abiertas de hasta 2 m de profundidad, en cuyo fondo aflora el agua freática del salar. Por todo ello, es importante la caracterización de los distintos tipos de aguas presentes en el salar, con objeto de evaluar su fragilidad ante una eventual intervención humana relacionada con la explotación de los recursos minerales existentes.

## Metodología

La metodología utilizada en este estudio está relacionada con la recogida y análisis de soluciones presentes en las distintas partes del salar, con el fin de su caracterización y estudio de las relaciones químicas entre ellas. El principal criterio para la elección de zonas donde proceder a la toma de muestras fue la existencia de soluciones superficiales, tanto en las áreas donde los aportes acceden al salar (vertientes y surgencias termales) como en las de acumulación en los sectores

marginales (bofedales) y más internos (láminas de salmuera libre) del mismo. En los puntos de muestreo se determinó in situ, la temperatura y pH de las soluciones. Las muestras fueron almacenadas al abrigo de la luz durante su traslado al laboratorio de Análisis Químico de la Universidad de Antofagasta (Chile), donde se realizaron las determinaciones de densidad y concentración en Ca, Mg, Na, K, Li, As, Si (mediante espectrometría de absorción atómica),  $\text{SO}_4$  (técnica gravimétrica con secado de residuo), Cl (volumetría),  $\text{HCO}_3$  y  $\text{CO}_3$  (técnica potenciométrica), y B (volumetría ácido-base). Sobre una alícuota de las muestras se determinó su contenido en elementos traza, empleando un espectrómetro de masas cuadrupolar con fuente de plasma (Q-ICP-MS). La mineralogía de las fases sólidas muestreadas en el salar se determinó por difracción de rayos X utilizando la técnica del polvo cristalino. Este análisis permitió identificar los minerales cuya proporción en las muestras era superior al 2%, y también estimar su abundancia relativa.

Los cálculos de la modelización geoquímica, se realizaron con los datos químicos obtenidos y las mediciones in situ, utilizando el software PHRQPITZ [6], el cual incorpora (y amplía a rangos de temperatura entre 0 y 60 °C para algunas fases minerales) la aproximación de Pitzer [7] con la parametrización realizada por Harvie et al. [8] para el sistema Na-K-Mg-Ca-H-Cl- $\text{SO}_4$ - $\text{HCO}_3$ - $\text{CO}_3$ - $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$ . Este software permite calcular los valores de fuerza iónica, actividad del agua, actividades iónicas e índices de saturación de las soluciones respecto de las fases salinas de interés en el sistema estudiado. Una descripción más ampliada de la modelización puede encontrarse en López et al. [9].

## Resultados

Durante la campaña de recogida de muestras, realizada a comienzos del periodo de verano austral del 2008 (mes de diciembre), se procedió al reconocimiento completo del salar y a la identificación de los puntos de agua existentes sobre el mismo. Se comprobó que el agua libre superficial existente en el Salar de Aguas Calientes I cubre tan sólo alrededor de un 10% del área total del

salar, situación similar a la observada 15 años antes por Risacher et al. [1]. Simultáneamente se seleccionaron y situaron mediante GPS los puntos de muestreo representativos de los distintos ambientes acuáticos observados. La figura 2 muestra la ubicación sobre la imagen de satélite de las muestras recogidas, así como el aspecto de las distintas zonas de muestreo. Los resultados de los análisis químicos realizados se presentan en las tablas 1 y 2.

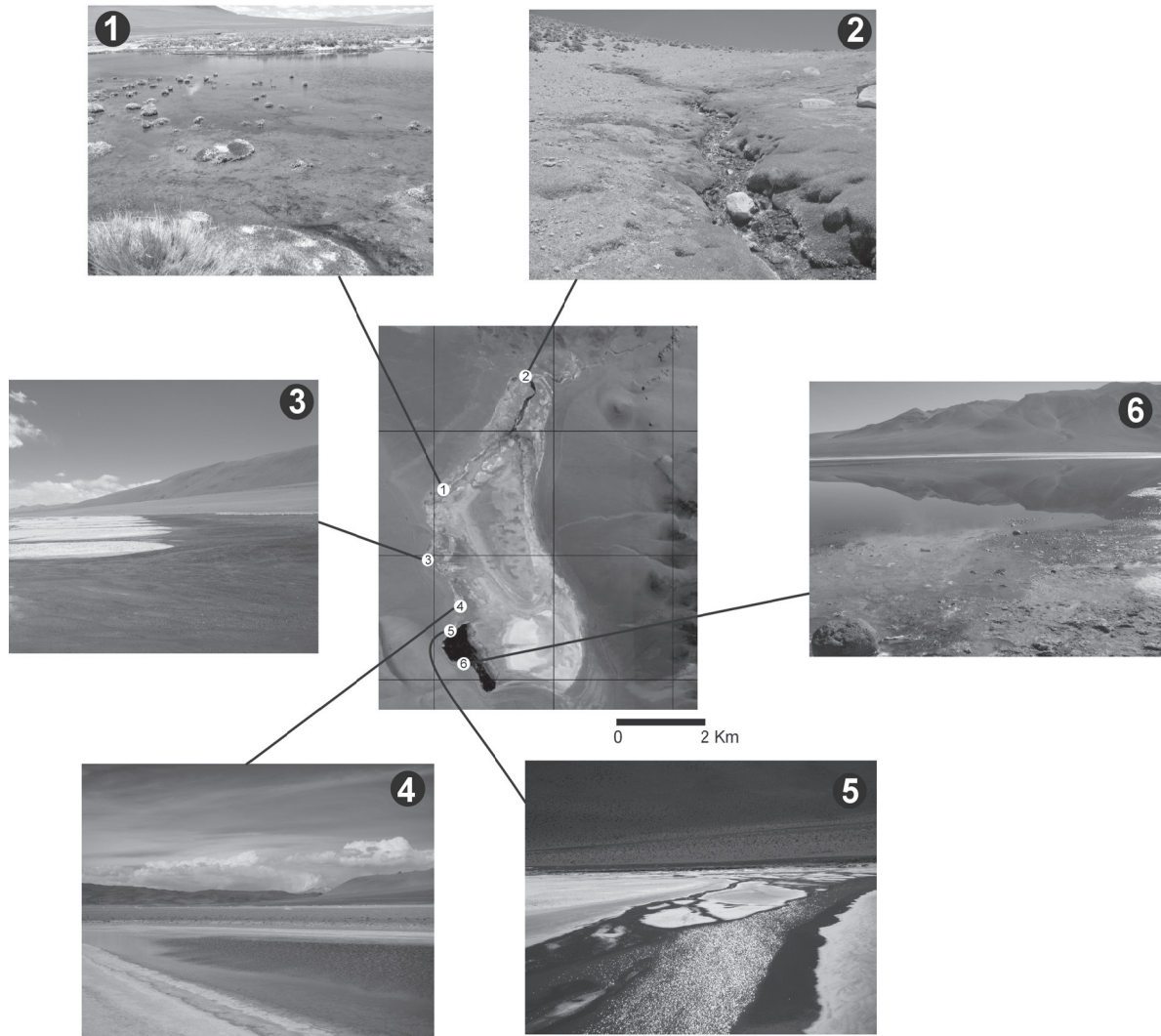
El reconocimiento del área permitió identificar cuatro puntos de aguas con las siguientes características:

- Un área de bofedal en el sector centro-occidental del salar, muestra A1-1 (punto 1, figura 2). Zona con abundante vegetación, principalmente, ciperáceas y juncáceas en ambiente turboso, donde el agua libre presenta una concentración iónica muy baja. La lámina de agua libre tiene una profundidad no superior a 20 cm y, tal como se comprobó durante el muestreo, sirve como abrevadero para los camélidos del entorno, concretamente llamas y vicuñas.
- Área con surgencia de agua no termal en el extremo más septentrional del salar, muestra A1-2 (punto 2, figura 2). Esta surgencia tiene un caudal importante, estimado en 50 L/s, y su agua fluye ladera abajo hacia el salar, que se encuentra unos 20 m por debajo de la cota de alumbramiento. Al realizar el recorrido descendente se comprobó que el agua que surge en el punto 2 discurre hasta el punto 1, existiendo conexión hidráulica superficial entre ambos.
- En el sector centro-occidental del salar hay varias zonas de aguas superficiales con láminas de agua muy poco profundas (< 5 cm), adyacentes al margen occidental del salar, en las que se tomaron las muestras A1-3, A1-4 y A1-5 (puntos 3, 4 y 5 de la figura 2, respectivamente). Estas zonas aparecen desprovistas de vegetación y en sus márgenes destaca la presencia de material salino precipitado, de color blanco. Análisis químicos confirmaron

que las aguas superficiales eran salmueras de alta fuerza iónica.

- En la zona de surgencia termal del sector suroccidental del salar, se tomó la muestra

A1-6 (punto 6, figura 2). El alumbramiento es de tipo difuso, con varios puntos de surgencia (mediciones in situ dan lecturas de 50 °C), con un color rojizo oscuro en la zona de afloramiento.



**Figura 2** Fotografías de los distintos puntos de agua identificados en el salar, y ubicación en la imagen de satélite

**Tabla 1** Análisis químico de las soluciones muestreadas en el salar, expresados en mg/L

<i>Parámetro / Muestra</i>	<i>A1-1</i>	<i>A1-2</i>	<i>A1-3</i>	<i>A1-4</i>	<i>A1-5</i>	<i>A1-6</i>
<b>pH</b>	7,90	6,70	7,65	6,80	7,72	6,43
<b>T campo (°C)</b>	26,7	17,6	22,5	22,0	25,1	47,3
<b>Densidad (g/l)</b>	0,998	1,000	1,011	1,125	1,002	1,008

<b>Parámetro / Muestra</b>	<b>A1-1</b>	<b>A1-2</b>	<b>A1-3</b>	<b>A1-4</b>	<b>A1-5</b>	<b>A1-6</b>
<b>Cloruros</b>	924	619	12490	117655	4753	13755
<b>Sulfato</b>	185	78	403	1984	243	292
<b>Bicarbonato</b>	117	120	47	727	50	53
<b>Calcio</b>	109	59	1365	11938	435	1655
<b>Magnesio</b>	20	27	91	1030	36	164
<b>Sodio</b>	524	361	6913	71581	2602	6880
<b>Potasio</b>	50	12	219	1831	71	156
<b>Litio</b>	2,89	2,90	30	227	12	27
<b>Arsénico</b>	0,639	0,610	2,40	41	12,03	2,67
<b>Boro</b>	18	8	78	729	28	73
<b>Silicio</b>	26	23	27	28	27	16

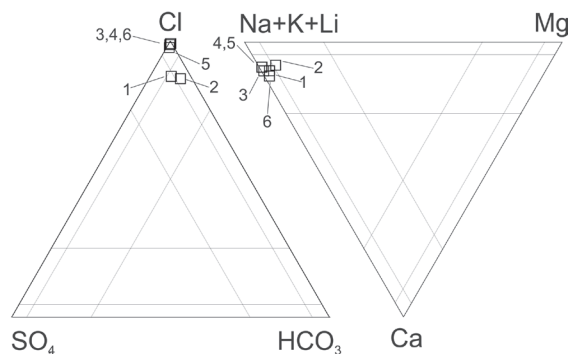
**Tabla 2** Contenidos en elementos traza, de las soluciones recogidas en el salar, expresados en mg/L

<b>Parámetro / Muestra</b>	<b>A1-1</b>	<b>A1-2</b>	<b>A1-3</b>	<b>A1-4</b>	<b>A1-5</b>	<b>A1-6</b>
<b>Ba</b>	48,43	25,60	236,9	2114	99,88	427,5
<b>Co</b>	0,690	0,180	3,260	24,54	0,730	2,970
<b>Cr</b>	0,499	2,320	0,324	4,369	0,600	0,455
<b>Hf</b>	0,018	0,013	0,009	0,073	0,011	0,006
<b>Nb</b>	0,014	0,007	0,005	0,094	0,008	0,004
<b>Ni</b>	7,329	9,125	4,781	81,46	1,551	15,51
<b>Sc</b>	8,68	11,74	15,99	30,9	12,85	11,21
<b>Th</b>	0,030	0,019	0,003	0,032	0,013	0,005
<b>U</b>	0,530	8,530	0,234	1,206	0,061	0,019
<b>V</b>	24,89	12,34	24,20	139,8	15,25	7,172
<b>Y</b>	0,056	0,016	0,212	1,972	0,105	0,470
<b>Zn</b>	37,42	23,90	26,13	33,78	86,54	20,77
<b>Zr</b>	0,282	0,178	0,127	0,787	0,131	0,113

En la figura 3, los datos químicos se han representado en diagramas triangulares [10], forma usual de representar los resultados en medios salinos. Se observa que todas las muestras analizadas pertenecen al tipo químico, clorurado-sódico, a pesar de mostrar una gran dispersión de

concentraciones que va desde aguas muy diluidas (A1-1 y A1-2) hasta verdaderas salmueras (A1-4). Las únicas muestras cuyo comportamiento se separa muy ligeramente de la pauta general son las del sector norte (A1-1 y A1-2) que presentan una proporción aniónica levemente mayor en  $\text{HCO}_3$

y SO<sub>4</sub>. La concentración del resto de elementos menores y traza en solución, es función directa del grado de concentración global de las soluciones.



**Figura 3** Representación de los datos químicos de las soluciones analizadas sobre los diagramas triangulares de Eugster y Hardie (1978). Se ha indicado para cada muestra el punto de la figura 2 al que pertenece

La tabla 3 presenta los principales resultados de los cálculos termodinámicos realizados a las

soluciones analizadas, comprobándose que la más diluida es la surgencia no termal del sector norte del salar (A1-2, de fuerza iónica 0,024 molal), y a continuación la muestra recogida en el bofedal situado al sur de la anterior (A1-1; 0,037 molal). Por su parte, la surgencia termal del sur presenta una concentración global superior a las dos anteriores (A1-6; 0,457 molal). Las salmueras recogidas en varias lagunas del sector centro-occidental muestran grados de concentración variable, que van de la más diluida (A1-5; 0,155 molal) a la más concentrada (A1-4; 4,319 molal).

Otro parámetro que permite calcular el código de modelización empleado es la actividad del agua, cuya evolución es contraria a la de la fuerza iónica. Así, las soluciones más diluidas presentan unos valores de actividad del agua muy próximos a la unidad (muestras A1-1 y A1-2, a H<sub>2</sub>O=0,999), reduciéndose dicho valor conforme aumenta la concentración de las soluciones (0,858 para la salmuera más concentrada, muestra A1-4).

**Tabla 3** Resultados de los cálculos termodinámicos empleando el código PHRQPITZ [6] y del análisis mineralógico por DRX de las muestras

<b>Parámetro / Muestra</b>	<b>A1-1</b>	<b>A1-2</b>	<b>A1-3</b>	<b>A1-4</b>	<b>A1-5</b>	<b>A1-6</b>
<b>Fuerza Iónica (molal)</b>	0,037	0,024	0,418	4,319	0,155	0,457
<b>Actividad H<sub>2</sub>O</b>	0,999	0,999	0,988	0,858	0,995	0,987
<b>I.S. Calcita</b>	+0,26	-1,21	-0,05	+1,74	+0,02	-0,49
<b>I.S. Yeso</b>	-1,39	-1,91	-0,75	+0,25	-1,11	-0,84
<b>I.S. Halita</b>	-4,95	-5,24	-2,85	-0,67	-3,63	-2,84
<b>Mineralogía sedimentos (DRX)</b>	-	-	H+Y+(Q,F,M,A)	H + Y	Y + H +(C)	-

Las condiciones de saturación de las soluciones frente a las distintas fases minerales se han evaluado mediante el cálculo de los índices de saturación mineral con el código PHRQPITZ. En la tabla 3 se presentan los resultados correspondientes a los principales minerales salinos de interés (calcita, yeso y halita) cuya

presencia se ha identificado en el análisis mineralógico de las muestras de sales recogidas junto a las soluciones y que se presentan en la última fila de la misma tabla. Sólo se formaron muestras sólidas en los puntos en que se observó la existencia de depósitos salinos recientes asociados a la actividad evaporítica actual, es



decir, generados a partir de la concentración por evaporación de las aguas superficiales, por lo que únicamente se presentan datos correspondientes a los puntos de muestreo identificados como 3, 4 y 5 (figura 2). En todos estos puntos la mineralogía de los precipitados salinos está dominada mayoritariamente por halita (H) y yeso (Y), apareciendo como minerales accesorios calcita (C), cuarzo (Q), flogopita (F), microclina (M) y anortita (A) en una menor proporción. Las condiciones de saturación (I.S.) de las soluciones analizadas respecto de los minerales salinos de interés muestran un comportamiento variable. Así, en el sector norte del salar (surgencia no termal y bofedal), las aguas se encuentran claramente subsaturadas respecto de yeso y halita. Por su parte, la surgencia no termal (muestra A1-2) se encuentra subsaturada en calcita, mientras que las aguas del bofedal se encuentran saturadas respecto de este mineral. Por otra parte, la surgencia termal (A1-6) se encuentra subsaturada respecto de estos tres minerales salinos principales, aunque el grado de subsaturación es menor que el de la surgencia no termal (A1-2). Finalmente, de las muestras recogidas en las lagunas del sector central, las dos más diluidas (A1-3 y A1-5) se encuentran en equilibrio con calcita y subsaturadas respecto de yeso y halita, mientras que la más concentrada (A1-4) aparece sobresaturada respecto de calcita y yeso, y subsaturada respecto de halita.

## Discusión

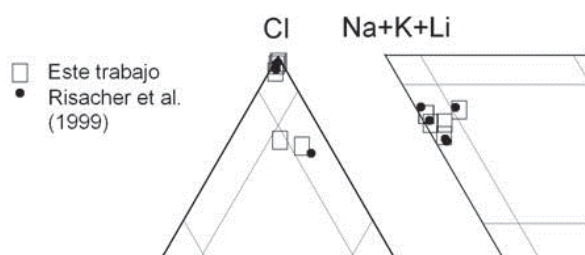
En el salar de Aguas Calientes I existen aguas con características hidrológicas y geoquímicas marcadamente diferentes. Los resultados obtenidos tras el análisis de las muestras recogidas en los distintos sectores identificados nos permiten poner de manifiesto lo siguiente:

La naturaleza química de las aguas evidencian (figura 3) que el salar pertenece al sistema Na-Cl, y guardan relación directa con la composición salina del salar, cuyos sedimentos están principalmente constituidos por halita acompañada de yeso y con presencia de boratos en su zona central. Es de notar la gran concentración de As y B, en las

salmueras de la zona centro-occidental del salar (A1-3, A1-4 y A1-5), lo cual obedece al origen predominantemente hidrotermal de las soluciones de recarga.

La composición de todas las aguas muestreadas parece estar ligada a la composición salina de los sedimentos del salar, ya que su contacto tanto con las aguas superficiales que acceden al salar como con las de los aportes subterráneos, provoca el enriquecimiento en cloruro y sodio, generando de esta forma una homogeneidad composicional de las soluciones. La actividad evaporítica actual da lugar a que en los periodos de mayor concentración por evaporación de las soluciones superficiales precipiten sales minerales del mismo tipo que las que constituyen el núcleo salino del salar, habiéndose identificado en este trabajo que se trata mayoritariamente de halita y yeso.

Comparando los datos químicos de soluciones del salar de un trabajo previo [1], que se han representado en la figura 4 junto con los del presente trabajo, podemos visualizar coincidencia de los puntos sobre los diagramas triangulares, teniendo en cuenta que existe una diferencia de 15 años entre ambos muestreos, lo cual permite comprobar la estabilidad de la composición de las soluciones superficiales del salar, a lo largo del tiempo.



**Figura 4** Comparación de los datos del presente trabajo con los de Risacher et al., (1999) sobre los diagramas triangulares de Eugster y Hardie (1978). Se presenta una imagen ampliada para facilitar la visualización

De acuerdo con las características que presentan las aguas superficiales, estas se pueden reagrupar en tres diferentes zonas, el primero incluye los

puntos de aguas del sector norte y noroccidental, y comprende la surgencia no termal (muestra A1-2) y el área del bofedal (muestra A1-1), cuyas características es presentar aguas muy poco concentradas, alrededor de las cuales se desarrolla la escasa vida vegetal presente en el salar, y que además sirven de punto de abrevadero para la fauna de camélidos del sector, tal y como se pudo comprobar durante la campaña de muestreo. Se trata por tanto de aguas que suponen el hábitat y el sustento hídrico de las formas de vida vegetal y animal de esta zona, constituyendo un ecosistema de elevada fragilidad frente a cualquier tipo de intervención externa. La conexión hidráulica superficial entre la zona de surgencia, con un caudal de alumbramiento importante (estimado en unos 50 L/s), y la zona de bofedal, asegura que las aguas de este último se mantengan en condiciones de dilución aceptables para el desarrollo de la vegetación, a pesar de las exigentes condiciones de evaporación y de la proximidad de depósitos salinos, los que contribuyen al aumento en la salinidad de las aguas y, por consiguiente, a la destrucción del equilibrio actual. Por todo ello, cabe concluir que cualquier variación en la zona de alumbramiento de la surgencia no termal, tanto en caudal como en calidad del agua, influirá negativamente en el mantenimiento de las condiciones actuales del bofedal.

La siguiente zona identificable en el salar la constituyen las lagunas del sector centro-occidental, que albergan aguas con un variable grado de concentración químico. Estas lagunas se localizan principalmente en la zona occidental del salar, ya que debido a un ligero basculamiento de su superficie hacia el W, se acumulan en este margen las escasas precipitaciones y también las soluciones procedentes del flujo subsuperficial tanto del entorno del salar como de su zona interna. El predominio de aguas procedentes del interior o del exterior del núcleo salino del salar condiciona el mayor o menor grado de concentración de las soluciones, aunque todas ellas comparten un mismo tipo químico. El contraste paisajístico de estas zonas de acumulación de agua con las de la

zona norte y noroccidental es evidente, ya que en la zona de lagunas de salmueras no existe vida vegetal alguna, estando las acumulaciones de agua bordeadas por una fina capa de sedimentos salinos precipitados por la evaporación marginal de la lámina de salmuera en su zona más somera. Es en esta zona donde se recogieron las muestras sólidas, y se analizaron por difracción de rayos X (tabla 3).

En el sector meridional del salar existe una zona de surgencia de aguas termales, que afloran en distintos puntos y de las cuales recibe su nombre el salar. La temperatura de surgencia está en torno a 50 °C, y el presente trabajo nos muestra que las condiciones químicas y térmicas actuales son prácticamente idénticas a las de hace quince años [1]. Esta surgencia tiene una concentración en disolución del orden de las que muestran las salmueras del sector central (con una fuerza iónica de 0,457, muestra A1-6, tabla 3), muy superior a la de las aguas de la zona norte y noroccidental. Esta zona de surgencias alimenta la laguna del sector sur del salar, denominada “laguna negra” y que no alberga forma alguna de vida vegetal ni sirve de suministro de agua para los camélidos de la región.

De lo expuesto, cabe concluir que la zona norte del salar está hidráulicamente desconectada del resto de puntos de agua en él existentes. La surgencia no termal del punto 2 desciende hacia la base del salar y sus aguas se acumulan en la zona de bofedal (punto 1), donde se mantienen en un elevado grado de dilución debido al importante caudal de la surgencia y al nulo contacto con los sedimentos salinos del salar. Por otra parte, en las lagunas del sector centro-occidental y sur-occidental se acumulan aguas provenientes del drenaje de la cuenca que alimenta al salar, y que por contacto con los minerales salinos preexistentes y por la elevada tasa de evaporación se concentran hasta dar lugar a verdaderas salmueras. En la zona más meridional afloran aguas termales con un grado de concentración en solución similar al de las salmueras que se acumulan en las lagunas próximas, de lo que se deduce que la concentración de las soluciones

viene en esta zona controlada por la interacción con los sedimentos salinos del salar.

El grado de concentración de las aguas superficiales del salar depende del balance entre los aportes (surgencias y precipitaciones estacionales) y las salidas por evaporación. Así, las salmueras presentes en las lagunas del sector central y sur-occidental presentan un grado de concentración variable, que aumenta progresivamente hacia el punto de muestreo identificado con el número 4 (la muestra A1-4 es la que posee la mayor concentración en solución). En este punto se puede situar el punto hidrológicamente más aislado, es decir, la zona donde las escasas aguas que acceden tienen como única salida la evaporación, dando lugar a salmueras cuya concentración alcanza los valores más elevados de entre los analizados (ver tablas 1 y 2). Elementos como B, Li o As llegan a alcanzar localmente concentraciones muy elevadas, debido al origen hidrotermal de las surgencias que originaron la acumulación de sales del salar, y cuyos vestigios actuales quedan limitados a los puntos de muestreo 2 y 6. Es necesario destacar la concentración de As que llega a alcanzar un valor máximo de 41 mg/L, y está por encima del límite de toxicidad (0,1 mg/L según las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud) en todas las aguas muestreadas. Por su parte, los puntos 3 y 5 poseen un mayor caudal de alimentación, lo que impide que lleguen a alcanzar un grado de concentración por evaporación tan elevado como en el caso del punto 4.

De lo observado en este trabajo cabe concluir que la zona del salar más sensible a cualquier cambio es su sector noroccidental. Contrastando los datos del presente estudio con los de Risacher et al. [1] indican que no se ha afectado al volumen y/o la calidad del agua en la zona de la surgencia (A1-2) como en el bofedal (A1-1). Ello ha permitido el mantenimiento de una importante comunidad vegetal y el suministro de agua para los grupos de camélidos de la región. Desde el punto de vista ambiental, esta zona es la que debe ser vigilada frente a cualquier intervención humana, ya que cualquier proyecto de extracción y beneficio en

los salares suele necesitar un aprovechamiento de los recursos hídricos allí existentes que, sin una evaluación previa adecuada, pueden influir decisivamente de forma negativa en los frágiles ecosistemas asociados a las zonas de bofedal.

## Conclusiones

Las aguas presentan una elevada homogeneidad en cuanto a su tipo químico, clasificándose del tipo Na-Cl (figura 3), circunstancia que se atribuye al contacto con los minerales salinos preexistentes en el salar, de entre los cuales sobresalen halita y yeso.

De los minerales identificados, sólo la halita, yeso y calcita se pueden correlacionar con procesos activos de precipitación evaporítica, mientras que las restantes fases minerales consisten en material terrígeno de alteración de las rocas volcánicas (ignimbritas de carácter intermedio a ácido) que constituyen el sustrato rocoso de la cuenca de drenaje del salar.

Las observaciones realizadas en terreno permitieron relacionarlas con mediciones anteriores comprobándose la gran estabilidad del sistema en un periodo de 15 años.

La surgencia no termal de la zona norte del salar (punto 2 en figura 2) alimenta el bofedal del sector noroccidental (punto 1), punto ambientalmente de mayor interés, por servir de sustento hídrico a la única comunidad vegetal del área, como a los camélidos allí existentes.

La presencia de agua en el sector centro-oeste y suroccidental se caracteriza por ser verdaderas salmueras. La evaporación de las mismas conduce a la precipitación de halita y yeso, minerales que orlan las lagunas y cuya mineralogía coincide con la que constituye el núcleo salino preexistente del salar. La laguna más meridional presenta contacto hidrológico directo con la surgencia termal del sector sur (situada en el punto 6 de la figura 2), mientras que las restantes no presentan puntos de alimentación visibles en superficie. En conjunto, estas lagunas constituyen zonas de acumulación de agua proveniente de drenaje

superficial y/o subterráneo, existiendo una relación inversa entre el caudal de alimentación y la concentración de sus soluciones. Así, la laguna del punto 4 (figura 2) contiene las aguas de mayor concentración, de lo que se deduce que recibe una alimentación de agua comparativamente mucho menor que las de los puntos 3 y 5, en que los aportes subsuperficiales mantiene a las soluciones con menor concentración en sales a pesar de estar sometidas todas ellas a la misma tasa de evaporación.

En resumen la zona de mayor importancia ambiental que se ubica en el sector noroccidental del salar, que por sus especiales características hidrológicas altitudinales, climatológicas, y por su alta sensibilidad a cualquier modificación relacionada con la intervención humana, debiese ser monitoreo y protección para preservar, en la medida de lo posible, las condiciones actuales que le permiten albergar y proporcionar agua a las escasas formas de vida vegetal y animal presentes en esta región.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Antofagasta por el aporte prestado durante las campañas realizadas, al Laboratorio del Servicio General de Geocronología y Geoquímica Isotópica de la Universidad del País Vasco y al Laboratorio del Servicio de Difracción de rayos X de la Universidad de Zaragoza. Se hacen extensivos los agradecimientos al Dr. José Pueyo por el valioso aporte en las correcciones del artículo.

### Referencias

1. F. Risacher, H. Alonso, C. Salazar. "Salar de Aguas Calientes 1". *Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones*. Convenio de Cooperación DGA – UCN – IRD-, S.I.T. N°51. Enero, Santiago de Chile. 1999. pp: II - 99 [AC1] - II - 110 [AC1].
2. Dirección General de Aguas (DGA). *Balance Hídrico de Chile: Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Telecomunicaciones*. Gobierno de Chile. 1987. pp. 24.
3. B. Mason, D. Pyle, C. Oppenheimer. "The size and frequency of the largest explosive eruptions on Earth". *Bulletin of Volcanology*. Vol. 66. 2004. pp. 735-748.
4. J. Lindsay, S. de Silva, R. Trumbull, R. Emmermann, K. Wemmer. "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*. Vol. 106. 2001. pp. 145-173.
5. R. Alonso. "On the origin of La Puna borates". *Acta Geológica Hispánica*. Vol. 34. 1999. pp.141-166.
6. L. Plummer, D. Parkhurst, G. Fleming, S. Dunkle. *Computer program incorporating Pitzer's equations for calculation of geochemical reactions in brines: US Geological Survey*. Water-Resources Investigation Report. WRI 88-4153. 1988. pp. 310.
7. K. Pitzer. "Thermodynamics of electrolytes. I. Theoretical basis and general equations". *Journal of Physical Chemistry*. Vol. 77. 1973. pp. 268-277.
8. C. Harvie, N. Moller, J. Weare. "The prediction of mineral solubilities in natural waters: The Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO<sub>4</sub>-OH-HCO<sub>3</sub>-CO<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system to high ionic strengths at 25 °C". *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 48. 1984. pp. 723-751.
9. P. López, L. Auqué, I. Garcés y G. Chong. "Características geoquímicas y pautas de evolución de las salmueras superficiales del Salar de Llamará, Chile". *Revista Geológica de Chile*. Vol. 26. 1999. pp. 89-108.
10. H. Eugster, L. Hardie. *Saline Lakes. Lakes, Chemistry, Geology, Physics*. A. Lerman (editor). Ed. Springer Verlag. New York (USA). 1978. pp. 237-293.