



MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS



UNIVERSIDAD CATOLICA DEL NORTE



Institut de recherche
pour le développement
INSTITUT DE RECHERCHE
POUR LE DÉVELOPPEMENT
(ex ORSTOM)

CONVENIO DE COOPERACION DGA – UCN – IRD

**GEOQUIMICA DE AGUAS
EN CUENCAS CERRADAS:
I, II Y III REGIONES - CHILE**

**VOLUMEN I I
ESTUDIO DE CUENCAS DE LA I I REGION**

REALIZADO POR:

**François Risacher
Hugo Alonso
Carlos Salazar**

S.I.T. N° 51

Santiago, Enero de 1999

INDICE

SEGUNDA REGION

Salar de Alconcha	1 - 13	[ALC]
Salar de Carcote	15 - 31	[CAR]
Salar de Ascotan	33 - 55	[ASC]
Salar de Atacama	57 - 75	[ATA]
Salar de Tara	77 - 87	[TAR]
Laguna Helada	89 - 97	[HEL]
Salar de Aguas Calientes 1	99 - 109	[AC1]
Salar de Pujsa	111 - 119	[PSA]
Salar de Loyoques	121 - 133	[LOY]
Lag. Trinchera / Chivato Muerto	135 - 143	[TRI/MUE]
Salar de Aguas Calientes 2	145 - 153	[AC2]
Laguna Lejia	155 - 165	[LEJ]
Laguna Miscanti	167 - 175	[MIS]
Laguna Miñiques	177 - 185	[MIN]
Salar del Laco	187 - 195	[LAC]
Laguna Tuyajto	197 - 205	[TUY]
Salar de Aguas Calientes 3	207 - 219	[AC3]
Salar de Capur	221 - 229	[CPR]
Salar de Imilac	231 - 241	[IMI]
Salar de Punta Negra	243 - 261	[PUN]
Salar de Aguas Calientes 4	263 - 273	[AC4]
Laguna de la Azufrera	275 - 283	[LAZ]
Salar de Pajonales	285 - 295	[PAJ]

Cada estudio de cuenca está presentado de manera independiente. Los estudios están organizados de la siguiente manera :

1. El **texto** que describe e interpreta la geoquímica de aguas de la cuenca, del salar o de la laguna

2. A continuación del texto siguen varios **anexos**:

- el mapa de la cuenca con la ubicación de los puntos de muestreo.
- la lista de los puntos de muestreo con las coordenadas UTM y el tipo de muestra.
- el cuadro de análisis.
- los diagramas circulares que representan gráficamente la composición química de las aguas de aporte (en meq/l).
- los diagramas de barras que muestran gráficamente la calidad de las aguas de aporte en función de las normas de potabilidad y de riego. En caso de pocas muestras, los diagramas de barras están agrupados con los circulares.
- el mapa geológico con las vías evolutivas de las aguas de aporte.

Los métodos de representación y de interpretación están descritos detalladamente en la parte **SINTEISIS** del estudio.

El informe completo está disponible en CD-ROM.

Advertencia:

Las figuras de este trabajo que se refieren o relacionen con los límites y fronteras de Chile, no comprometen, en modo alguno, al Estado de Chile, de acuerdo con el Art. 2º letra g) del D.F.L. N° 83, del Ministerio de Relaciones Exteriores.

SALAR DE ALCONCHA

Introducción

La cuenca del salar de Alconcha se encuentra en la Cordillera de los Andes al extremo norte de la II Región. Colinda al este con la cuenca de Michincha y al sur con la cuenca del río Loa. Aunque su hidrogeología ha sido investigada por empresas mineras, no se explota las napas de la cuenca. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4250 m
- superficie de la cuenca: 128 km²
- superficie del salar: 3,8 km²
- superficie de la laguna: 0,5 - 1 km²
- precipitaciones: 200 mm/año
- evaporación potencial: 1620 mm/año
- temperatura media: 3,5°C

El salar está parcialmente recubierto por una laguna salada poco profunda y de superficie variable. Varios manantiales surgen en las laderas. Sus aguas se infiltran alimentando las napas alrededor del salar. La orilla sur-oeste es un gran bofedal con vertientes fluyentes y difusas y numerosas pozas de evaporación. Es la única alimentación visible de la laguna.

Aguas de aporte

Representamos en la figura 1 la composición química de todas las aguas, diluidas y saladas, de Michincha. Las varias aguas de aporte tienen una composición relativamente homogénea.

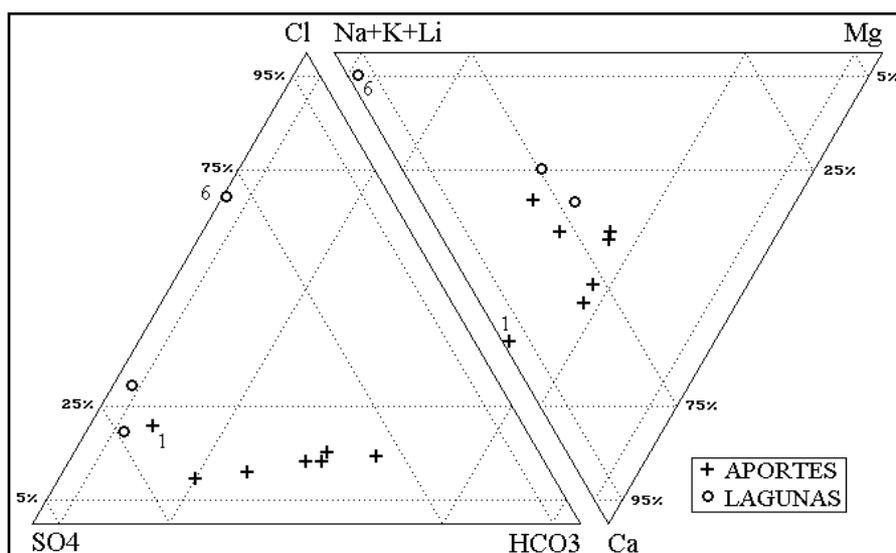


Fig.1. Composición de las aguas de aporte y de las salmueras del salar de Alconcha.

Hemos muestreado 6 aguas de vertiente (5 fluyentes y una difusa) y el agua termal de un pozo surgente (ALC-1). Las aguas de vertiente tienen una composición relativamente homogénea y son de tipo catiónico Na - Ca - Mg. Se ubican casi al centro del triángulo Na-Ca-Mg. Su tipo aniónico se extiende en un estrecho huso desde un polo SO_4 (4) hasta un polo HCO_3 (3), con una concentración porcentual de Cl baja y casi constante. Este contenido relativo en SO_4 y HCO_3 es el punto relevante que diferencia y caracteriza cada agua de vertiente. Por otra parte, las aguas de vertientes fluyentes son muy diluidas: desde 120 mg/l hasta 230 mg/l. El agua de la vertiente difusa es mucho más salada: 1165 mg/l, pero no se distingue de las aguas muy diluidas en lo que se refiere a sus concentraciones porcentuales. Esas aguas de vertientes se parecen mucho a las aguas de aporte del vecino salar de Michincha. El agua termal de la napa surgente (ALC-1) es distinta. Es de tipo Ca-Na / SO_4 , con muy poco magnesio. Notamos, al paso, que se observa la misma deficiencia en Mg en las aguas *termales* de la cuenca de Pintados.

La figura 2 presenta las relaciones Na versus Cl y Ca versus SO_4 para todas las aguas y salmueras. No se observa concentraciones equimolares entre Na y Cl, pero sí entre Ca y SO_4 .

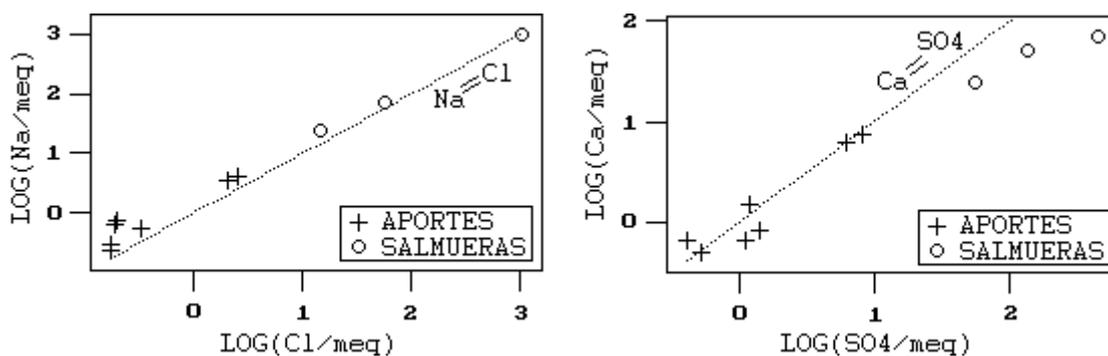


Fig.2. Relación entre Na - Cl y Ca - SO_4 en las aguas del salar de Alconcha

Podría ocurrir alguna disolución de sulfato de calcio (yeso) para las dos aguas de aporte más concentradas (7 y 10). Para las aguas más diluidas, a pesar de agruparse cerca de la recta de equimolaridad $\text{Ca} = \text{SO}_4$, es poco probable un aporte sustancial de Ca y SO_4 por disolución de yeso. Estas aguas son demasiado diluidas para ser aguas de lixiviación de sales. Es más probable que los componentes disueltos en las aguas de vertientes provengan de la alteración de rocas volcánicas con presencia de azufre o sulfuros. Al oxidarse, el azufre acidifica las aguas, reduciendo su contenido en bicarbonatos, sin modificar el contenido relativo de cloruros.

Composición de la laguna

La laguna principal del salar (6) es salada (100 g/l STD). En el bofedal circundante, las pozas de evaporación (8 y 9) presentan soluciones menos concentradas: 3 - 15 g/l STD. Sus composiciones químicas, de tipo Na-Mg / SO_4 , son distintas de la composición de la laguna de tipo Na / Cl- SO_4 (ver Fig.1).

Vías evolutivas

Todas las aguas de aporte evolucionan por evaporación hacia salmueras sulfatadas, sea por la vía neutra sulfatada (1, 5, 10) sea por la vía alcalina sulfatada (2, 3, 4, 7). Esta uniformidad refleja la similitud de los aportes. A pesar de su composición distinta, el agua de napa ALC-1 sigue también una vía sulfatada. La vía sulfatada corresponde bien a aguas de terrenos volcánicos con azufre. La vía neutra sulfatada podría reflejar la presencia de rocas volcánico-sedimentarias o un contenido más elevado de azufre en las rocas lixiviadas. Sin embargo, la baja salinidad de las vertientes caracteriza más los terrenos volcánicos o cristalinos que los sedimentarios. La geología de la cuenca es esencialmente volcánica con ocurrencias de azufre, en particular en el volcán Aucanquillcha (6100 m) al sur del salar. Se puede asumir entonces una buena correlación entre la litología de la cuenca y las vías evolutivas de las aguas.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la poza en bofedal (ALC-9) y también hasta la concentración de la salmuera de la laguna (ALC-6). Las soluciones reales están muy sobresaturadas en calcita y la salmuera (6) en yeso. Por eso hemos recalculado la composición de estas soluciones una vez llevadas al equilibrio después de precipitar la calcita y el yeso. Los valores de la columna "desviación" son los coeficientes del chi-cuadrado adaptado que miden el grado de semejanza entre las soluciones de aporte evaporadas (ALC-xxE) y la solución real equilibrada (ALC-xx.EQL).

NUMERO	PH	ALC	NA	K	LI	CA	MG	CL	SO4	B	SI	DESV.
<i>ALC-9.EQL</i>	<i>7,91</i>	<i>1,82</i>	<i>1670</i>	<i>1050</i>	<i>1,86</i>	<i>494</i>	<i>636</i>	<i>2080</i>	<i>5580</i>	<i>66,3</i>	<i>33,6</i>	
ALC-10E	8,20	1,77	1470	1010	1,62	461	741	1360	6260	88,4	32,7	0,034
ALC-7E	8,35	2,38	1680	1000	1,51	226	808	1510	6320	77,0	32,8	0,080
ALC-2E	8,35	2,91	1520	1050	--	225	805	1380	5790	124	32,8	0,130
ALC-3E	8,38	3,20	1520	1420	--	188	678	1650	5360	135	32,9	0,159
ALC-4E	8,45	2,49	2070	1110	1,12	154	539	867	6790	49,6	33,1	0,223
ALC-5E	8,22	1,51	1670	963	0,231	428	660	724	7170	49,2	32,9	0,355
ALC-1E	8,14	1,50	3080	397	4,44	528	70,1	2840	4570	94,2	32,6	0,466
<i>ALC-6.EQL</i>	<i>8,13</i>	<i>2,90</i>	<i>23800</i>	<i>14600</i>	<i>14,1</i>	<i>724</i>	<i>375</i>	<i>37600</i>	<i>19900</i>	<i>157</i>	<i>15,9</i>	
ALC-1E	7,97	7,69	28900	3740	41,9	612	660	26700	32700	803	26,2	0,516
ALC-4E	8,14	7,06	17500	9340	9,41	529	4370	7300	55300	417	28,6	0,723
ALC-7E	8,04	9,87	14400	8590	13,0	513	6810	13000	50800	662	27,1	0,735
ALC-10E	8,04	11,9	13500	9250	14,9	519	6780	12500	48800	814	27,2	0,764
ALC-3E	7,97	12,9	12900	12100	--	533	5650	14100	43300	1080	27,6	0,826
ALC-2E	8,01	14,5	13000	9030	--	528	6790	11800	46300	1050	27,3	0,896
ALC-5E	8,08	7,12	15200	8770	2,10	516	5960	6600	57300	448	28,2	0,999

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las soluciones del salar de Alconcha. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

El agua de la poza (9) proviene de la evaporación de las vertientes (7) y (10) que se descargan en el bofedal. Las desviaciones son mínimas. El agua de napa (1) no parece tener mucha influencia sobre la composición de las pozas del bofedal. Al contrario, el agua de aporte evaporada que más

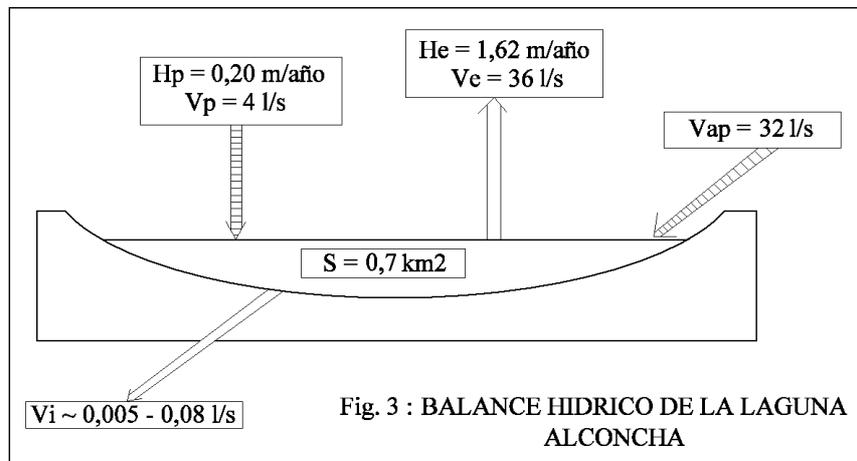
se asemeja a la salmuera de la laguna es el agua de la napa termal, pero con un coeficiente de desviación bastante mediocre de 0,5. Las demás aguas evaporadas tienen una desviación todavía más importante, lo que sugiere que la alimentación principal de la laguna no proviene del lado del bofedal. Tampoco es posible obtener una composición de salmuera similar a la laguna partiendo de una mezcla ponderada de distintos aportes. Los aportes superficiales visibles no son los principales. Es probable que la laguna sea alimentada en gran parte por vertientes difusas a lo largo de su orilla oriental con aguas de composición más parecida a ALC-1 que a las vertientes diluidas de la cuenca.

Calidad de agua

Todas las aguas de vertientes cuenca arriba son de excelente calidad tanto para el uso doméstico como para el uso agrícola. Las aguas de vertientes en el bofedal son de calidad aceptable o al límite de potabilidad. El agua de napa tiene cuatro veces más arsénico que el máximo permisible para el uso humano y tres veces más boro para el uso agrícola.

Balance hídrico de la laguna Alconcha

Tenemos un problema para estimar las infiltraciones. No conocemos la composición promedio de las aguas de aporte por faltar un componente difuso importante. Por eso damos un rango de tasa de infiltración basado en las concentraciones extremas de los aportes encontrados.



Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 1,62$ m/año
- $H_p = 0,20$ m/año
- $S = 0,6$ km²
- $C_{ap} = 6 - 90$ mg/l
- $C_L = 36\ 600$ mg/l

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 995\ 000$ m³/año = 32 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 160 - 2500$ m³/año
= 0,005 - 0,08 l/s

A pesar de la gran imprecisión sobre la composición de las aguas de aporte, es posible adelantar que las infiltraciones son mínimas.

Conclusiones

El salar de Alconcha está alimentado por dos tipos de aguas :

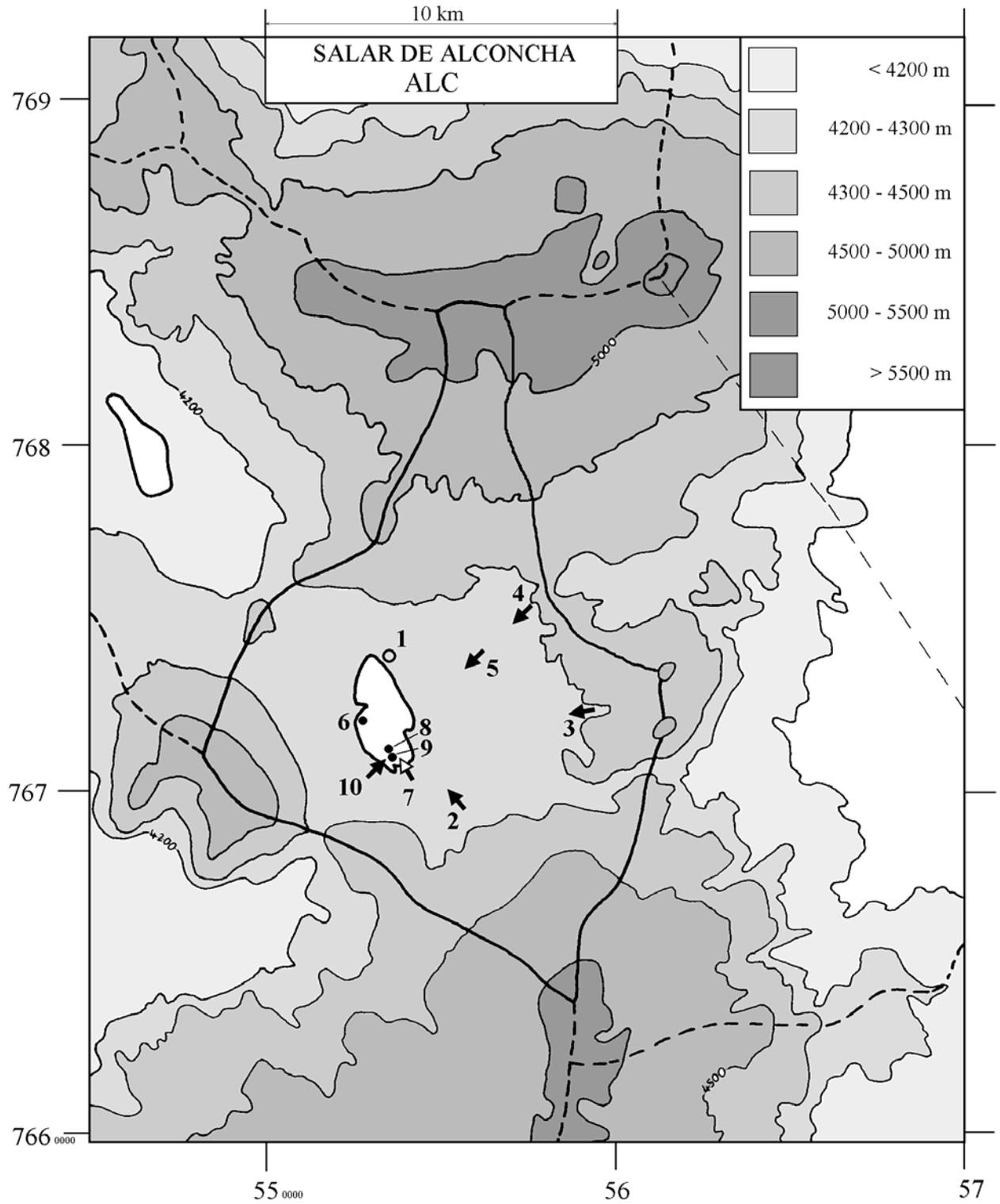
- aguas diluidas (120-230 mg/l STD) de tipo Na-Ca-Mg / $\text{HCO}_3\text{-SO}_4$ en vertientes cuenca arriba que alimentan el gran bofedal al sur del salar. La salmuera de la laguna principal no proviene de la evaporación de estas aguas.

- aguas de napa más concentradas (1000 mg/l) de tipo Ca-Na / SO_4 .

Hay buena concordancia entre los tipos químicos, las vías evolutivas y la geología de la cuenca. Basicamente, las aguas de aporte provienen de la alteración de rocas volcánicas con azufre. Ningún agua de aporte produce por evaporación, de manera satisfactoria, una salmuera similar a la de la laguna principal del salar. Su principal alimentación se hace probablemente por descarga de napas en su orilla oriental.

Referencias y estudios anteriores

Montgomery, E.L. and Harshbarger J.W. 1985. Groundwater development from salar basins in the arid andean highlands of northern Chile. IV Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, 19-24 Agosto de 1985, Actas, 5, 36-53.



**SALAR DE ALCONCHA
ALC**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
ALC-1	09/04/97	12 ^H 35	553482	7673910	4185	Napa (pozo 7 hierro, surgente)
ALC-2	09/04/97	14 ^H 10	556036	7669738	4190	Manantial corriente AW-5
ALC-3	09/04/97	15 ^H 00	558891	7672378	4280	Manantial corriente
ALC-4	09/04/97	16 ^H 05	557316	7675280	4250	Manantial corriente
ALC-5	09/04/97	16 ^H 30	555648	7674175	4200	Manantial corriente
ALC-6	09/04/97	17 ^H 15	552647	7671824	4180	Laguna
ALC-7	14/04/97	10 ^H 15	553926	7670791	4181	Manantial difuso en bofedal
ALC-8	14/04/97	10 ^H 45	553618	7671065	4180	Poza de evaporación en bofedal
ALC-9	14/04/97	11 ^H 05	553623	7671003	4180	Poza de evaporación en bofedal
ALC-10	14/04/97	11 ^H 25	553434	7670905	4181	Manantial corriente en bofedal

**SALAR DE ALCONCHA
ALC**

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
ALC-1	1170	43,4	0,2	1,000	6,46	1,43	89,5	0,217	0,036	396	na	2,97	22,8	0,213	97,1	12,5	0,140	150	2,21
ALC-2	142,0	12,6	5,2	1,000	7,42	0,629	6,00	0,039	0,0029	25,2	2,2	0,541	19,4	0,0026	6,60	4,57	nd	10,2	5,08
ALC-3	141,0	16,1	5,3	1,000	8,07	0,746	5,96	0,046	0,0016	19,4	1,4	0,486	15,7	0,0032	5,50	5,12	nd	13,1	3,67
ALC-4	220,0	19,2	5,0	1,000	7,78	0,678	6,99	0,024	0,0005	53,3	1,2	0,400	35,6	0,0068	17,5	8,95	0,009	13,0	5,22
ALC-5	235,0	11,7	5,4	1,000	7,10	0,542	6,53	0,032	0,0003	67,3	1,1	0,443	27,3	0,0055	15,1	8,68	0,002	16,8	5,95
ALC-6	112000	13,1	4,4	1,072	8,65	8,66	36600	29,6	0,229	21300	na	157	15,9	1,93	24400	14600	14,0	1440	374
ALC-7	1384	2,8	0,0	1,000	7,37	7,15	72,1	0,217	0,0099	301	na	3,68	40,3	0,0494	80,0	47,7	0,072	126	58,3
ALC-8	5950	5	8,8	1,005	8,47	5,15	529	1,93	0,143	2670	na	24,6	53,5	0,251	541	305	0,660	493	267
ALC-9	14900	6,2	4,7	1,012	8,46	6,97	2080	8,63	0,256	6440	na	66,2	51,0	1,20	1730	1050	1,86	1010	634
ALC-10	288,0	6,1	4,0	1,000	7,94	1,19	11,6	0,081	0,0042	57,4	1,7	0,757	26,0	0,0186	12,6	8,60	0,014	29,4	6,34

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

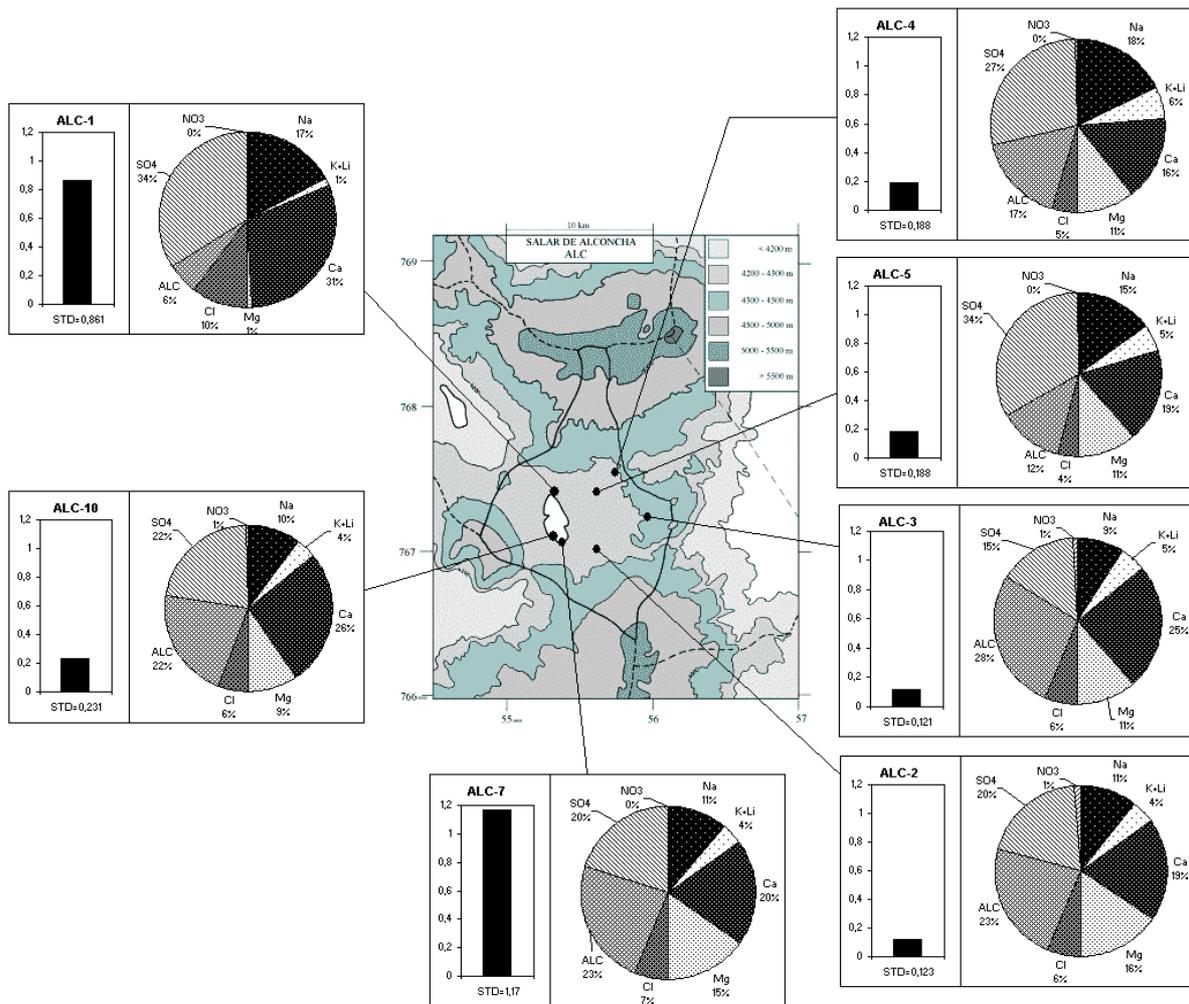
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
ALC-1	860,7	87,2	0,06	37	12,24	12,19	0,4
ALC-2	123,2	38,1	0,06	2,6	1,330	1,357	2,0
ALC-3	120,9	44,3	0,30	0,7	1,326	1,340	1,1
ALC-4	188,3	40,3	0,18	1,1	2,067	2,004	3,1
ALC-5	187,6	32,9	0,0	4,8	2,206	2,145	2,8
ALC-6	99366	139	25,8	0,3	1538	1483	3,6
ALC-7	1165	434	1,02	40	15,77	15,46	2,0
ALC-8	5201	260	14,8	1,5	77,99	75,65	3,0
ALC-9	13489	301	25,3	1,6	204,9	199,8	2,5
ALC-10	230,8	71,4	0,36	1,7	2,757	2,742	0,6

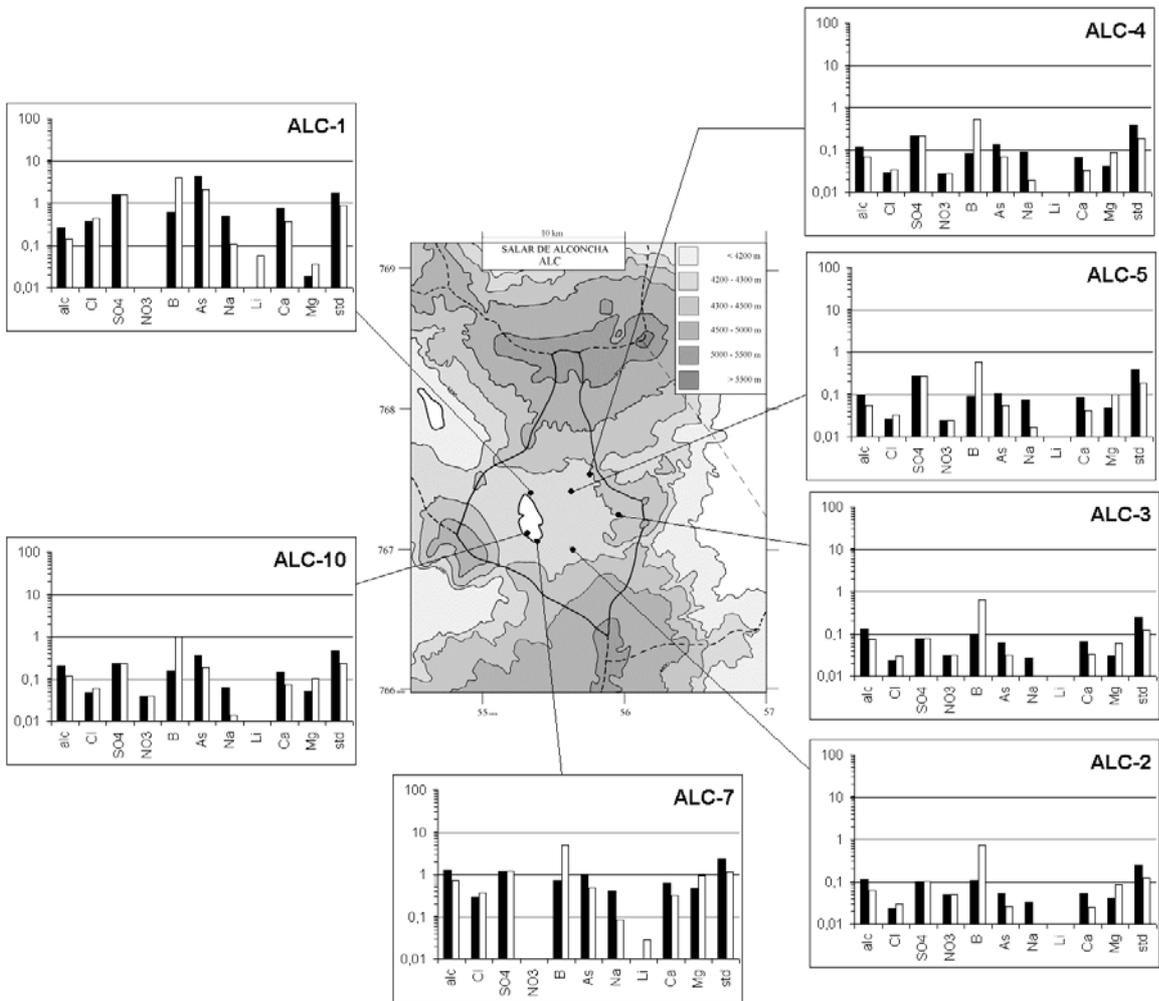
NUMERO	$\delta^{18}O$	δ^2H
ALC-1	-14,42	-108
ALC-3	-14,71	-111

Análisis de oxígeno-18
y deuterio

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %





MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

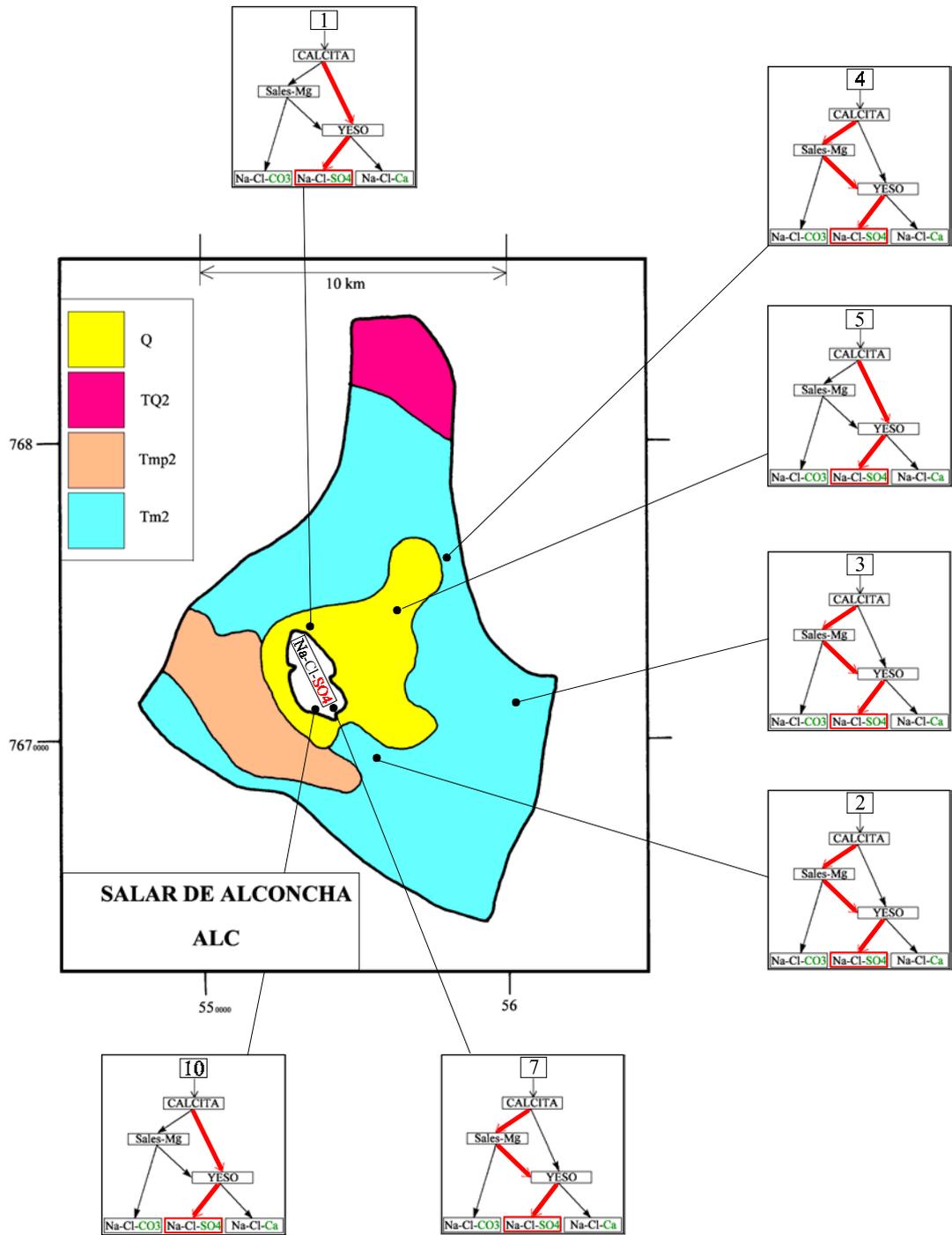
ALC

Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

TQ2 : *Plioceno - Pleistoceno*. Coladas, tobas y brechas andesíticas y basálticas con intercalaciones de sedimentitas detríticas.

Tmp2 : *Mioceno - Plioceno*. Ignimbritas riolíticas y riodacíticas con intercalaciones sedimentarias.

Tm2 : *Mioceno*. Tobas riolíticas y dacíticas, coladas andesíticas y dacíticas.



SALAR DE CARCOTE

Introducción

La cuenca del salar de Carcote se encuentra al norte de la II Región. Colinda al sur con la cuenca del salar de Ascotán y al oeste con la cuenca del río Loa. Su hidrogeología ha sido investigada por Mardones (1977) y más recientemente por CODELCO- Chuquicamata, pero con información reservada. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 3690 m
- superficie de la cuenca: 561 km²
- superficie del salar: 108 km²
- superficie de las lagunas 3 - 4 km²
- precipitaciones: 100 - 150 mm/año
- evaporación potencial: 1630 mm/año
- temperatura media: 5,8°C

Es un salar de tipo playa constituido de limos salinos y costras de sales. A unos decímetros de profundidad se encuentra una napa de salmuera. Existen varias lagunas superficiales generalmente ubicadas cerca de las orillas y alimentadas por vertientes al borde el salar. En época seca, la superficie total de estas lagunas apenas alcanza unos 4% de la superficie total del salar.

Aguas de aporte

Representamos en la figura 1 la composición química de todas las aguas de aporte de Carcote.

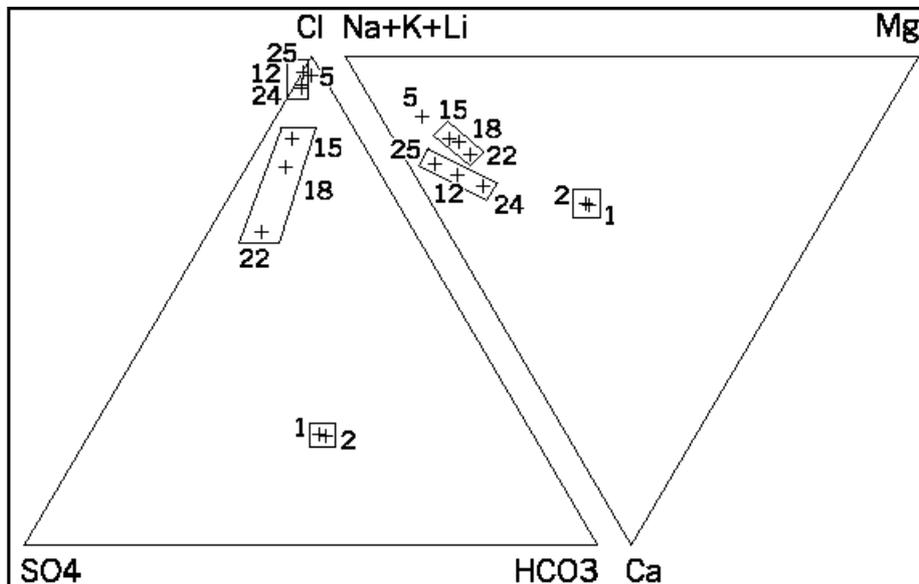


Fig.1. Composición de las aguas de aporte del salar de Carcote.

Se puede distinguir en estos diagramas triangulares cuatro tipos de aguas de aporte :

- aguas muy diluidas (110 mg/l STD) de vertientes ubicadas muy cuenca arriba (1 y 2). Son de tipo Na-Ca-Mg / $\text{HCO}_3\text{-SO}_4$, muy parecidas a las aguas diluidas de Michincha y Alconcha. Se infiltran antes de llegar al salar.

- aguas de mediana salinidad (700 - 1300 mg/l STD) de vertientes al norte del salar (15, 18, 22). Son de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl-(SO_4).

- aguas de alta salinidad (7000 - 25 000 mg/l STD) de vertientes al sur del salar (12, 24, 25). Son de tipo Na-(Ca) / Cl.

- en la orilla oeste se encuentra una vertiente (5) de agua salobre (2900 mg/l STD) con más Cl y Na.

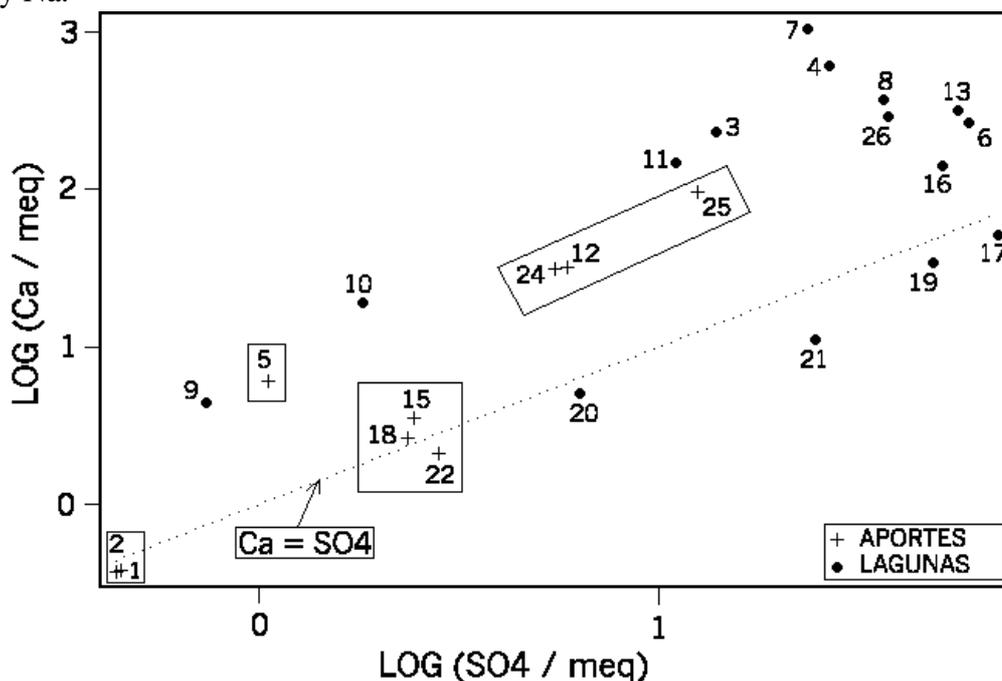


Fig.2. Relación entre Ca - SO_4 en las aguas de aporte y las salmueras del salar de Carcote.

A parte de las dos vertientes de agua muy diluidas (1 y 2), todos los demás aportes presentan una influencia termal, cualquier que sea su tipo químico. Sus temperaturas se escalonan entre 20° y 24° C. Las aguas de aporte se caracterizan también por su relación Ca versus SO_4 (Fig. 2). Las aguas del norte del salar (1, 2, 15, 18, 22) tienen sus puntos cerca de la recta de equimolaridad $\text{Ca} = \text{SO}_4$, mientras que las aguas de las orillas sur y oeste (5, 12, 24, 25) los tienen netamente por encima, lo que señala un contenido en Ca muy superior al de SO_4 .

Podemos finalmente reagrupar los cuatro tipos definidos anteriormente en dos grandes familias de aguas de aporte :

- aguas diluidas a medianamente salobres con $\text{Ca} \sim \text{SO}_4$, en el norte de la cuenca.
- aguas salobres a muy salinas con Ca superior a SO_4 al sur y al oeste de la cuenca.

Esta clasificación es la más relevante para la evolución de aguas por evaporación.

La figura 3 presenta la relación entre Cl y Na para todas las aguas y salmueras de Carcote. Se observa que tantos los puntos de aguas de aportes como los de lagunas y napas se alinean según una recta ligeramente distinta de la recta de equimolaridad. También hemos visto que las aguas de aporte más saladas tienen mucho más Ca que SO_4 . De eso se puede inferir que la alta salinidad

de los aportes al sur del salar no se debe a la habitual redisolución de yeso y halita en las formaciones geológicas de la cuenca.

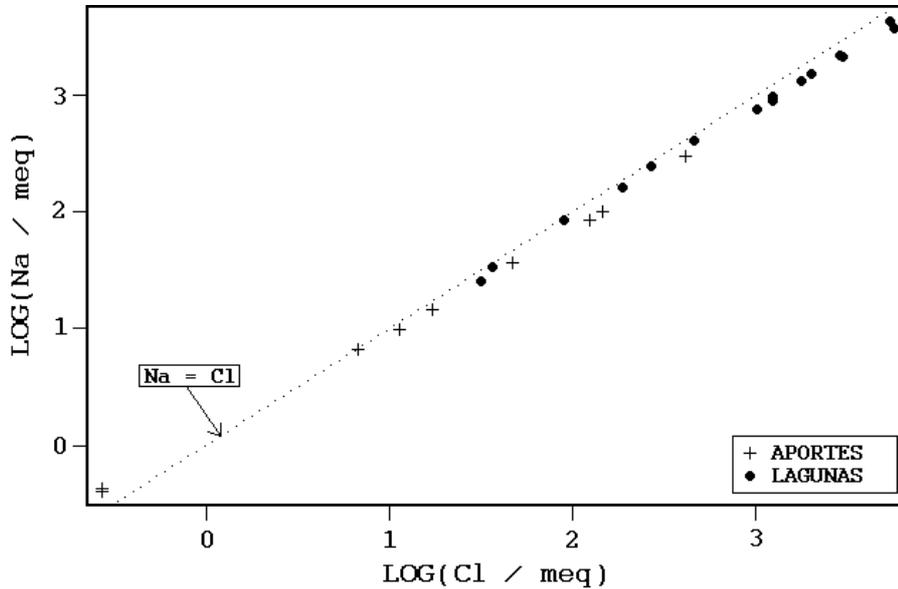


Fig.3 : Relación entre Na y Cl en las aguas de aporte y las salmueras del salar de Carcote.

La figura 4 presenta la relación Cl versus Na+Ca. Aquí se nota que conforme se van salinizando, las aguas de aporte tienen sus puntos acercándose a la recta de equimolaridad Na+Ca = Cl.

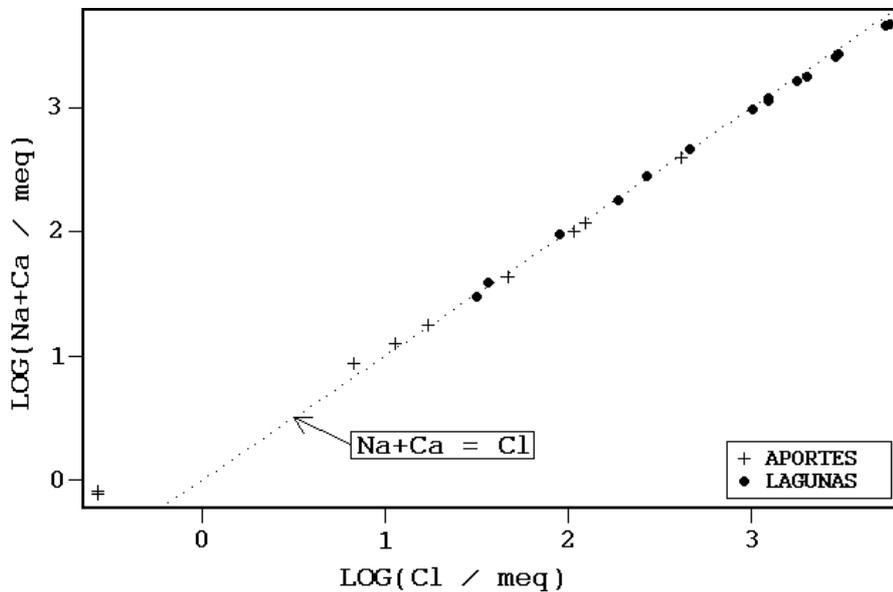


Fig.4 : Relación Na+Ca versus Cl en las aguas de aporte y las salmueras del salar de Carcote.

Esta última correlación sugiere que las altas salinidades de las aguas de aporte del sur provienen de la salinización de las napas de la cuenca por salmueras de tipo Na-Ca / Cl. No consideramos la posibilidad de redisolución de antiguas evaporitas de este tipo químico, puesto que el cloruro de calcio es una sal extremadamente soluble que solamente cristaliza a temperaturas muy bajas

(< - 40° C) no habituales en el área. No tenemos explicación para el origen de estas salmueras salinizantes, que también lo hacen a las aguas de aporte al salar de Ascotán.

Química de las lagunas y napas

Si se sigue estrictamente las normas de clasificación de aguas, las salmueras de Carcote son todas de tipo Na / Cl. Sin embargo, si observamos la figura 2 : Ca versus SO₄, notamos la existencia de dos tipos de salmueras según la posición de sus puntos en relación a la recta de equimolaridad Ca = SO₄. Cuatro soluciones se encuentran por debajo de la recta (17, 19, 20, 21) o sea, tienen más SO₄ que Ca (en meq/l). La más concentrada de estas aguas (17) tiene solamente 32 g/l de salinidad. Si se concentrara más estas soluciones, la precipitación del yeso induciría un aumento de la concentración en SO₄ en desmedro de Ca. Podemos entonces clasificar estas salmueras en el tipo Na / Cl-(SO₄). Al contrario, las salmueras cuyos puntos se encuentran por encima de la recta Ca = SO₄ son mucho más concentradas (hasta 330 g/l STD) y tienen mucho más Ca que SO₄. Son del tipo Na-Ca / Cl. Existen entonces dos tipos de aguas saladas y lagunas del salar :

- en la parte central y sur, las salmueras son del tipo Na-Ca / Cl. Se encuentran en los mismos sectores que las vertientes salobres y salinas con Ca > SO₄. Llegan hasta el centro - norte (3 y 4). Ocupan entonces la mayor parte del salar.
- en el extremo norte, las salmueras son de tipo Na / Cl-(SO₄) asociadas a las vertientes menos concentradas con Ca ~ SO₄.

Vías evolutivas y relación con la geología

Las aguas de aporte siguen al evaporarse, tres vías evolutivas que reflejan su composición química :

- las dos aguas muy diluidas cuenca arriba (1 y 2), siguen la vía alcalina sulfatada
- las dos vertientes (18 y 22) en el extremo norte, siguen la vía neutra sulfatada
- todas las vertiente al sur y oeste de salar siguen la vía neutra cálcica.

El agua (15) del extremo norte está clasificada en la vía neutra cálcica. Sin embargo, las concentraciones en Ca de las salmueras calculadas, son apenas superiores a las de SO₄. Se trata de un caso límite entre la vía neutra cálcica y la vía neutra sulfatada. Debemos recalcar también que Carcote es el salar más septentrional de Chile, que presenta netamente la vía evolutiva neutra cálcica.

Si bien estas vías evolutivas corresponden al tipo real de salmueras que se encuentran en el salar, no se relacionan tan bien con la geología de la cuenca de drenaje. Toda la cuenca está constituida de estrato-volcanes andesíticos y dacíticos y los dos más importantes, el Ollagüe y el Aucanquillcha, contienen yacimientos de azufre que han sido explotados. Con tal litología, las aguas de aporte deberían ser todas ricas en azufre y de vía evolutiva alcalina sulfatada o neutra sulfatada. Las salmueras de Carcote deberían ser todas de tipo Na / Cl-SO₄. En realidad existe solamente una pequeña parte del salar que responde a esta previsión : el extremo norte. La composición de las aguas de aporte de vía evolutiva neutra cálcica, no proviene de la alteración de las rocas de la cuenca de drenaje.

Evolución cuantitativa de aguas

En la tabla I presentamos la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de cuatro de las salmueras más representativas del salar. Los valores de la columna "desviación" son los coeficientes del chi-cuadrado adaptado que miden el grado de semejanza entre las soluciones de aporte evaporadas (CAR-xxE) y las salmueras reales CAR-n.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>CAR-4</u>	7,06	4,52	107000	1280	426	15,8	49500	2880	136	12000	1990	
CAR-25E	7,34	3,16	105000	1250	385	14,8	48800	3710	146	12400	1780	0,010
CAR-12E	7,32	4,63	105000	1260	579	14,6	46600	3960	190	12200	2850	0,044
CAR-24E	7,32	3,58	107000	1130	406	14,4	44100	3070	138	13600	4200	0,057
CAR-5E	7,51	4,37	104000	2310	490	14,3	52800	4600	192	6240	2770	0,120
CAR-15E	7,60	5,46	101000	5570	587	14,2	53800	5270	150	2570	4100	0,421
CAR-18E	7,56	5,89	95100	11300	728	14,6	52400	6250	158	1360	4750	0,662
CAR-22E	7,70	8,06	79800	27600	839	17,5	50100	7030	145	774	5070	0,841
CAR-2E	7,58	10,3	37900	70400	1470	22,0	31500	18600	54,5	424	8160	1,400
CAR-1E	7,65	11,4	35800	72700	1380	22,1	31100	17600	44,2	468	8760	1,430
<u>CAR-6</u>	7,85	7,58	71700	2830	396	37,0	35400	2990	133	5330	2000	
CAR-5E	7,65	3,01	71100	2140	336	19,1	36200	3150	132	4510	1900	0,055
CAR-12E	7,50	3,21	72000	1620	397	19,4	31900	2710	130	8650	1950	0,093
CAR-25E	7,50	2,17	72100	1600	264	19,5	33400	2540	100	8770	1220	0,144
CAR-15E	7,77	4,29	68100	5430	408	19,1	36400	3570	101	2440	2770	0,157
CAR-24E	7,49	2,45	73300	1490	278	19,2	30200	2100	94,5	9620	2870	0,163
CAR-18E	7,85	6,14	64400	9060	532	19,5	35500	4240	107	1540	3220	0,319
CAR-22E	7,98	8,55	54400	19600	627	21,7	34200	4790	98,7	883	3460	0,542
CAR-2E	7,92	11,5	24200	50600	1030	25,6	22500	12100	34,7	553	5200	1,160
CAR-1E	7,95	12,3	23600	51000	1010	25,5	21700	11800	29,2	552	5790	1,200
<u>CAR-17</u>	8,41	5,02	16400	3350	101	35,3	9480	1100	23,6	1030	547	
CAR-15E	7,93	1,26	16700	3150	100	29,3	8930	876	24,9	1360	681	0,023
CAR-18E	7,98	1,59	15700	4150	130	29,4	8680	1030	26,2	1190	786	0,032
CAR-22E	8,07	2,17	13600	6350	157	30,0	8540	1200	24,7	831	863	0,090
CAR-12E	7,79	0,98	18600	1180	102	29,1	8220	698	33,6	2550	504	0,205
CAR-5E	7,94	1,17	19000	571	89,7	28,9	9650	841	35,1	1210	506	0,235
CAR-24E	7,77	0,78	18800	1280	71,3	29,1	7750	539	24,2	2840	737	0,246
CAR-25E	7,79	0,77	19000	753	69,4	20,4	8780	668	26,3	2450	320	0,325
CAR-2E	8,30	5,45	6240	13600	294	31,4	5820	3130	8,97	378	1360	0,678
CAR-1E	8,28	5,06	6090	13800	276	31,4	5600	3040	7,53	419	1500	0,699
<u>CAR-16</u>	7,02	9,00	195000	2440	386	7,56	101000	12500	339	2810	6850	
CAR-15E	6,94	3,92	179000	4060	937	6,20	95300	9340	265	2060	7270	0,124
CAR-5E	6,81	3,31	183000	913	784	6,38	92800	8090	338	9610	4870	0,283
CAR-18E	6,95	5,01	170000	16000	1200	6,50	93500	11200	282	609	8480	0,500
CAR-12E	6,51	3,31	187000	456	939	6,50	82600	7020	338	20800	5060	0,537
CAR-25E	6,83	4,11	183000	488	644	6,91	84700	6450	254	20700	3090	0,546
CAR-24E	6,64	4,21	198000	350	708	5,72	81600	5680	255	24400	7770	0,590
CAR-22E	6,90	5,52	165000	30600	1500	8,46	91800	14500	299	502	10500	0,651
CAR-2E	6,71	9,09	94800	99100	3310	13,0	43900	44500	136	78,6	20400	1,410
CAR-1E	6,80	10,2	90000	104000	3080	13,0	42800	42100	111	86,9	22000	1,440

Tabla 1. Comparación de la composición química de las aguas de aporte evaporadas con algunas salmueras del salar de Carcote. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

La primera salmuera investigada es CAR-4, una laguna superficial sin ningún aporte visible cerca de la orilla centro-norte. Las aguas de aporte ubicadas justo cuenca arriba son las más diluidas (1 y 2). Sin embargo, notamos que el agua de aporte cuya evaporación produce la salmuera más

parecida es CAR-25, al otro extremo del salar. Su coeficiente de desviación es particularmente bajo. La correlación entre CAR-25E y CAR-4 es excelente. Las demás aguas de aporte del sur y del oeste del salar (12, 24, 5) también tienen buena correlación con CAR-4. Al contrario, las aguas muy diluidas (1 y 2) presentan un pésimo coeficiente de desviación. No son ellas las que producen las salmueras del centro norte del salar. La salmuera de la napa vecina CAR-3 presenta las mismas características que CAR-4.

CAR-6 es una salmuera de la laguna superficial alimentada por CAR-5. La simulación de evaporación muestra que la salmuera deriva bien de esta vertiente y que las aguas diluidas (1 y 2) no tienen relación con este sistema. CAR-17 es la salmuera de una laguna superficial del extremo norte de tipo Na / Cl-(SO₄). Las tres aguas de aporte que más se asemejan a (17), una vez evaporadas, provienen justamente de las vertientes del extremo norte (15, 18, 22). CAR-16 es una salmuera de napa justo al límite entre la zona central y el extremo norte. El agua de la vertiente (15), la más próxima, es la que más se acerca a la salmuera cuando se evapora. Pero el coeficiente de desviación no es tan bueno como los primeros de los grupos vistos anteriormente. Las aguas que siguen en el orden de similitud, provienen tanto del extremo norte como del sur y del oeste del salar. Finalmente, recalcamos que ninguna salmuera presenta una influencia de las aguas más diluidas que surgen en las laderas del principal volcán de la cuenca de drenaje. Esto sugiere que las napas diluidas superficiales que se descargan en esas vertientes no deben tener un flujo importante.

Calidad de aguas

En toda la cuenca, solamente las aguas muy diluidas de vertientes en las laderas del volcán Aucanquillcha son de buena calidad para cualquier uso, doméstico y agrícola. Lastimosamente las napas que las originan no parecen tener un flujo notable. La menos concentrada de las aguas de aporte del extremo norte (CAR-22 : 700 mg/l STD) tiene nueve veces más arsénico que lo máximo permisible. Las aguas de las orillas sur y oeste son totalmente impropias para cualquier uso potable o agrícola.

Balances hídricos

Tenemos suficientes datos para establecer el balance hídrico de cuatro lagunas de Carcote. Identificamos cada laguna por el número de su salmuera. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son para cada laguna :

Laguna	S (m ²)	H _e (m)	H _p (m)	C _{ap}	C _L
CAR-21	250 000	1,63	0,12	239 ⁽²²⁾	3210 ⁽²¹⁾
CAR-17	480 000	1,63	0,12	512 ⁽¹⁵⁺¹⁸⁾	16400 ⁽¹⁷⁾
CAR-6	280 000	1,63	0,12	1670 ⁽⁵⁾	71700 ⁽⁶⁾
CAR-13	460 000	1,63	0,12	4470 ⁽¹²⁾	63900 ⁽¹³⁾

Los números entre paréntesis en las columnas C_{ap} y C_L son los números de las muestras utilizadas. Los caudales de aporte y de infiltración están dados por :

$$- \text{Volumen de aporte : } V_{ap} = S(H_e - H_p) / (1 - C_{ap}/C_L) \text{ m}^3/\text{año}$$

- Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p) / (1 - C_i / C_{ap}) \text{ m}^3/\text{año}$

Para cambiar a litros/segundos se dividen los $\text{m}^3/\text{año}$ por 31536. Los resultados están presentados en la figura 5. Los caudales de aporte corresponden prácticamente a los caudales de las vertientes que alimentan cada laguna.

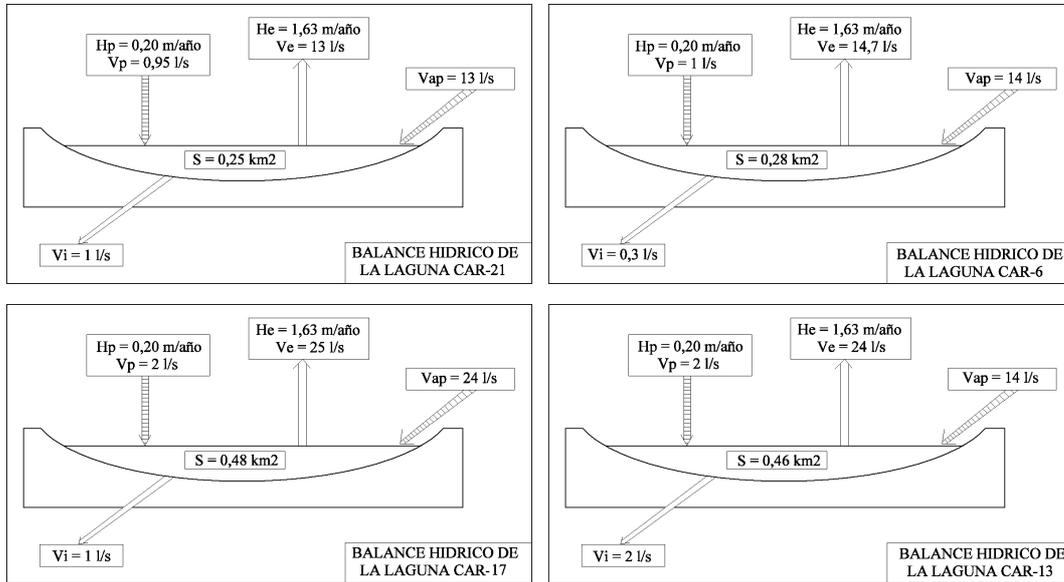


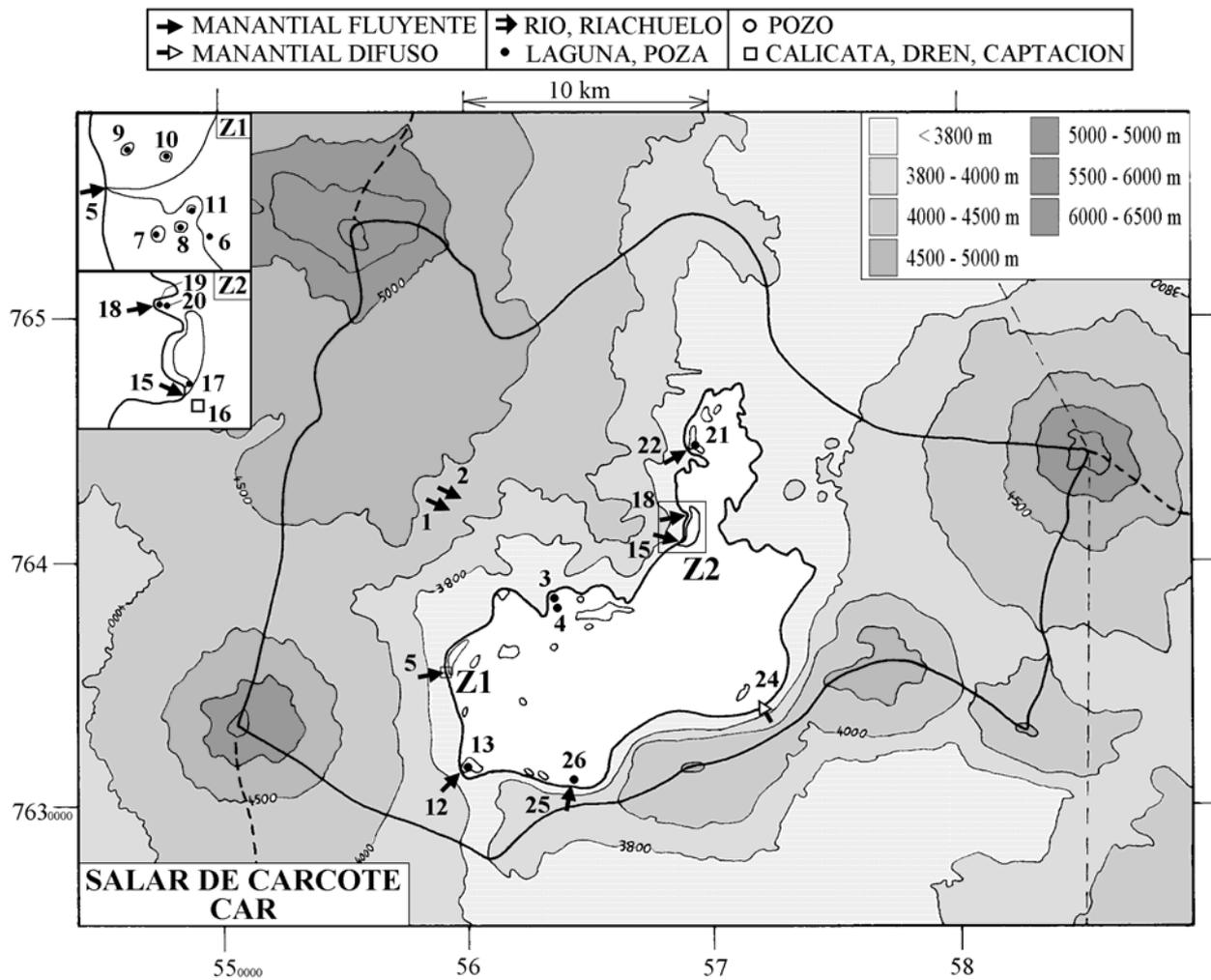
Fig.5 : Balances hídricos de cuatro lagunas del salar de Carcote.

Conclusiones

La cuenca de Carcote está dividida por su hidroquímica en dos partes, tanto en su cuenca de drenaje como en el salar mismo. Las vertientes del sur y oeste del salar son saladas, de tipo Na-(Ca) / Cl y Na / Cl y de vía evolutiva neutra cálcica. No provienen de la alteración de la cuenca de drenaje constituida de rocas volcánicas ricas en azufre. Estas aguas han sido salinizadas por salmueras de tipo Na-Ca / Cl de origen desconocido. Con excepción del extremo norte, la influencia de estas aguas se extiende a la mayor parte del salar, donde producen al evaporarse salmueras de tipo Na-Ca / Cl. En el norte del salar surgen aguas diluidas a salobres de tipo Na-Ca-Mg / HCO₃-SO₄ y Na-(Ca)-(Mg) / Cl-(SO₄), de vía evolutiva sulfatada. Estas aguas corresponden mejor con la litología de la cuenca de drenaje. Su influencia en el salar mismo se reduce al extremo norte donde producen salmueras sulfatadas. Las aguas diluidas en la ladera del volcán Aucanquillcha no tienen ninguna influencia sobre la química del salar, lo que sugiere que no son muy abundantes.

Referencias y estudios anteriores

Mardones, L. 1977. Geología e hidrogeología de los salares de Ascotán y Carcote, II Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad del Norte, Departamento de Geología, Antofagasta, 178p.



**SALAR DE CARCOTE
CAR**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
CAR-1	06/10/94	10 ^H 30	559050	7642250	4100	Manantial corriente
CAR-2	06/10/94	11 ^H 00	559325	7642325	4100	Manantial corriente
CAR-3	06/10/94	12 ^H 20	563250	7638700	3690	Laguna
CAR-4	06/10/94	12 ^H 45	563300	7638525	3690	Napa ("ojo" en el salar)
CAR-5	06/10/94	14 ^H 15	559160	7634690	3691	Manantial corriente
CAR-6	06/10/94	14 ^H 30	559293	7634650	3690	Laguna
CAR-7	06/10/94	14 ^H 45	559231	7634650	3690	Poza
CAR-8	06/10/94	15 ^H 00	559260	7634664	3690	Poza
CAR-9	06/10/94	15 ^H 15	559185	7634735	3690	Napa (cateo)
CAR-10	06/10/94	15 ^H 25	559229	7634728	3690	Poza
CAR-11	06/10/94	15 ^H 40	559270	7634685	3690	Poza
CAR-12	06/10/94	16 ^H 40	560125	7631200	3691	Manantial corriente
CAR-13	06/10/94	17 ^H 00	560200	7631375	3690	Laguna
CAR-15	07/10/94	11 ^H 10	568900	7640815	3691	Manantial corriente
CAR-16	07/10/94	11 ^H 40	569100	7640800	3690	Napa (cateo)
CAR-17	07/10/94	12 ^H 25	569040	7640900	3690	Laguna
CAR-18	07/10/94	12 ^H 45	568750	7641775	3691	Manantial corriente
CAR-19	07/10/94	13 ^H 00	568755	7641775	3690	Napa (cateo)
CAR-20	07/10/94	13 ^H 25	568790	7641775	3690	Laguna muy superficial
CAR-21	07/10/94	14 ^H 30	569000	7644775	3690	Laguna
CAR-22	07/10/94	15 ^H 25	569150	7645250	3691	Manantial corriente
CAR-24	07/10/94	16 ^H 30	571625	7633875	3690	Manantial difuso
CAR-25	07/10/94	17 ^H 15	564400	7630975	3691	Manantial corriente
CAR-26	07/10/94	17 ^H 30	564625	7631200	3690	Laguna

**SALAR DE CARCOTE
CAR**

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
CAR-1	141,0	12	11,5	1,000	7,58	0,485	9,55	0,030	0,0060	21,6	0,335	0,432	14,7	0,043	9,38	4,77	0,012	7,66	4,23
CAR-2	143,0	11,5	11,5	1,000	7,44	0,503	9,66	0,026	0,0053	21,0	0,040	0,454	16,9	0,041	9,45	4,85	0,014	7,54	4,13
CAR-3	80400	12	na	1,045	6,94	1,69	36600	4,67	0,608	662	1,36	162	21,9	0,34	17400	985	46,0	4570	654
CAR-4	172600	8	4,1	1,123	7,06	4,52	107000	10,3	0,355	1280	0,260	426	15,8	0,38	49500	2880	136	12000	1990
CAR-5	5280	22,9	7,1	1,002	7,21	0,866	1670	0,244	0,0143	50,4	3,61	7,92	19,6	0,011	856	74,3	3,10	122	44,7
CAR-6	135700	24,5	7,9	1,087	7,85	7,58	71700	7,56	0,211	2830	1,57	396	37,0	2,5	35400	2990	133	5330	2000
CAR-7	200000	22,5	0,5	1,220	6,38	24,5	202000	42,4	1,18	1120	2,23	1070	26,0	0,008	86000	10600	537	21100	8970
CAR-8	170100	24,8	3,8	1,119	7,12	8,78	103000	15,3	0,364	1740	0,905	384	31,1	0,029	51300	4220	189	7340	2940
CAR-9	3720	12,2	7,5	1,001	6,84	1,08	1130	0,181	0,0135	35,3	0,024	4,91	25,8	0,005	593	52,8	2,00	88,2	32,1
CAR-10	19140	20	na	1,009	7,82	3,90	6750	0,700	0,0586	87,4	0,118	24,4	18,2	0,026	3700	217	9,09	385	169
CAR-11	94800	19,5	10,8	1,053	7,70	4,78	44400	5,62	0,102	528	0,384	179	31,6	0,013	22600	1790	76,3	2930	1180
CAR-12	13000	24,2	5,4	1,006	7,08	1,92	4470	1,01	0,0538	283	1,90	24,5	18,2	0,44	1960	167	8,05	646	121
CAR-13	121400	10,1	8,4	1,078	7,74	9,62	63900	15,0	0,299	2680	1,98	397	29,4	8,2	31100	2690	131	6260	1770
CAR-15	2270	23,4	7,3	1,001	7,78	1,06	618	0,186	0,0360	117	0,601	3,72	30,0	0,30	334	32,5	0,923	71,0	25,3
CAR-16	200000	6,9	1,2	1,212	7,02	9,00	195000	10,4	0,110	2440	1,49	386	7,56	8,2	101000	12500	339	2810	6850
CAR-17	43300	21	11,3	1,024	8,41	5,02	16400	6,99	0,445	3350	0,180	101	35,3	9,0	9480	1100	23,6	1030	547
CAR-18	1710	23,1	8,3	1,001	7,58	1,01	405	0,205	0,0584	112	0,353	3,37	30,2	0,31	228	26,9	0,680	52,1	20,4
CAR-19	28800	14	na	1,015	8,08	3,06	9690	3,84	0,345	2320	0,180	66,0	34,7	6,8	5680	712	14,2	678	352
CAR-20	4790	26	4,8	1,002	9,01	1,45	1310	0,605	0,159	304	0,155	13,5	33,9	0,19	787	107	2,03	101	42,3
CAR-21	10600	21	6,0	1,006	8,92	1,17	3210	0,895	0,195	1180	0,130	16,9	30,2	0,58	1970	282	5,46	221	93,6
CAR-22	1200	20,3	7,7	1,000	7,59	0,970	239	0,177	0,0704	134	0,676	2,78	29,4	0,39	152	21,2	0,437	42,5	15,3
CAR-24	11500	24,3	5,5	1,005	6,87	1,93	3870	0,674	0,0622	263	0,688	14,7	37,0	0,19	1600	111	5,00	622	152
CAR-25	37800	21	6,6	1,019	7,44	0,899	14900	1,78	0,112	595	2,55	54,8	16,1	2,7	7020	528	20,8	1940	253
CAR-26	94300	15	8,8	1,055	7,52	2,63	44400	5,49	0,225	1790	0,750	168	33,0	8,2	20800	1480	62,8	5810	787

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

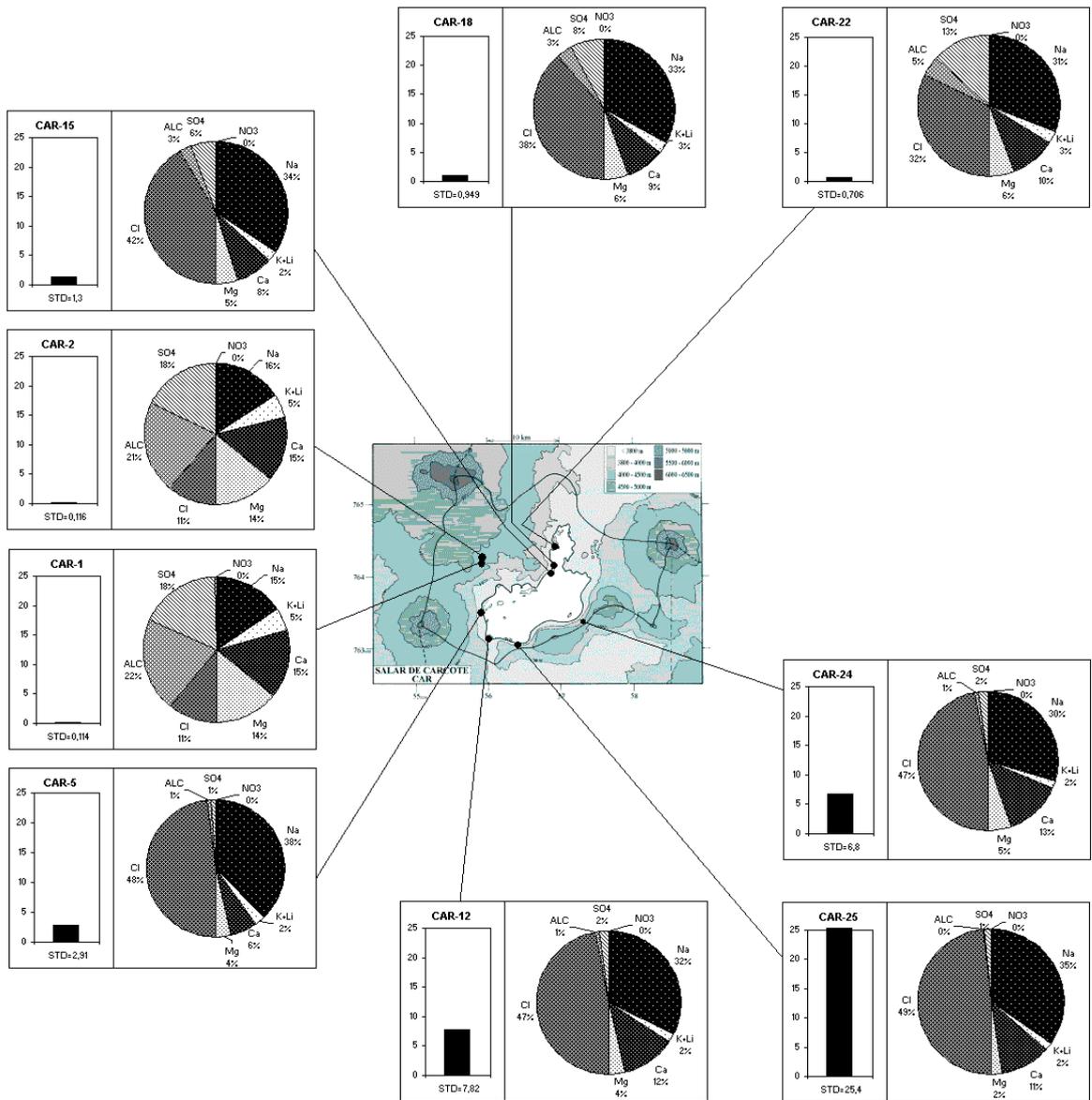
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

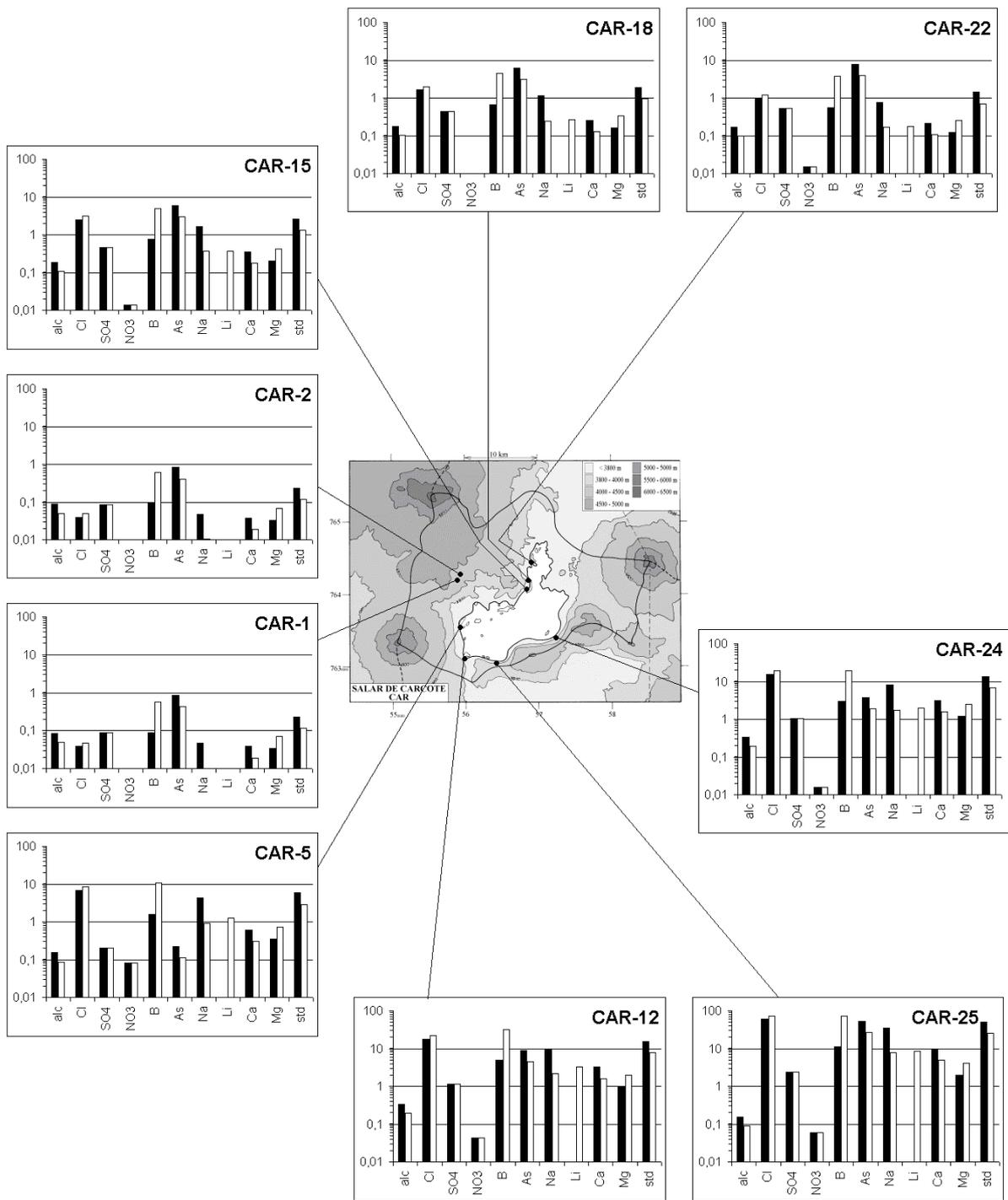
**SALAR DE CARCOTE
CAR**

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
CAR-1	113,7	29,3	0,06	1,4	1,262	1,209	4,2
CAR-2	116,2	30,5	0,06	2,1	1,253	1,214	3,2
CAR-3	61207	85,4	0,84	14	1072	1046	2,5
CAR-4	175699	134	5,94	21	3007	3051	1,4
CAR-5	2913	51,9	0,12	4,3	49,33	49,07	0,5
CAR-6	121326	-	-	-	2067	2087	1,0
CAR-7	333198	-	-	-	5875	5748	2,2
CAR-8	171623	335	20,5	29	2973	2945	1,0
CAR-9	2033	65,9	0,06	15	34,48	33,52	2,8
CAR-10	11595	221	4,14	4,0	200,9	195,7	2,6
CAR-11	73976	166	9,72	3,7	1282	1266	1,3
CAR-12	7823	114	0,60	11	132,7	133,9	0,9
CAR-13	109510	236	22,1	6,2	1896	1865	1,6
CAR-15	1304	62,2	0,54	1,4	21,08	20,91	0,8
CAR-16	322227	-	-	-	5483	5550	1,2
CAR-17	32422	123	15,9	0,53	539,8	537,8	0,4
CAR-18	948,9	60,1	0,30	2,2	14,97	14,76	1,4
CAR-19	19745	136	5,16	1,4	330,1	324,5	1,7
CAR-20	2787	30,0	5,16	0,04	45,75	44,59	2,6
CAR-21	7087	17,3	2,88	0,03	112,3	116,3	3,5
CAR-22	705,7	58,0	0,24	2,2	10,62	10,52	0,9
CAR-24	6796	117	0,36	19	116,6	116,4	0,1
CAR-25	25365	40,9	0,78	1,8	439,1	432,3	1,6
CAR-26	75474	78,1	3,90	3,1	1306	1290	1,2

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %





MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

CAR

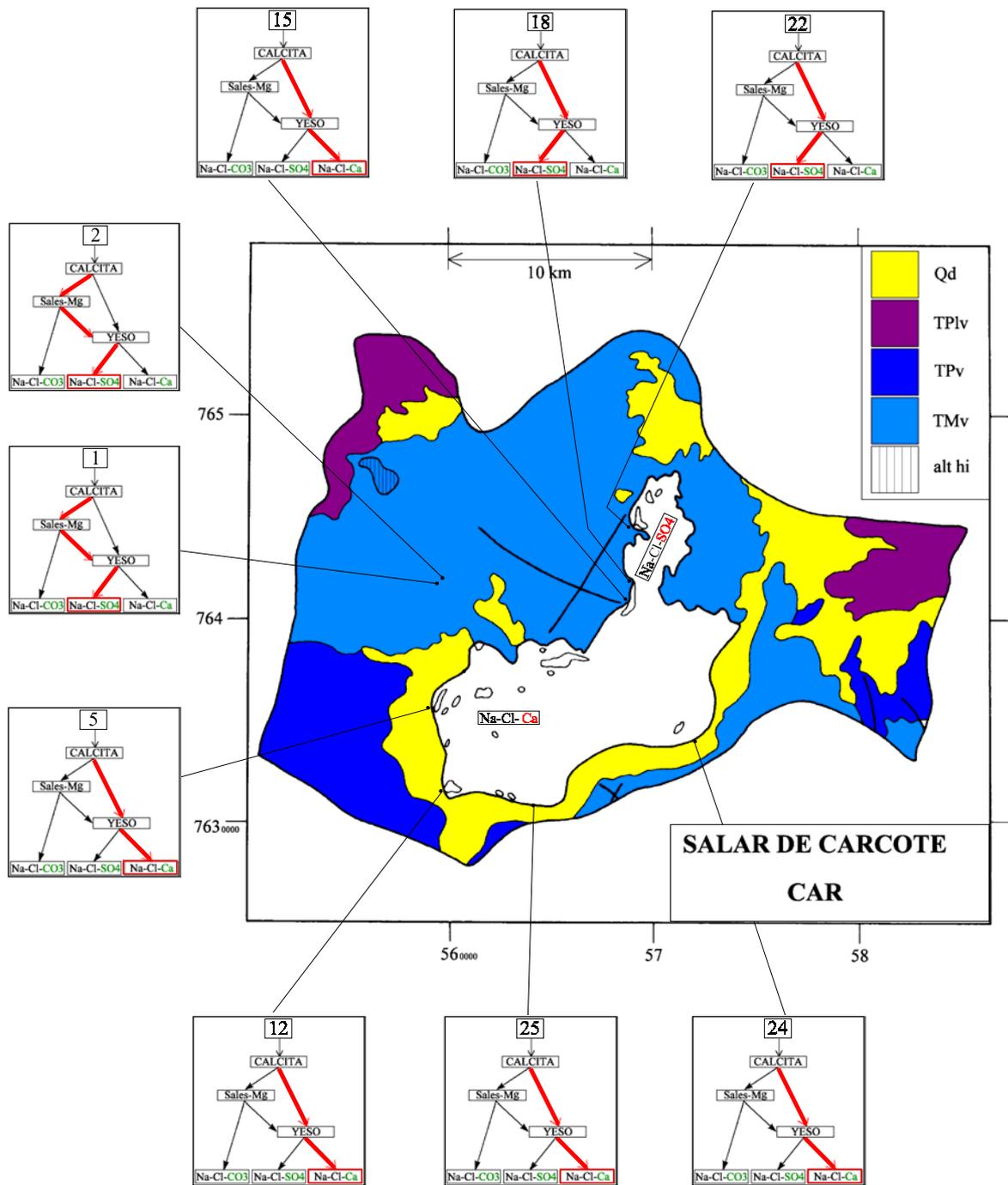
Qd : *Cuaternario*. Depósitos no consolidados.

TPlv : *Plioceno sup.* - Pleistoceno. Estrato-volcanes andesíticos y dacíticos.

TPv : *Plioceno*. Estrato-volcanes andesíticos moderadamente erosionados.

TMv : *Mioceno sup.* - Plioceno. Estrato-volcanes andesíticos intensamente erosionados.

alt hi : alteración hidrotermal.



SALAR DE ASCOTÁN

Introducción

El salar de Ascotán se encuentra en la II Región, al sur del salar de Carcote. Ambos salares se implantan en la parte más baja de una depresión flanqueada al este y al oeste por cadenas volcánicas terciarias y cuaternarias de orientación general norte-sur. Colinda al oeste con la cuenca del río Loa. Al este, la frontera con Bolivia no sigue la línea divisoria de aguas pues pasa dentro de la cuenca de drenaje de Ascotán. La geología y la hidrogeología de la cuenca han sido estudiadas detalladamente por el Proyecto CHI-535 de DGA y PNUD; Mardones, 1977; y más recientemente por CODELCO Chuquicamata (1994, 1996) que ha realizado más acabados estudios y perforado varios pozos a su alrededor para proveer de agua al yacimiento El Abra. Es un salar de tipo “playa” con limos salinos y costras de sales (yeso, halita). A unos decímetros debajo de la superficie se encuentra una napa de salmuera. Es una boratera donde se explota la ulexita cerca de la orilla centro-oeste (Cebollar; ASC-41). Se observa un complejo sistema de lagunas superficiales elongadas este-oeste o suroeste-noreste alimentadas por vertientes que surgen de la orilla oriental del salar. Lagunas más pequeñas y menos numerosas se encuentran cerca de la orilla oeste del salar. Las principales características morfométricas y climatológicas del salar son :

- altura: 3716 m
- superficie de la cuenca: 1757 km²
- superficie del salar: 243 km²
- superficie de las lagunas 18 km²
- precipitaciones: 100 - 150 mm/año
- evaporación potencial: 1630 mm/año
- temperatura media: 5,8°C

Una información actualizada (1998) proporcionada por Leonardo Mardónes (com. per.) da valores inferiores para las precipitaciones: 52,2 mm/año en Cebollar y 75,7 mm/año en Ascotán).

Aguas de aporte

La principal alimentación superficial al salar de Ascotán proviene de vertientes de aguas salobres que surgen en la orilla misma. Las vertientes de más flujo, que son también las más numerosas, se encuentran a lo largo de la orilla este. Se encontraron solamente dos vertientes de aguas muy diluidas en toda la cuenca (13 y 14) las que están cuenca arriba y se infiltran antes de llegar al salar. Hemos prelevado también aguas de napa todo alrededor del salar. Hay cuatro puntos que fueron muestreados dos veces, en julio y en octubre de 1994 (ASC -8 y 22; ASC-5 y 24; ASC-6 y 28; ASC-11 y 33) sin notar cambios significativos en las composiciones químicas. Descartaremos entonces las muestras dobles (22, 24, 28 y 33) de la discusión. La figura 1 presenta la composición química de los aportes en diagramas triangulares. Hemos distinguido los aportes por su ubicación geográfica : al este, al oeste y al sur del salar. Los aportes salobres del este del salar presentan sus puntos representativos bien agrupados. Son aguas de tipo Na-(Ca) / Cl. Con excepción de una (16), las aguas del sur del salar también son de tipo Na-(Ca) / Cl, pero se diferencian ligeramente de las aguas orientales por un leve aumento de HCO₃ y Na. El agua de

napa 16, que se encuentra mucho más al sur, es distinta. Es netamente más diluida (411 mg/l STD) que las aguas de la orilla sur del salar (1, 3, 15, 36 ; STD promedio = 2500 mg/l). Su tipo químico es Na-(Ca) / Cl-(HCO₃)-(SO₄). Las aguas de aporte del sector occidental de la cuenca tienen una composición mucho más variada. Se distingue un grupo homogéneo de cinco aguas (2, 17, 37, 38, 42) y cuatro otras de composición muy distinta :

- grupo principal : Na-(Ca)-(Mg) / Cl-(HCO₃)-(SO₄)
- ASC-13 : Na-Ca-Mg / HCO₃-(SO₄)
- ASC-14 : Na-Ca-Mg / SO₄-(HCO₃)
- ASC-44 : Na-Mg / HCO₃-(Cl)
- ASC-47 : Na / Cl-(HCO₃)

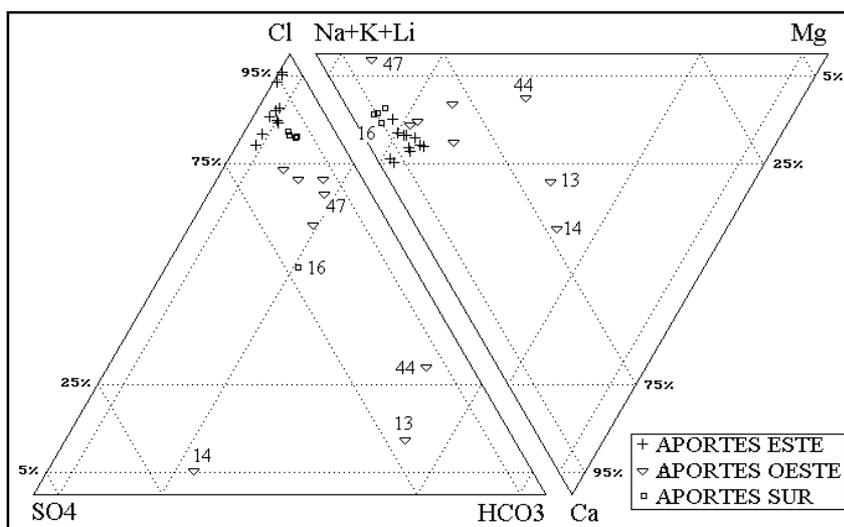


Fig.1. Composición de las aguas de aporte del salar de Ascotán.

Es sorprendente que las dos aguas de vertientes cuenca arriba (13 y 14), vecinas y de similar salinidad (~ 100 mg/l STD), tengan composiciones tan diferentes. De esta clasificación algo compleja de las aguas de aporte, el punto más importante a retener es que las aguas del oeste de la cuenca tienen un contenido porcentual más elevado en SO₄ que las aguas del este y del sur.

Casi todas las aguas de aporte de Ascotán tienen influencia termal aunque no se puede correlacionar el termalismo con ningún parámetro químico de las aguas. Solamente el contenido porcentual del magnesio parece disminuir cuando la temperatura aumenta, una característica observada más claramente en otras cuencas como Pintados.

La figura 2 presenta la relación entre Cl y Na para todas las aguas y salmueras de Ascotán. Se observa que tantos los puntos de aguas de aportes como los de lagunas y napas no se alinean exactamente sobre la recta de equimolaridad. La figura 3 presenta la relación Ca versus SO₄ y tampoco se observa una alineación de los puntos sobre la recta de equimolaridad Ca = SO₄. La figura 4 presenta la relación Cl versus Na + Ca en la cual se nota que las aguas de aporte del este del salar tienen sus puntos sobre la recta de equimolaridad Na+Ca = Cl. De eso se puede inferir que la alta salinidad de los aportes orientales no se debe a la habitual redisolución de yeso y halita en formaciones geológicas de la cuenca. Esta última correlación sugiere que las altas

salinidades de las aguas de aporte del este provienen de la salinización de las napas de la cuenca por salmueras de tipo Na-Ca / Cl. No consideramos la posibilidad de redisolución de antiguas evaporitas de este tipo químico puesto que el cloruro de calcio es una sal extremadamente soluble que solamente cristaliza a temperaturas muy bajas ($< - 40^{\circ} \text{C}$) no habituales en la zona. No tenemos idea del origen de estas salmueras salinizantes, las que también contaminan la mayor parte de las aguas de aporte en el salar de Carcote.

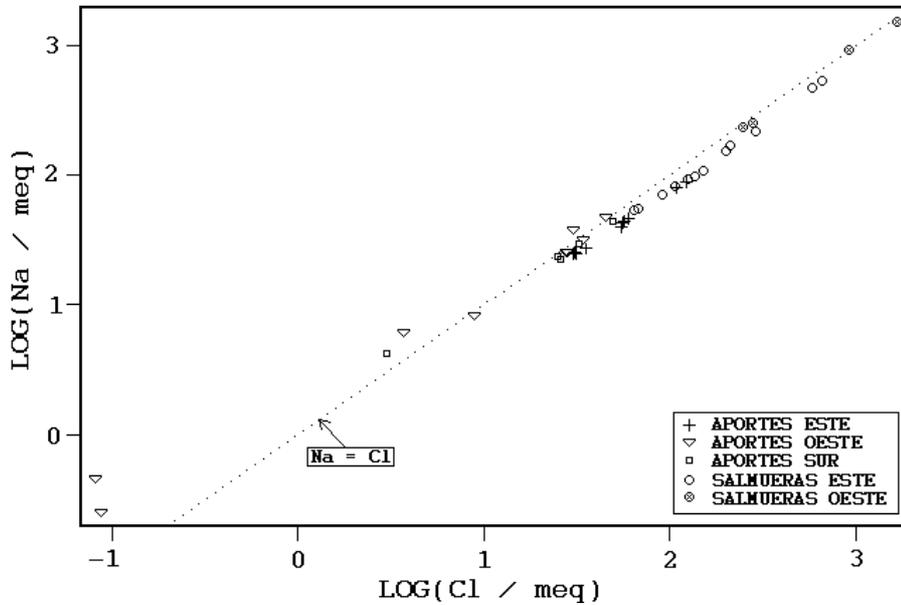


Fig.2 : Relación entre Na - Cl en las aguas de aporte y las salmueras de Ascotán.

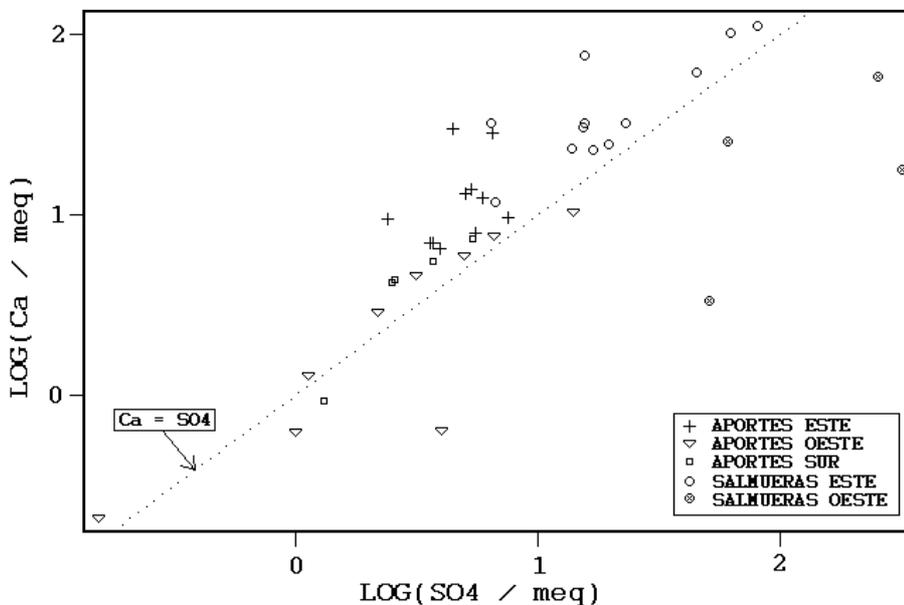


Fig.3 : Relación Ca versus SO₄ en las aguas de aporte y las salmueras de Ascotán.

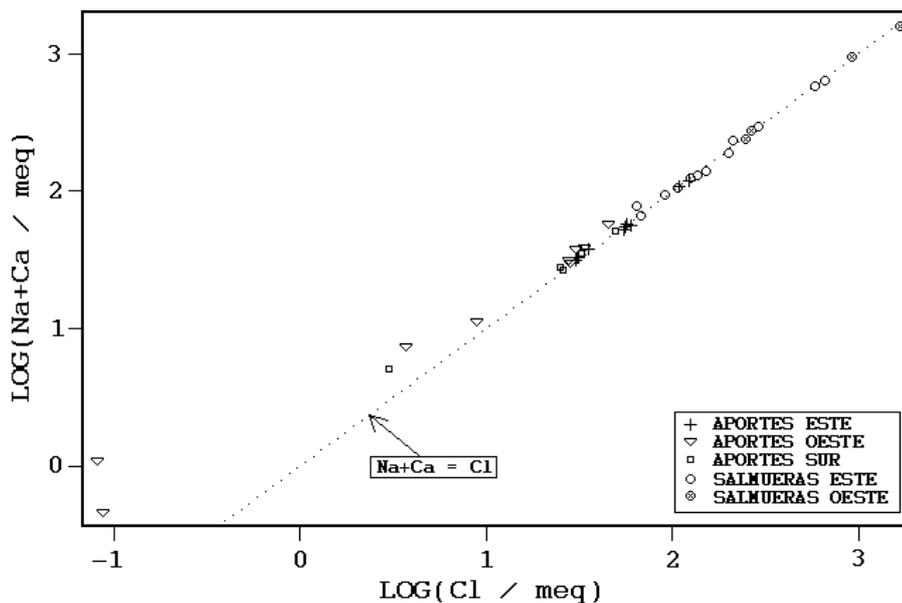


Fig.4 : Relación Na+Ca versus Cl en las aguas de aporte y las salmueras de Ascotán.

Química de lagunas y napas

Las salmueras de lagunas y napas de Ascotán no llegan a salinidades muy elevadas dando valores de 75 g/l STD para la laguna más salada (43) y 118 g/l para la napa (41) del salar. Si se sigue estrictamente las normas de clasificación de aguas, las salmueras de Ascotán son todas de tipo Na / Cl con pequeñas variaciones *aparentemente* no importantes en Ca y SO₄. Sin embargo, si observamos la figura 3 : Ca versus SO₄, notamos la existencia de dos tipos de salmueras según la posición de sus puntos en relación a la recta de equimolaridad Ca = SO₄.

Las soluciones cuyos puntos se encuentran por debajo de la recta Ca = SO₄ tienen más SO₄ que Ca (en meq/l). Podemos entonces clasificar estas salmueras en el tipo Na / Cl-(SO₄). Al contrario las salmueras cuyos puntos se encuentran por encima de la recta Ca = SO₄ tienen mucho más Ca que SO₄. Son del tipo Na-(Ca) / Cl. Existen entonces dos tipos de aguas saladas en las napas y lagunas del salar :

- las salmueras de las lagunas alimentadas a partir de las vertientes orientales son de tipo cálcico : Na-(Ca) / Cl. Debido a la gran extensión de estas lagunas, llegan casi hasta la orilla occidental (18, 40, 45).

- la napa del salar y las pequeñas lagunas alimentadas a partir de las vertientes occidentales son de tipo sulfatado : Na / Cl-(SO₄).

Vías evolutivas y relación con la geología

Las aguas de aporte siguen al evaporarse todas las vías evolutivas :

- cuatro aguas siguen la vía carbonatada. Tres se encuentran en el sector occidental (13, 44, 47) y una al extremo sur de la cuenca (16).

- cuatro aguas siguen la vía alcalina sulfatada (2, 17, 38, 42). También se encuentran en el sector occidental, mezcladas con las aguas de vía alcalina sulfatada.

- cuatro aguas siguen la vía neutra cálcica. Tres se encuentran al sur del salar (15, 36, 37) y la cuarta es una de las dos vertientes muy diluidas de la ladera occidental de la cuenca (14).

- Trece aguas siguen la vía neutra cálcica. Se encuentran todas en el sector oriental de la cuenca (ver Fig.5).

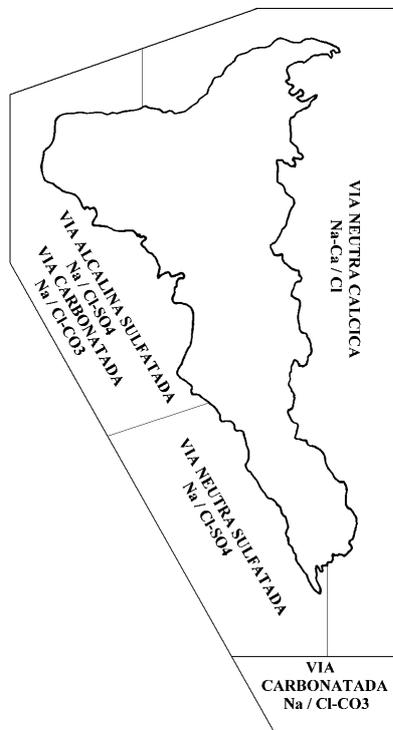


Fig.5 : Distribución de las vías evolutivas en la cuenca de Ascotán

Estas vías evolutivas corresponden bien al tipo real de salmueras que se encuentran en el salar : sulfatadas al oeste y cálcicas al este. Las aguas de vía evolutiva carbonatada, poco abundantes, se mezclan con aguas sulfatadas y no logran evolucionar hacia salmueras alcalinas. Sin embargo, cabe notar que ASC-47 es un agua salobre (2,9 g/l STD) de vía evolutiva carbonatada. Generalmente las aguas de aporte de vía carbonatada son muy diluidas. Esta alta salinidad sugiere que la napa en este sector ha sido evaporada siguiendo la vía carbonatada.

Al contrario, las vías evolutivas no se relacionan tan bien con la geología de la cuenca de drenaje. Toda la cuenca está constituida de estrato-volcanes andesíticos y dacíticos de los cuales los más importantes, el Ollague y el Cañapa, contienen yacimientos de azufre. Con tal litología, las aguas de aporte deberían ser todas ricas en azufre y de vía evolutiva alcalina sulfatada o neutra sulfatada. Las salmueras de Ascotán deberían ser todas de tipo Na / Cl-SO₄. En realidad existe solamente una parte del salar que responde a esta previsión y es la orilla oeste. La composición de las aguas orientales de aporte, de vía evolutiva neutra cálcica, no proviene de la alteración de las rocas de la cuenca de drenaje.

Relación con las cuencas bolivianas colindantes

La pregunta que se hace naturalmente para el origen de las aguas de aporte cálcicas del este de la cuenca de Ascotán es si ellas provienen de las vecinas cuencas bolivianas más elevadas. La figura 6 muestra la relación SO_4 versus Ca para las aguas del este de Ascotán y para todas las aguas de aporte y salmueras de los 7 salares bolivianos colindantes con Ascotán : Cañapa, Hedionda, Chiar Kota, Honda, Pujio, Ramaditas y Balivian (Risacher y Fritz, 1991).

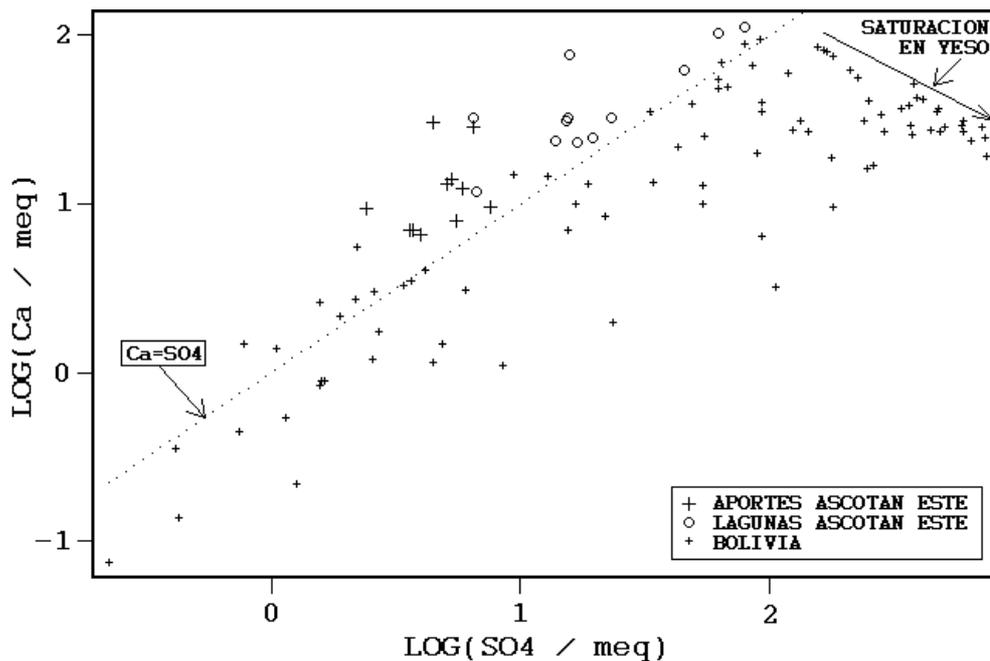


Fig.6 : Relación Ca versus SO_4 en las aguas del sector oriental de Ascotán y de las cuencas colindantes de Bolivia.

Las aguas de los salares bolivianos evolucionan todas hacia la vía sulfatada. Se observa la distribución de los puntos de las salmueras bolivianas más concentradas a lo largo de la línea de saturación del yeso. Estas salmueras se concentran todas en SO_4 en desmedro de Ca. Al contrario todas las salmueras *del sector oriental* de Ascotán son más concentradas en Ca que SO_4 . Todas provienen de la vía neutra cálcica. Las aguas del lado boliviano, al contrario que en Ascotán, están en buen acuerdo con la litología de la cuenca de drenaje : rocas volcánicas con azufre. Por lo tanto, no son estas aguas las que surgen en el lado oriental de Ascotán.

Evolución cuantitativa de aguas

En la tabla I presentamos la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de dos salmueras representativas del salar. Los valores de la columna "desviación" son los coeficientes del chi-cuadrado adaptado que miden el grado de semejanza entre las soluciones de aporte evaporadas (**ASC-xxE**) y las salmueras reales **ASC-n**.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
ASC-32	8,22	9,05	23300	3010	373	28,3	12200	1410	81,9	2050	790	
ASC-6E	7,83	1,90	24200	2850	210	27,7	11800	1210	63,3	2240	960	0,045
ASC-30E	7,81	1,93	24500	2580	221	27,7	11500	1200	58,7	2500	1010	0,053
ASC-11E	7,81	1,82	24500	2550	208	27,7	11600	1170	55,0	2520	974	0,064
ASC-5E	7,86	1,61	23900	3230	162	27,7	12200	1400	104	1940	774	0,069
ASC-26E	7,86	1,54	24100	3150	152	27,7	12200	1350	75,2	2000	827	0,072
ASC-4E	7,86	1,56	24000	3170	158	27,7	12400	1410	103	1970	682	0,074
ASC-8E	7,88	1,52	23800	3350	146	27,7	12500	1280	82,9	1870	746	0,080
ASC-9E	7,90	1,55	23500	3710	142	27,7	12700	1300	90,3	1690	741	0,091
ASC-10E	7,83	1,68	25500	1380	186	26,8	12500	1280	59,6	2140	700	0,114
ASC-37E	8,06	6,00	20600	5320	548	28,6	11800	1680	100	847	987	0,128
ASC-36E	8,10	6,14	22300	3280	542	28,5	12700	1600	112	679	704	0,128
ASC-1E	7,95	5,60	21600	3300	700	28,0	12400	1840	138	805	402	0,190
ASC-15E	8,00	6,06	21900	2980	693	28,0	12500	1840	140	636	517	0,200
ASC-3E	8,01	6,24	21900	2910	694	28,0	12600	1850	140	563	513	0,219
ASC-38E	8,31	8,73	20900	5060	491	28,7	12500	1680	93,0	269	1100	0,286
ASC-42E	8,28	3,62	23600	3490	157	28,2	13300	1610	56,8	291	1240	0,329
ASC-2E	8,28	4,40	20400	6830	210	28,3	12700	1680	44,0	319	1300	0,369
ASC-7E	7,73	0,85	25400	1820	88,8	27,8	12100	909	33,1	3580	260	0,399
ASC-19E	7,72	0,87	25800	1290	91,6	27,7	12200	914	37,0	3520	257	0,420
ASC-47E	9,62	83,9	19400	3420	366	39,9	14900	1690	73,0	0,93	3,69	0,819
ASC-16E	9,16	38,4	15500	9080	515	33,1	13500	2150	136	6,90	26,2	0,919
ASC-44E	9,92	206	13000	5370	309	52,4	13900	2870	33,0	0,44	1,67	1,020
ASC-14E	8,16	4,63	1910	28500	274	30,7	6980	1560	19,9	445	3450	1,060
ASC-13E	9,61	94,8	6740	16100	495	42,2	12500	2990	10,9	1,37	4,85	1,410
ASC-41	7,77	26,4	58600	12200	1030	55,2	35400	4890	245	1170	2410	
ASC-37E	7,33	4,62	56600	12300	1300	21,5	32500	4630	276	1180	2720	0,087
ASC-36E	7,30	4,01	59800	8640	1230	21,3	34100	4300	299	1590	1890	0,114
ASC-38E	7,64	6,76	56300	13600	1030	21,5	33500	4520	250	510	2960	0,147
ASC-3E	7,07	3,48	58800	7800	1620	20,2	33700	4960	376	1330	1370	0,176
ASC-15E	7,05	3,38	58700	7950	1630	20,3	33400	4940	376	1520	1390	0,178
ASC-2E	8,05	8,91	53900	18100	554	20,8	33400	4430	116	843	3390	0,208
ASC-1E	7,02	3,26	58400	7880	1680	20,4	33700	4990	375	1580	1090	0,211
ASC-42E	8,05	6,86	62500	9230	415	20,9	35000	4260	150	770	3230	0,212
ASC-9E	7,77	4,02	66100	5120	399	19,5	35600	3640	254	2530	2080	0,301
ASC-8E	7,74	3,95	66900	4200	409	19,5	35100	3580	232	3070	2090	0,354
ASC-5E	7,71	4,24	67000	3920	455	19,5	34300	3910	292	3280	2170	0,357
ASC-4E	7,71	4,07	67100	3790	441	19,5	34600	3960	288	3390	1910	0,374
ASC-26E	7,71	4,03	67400	3720	427	19,5	34300	3770	211	3470	2320	0,382
ASC-6E	7,65	5,13	67700	3090	587	19,4	33000	3380	177	4210	2680	0,418
ASC-30E	7,59	5,01	68200	2600	610	19,4	31900	3350	164	5050	2820	0,477
ASC-11E	7,61	4,93	68300	2570	578	19,4	32200	3250	153	5120	2710	0,492
ASC-10E	7,61	4,14	68200	2510	497	19,6	33400	3440	160	5220	1870	0,511
ASC-47E	9,77	208	52900	9340	567	38,3	40200	4610	199	0,62	2,27	0,863
ASC-19E	7,51	1,98	69700	1590	247	20,0	32900	2470	99,8	8700	692	0,947
ASC-7E	7,52	1,98	69700	1640	244	19,9	33200	2500	90,9	8420	714	0,948
ASC-14E	8,00	11,4	5150	75200	736	26,4	18800	4210	53,5	526	9290	0,951
ASC-44E	10,0	552	35000	14500	741	53,8	37500	7760	89,1	0,42	1,54	0,952
ASC-16E	9,29	56,2	43900	25600	445	28,8	37200	6080	385	4,16	14,7	0,974
ASC-13E	9,84	284	23900	36300	671	46,6	33100	10600	38,6	0,71	2,44	1,260

Tabla 1. Comparación de la composición química de las aguas de aporte evaporadas con dos salmueras de Ascotán. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

ASC-32 es una salmuera del sistema lagunar al este del salar. Las aguas de aporte cuya evaporación produce las salmueras más parecidas provienen todas del sector este del salar con coeficientes de desviación mínimos ($< 0,1$). Las que más discrepan son las aguas de aporte del sector occidental, en particular las aguas de vía evolutiva carbonatada. Todas las demás aguas del gran sistema lagunar tienen el mismo origen.

ASC-41 es la napa subterránea del sector occidental del salar precisamente donde se explota la ulexita. Las aguas de aporte que más se asemejan a esta salmuera cuando se evaporan provienen del sur-oeste del salar, es decir el sector marcado en la figura 5 con la vía evolutiva neutra sulfatada. Esto sugiere un flujo subterráneo globalmente de sur a norte. Aquí también, las aguas que más discrepan son las de vía evolutiva carbonatada.

Relación con la cuenca de Carcote

En la orilla sur del salar de Carcote surgen vertientes saladas (CAR-12, 24, 25). Se supone generalmente que provienen de infiltraciones de salmueras del salar de Ascotán. Las aguas de vertientes CAR-12 y 24, que son las más representativas de la alimentación del sur de Carcote, son muy parecidas, tanto en salinidad (7 g/l STD) como en composición (cálcica), a las aguas de napas y vertientes del nor-este de Ascotán (ASC-7, 19). Esta similitud no implica una comunicación de una cuenca a la otra, sino solamente un origen común, probablemente afuera de las dos cuencas. Sin embargo, hemos encontrado una vertiente fluyente, CAR-25, de salinidad netamente más elevada (25 g/l STD), lo que plantea un problema en cuanto a su origen. Vamos a comparar la composición de esta vertiente salada de Carcote con aguas evaporadas de la cuenca de Ascotán (Tabla 2). ASC-20 y 21E son aguas evaporadas de lagunas al norte del salar, es decir cerca de Carcote.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
CAR-25	7,44	0,899	14900	595	54,8	16,1	7020	528	20,8	1940	253	
ASC-19E	7,82	0,678	14700	731	52,0	30,0	6920	519	21,0	2000	146	0,070
ASC-7E	7,82	0,662	14300	1150	50,0	30,1	6810	512	18,7	2070	147	0,109
ASC-20E	7,75	0,632	14400	1010	52,0	41,4	6810	521	19,6	2070	150	0,131
ASC-21E	7,72	0,625	14400	1050	52,9	45,6	6740	526	21,4	2120	154	0,147
ASC-8E	7,92	1,00	12800	2770	78,2	30,2	6720	686	44,5	1410	401	0,309
ASC-9E	7,93	1,02	12600	2960	76,2	30,2	6800	696	48,5	1320	398	0,334
ASC-42E	8,37	2,88	13400	1980	89,0	30,5	7510	914	32,2	166	710	0,601
ASC-2E	8,37	3,31	11600	3870	119	30,6	7170	951	24,9	182	744	0,724
ASC-44E	9,84	115	7260	3010	173	49,0	7790	1610	18,5	0,47	1,8	1,340

Tabla 2. Comparación de la composición química de aguas evaporadas del norte de Ascotán con la salmuera de la vertiente salada CAR-25 de Carcote. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Se observa una buena correlación entre las aguas evaporadas del sector noreste de Ascotán (19, 7, 20, 21), en particular la vertiente ASC-19, con la vertiente salada de Carcote. Al contrario, las aguas de Ascotán de los sectores norte y oeste, aunque más cercanas de CAR-25, no tienen relación con el agua de Carcote. Es probable que las salmueras cálcicas del noreste de Ascotán se infiltran hacia Carcote, pero no las salmueras sulfatadas, aunque más cercanas. La vertiente CAR-25 tiene un flujo muy débil. Alimenta una pequeña laguna superficial de superficie máxima de 10 000 m². El balance hídrico de esta lagunita da un caudal entrante de 0,7 l/s. Eso sugiere que las infiltraciones de Ascotán hacia Carcote son mínimas y no influyen en el balance hídrico del salar de Carcote.

Calidad de aguas

La cuenca de Ascotán se caracteriza por la mala calidad de sus aguas. Se ha encontrado solamente 4 aguas de calidad aceptable para el consumo humano (2, 13, 14, 44) las que se encuentran todas al nor-oeste del salar en el sector de vías evolutivas carbonatada y alcalina sulfatada (ver figura 5). Las aguas (13) y (14), de las dos únicas vertientes cuenca arriba, son de excelente calidad. Sin embargo, no parecen tener mucha influencia en la hidroquímica del salar. La importancia hidrogeológica de las napas que las originan debe ser mínima. Las aguas (2) y (44) son al límite de potabilidad, pero tienen demasiado boro para el uso agrícola. El agua de napa (16), al sur del salar, es bien diluida (411 mg/l STD) y hubiera constituido una excelente agua potable si no fuera por su alto contenido en arsénico : 0,65 mg/l, o sea 13 veces más que la concentración máxima autorizada.

Balance hídrico

Podemos intentar establecer, a nivel de orden de magnitud, el balance hídrico del sistema lagunar de Ascotán. Hemos visto que las salmueras provienen bien de la evaporación de las vertientes que las alimentan superficialmente. No se ha detectado ningún indicio de otra alimentación. Consideramos separadamente los dos conjuntos lagunares, oriental y occidental. El volumen de aporte que se puede estimar corresponde entonces al total del flujo superficial entrante por cada orilla, oriental y occidental. Los cálculos corresponden a promedios, no a los valores individuales de cada laguna, lo que además no tiene mucha importancia para la estimación de los flujos entrantes, pero sí para las infiltraciones. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 1,63$ m/año
- $H_p = 0,12$ m/año

+ sistema lagunar oriental :

- $S = 14$ km²
- $C_{ap} = 1,94$ g/l (promedio ASC-5, 6, 8, 11, 19, 26, 30)
- $C_L = 23,3$ g/l (laguna más concentrada ASC-32)

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 23 \times 10^6$ m³/año = 731 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 1,9 \times 10^6$ m³/año = 61 l/s

+ sistema lagunar occidental :

- $S = 4$ km²
- $C_{ap} = 1$ g/l (promedio ASC-36, 37, 38, 42, 44)
- $C_L = 17$ g/l (promedio ASC-39, 43, 46)

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 6,5 \times 10^6$ m³/año = 203 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 0,4 \times 10^6$ m³/año = 11 l/s

El flujo obtenido de 731 l/s para la sola orilla oriental es importante. En comparación, el flujo superficial por la ladera oeste del salar es bajo. V_i representa infiltraciones de las lagunas en los sedimentos hacia la napa subterránea del salar y no afuera de la cuenca de Ascotán. El coeficiente de escurrimiento (razón entre el volumen caído y el volumen entrante) en la ladera occidental es de 0,11 mientras que el de la ladera oriental es de 0,32, un valor muy elevado. Esto también

confirma que las aguas cálcicas de napas y vertientes de la ladera oriental no provienen de las únicas precipitaciones sobre la cuenca de drenaje.

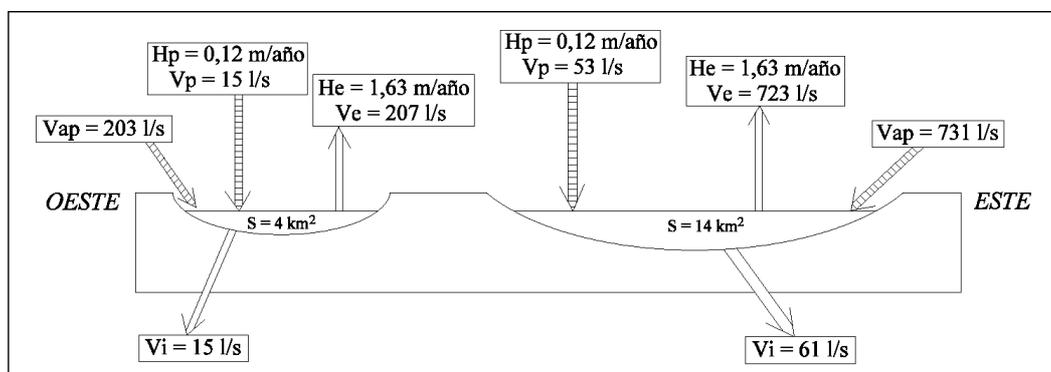


Fig.7 : Balance hídrico de los sistemas lagunares del salar de Ascotán.

Conclusiones

El salar de Ascotán se divide en dos partes. El sector oriental se caracteriza por aguas de aporte salobres de tipo Na-(Ca) / Cl y de vía evolutiva neutra cálcica en completa discrepancia con la litología de la cuenca de drenaje constituida de rocas volcánicas con azufre. El origen de estas aguas es desconocido. No provienen de las napas superficiales de las cuencas bolivianas colindantes. Las numerosas vertientes del sector oriental tienen un caudal total muy elevado de 730 l/s y alimentan un complejo sistema lagunar produciendo salmueras de tipo Na-(Ca) / Cl. Ninguna de las aguas de aporte de este sector tiene una calidad aceptable para el uso doméstico o agrícola.

El sector occidental se caracteriza por aguas de aporte con salinidad y composición variada, y de contenido porcentual en SO₄ más elevado que el de las aguas del sector oriental. Todas siguen las vías evolutivas sulfatadas, en buen acuerdo con la litología de la cuenca. El caudal entrante por este sector, 200 l/s, es muy inferior al del sector oriental. Alimentan solamente pequeñas lagunas adyacentes a la orilla y también la napa subterránea del oeste del salar produciendo salmueras de tipo : Na / Cl-(SO₄). Es en este sector que se encuentran las únicas aguas aprovechables para el uso humano y agrícola.

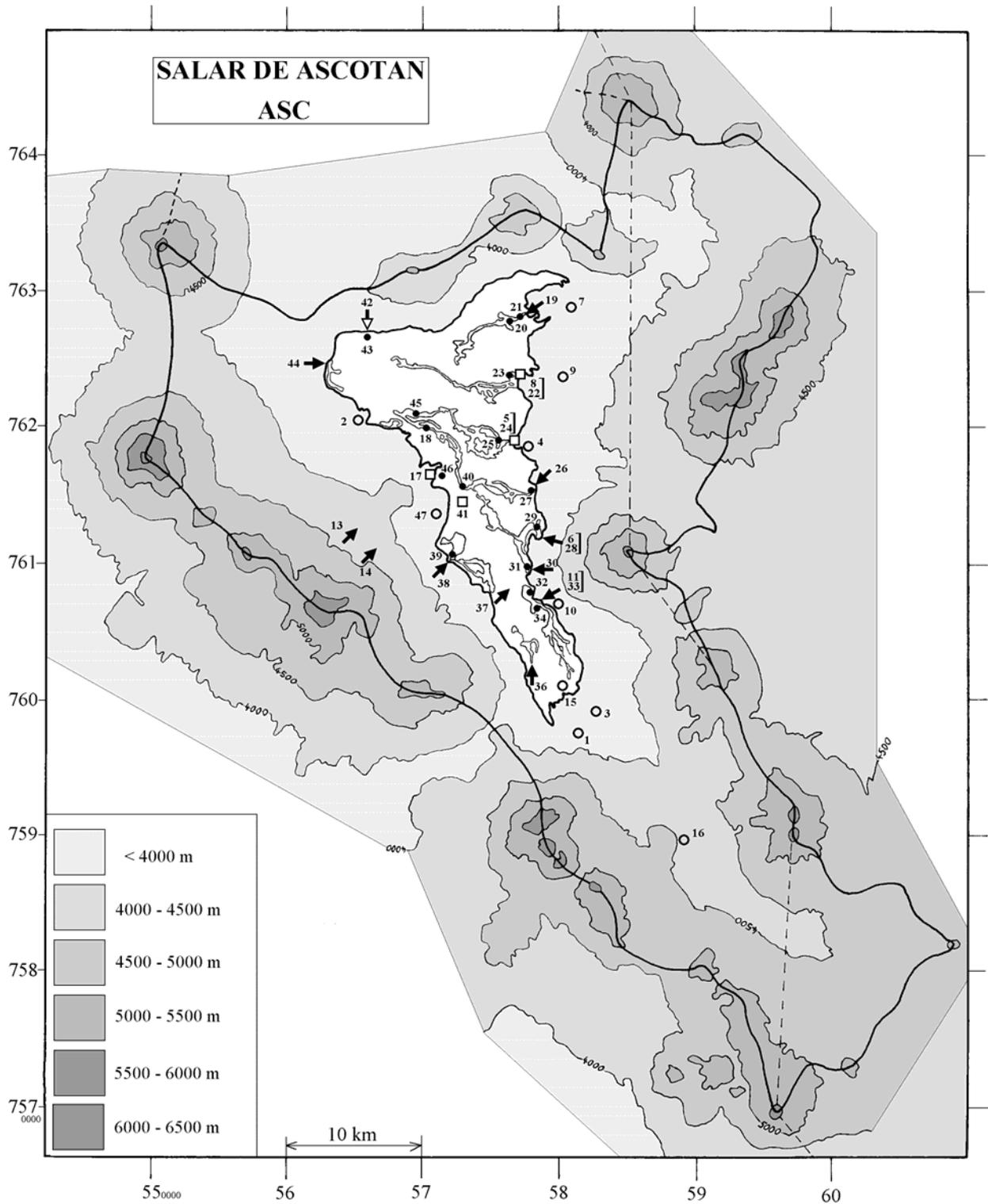
Referencias y estudios anteriores

CODELCO 1994. Salar de Ascotán. Antecedentes técnicos. División Chuquicamata. Recopilación de informes, Enero de 1994.

CODELCO 1996. Caracterización hidrogeológica, cuenca salar de Ascotán. Pozos Naciones Unidas. Expediente DGA ND-II-542, 44p.

Mardones, L. 1977. Geología e hidrogeología de los salares de Ascotán y Carcote, II Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad del Norte, Departamento de Geología, Antofagasta, 178p.

Mardones, L. 1997. Características isotópicas de las aguas subterráneas entre los paralelos 21° y 24° latitud sur, con énfasis en el salar de Ascotán. Coloquio Internacional: El Recurso Agua en los Andes, Orstom - Universidad Católica del Norte, 10-13 de junio de 1997, Antofagasta.



SALAR DE ASCOTAN

ASC

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
ASC-1	01/07/94	09 ^H 40	582547	7598026	3760	Napa (pozo CHU-46 = ASB-1)
ASC-2	01/07/94	10 ^H 50	565136	7620662	3720	Napa (pozo ASB-40)
ASC-3	01/07/94	15 ^H 45	583153	7599119	3750	Napa (pozo CHU-62 = ASB-2)
ASC-4	01/07/94	12 ^H 50	576722	7618906	3728	Napa (pozo SA7-1)
ASC-5	01/07/94	13 ^H 05	576600	7618950	3716	Napa (dren)
ASC-6	01/07/94	13 ^H 50	578890	7611790	3718	Manantial corriente
ASC-7	01/07/94	11 ^H 40	580657	7628209	3727	Napa (pozo SA1-2)
ASC-8	01/07/94	12 ^H 00	577223	7624023	3718	Napa (dren)
ASC-9	01/07/94	12 ^H 30	580317	7623234	3767	Napa (pozo ASE-15)
ASC-10	01/07/94	14 ^H 50	579070	7606929	3720	Napa (pozo CHU-28)
ASC-11	01/07/94	15 ^H 00	579200	7606800	3718	Manantial corriente
ASC-13	05/10/94	11 ^H 15	564625	7612425	4250	Manantial corriente (Cebollar)
ASC-14	05/10/94	15 ^H 15	565750	7610975	4250	Manantial corriente
ASC-15	05/10/94	15 ^H 40	580775	7601325	3716	Napa (pozo)
ASC-16	05/10/94	16 ^H 10	589905	7589406	4280	Napa (pozo Perdiz)
ASC-17	06/10/94	18 ^H 00	570725	7616600	3716	Napa (cateo)
ASC-18	08/10/94	09 ^H 25	569975	7619900	3716	Laguna
ASC-19	08/10/94	10 ^H 40	577550	7628250	3718	Manantial corriente
ASC-20	08/10/94	11 ^H 15	577000	7628000	3716	Laguna
ASC-21	08/10/94	11 ^H 25	577125	7628225	3716	Laguna
ASC-22	08/10/94	11 ^H 50	577223	7624023	3718	Napa (dren = ASC-8)
ASC-23	08/10/94	12 ^H 30	576375	7624125	3716	Laguna

**SALAR DE ASCOTAN
ASC**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
ASC-24	08/10/94	14 ^H 20	576600	7618950	3716	Napa (dren = ASC-5)
ASC-25	08/10/94	15 ^H 00	575750	7619125	3716	Laguna
ASC-26	08/10/94	15 ^H 25	578100	7616300	3718	Manantial corriente
ASC-27	08/10/94	16 ^H 00	577650	7616000	3716	Laguna
ASC-28	08/10/94	16 ^H 25	578890	7611790	3718	Manantial corriente = ASC-6
ASC-29	08/10/94	17 ^H 00	578375	7611875	3716	Laguna
ASC-30	08/10/94	17 ^H 20	578000	7610125	3718	Manantial corriente
ASC-31	09/10/94	10 ^H 45	577575	7610075	3716	Laguna
ASC-32	09/10/94	11 ^H 30	578300	7607750	3716	Laguna
ASC-33	09/10/94	12 ^H 10	579200	7606800	3718	Manantial corriente = ASC-11
ASC-34	09/10/94	12 ^H 50	579425	7606375	3716	Laguna
ASC-36	09/10/94	14 ^H 35	578000	7603300	3718	Manantial corriente
ASC-37	09/10/94	15 ^H 30	575625	7608425	3716	Manantial corriente
ASC-38	09/10/94	16 ^H 25	571800	7610575	3718	Manantial corriente
ASC-39	10/10/94	10 ^H 00	572000	7610925	3716	Laguna
ASC-40	10/10/94	10 ^H 30	573150	7615825	3716	Laguna
ASC-41	10/10/94	11 ^H 15	572650	7614825	3716	Napa (cateo)
ASC-42	10/10/94	12 ^H 20	565000	7627000	3716	Manantial difuso
ASC-43	10/10/94	12 ^H 40	564950	7626700	3716	Laguna
ASC-44	10/10/94	14 ^H 15	562650	7623950	3717	Manantial corriente
ASC-45	10/10/94	14 ^H 40	568450	7621125	3716	Laguna
ASC-46	10/10/94	15 ^H 40	571075	7616700	3716	Laguna
ASC-47	10/10/94	16 ^H 30	570750	7613750	3730	Napa (pozo 6)

SALAR DE ASCOTAN

ASC

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
ASC-1	4380	42	na	1,002	6,72	3,72	1160	1,48	0,359	179	0,533	39,6	54,3	1,3	679	99,7	7,50	111	21,7
ASC-2	1560	14	na	1,001	7,74	3,51	315	0,123	0,039	105	0,849	3,22	21,1	0,005	192	25,7	0,673	58,1	29,4
ASC-3	3460	34	na	1,002	6,75	3,37	898	1,16	0,261	120	0,651	30,3	47,3	0,97	524	76,2	5,79	85,0	21,1
ASC-4	3900	18	na	1,002	7,85	1,16	1080	0,749	0,084	191	0,310	7,19	10,9	0,020	570	64,5	4,69	131	31,1
ASC-5	3960	16	na	1,002	7,57	2,04	1100	0,729	0,053	178	1,41	7,59	30,8	0,71	587	65,3	4,87	141	36,2
ASC-6	6630	24	na	1,003	7,12	2,34	1980	0,723	0,100	283	1,17	17,4	41,7	0,97	989	100	5,24	249	79,5
ASC-7	11790	21	na	1,006	7,34	1,04	3870	0,685	0,083	311	1,20	13,5	39,5	0,68	1840	138	5,04	577	39,6
ASC-8	4070	19	na	1,002	8,22	1,46	1110	0,605	0,042	266	1,74	6,73	31,1	1,4	570	59,0	3,83	161	34,5
ASC-9	5420	25	na	1,002	7,88	1,75	1260	0,718	0,079	365	0,353	7,45	9,38	0,045	649	68,0	4,74	193	38,9
ASC-10	6700	21	na	1,003	8,46	0,626	2130	0,807	0,184	116	0,057	15,7	2,28	0,034	1060	108	5,03	190	59,0
ASC-11	6680	17	na	1,003	7,09	2,72	2020	0,781	0,101	255	0,837	17,5	45,4	1,2	1010	98,5	4,64	281	82,1
ASC-13	75,0	12,5	11,4	1,000	7,94	0,478	3,09	0,002	0,001	7,39	0,020	0,227	16,4	0,005	5,84	1,37	0,005	4,25	2,77
ASC-14	174,0	19,5	9,5	1,000	7,66	0,438	2,88	0,004	0,003	48,5	0,021	0,411	20,3	0,044	10,5	2,35	0,030	12,6	5,22
ASC-15	3310	31,9	10,2	1,001	6,76	3,30	888	1,10	0,194	124	0,040	30,3	59,6	3,2	536	76,6	5,84	87,0	21,5
ASC-16	642,0	28	na	1,000	7,70	1,51	107	0,152	0,035	63,4	0,316	4,27	40,0	0,65	96,1	15,0	0,951	18,8	3,52
ASC-17	6900	10	na	1,004	7,42	11,9	1680	1,08	0,078	672	0,057	57,5	38,4	3,8	1110	113	5,01	205	143
ASC-18	22300	2	11,5	1,013	8,13	3,23	7490	3,44	0,283	2180	0,068	79,3	46,2	5,8	3890	422	22,2	1250	270
ASC-19	12500	10	9,9	1,006	7,61	0,928	4330	0,633	0,071	216	1,59	15,4	36,7	0,97	2040	153	6,20	606	43,0
ASC-20	12700	17	13,5	1,006	7,92	0,995	4400	0,719	0,088	310	0,949	16,0	37,0	1,0	2120	160	6,02	654	46,2
ASC-21	27600	21	7,6	1,014	8,19	1,84	10200	1,67	0,122	754	2,44	38,1	48,7	2,2	4950	378	15,4	1550	111
ASC-22	3960	19,5	7,2	1,002	7,81	1,48	1120	0,615	0,042	206	1,36	7,46	32,2	0,71	584	63,3	3,84	157	33,8
ASC-23	10570	26	19,7	1,005	9,14	2,25	3240	1,55	0,227	662	0,035	20,2	40,6	1,9	1640	161	10,2	473	97,7

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
 CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

SALAR DE ASCOTAN

ASC

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
ASC-24	3910	16,5	8,7	1,002	7,72	2,07	1110	0,694	0,051	178	0,508	7,25	31,1	0,53	575	64,5	4,71	144	36,5
ASC-25	7780	23,3	8,5	1,003	7,74	2,50	2400	1,66	0,402	320	5,21	16,6	28,3	1,4	1240	148	10,4	237	80,9
ASC-26	3930	24	6,8	1,002	7,81	1,89	1100	0,483	0,032	173	0,068	7,12	33,3	0,56	589	63,0	3,51	141	38,6
ASC-27	8240	15,6	na	1,005	9,21	1,24	2300	1,22	0,087	941	0,033	16,1	36,1	1,8	1220	137	7,98	493	73,1
ASC-28	6460	23,6	6,3	1,003	7,37	2,30	2000	0,696	0,097	218	0,502	17,0	43,1	1,0	950	102	5,38	253	79,0
ASC-29	15680	10,3	8,9	1,008	9,37	2,63	5360	1,87	0,326	739	0,136	51,1	45,9	3,1	2510	274	13,9	618	228
ASC-30	6270	22,8	5,1	1,003	7,42	2,53	1930	0,797	0,106	244	0,254	17,5	45,4	1,2	915	95,4	4,66	263	80,4
ASC-31	14650	7,9	3,5	1,008	8,16	4,77	4830	1,65	0,425	749	0,020	47,2	47,9	4,2	2260	247	12,2	650	213
ASC-32	57200	11	9,5	1,033	8,22	9,05	23300	11,7	0,595	3010	0,341	373	28,3	29	12200	1410	81,9	2050	790
ASC-33	6590	18,5	4,7	1,003	7,22	2,69	1980	0,779	0,097	267	0,428	18,7	43,7	1,0	948	95,8	4,59	275	79,9
ASC-34	19620	21	7,3	1,011	8,27	4,37	7060	3,28	0,190	1110	0,409	108	44,5	9,7	3570	446	23,8	654	242
ASC-36	6180	14,5	4,0	1,003	7,10	5,23	1740	1,46	0,284	259	0,459	42,8	43,4	4,1	1020	127	8,81	149	55,6
ASC-37	4770	25	7,6	1,002	7,34	5,49	1200	1,38	0,277	316	0,047	32,5	54,3	3,0	713	99,7	5,94	153	58,6
ASC-38	4020	20	9,5	1,002	7,18	6,20	987	1,01	0,199	238	0,026	23,1	40,9	1,8	587	79,0	4,38	120	57,1
ASC-39	28600	4,7	6,5	1,016	8,15	8,72	9440	9,51	0,973	2940	0,046	248	63,8	17	5660	817	42,1	513	445
ASC-40	12000	7	7,0	1,006	8,42	1,83	3800	1,89	0,169	816	0,167	28,6	27,1	2,3	1880	196	11,8	465	135
ASC-41	122900	5,5	6,2	1,085	7,77	26,4	58600	43,6	1,690	12200	3,35	1030	55,2	82	35400	4890	245	1170	2410
ASC-42	4010	19,6	6,2	1,002	8,17	8,30	1010	0,135	0,003	151	0,081	6,78	34,7	0,11	580	69,6	2,45	93,0	104
ASC-43	83000	24,5	6,4	1,058	8,20	13,2	32500	13,3	0,753	15200	0,074	198	43,1	17	21200	2540	79,1	357	3010
ASC-44	1160	20,4	9,5	1,000	8,74	7,96	131	0,060	0,005	54,2	0,015	3,12	32,2	0,046	141	29,0	0,333	26,1	55,6
ASC-45	52500	21,3	5,9	1,031	8,03	7,05	20700	9,19	0,319	3850	0,341	244	54,9	23	10700	1190	70,1	2270	753
ASC-46	25800	20,3	5,3	1,015	8,42	16,2	8700	5,41	0,900	2470	0,161	175	53,5	9,0	5430	590	22,5	67,4	695
ASC-47	4440	20,1	na	1,002	9,32	10,1	1080	0,831	0,178	194	0,620	20,8	34,4	0,90	860	95,8	4,14	12,8	57,3

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

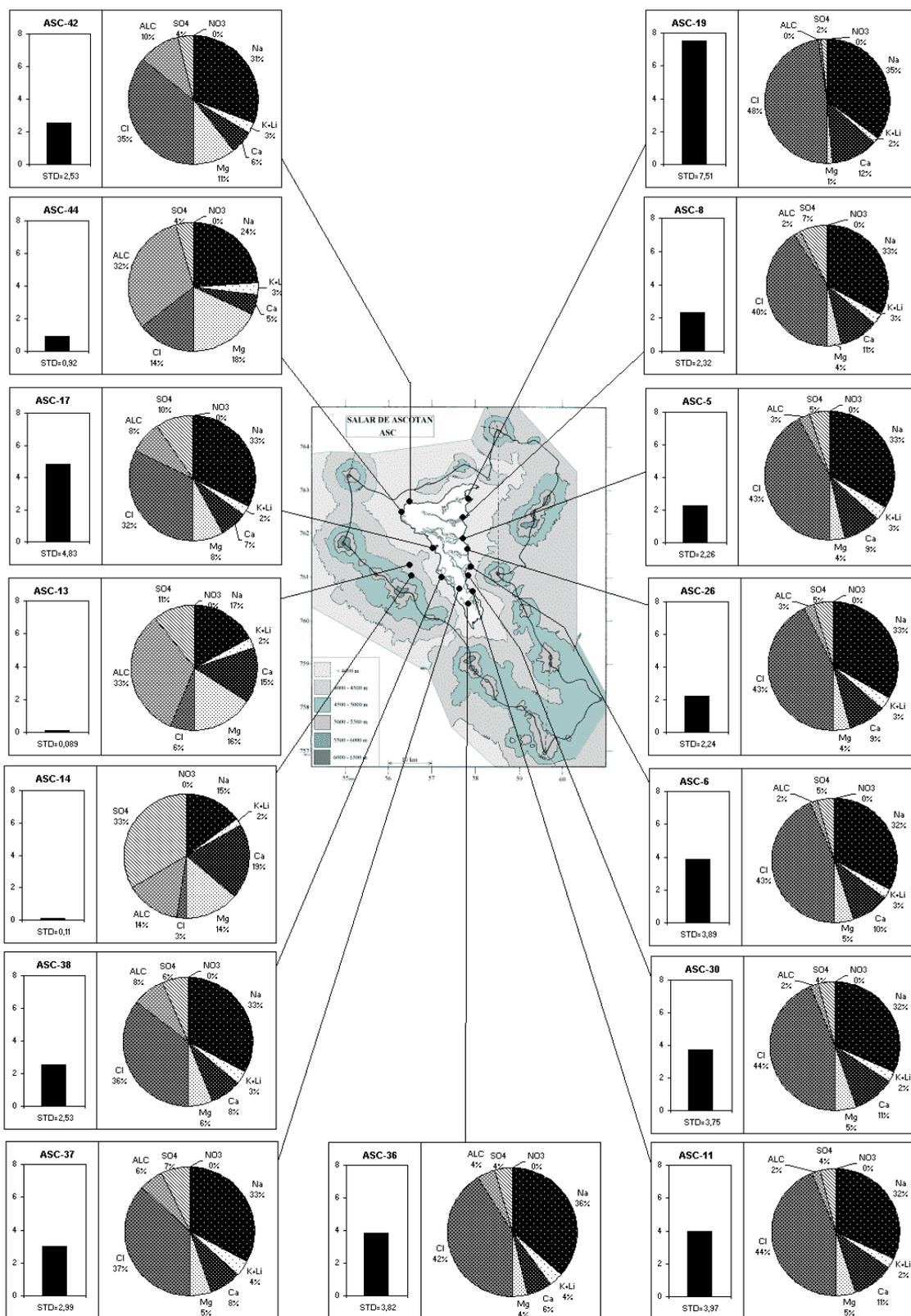
SALAR DE ASCOTAN

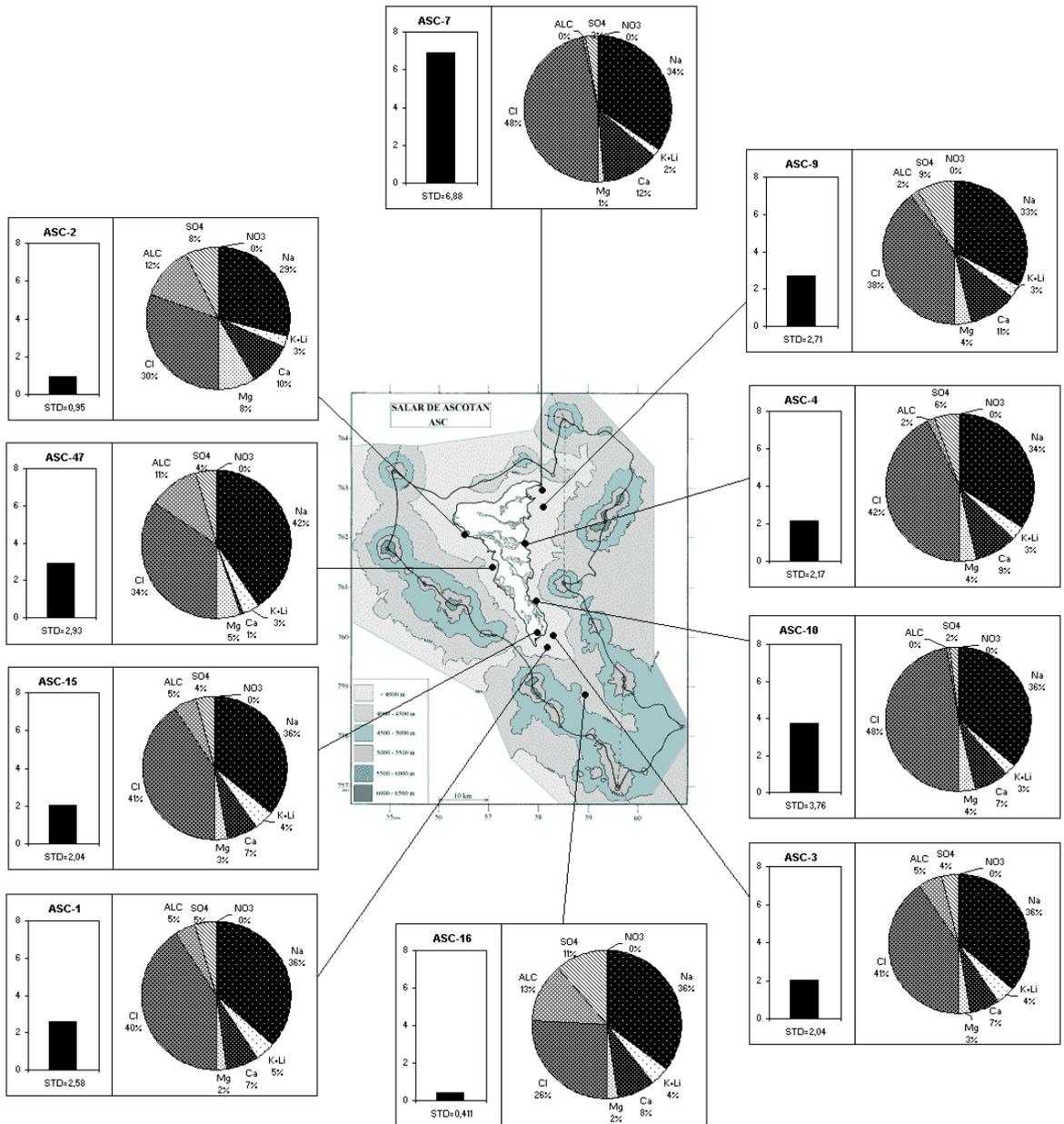
ASC

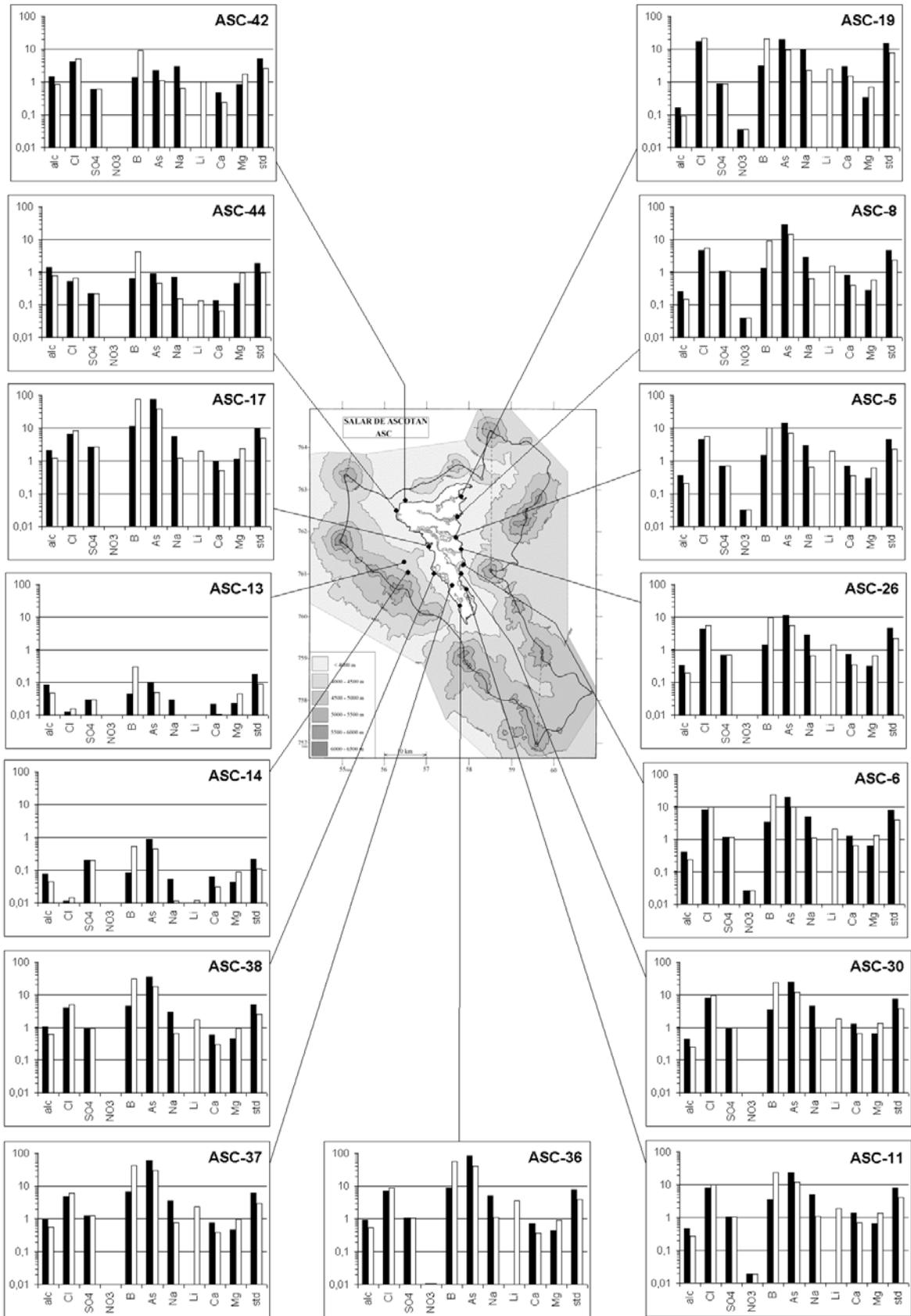
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%	NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
ASC-1	2581	225	0,30	48	40,48	40,15	0,8	ASC-24	2267	123	0,96	3,5	37,49	37,18	0,8
ASC-2	949,6	211	1,14	6,2	14,41	14,58	1,2	ASC-25	4644	144	1,86	3,3	77,64	76,75	1,2
ASC-3	2036	204	0,24	44	31,56	31,18	1,2	ASC-26	2243	110	1,32	2,2	37,92	36,39	4,1
ASC-4	2169	67,1	0,72	1,4	36,23	35,65	1,6	ASC-27	5295	5,31	2,16	0,005	88,48	85,54	3,4
ASC-5	2259	122	0,66	4,8	37,89	36,66	3,3	ASC-28	3802	137	0,84	7,5	63,80	63,15	1,0
ASC-6	3891	140	0,48	14	65,26	64,16	1,7	ASC-29	10055	-	-	-	167,6	169,0	0,8
ASC-7	6883	60,7	0,42	3,6	116,1	116,5	0,4	ASC-30	3746	149	1,02	7,5	62,63	62,01	1,0
ASC-8	2322	79,3	2,16	0,66	37,72	38,43	1,9	ASC-31	9407	245	9,06	2,7	156,4	156,4	0,01
ASC-9	2709	101	1,62	1,7	43,46	44,86	3,2	ASC-32	44631	134	12,8	1,1	744,8	728,9	2,2
ASC-10	3763	19,5	1,14	0,09	64,03	63,15	1,4	ASC-33	3876	161	0,60	13	64,59	64,06	0,8
ASC-11	3973	164	0,42	19	67,75	64,95	4,2	ASC-34	13731	143	9,90	0,92	222,3	226,6	1,9
ASC-13	89,10	28,6	0,12	0,62	0,7297	0,7193	1,4	ASC-36	3820	316	0,60	37	60,71	59,74	1,6
ASC-14	110,0	26,2	0,06	0,92	1,580	1,529	3,3	ASC-37	2992	328	1,44	19	46,87	45,97	1,9
ASC-15	2040	200	0,18	44	32,21	30,88	4,2	ASC-38	2526	375	0,90	34	38,85	38,96	0,3
ASC-16	411,3	89,7	0,42	2,5	5,929	5,845	1,4	ASC-39	21194	372	11,8	4,0	335,2	335,9	0,2
ASC-17	4834	714	3,12	43	73,72	73,10	0,9	ASC-40	7509	78,1	4,02	0,48	122,9	125,8	2,4
ASC-18	15968	143	5,46	1,9	267,4	259,6	2,9	ASC-41	117682	958	40,4	21	1957	1930	1,4
ASC-19	7506	52,8	0,48	2,0	127,5	127,5	0,01	ASC-42	2532	476	12,1	4,4	40,49	39,84	1,6
ASC-20	7808	50,9	1,32	0,84	133,5	131,5	1,5	ASC-43	75901	398	57,7	2,2	1262	1245	1,4
ASC-21	18180	61,6	5,52	0,48	313,4	304,6	2,9	ASC-44	920,4	421	26,8	1,1	12,78	12,78	0,01
ASC-22	2286	86,0	0,90	1,8	38,17	37,40	2,0	ASC-45	40802	178	15,6	1,8	682,7	670,3	1,8
ASC-23	6479	24,3	11,8	0,02	108,4	107,4	1,0	ASC-46	19517	659	54,5	2,8	314,9	312,6	0,7
								ASC-47	2933	365	80,4	0,24	45,81	44,45	3,0

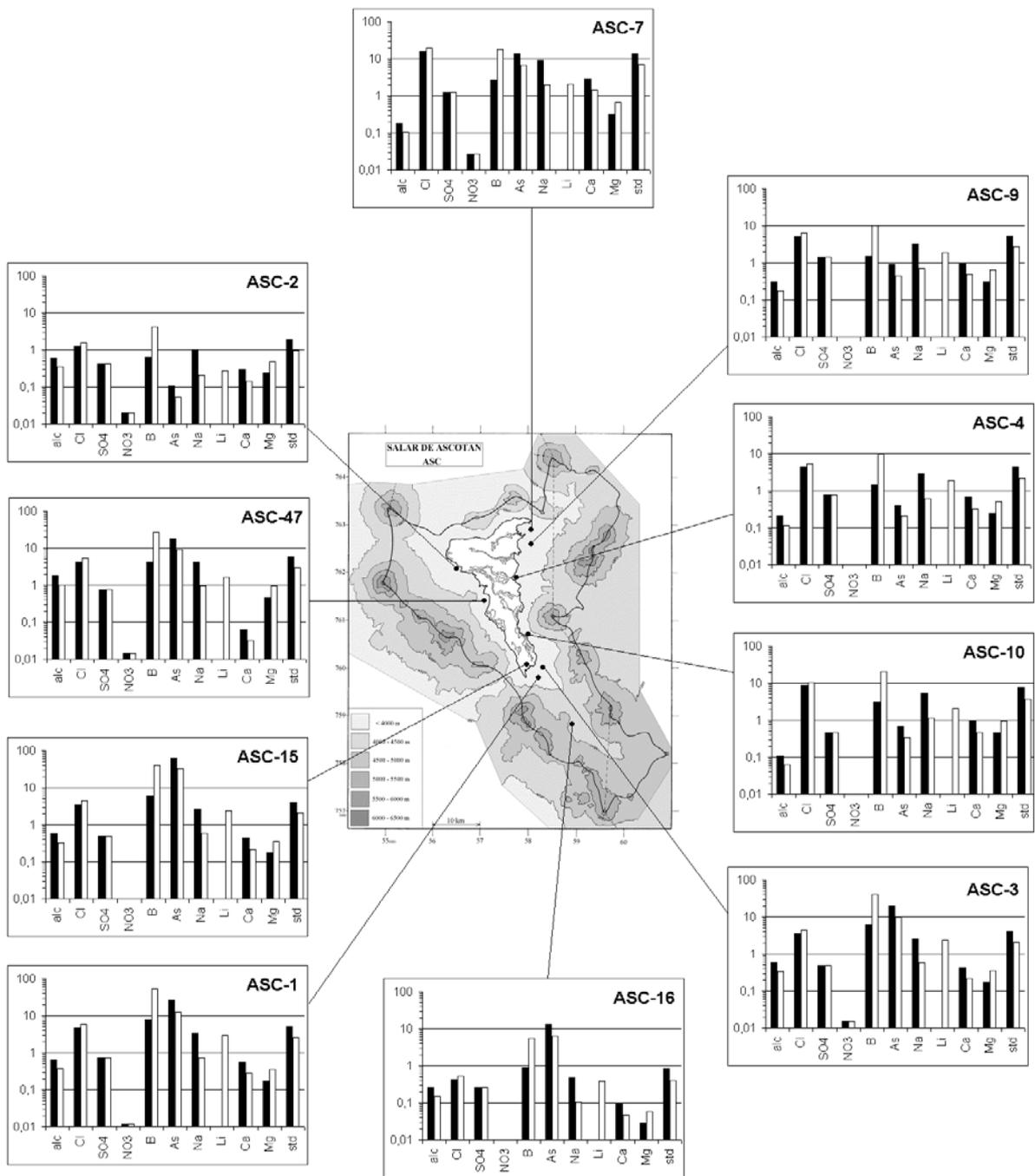
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %









MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

ASC

Qd : *Cuaternario*. Depósitos no consolidados.

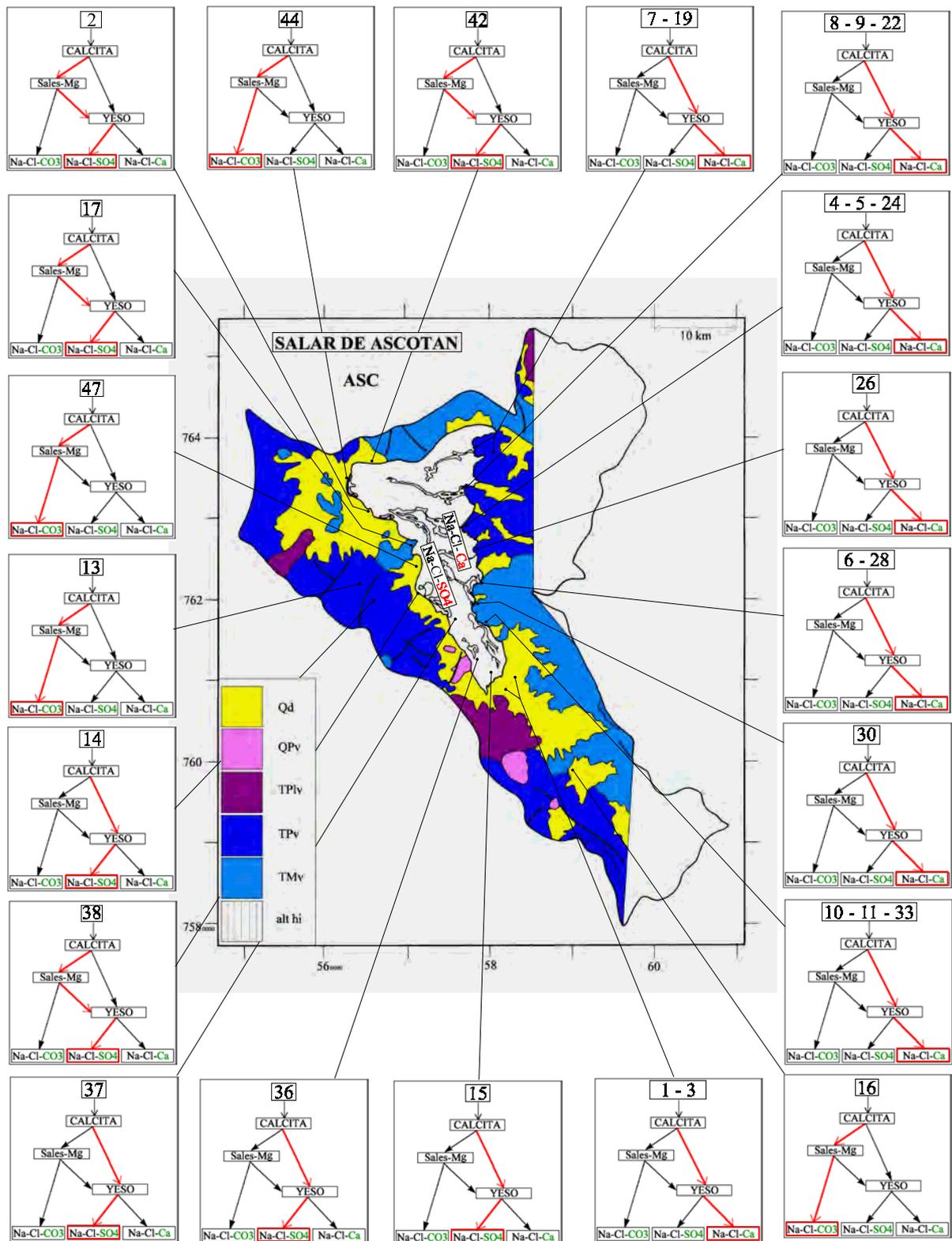
QPv : *Cuaternario*. Domos dacíticos porfíricos.

TPlv : *Plioceno sup.* - Pleistoceno. Estrato-volcanes andesíticos y dacíticos.

TPv : *Plioceno*. Estrato-volcanes andesíticos moderadamente erosionados.

TMv : *Mioceno sup.* - Plioceno. Estrato-volcanes andesíticos intensamente erosionados.

alt hi : alteración hidrotermal.



SALAR DE ATACAMA

Introducción

El salar de Atacama, con una superficie de 3000 km², es el más grande de Chile. Está ubicado en una cuenca cerrada entre la Cordillera de los Andes al este y la Cordillera de Domeyko al oeste. Sus principales características morfológicas y climatológicas son:

- altura: 2300 m
- superficie de la cuenca: 18 100 km²
- superficie del salar: 3000 km²
- superficie de las lagunas: 12,6 km²
- precipitaciones: 25 mm/año (salar) - 300 mm/año (Cordillera)
- evaporación potencial: 2000 mm/año (salar) - 1600 mm/año (Cordillera)
- temperatura media: 14°C (salar)

El salar de Atacama no fue incluido en el proyecto objeto del presente estudio como los demás salares y lagunas. La extensión y la complejidad de su cuenca y del salar mismo hacia muy difícil su estudio completo en los plazos y con el presupuesto del proyecto. Además, debido a su gran interés económico, numerosos estudios hidrogeológicos e hidroquímicos han sido realizados desde hace 30 años, con mejores medios que los nuestros, por el Instituto de Investigaciones Geológicas, Corfo, PNUD (Naciones Unidas), Universidades y empresas mineras como Minsal, Cia. Minera del Litio, Zaldivar y Escondida entre otras. A raíz de esos trabajos existe una gran cantidad de pozos de todo tipo en la cuenca. Como se dijo anteriormente, nuestras posibilidades de entregar nuevos antecedentes a los muchos disponibles, eran bajas. Preferimos interpretar la información ya existente y que ha sido publicada.

El primer estudio extensivo sobre el salar de Atacama, incluyendo la caracterización hidroquímica de las aguas, fue realizado por Moraga et al. (1974). Las altas concentraciones de litio y potasio en las salmueras incentivaron nuevos estudios del salar y de la hidrogeología de su cuenca de drenaje. En su evaluación económica, cabe resaltar la cubicación de la costra de sal realizada por Ide (1978). La hidrogeología fue estudiada por Dingman (1967), Díaz del Río et al. (1972), Dalannais (1979) y Mardones (1986). La climatología y la hidrología de la cuenca fueron descritas por Grilli et al. (1986). Los conocimientos geológicos y estratigráficos del salar de Atacama, incluyendo perfiles de pozos hasta 500 m de profundidad, han sido sintetizados por Bevacqua (1992). Finalmente, los balances hídricos y salinos fueron estimados por Alonso y Risacher (1996) y la geoquímica tocada por Risacher y Alonso (1996).

Todos estos estudios son relativamente fáciles de conseguir o consultar. Pero existen mucho más información inédita o de acceso restringido producida especialmente por diversas empresas mineras. Es muy difícil hacer una síntesis de todo este abundante material. De hecho, la simple recopilación y tratamiento informático de todo lo que existe sobre la cuenca del salar de Atacama, demoraría mucho más tiempo del que disponíamos y ello suponiendo que todas las empresas facilitaran su información reservada.

Hemos hecho una campaña de muestreo de los aportes superficiales al salar, todos en la parte oriental de la cuenca. Se muestrearon 22 aguas a las cuales se agregó otras tres facilitadas por colegas. (En el sólo estudio inicial de Moraga et al. (1974), hay más de 200 análisis químicos completos de aguas y salmueras del salar). Presentamos en este informe los análisis de esas 25 muestras sin discusión detallada, la que puede encontrarse en artículos recientes de la Revista Geológica de Chile, de fácil acceso. (Alonso y Risacher, 1996 y Risacher y Alonso, 1996). Reproducimos en anexo los resúmenes de estos artículos.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de las principales aguas de aporte del salar de Atacama están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1.

APORTES	SALINIDAD mg/l	TIPO QUÍMICO		VÍA EVOLUTIVA
		Cationes	Aniones	
ATA-24	213	Mg-Ca-Na	/ HCO ₃ -SO ₄	SO ₄ (A)
ATA-6	274	Na-Ca-(Mg)	/ Cl-HCO ₃ -(SO ₄)	SO ₄ (D)
ATA-2	308	Na-Ca	/ Cl-(HCO ₃)-(SO ₄)	SO ₄ (N)
ATA-18	383	Mg-Na-Ca	/ SO ₄ -HCO ₃ -(Cl)	SO ₄ (A)
ATA-9	467	Na-Ca-Mg	/ HCO ₃ -(SO ₄)-(Cl)	SO ₄ (A)
ATA-17	765	Na-Mg-(Ca)	/ SO ₄ -Cl-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-11	825	Na-Mg-Ca	/ SO ₄ -HCO ₃ -(Cl)	SO ₄ (A)
ATA-8	846	Ca-Na-Mg	/ HCO ₃ -SO ₄ -(Cl)	SO ₄ (A)
ATA-3	940	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-SO ₄ -(HCO ₃)	SO ₄ (A)
ATA-1	1115	Na-Ca	/ Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-23	1120	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-SO ₄ -(HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-7	1388	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-HCO ₃ -(SO ₄)	SO ₄ (D)
ATA-15	1497	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-(HCO ₃)-(SO ₄)	SO ₄ (A)
ATA-25	1604	Ca-Na-(Mg)	/ SO ₄ -(Cl)-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-4	1655	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-16	1695	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-SO ₄ -(HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-14	1806	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-SO ₄ -(HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-10	2092	Na-Mg-(Ca)	/ SO ₄ -HCO ₃ -(Cl)	SO ₄ (N)
ATA-19	2138	Ca-Na-(Mg)	/ SO ₄ -Cl-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-5	2326	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-21	2624	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-12	2742	Na-Ca-(Mg)	/ Cl-SO ₄ -(HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-13	3630	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-22	4413	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-20	19509	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-(SO ₄)	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Atacama.

SO₄ (A) = vía alcalina sulfatada; SO₄ (N) = vía neutra sulfatada

SO₄ (D) = vía sulfatada directa (sin pasar por el yeso); Ca = vía cálcica.

Casi todos los aportes encontrados provienen de la Cordillera de los Andes al este y al norte del salar. Hay tres muestras de aguas difusas al sur. No tenemos ningún aporte de la Cordillera de Domeyko, al oeste. De la figura 1 se deduce que las composiciones de los aportes son muy variadas, lo que refleja la gran complejidad de la cuenca de drenaje. Las salinidades varían desde

213 mg/l hasta 19 500 mg/l. El aporte más concentrado esta probablemente contaminado por la cuña salina del salar.

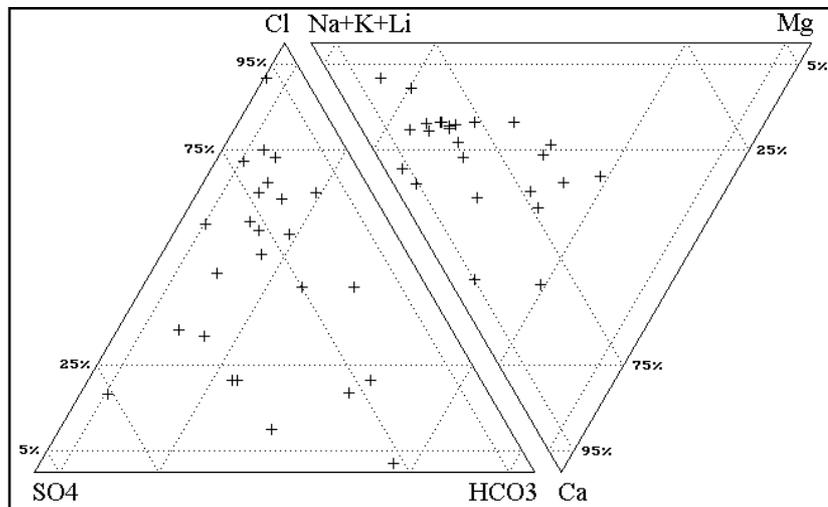


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Atacama.

No hemos muestreado ninguna salmuera. Ide (1978) presenta unos 400 análisis de salmueras en su estudio sobre la cubicación del núcleo del salar. Sólo con esta base de datos, se ha podido detectar la existencia de dos tipos de salmueras en el núcleo:

- al este, las salmueras son del mega-grupo sulfatado: Na / Cl-SO₄.
- al oeste, las salmueras son del mega-grupo cálcico: Na-Ca / Cl.

Origen de los componentes disueltos

Se puede observar dos tendencias equimolares en las aguas de aporte: Na ~ Cl y Ca ~ SO₄. La relación entre Na y Cl tiene un aspecto clásico: las concentraciones de Na y Cl tienden a igualarse cuando aumenta la salinidad, Na siendo superior a Cl en las aguas más diluidas.

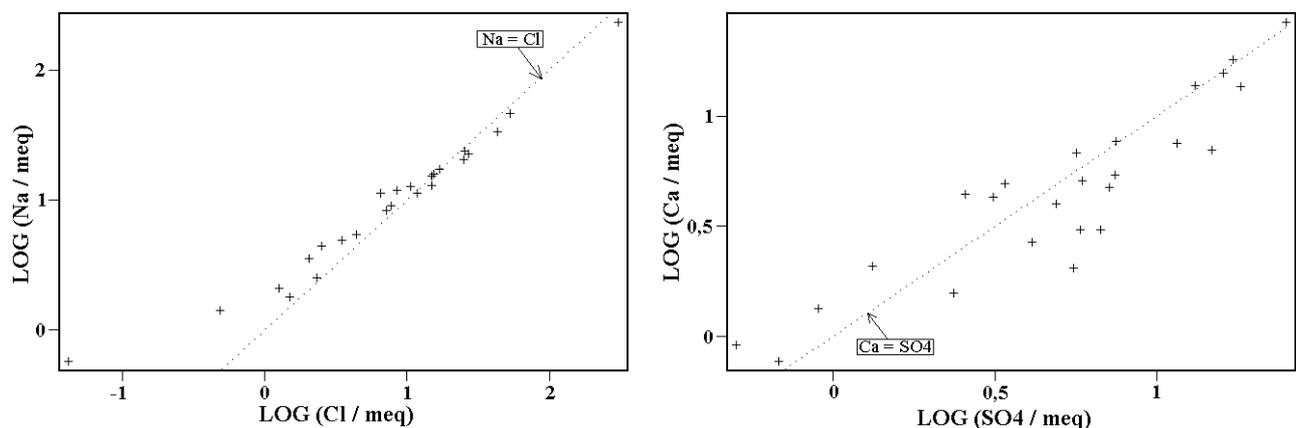


Fig.2 : Relaciones Na versus Cl y Ca versus SO₄ en aguas de aporte al salar de Atacama.

Esto sugiere que Na, Ca, Cl y SO₄ provienen en gran parte (pero no exclusivamente) de la redisolución de halita (NaCl) y yeso (CaSO₄·2H₂O) en antiguas evaporitas recubiertas por formaciones volcánicas más recientes. Tal formación geológica existe en la cuenca del salar de Atacama: es la Cordillera de la Sal que aflora al oeste del salar y que se prolonga al norte por debajo de las formaciones volcánicas (ver mapa geológico). Los demás componentes (K, Mg, Li, B) provienen de la alteración de rocas volcánicas.

Vías evolutivas y relación con la geología

Todas las aguas de aporte siguen las vías sulfatadas. El aporte más concentrado sigue la vía cálcica; pero hemos visto que podría estar contaminado por la cuña salina. Las vías sulfatadas son coherentes con la geología volcánica de la parte oriental de la cuenca y también con la composición sulfatada de las salmueras de la mitad oriental del núcleo. Al contrario, discrepan con la composición cálcica de las salmueras del sector occidental del núcleo. Ahora bien, esta composición cálcica refleja la litología, en gran parte sedimentaria, de la Cordillera de Domeyko. Lamentablemente, nos faltan muestras de aportes desde esta Cordillera. Existen en el sector oriental algunos afloramientos sedimentarios de litología parecida a la de Domeyko. Hemos encontrado en Moraga et al. (1974) algunos análisis de aguas de aporte que drenan tales afloramientos. Se puede razonablemente suponer que son aguas parecidas a las que lixiviaron la Cordillera de Domeyko. Estas aguas pertenecen todas a la vía cálcica. Presentamos en la figura 3 la relación entre Ca y SO₄ de todas las aguas de Moraga et al. (1974) y de Risacher y Alonso (1996)

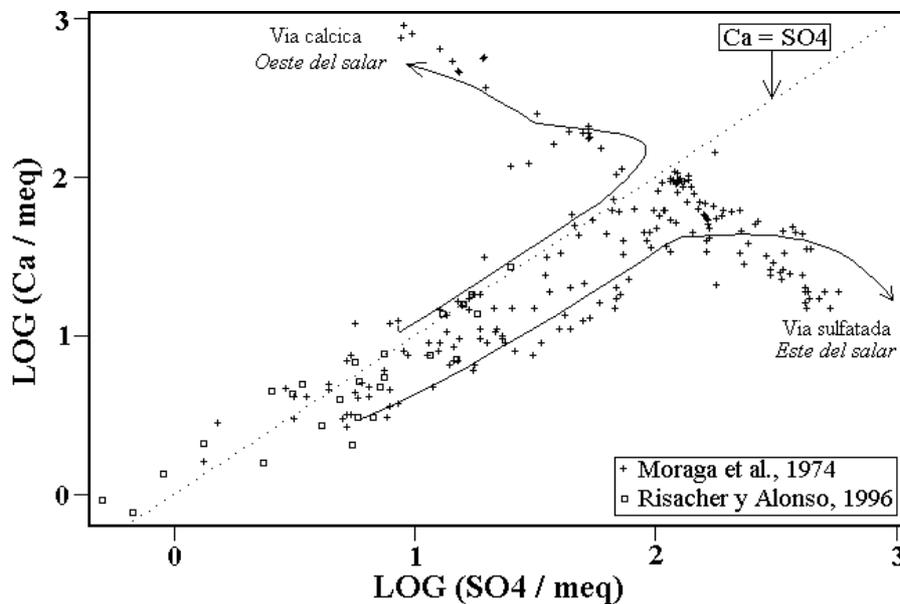


Fig.3 : Relación entre Ca y SO₄ en aguas y salmueras de Atacama.

Se observa que los puntos se reparten a lo largo de una T inclinada. El pie de la T corresponde a soluciones no saturadas en yeso en las cuales el calcio y el sulfato se concentran conjuntamente. Las aguas saturadas en yeso tienen su punto representativo en la barra transversal de la T. Se observa dos grupos de salmueras:

- unas que se concentran en Ca y se empobrecen en SO_4 ; siguen la vía cálcica y se encuentran en el sector occidental del núcleo.

- otras que se concentran en SO_4 y se empobrecen en Ca ; siguen la vía sulfatada y se encuentran en el sector oriental del núcleo.

Las aguas del salar de Atacama ilustran perfectamente las dos vías evolutivas producidas por la precipitación del yeso. Hemos representado en la figura 3 dos trayectos de evaporación típicos de las aguas de aporte del salar de Atacama. Uno corresponde al agua del río San Pedro, principal aporte superficial al salar, cuya evaporación produce una salmuera sulfatada similar a las que hay al este del núcleo. Casi todas las demás aguas diluidas del borde oriental siguen un trayecto similar. Se observa pues una buena concordancia entre la evolución teórica de las aguas de aporte y la composición de las salmueras sulfatadas de la parte oriental del núcleo. El otro trayecto de evaporación conduce a una salmuera cálcica y corresponde a una agua que drena terrenos sedimentarios al sur-este de la cuenca (muestra a-79 de Moraga et al., 1974).

Calidad de las aguas superficiales

Hay aguas de muy buena calidad en el norte de la cuenca y en el sector oriental alto. Globalmente, todas las aguas cuya salinidad es inferior a 1 g/l son aprovechables para cualquier uso. Los principales contaminantes son el arsénico y el boro. Las aguas del río Vilama al norte y de las quebradas al sur del salar, tienden a ser más salinas, lo que plantea problemas para su uso, particularmente potable, siendo la situación de San Pedro de Atacama muy delicada por el alto contenido en arsénico. En el pueblo de Peine, se utiliza principalmente para consumo doméstico agua de la cuenca colindante de Miscanti, traída por una cañería de unos 40 km de largo. Presentamos solamente datos sobre aportes superficiales, pero hay grandes reservas subterráneas explotadas en parte por empresas mineras. No tenemos todos los datos para estudiarlas detalladamente.

Balance hídrico.

Repetimos que sólo contamos con valores publicados, los que pueden discrepar de los obtenidos por las empresas mineras en sus estudios más acabados. Los aportes superficiales al salar de Atacama son parcialmente consumidos en riego. Los caudales iniciales, antes de llegar a las zonas de cultivos, han sido estimados por Grilli et al. (1986). Para determinar las cantidades usadas en riego se considera una tasa de riego comprendida entre 0,5 y 1 l/s/ha (INGE, 1991). El total de los caudales superficiales (V_{rios}) llega a $52 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ de los cuales $27 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ son utilizados para el riego (V_{riego}). El volumen de agua evaporada a través de la superficie del salar (V_e) ha sido estimado por Grilli et al. (1986) en $145 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$. El volumen de las precipitaciones (V_p) que caen directamente sobre la superficie del salar se obtiene multiplicando la altura promedia de precipitación (10 mm/año) por la superficie del salar (3000 km^2), lo que da $30 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$. Igualando los aportes y las pérdidas:

$$V_{\text{rios}} + V_{\text{sub}} + V_p = V_e + V_{\text{riego}}$$

se obtiene así un volumen de aportes subterráneos (V_{sub}) de $90 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$. Se observa que los aportes subterráneos son casi el doble de los aportes superficiales. En otra estimación del balance hídrico del salar de Atacama, Mardones (1986) da los siguientes parámetros: $V_{\text{rios}} = 48 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$, $V_{\text{riego}} = 19 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$, $V_p = 30 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$, $V_e = 170 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$, $V_{\text{sub}} = 148 \times 10^6$

m³/año. Con excepción del volumen de aguas subterráneas, hay una buena concordancia con los valores derivados de Grilli et al. (1986). Mardones (1986) estimó V_{sub} a partir de estudios hidrogeológicos, los que son cuantitativamente imprecisos por estar basados en un número reducido de pozos ubicados en formaciones geológicas muy variadas. Sin embargo, el error del balance así obtenido es solamente de 20%.

		CAUDALES (en l/s)		
		<i>Antes riego</i>	<i>Uso riego</i>	<i>Al salar</i>
ATA-4	Río San Pedro	27,2	13,2	14
ATA-14	Río Vilama	7,7	3,7	4
ATA-6	Río Honar	1,9	1,3	0,6
ATA-7	Río Aguas Blancas	4,4	---	4,4
ATA-8	Río Talabre	0,6	0,6	---
ATA-10	Río Camar	0,06	0,06	---
ATA-11	Río Socaire	6,8	6,8	---
ATA-12	Río Peine	0,5	0,5	---
ATA-13	Río Tilomonte	2,4	---	2,4
TOTAL		51,5	26	25,5

Tabla 2 : Caudales de los principales aportes al salar de Atacama

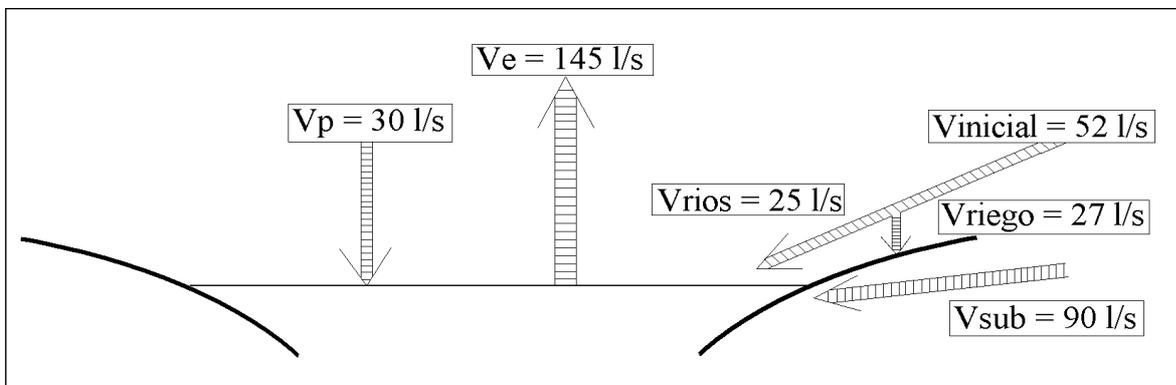


Fig. 4 : Balance hídrico del salar de Atacama. En gran parte según Grilli et al. (1986).

Este balance hídrico es muy impreciso, especialmente en lo referente a los aportes subterráneos. Por ejemplo, no se ha tomado en cuenta los aportes desde la sub-cuenca de Negrillar, al sur del salar, que entran por el sector de Tilopozo. Sin embargo, estos ordenes de magnitud muestran que el caudal entrante de 145 l/s en el salar de Atacama es muy bajo en relación a la superficie de la cuenca. En la vecina laguna Miscanti, entra un caudal de 600 l/s a partir de una cuenca de drenaje de 300 km². Las precipitaciones sobre los sectores norte y este de la cuenca, de donde provienen los aportes, llegan a unos 15 000 l/s (0,1 m/año sobre una superficie de 5000 km²). El coeficiente de escurrimiento (definido como la razón entre lo que cae sobre la cuenca y lo que entra en el

salar) es de 1%. Significa que el 99% de lo que cae sobre la cuenca no llega al salar ya que se evapora y se infiltra. Es probable que existan grandes volúmenes de agua en napas profundas y confinadas que fluyen hacia la cuenca de Atacama.

Conclusiones

Los aportes al salar de Atacama drenan esencialmente terrenos volcánicos. Sin embargo, una gran parte de Na, Ca, Cl y SO₄, sobre todo en aguas salobres, provienen de la redisolución de antiguas evaporitas por debajo de la formaciones volcánicas, sobre todo en aguas salobres. Las rocas volcánicas proveen K, Mg, Li, B y también algo de Ca, Na y SO₄. Casi todos los aportes siguen las vías sulfatadas, reflejando terrenos volcánicos con algo de azufre. Las salmueras del sector oriental del núcleo son todas sulfatadas (Na / Cl-SO₄) y corresponden bien a la vía evolutiva de los aportes. Al contrario, las salmueras del sector occidental son cálcicas (Na-Ca / Cl) y no provienen de la evaporación de los aportes muestreados. La composición cálcica refleja la litología en gran parte sedimentaria de la Cordillera de Domeyko. El balance hídrico del salar, aunque muy impreciso, muestra que entra en el salar solamente 1 % de lo que cae sobre la cuenca. Eso sugiere que puede existir grandes reservas de agua en napas más o menos profundas en la cuenca de drenaje.

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, 2, p. 113-122.

Bevacqua, P. 1992. Geomorfología del salar de Atacama y estratigrafía de su núcleo y delta, Segunda Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Antofagasta, 284p.

Dalannais, L. 1979. Hidrogeología del borde oriental del salar de Atacama. Tesis de Grado, Universidad del Norte, Departamento de Geología, Antofagasta, 157p.

Díaz del Río, G.; Bonilla, R.; Peralta, F. 1972. Geología de superficie, sub-superficie y geoquímica del salar de Atacama. Informe CORFO, Departamento de Recursos Hidráulicos, Santiago, 162p.

Dingman, R.J. 1967. Geology and ground-water resources of the northern part of the salar de Atacama, Antofagasta Province, Chile. U.S. Geol. Surv. Bulletin 1219, 49p.

Grilli, A.; Vidal, F.; Garín, C. 1986. Balance hidrológico nacional, II Región. Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología, Publicación interna S.D.E.H. 86/1, Santiago, 167p.

Ide, F. 1978. Cubicación del yacimiento salar de Atacama. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Minas, Santiago, 144p.

INGE (Ingeniero y Geotecnia Ltda) 1991. Informe final del estudio, análisis y planificación de los recursos de agua en la Segunda Región de Antofagasta. Informe técnico inédito, Intendencia II Región, 185p.

Mardones, L. 1986. Características geológicas e hidrogeológicas del salar de Atacama. *In: El litio, un nuevo recurso para Chile*, (G. Lagos, editor), Universidad de Chile, Dpto Ingeniería en Minas, Editorial Universitaria, Santiago, p. 181-216.

Moraga, A.; Chong, G.; Fortt, M.A.; Henriquez, H. 1974. Estudio geológico del salar de Atacama, Provincia de Antofagasta. Boletín del Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Chile, 29, 56p.

Risacher, F. y Alonso H. 1996. Geoquímica del Salar de Atacama, parte 2: evolución de aguas. *Revista Geologica de Chile*, 23, 2, p. 123-134.

Anexo 1 : Resumen de la publicación:

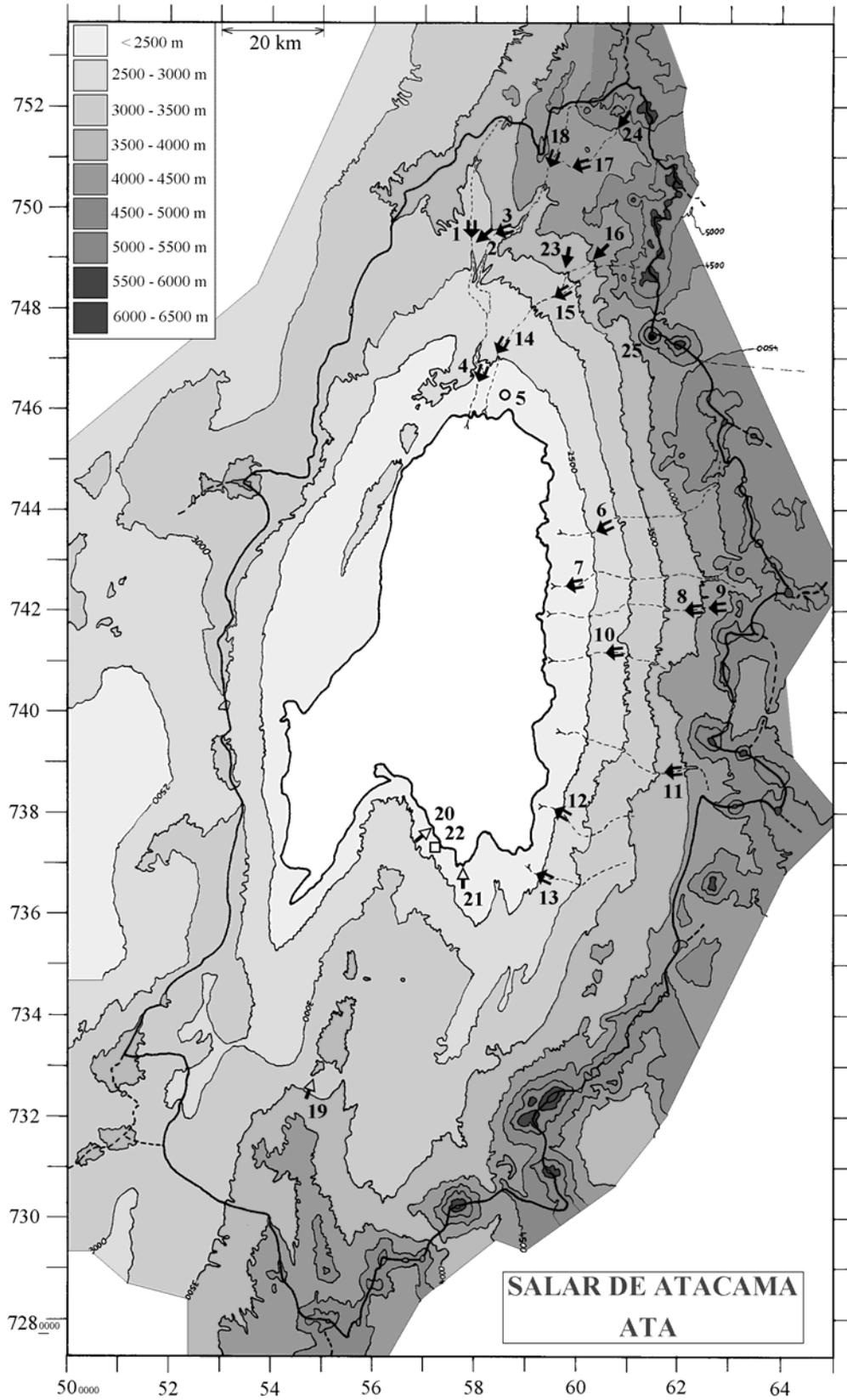
Alonso, H. y Risacher, F. 1996. Geoquímica del Salar de Atacama, parte 1: origen de los componentes y balance salino. *Revista Geologica de Chile*, 23, 2, p. 113-122.

El salar de Atacama en el norte de Chile es una costra de halita, o núcleo, de 1100 km² de superficie y de 900 m de profundidad rodeada por una zona marginal de limos salinos de unos 2000 km² de superficie. La costra de sal contiene una salmuera intersticial de cloruro de sodio rica en magnesio, potasio, litio y boro. El salar recibe la mayor parte de sus aportes desde las formaciones volcánicas de la Cordillera de los Andes, al este. Los componentes disueltos en las aguas de aporte tienen un doble origen. Na, Ca, Cl y SO₄ provienen de la redisolución de antiguas evaporitas que se encuentran por debajo de las formaciones volcánicas. Mg, K, Li y B proceden de la alteración de rocas volcánicas. El balance salino de la parte superior del núcleo del salar presenta un fuerte exceso de NaCl en relación a Mg, K, Li y B, lo que indica que el núcleo no puede provenir de aguas de composición semejante a la de los aportes actuales. El exceso de NaCl se debe muy probablemente a un contenido mucho más elevado en cloruro de sodio de los antiguos aportes proveniente de lixiviación de la Cordillera de la Sal, un cordón evaporítico terciario que bordea el salar por el oeste. La velocidad de sedimentación de la halita, estimada a partir de una datación en una muestra de ignimbrita interestratificada en el núcleo, corresponde exactamente a la velocidad de sedimentación actual de la halita (0,1 mm/año). Esto sugiere que la halita del núcleo se habría depositado a partir de aportes de sales similares a los actuales, discrepando con el balance salino que indica que los aportes antiguos eran mucho más concentrados en NaCl. Para resolver esta anomalía, se supone un funcionamiento intermitente del salar donde largos periodos secos han alternado con cortos periodos húmedos durante los cuales se depositaban grandes cantidades de sales. La ausencia de niveles lacustres y la gran pureza de la sal sugieren que el núcleo no proviene de la sequía de un antiguo lago salado, sino de aportes salinos subterráneos.

Anexo 2 : Resumen de la publicación:

Risacher, F. y Alonso H. 1996. Geoquímica del Salar de Atacama, parte 2: evolución de aguas. Revista Geologica de Chile, 23, 2, p. 123-134.

Las aguas de aporte que alimentan a un salar se evaporan y depositan sus sales disueltas según el orden de sus solubilidades crecientes. El primer mineral que precipita es la calcita, lo que determina dos vías evolutivas: si hay más carbonato que calcio en el agua inicial, la solución sigue la vía alcalina donde aumenta la concentración del carbonato y disminuye la del calcio. En cambio, si hay más calcio que carbonato, la solución sigue la vía salina neutra, enriqueciéndose en calcio y empobreciéndose en carbonato. En el salar de Atacama, las aguas de aporte más diluidas, que drenan terrenos volcánicos, siguen al comienzo la vía alcalina hasta que la precipitación de silicatos de magnesio, al liberar iones H^+ que neutralizan parte del carbonato, cambia la vía alcalina por la vía neutra, donde aumenta el calcio y disminuye el carbonato. Las aguas de aporte más concentradas, que deben su elevada salinidad a la redisolución de antiguas evaporitas, evolucionan desde el principio hacia la vía salina neutra. La total ausencia de salmueras básicas se debe a dos factores: redisolución del yeso de antiguas formaciones evaporíticas, lo que aporta un exceso de calcio en las aguas, y oxidación del azufre de las rocas volcánicas, lo que acidifica las aguas más diluidas. La precipitación del yeso determina a su vez dos vías evolutivas: una donde el calcio aumenta y el sulfato disminuye, lo cual conduce a salmueras cálcicas y la otra que sigue la evolución opuesta y que lleva a salmueras sulfatadas. Ambos tipos de salmuera se encuentran en el núcleo del salar. Las salmueras cálcicas se encuentran al oeste del núcleo y están relacionadas con las rocas sedimentarias de la Cordillera de Domeyko del oeste de la cuenca. Las salmueras sulfatadas, al este del núcleo, están relacionadas con las rocas volcánicas de la Cordillera de los Andes, al oriente de la cuenca. La buena correspondencia entre el quimismo de las salmueras intersticiales y la litología de la cuenca de drenaje sugiere que estas salmueras no son soluciones residuales producto del desecamiento de un antiguo lago salado, sino que se formaron por evaporación a través de la costra de sal.



SALAR DE ATACAMA (APORTES)**ATA**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
ATA-1	31/05/93	15 ^H 30	579250	7493750	3100	Río Salado
ATA-2	31/05/93	15 ^H 45	579350	7493700	3105	Manantial corriente
ATA-3	31/05/93	17 ^H 00	587250	7495550	3300	Río Grande
ATA-4	01/06/93	09 ^H 40	581250	7468300	2480	Río San Pedro
ATA-5	01/06/93	11 ^H 00	585700	7464575	2430	Napa (pozo#3)
ATA-6	01/06/93	12 ^H 00	604250	7436500	2600	Río Honar
ATA-7	01/06/93	14 ^H 30	597375	7424950	2350	Río Aguas Blancas
ATA-8	01/06/93	15 ^H 45	624000	7420450	3900	Río Talabre (abajo)
ATA-9	01/06/93	16 ^H 00	624425	7420475	3950	Río Talabre (arriba)
ATA-10	02/06/93	10 ^H 45	606700	7411625	2720	Río Camar
ATA-11	02/06/93	12 ^H 30	617250	7387850	3600	Río Socaire
ATA-12	02/06/93	16 ^H 40	595625	7381250	2380	Río Peine
ATA-13	02/06/93	17 ^H 30	592125	7368025	2420	Río Tilomonte
ATA-14	03/06/93	09 ^H 45	584100	7471000	2580	Río Vilama
ATA-15	03/06/93	10 ^H 35	596000	7482125	3200	Río Puripica
ATA-16	03/06/93	12 ^H 30	603625	7490500	4100	Manantial termal corriente Puritama
ATA-17	03/06/93	13 ^H 00	598500	7508125	4280	Río Putana
ATA-18	03/06/93	13 ^H 15	595875	7511000	4200	Río Jauna
ATA-19	28/05/94	18 ^H 10	548045	7327315	3250	Manantial difuso
ATA-20	29/05/94	12 ^H 20	570875	7378825	2290	Manantial difuso
ATA-21	29/05/94	13 ^H 30	577675	7370125	2310	Vegas de Tilopozo
ATA-22	29/05/94	15 ^H 20	573250	7374250	2300	Napa (dren)
ATA-23	13/07/94	12 ^H 30	597284	7487932	3550	Manantial corriente
ATA-24	13/07/94	15 ^H 30	607580	7515849	4560	Manantial corriente
ATA-25	26/02/96	15 ^H 30	614988	7474584	5845	Laguna Licancabur (= LIC-1)

SALAR DE ATACAMA (APORTES)

ATA

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
ATA-1	na	11	1,001	8,29	2,28	419	0,038	0,0047	163	0,008	0,530	27,0	0,0120	258	3,79	0,038	99,0	7,14
ATA-2	na	18	1,000	8,18	0,98	82,4	0,023	0,0046	43,2	1,50	0,454	32,8	0,0090	57,5	1,60	0,031	26,9	2,21
ATA-3	1452	4	1,001	8,76	2,82	252	0,132	0,0168	197	0,038	1,55	33,0	0,120	191	13,4	0,160	53,7	30,4
ATA-4	2680	2	1,001	8,00	3,18	604	0,107	0,0181	282	0,055	1,65	32,5	0,120	396	14,7	0,347	102	29,4
ATA-5	3760	25	1,001	7,39	4,24	959	1,43	0,303	271	1,30	19,5	46,8	0,622	520	50,0	4,44	136	60,0
ATA-6	375	18	1,000	7,77	1,48	53,3	0,081	0,0114	24,0	0,053	1,10	34,2	0,0210	40,9	4,89	0,118	18,2	7,05
ATA-7	1921	12	1,001	8,54	6,28	302	0,431	0,0374	234	0,014	20,1	38,4	3,00	271	30,0	1,49	79,8	31,3
ATA-8	1040	10	1,000	8,40	6,04	72,1	0,399	0,449	150	2,50	2,78	37,2	0,0419	81,0	14,8	0,222	85,8	35,2
ATA-9	595	13	1,000	6,80	3,36	44,4	0,081	0,0242	63,4	1,32	1,50	34,4	0,0240	48,3	7,59	0,153	41,7	19,4
ATA-10	2570	21	1,001	7,08	9,06	231	0,302	0,0467	710	0,670	5,50	40,0	0,322	260	21,0	0,666	140	130
ATA-11	1130	10,5	1,000	8,72	3,40	88,8	0,127	0,0306	279	0,942	2,12	29,7	0,202	101	11,8	0,250	61,0	47,4
ATA-12	4160	24	1,002	7,54	2,40	888	0,879	0,0978	768	4,66	10,0	31,9	0,0742	469	29,0	0,541	315	80,2
ATA-13	5890	11	1,002	8,42	3,32	1530	0,911	0,0319	629	0,074	10,1	30,0	0,0824	764	64,9	1,09	275	130
ATA-14	2850	15	1,001	7,85	4,58	547	0,799	0,0994	356	0,038	11,7	44,5	0,562	361	37,5	2,52	108	58,3
ATA-15	2340	0	1,001	8,74	5,44	533	0,815	0,0740	123	0,059	12,0	22,0	0,300	299	38,0	2,48	89,0	55,2
ATA-16	2630	35	1,001	7,13	3,60	533	0,815	0,141	343	0,800	11,6	47,6	0,622	352	37,0	2,58	94,6	53,5
ATA-17	1096	0,5	1,000	8,40	1,98	124	0,170	0,0283	265	0,149	2,15	31,6	0,157	112	26,2	0,423	40,9	42,5
ATA-18	498	13	1,000	6,54	2,10	17,0	0,033	0,0093	113	0,806	0,432	32,5	0,0562	32,4	7,00	0,125	31,5	20,0
ATA-19	na	7	1,002	7,43	3,89	373	0,593	0,132	826	0,124	3,74	16,2	0,0064	292	8,72	0,153	361	21,0
ATA-20	na	14	1,015	7,28	2,05	10800	3,17	0,983	1200	2,04	33,9	25,4	0,449	5410	919	71,5	537	396
ATA-21	na	25	1,002	6,97	7,07	898	0,863	0,166	360	4,35	9,57	48,2	0,382	545	86,0	4,96	153	82,9
ATA-22	na	15	1,003	7,61	5,96	1880	1,10	0,270	552	1,82	13,4	44,2	0,472	1070	196	13,3	151	128
ATA-23	1790	21,4	1,000	7,48	2,25	275	0,333	0,0629	323	0,248	5,34	40,6	0,392	207	21,4	1,09	61,4	47,6
ATA-24	259	12,7	1,000	7,85	1,76	1,46	0,007	nd	32,5	0,744	0,097	26,8	0,0260	13,3	2,58	0,090	15,5	12,8
ATA-25	1965	6,4	1,002	7,81	1,35	155	0,332	0,0345	871	0,205	6,09	4,14	0,0286	124	35,7	0,023	274	52,5

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

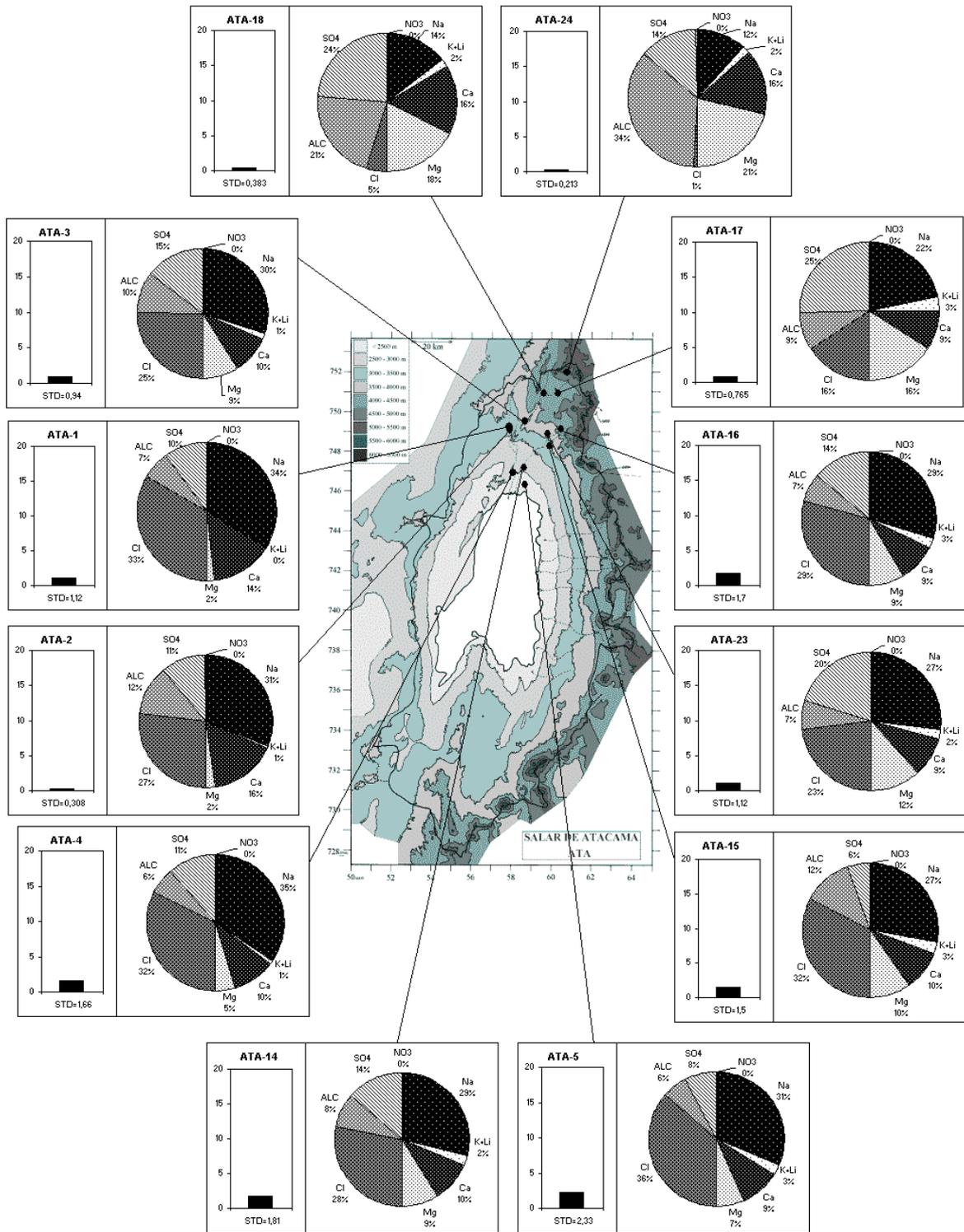
SALAR DE ATACAMA (APORTES)
ATA

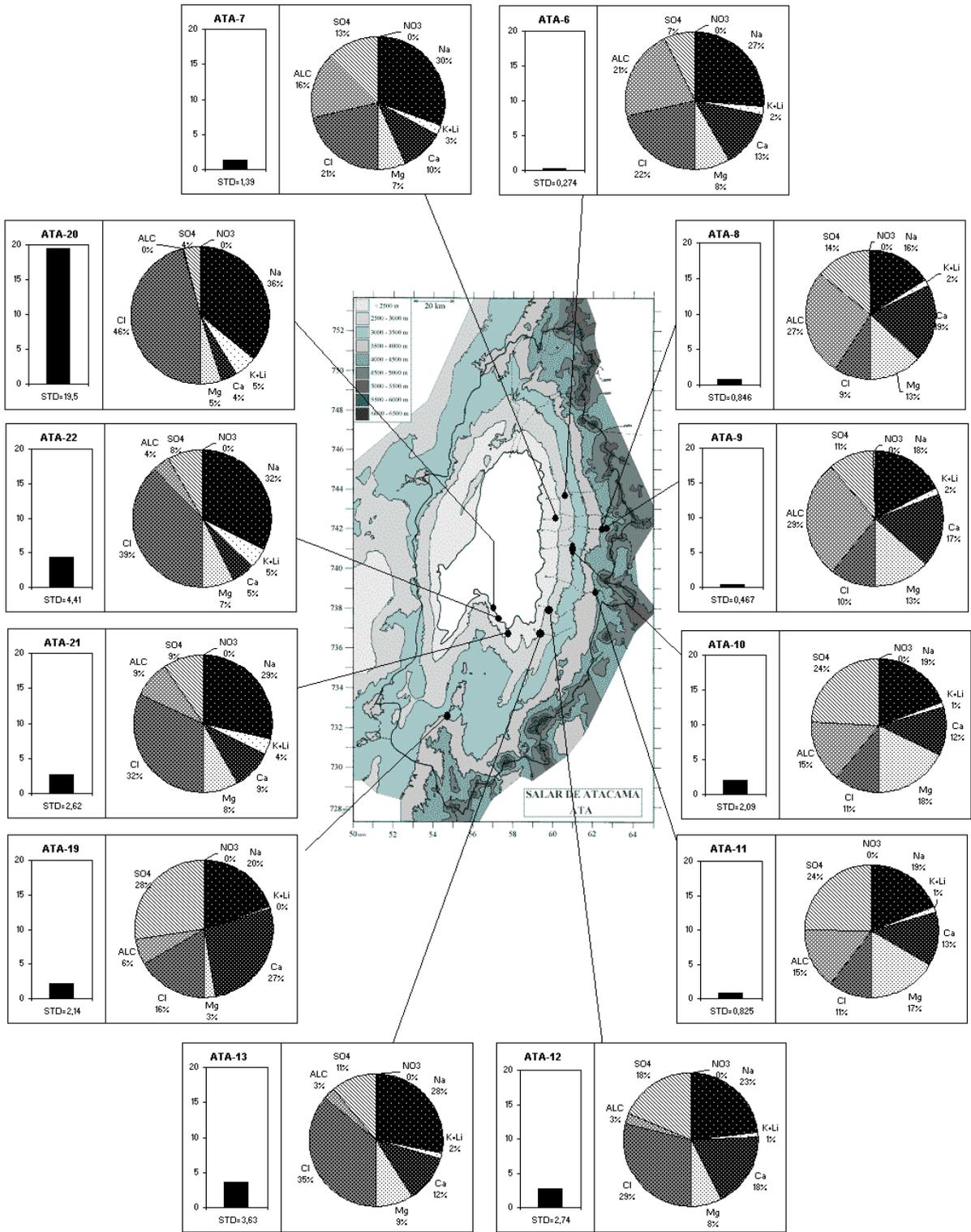
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%	NUMERO	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
ATA-1	1115	132	2,52	1,2	16,83	17,48	3,8	ATA-23	-7.99	-64.0
ATA-2	307,9	57,0	0,60	0,62	4,067	4,224	3,8	ATA-24	-9.06	-65.7
ATA-3	940,2	155	6,36	0,57	13,87	14,02	1,1	ATA-25	9.45	25.2
ATA-4	1655	190	1,50	4,0	25,15	26,06	3,6			
ATA-5	2326	254	1,26	14	36,24	36,90	1,8			
ATA-6	273,9	89,1	0,36	2,5	3,412	3,481	2,0			
ATA-7	1388	338	11,9	1,6	19,34	19,66	1,6			
ATA-8	846,0	346	9,12	2,5	11,11	11,23	1,1			
ATA-9	467,1	205	0,12	57	5,996	5,951	0,8			
ATA-10	2092	550	1,38	62	29,63	30,37	2,5			
ATA-11	825,4	183	9,36	0,62	11,69	11,74	0,4			
ATA-12	2742	142	1,38	5,3	43,52	43,48	0,1			
ATA-13	3630	175	8,64	1,1	59,42	59,42	0,01			
ATA-14	1806	270	2,58	5,7	27,22	27,40	0,7			
ATA-15	1497	292	13,1	1,2	23,31	23,00	1,3			
ATA-16	1695	217	0,66	20	25,74	25,75	0,06			
ATA-17	764,6	115	1,86	1,1	11,13	11,00	1,2			
ATA-18	383,3	128	0,06	66	4,827	4,953	2,6			
ATA-19	2138	235	0,96	16	32,68	31,59	3,4			
ATA-20	19509	120	0,72	7,9	328,2	331,1	0,9			
ATA-21	2624	429	0,90	57	41,08	39,94	2,8			
ATA-22	4413	356	2,46	13	71,57	70,39	1,7			
ATA-23	1120	135	0,54	6,6	16,67	16,73	0,4			
ATA-24	212,9	106	0,48	2,7	2,480	2,491	0,4			
ATA-25	1604	79,9	0,72	2,3	24,28	23,86	1,7			

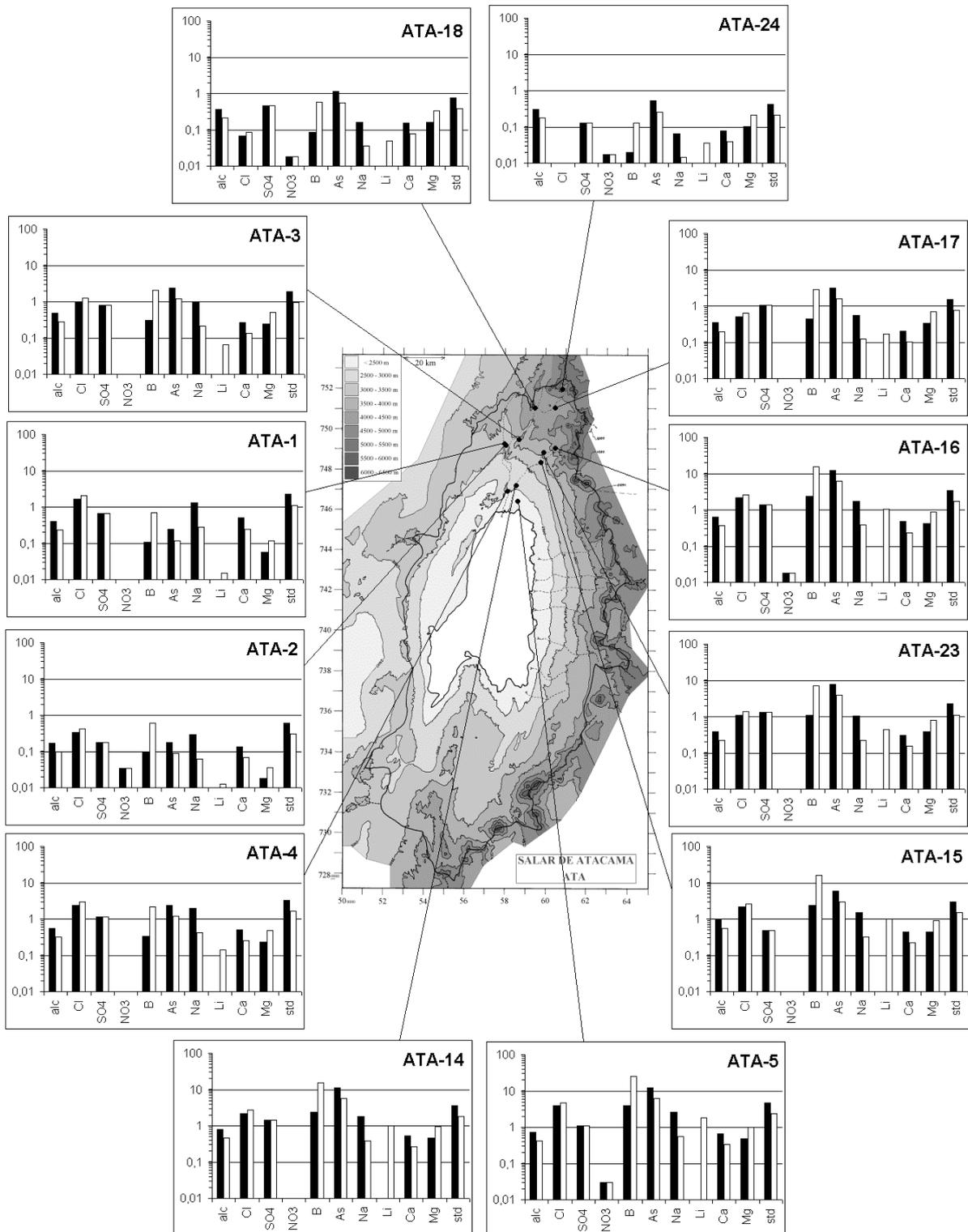
Análisis de oxígeno-18
y deuterio

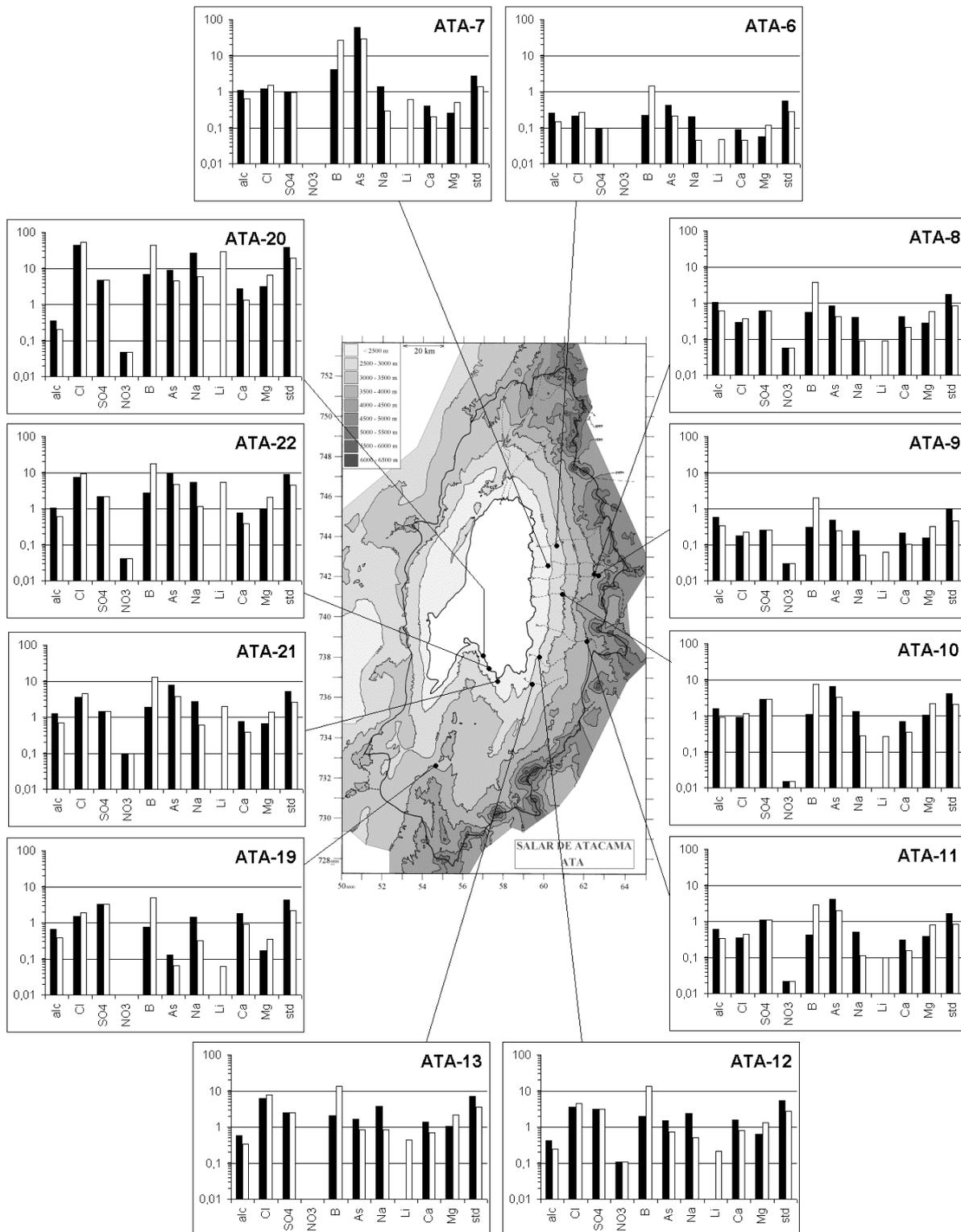
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %





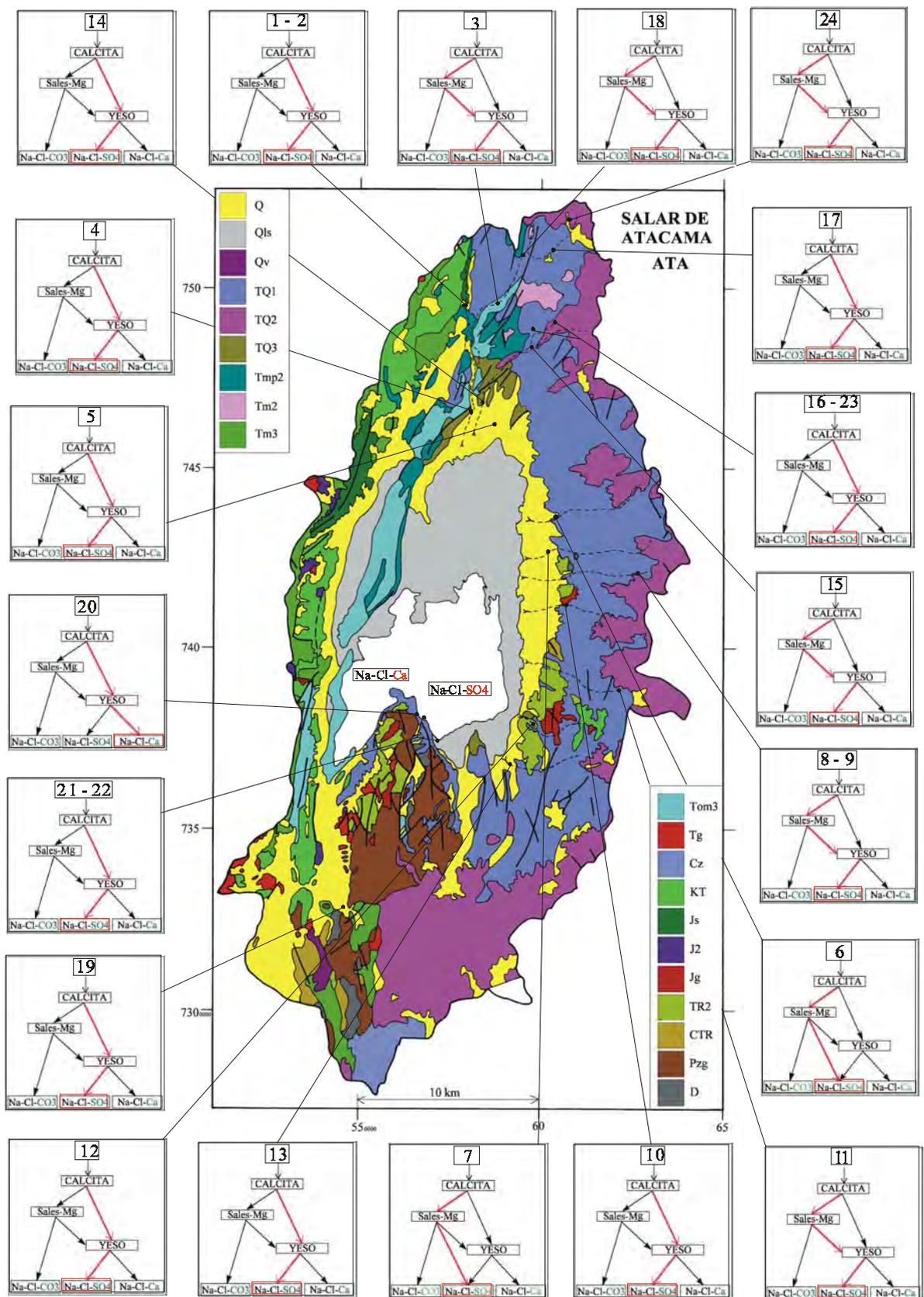




MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

ATA

- Q** : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.
- Qls** : *Cuaternario*. Zona marginal del salar de Atacama. Limos salinos de carbonato y sulfato de calcio.
- Qv** : *Cuaternario*. Coladas y depósitos piroclásticos riolíticos, dacíticos, andesíticos y basálticos y flujos laháricos asociados a volcanes bien conservados.
- TQ1** : *Plioceno - Pleistoceno*. Ignimbritas dacíticas, tobas e intercalaciones de sedimentitas clásticas continentales.
- TQ2** : *Plioceno - Pleistoceno*. Coladas, tobas y brechas andesíticas y basálticas con intercalaciones de sedimentitas detríticas.
- TQ3** : *Plioceno - Pleistoceno*. Calizas, areniscas y lutitas calcáreas, cherts y limos con fauna de agua dulce y salobre.
- Tmp2** : *Mioceno - Plioceno*. Ignimbritas riolíticas y riodacíticas con intercalaciones sedimentarias.
- Tm2** : *Mioceno*. Tobas riolíticas y dacíticas, coladas andesíticas y dacíticas.
- Tm3** : *Mioceno*. Gravas de Atacama. Gravas, arenas y limos subordinados, localmente con litificación incipiente e intercalaciones de ignimbritas.
- Tom3** : *Oligoceno - Mioceno*. Fm. San Pedro. Conglomerados, brechas, areniscas, lutitas y limolitas de facies continentales con yeso y capas de sal, al oeste del Salar de Atacama.
- Tg** : *Terciario*. Rocas plutónicas e hipabisales.
- Cz** : *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.
- KT** : *Cretácico sup. - Terciario inf.* Coladas y brechas andesíticas y riolíticas, tobas e ignimbritas dacíticas y riolíticas, con intercalaciones de lutitas, calizas, areniscas y conglomerados continentales.
- Js** : *Jurásico sup.* Conglomerados, areniscas, lutitas, calizas, coladas y brechas andesíticas, continentales.
- J2** : *Jurásico*. Fm. La Negra. Coladas y tobas andesíticas y, en forma subordinada, coladas riolíticas, dacíticas y traquíticas, tobas dacíticas e intercalaciones sedimentarias, algunas con fósiles marinos.
- Jg** : *Jurásico*. Rocas plutónicas e hipabisales.
- TR2** : *Triásico medio - Triásico sup.* Rocas sedimentarias y/o volcánicas. Areniscas, conglomerados y lutitas, localmente con flora fósil. Coladas y brechas riolíticas y andesíticas.
- CTR** : *Carbonífero - Triásico (?)*. Tobas, brechas, coladas e ignimbritas principalmente riolíticas y dacíticas, con intercalaciones de sedimentitas clásticas. Cuerpos hipabisales dacíticos y riolíticos asociados.
- Pzg** : *Paleozoico*. Rocas plutónicas e hipabisales.
- D** : *Devónico*. Cuarzitas, filitas, pizarras, esquistos, lutitas y conglomerados. Facies marinos y transicionales.



SALAR DE TARA

Introducción

El salar de Tara se encuentra en el Altiplano de la II Región cerca del punto fronterizo tripartito entre Chile, Bolivia y Argentina (Cerro Zapaleri). Es un salar de tipo playa con un sistema lagunar de extensión muy variable. Su cuenca se extiende por esos tres países, a igual que el río Zapaleri, su principal alimentación superficial. Este río nace en Bolivia, pasa luego a Argentina y posteriormente a Chile, donde después de escurrir unos 20 km desemboca al lado este de la laguna de Tara. Su caudal en la parte chilena es de 400 l/s y se proyecta su captación para uso potable, siendo la última reserva aprovechable para ese uso en la Segunda Región. Aunque el río ha sido analizado y hay varios informes inéditos, la hidroquímica del salar ha sido poco estudiada. Las características morfométricas y climatológicas del salar son:

- altura: 4400 m
- superficie de la cuenca: 2035 km²
- superficie del salar: 48 km²
- superficie de la laguna 3 -25 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 0°C

Aportes de agua

Se considera generalmente que el río Zapaleri es el único aporte relevante al salar de Tara y su caudal es excepcional en el ámbito árido de los Andes del norte chileno. Sin embargo, existen otros aportes que no son despreciables, en particular a lo largo de la orilla noroeste del salar.

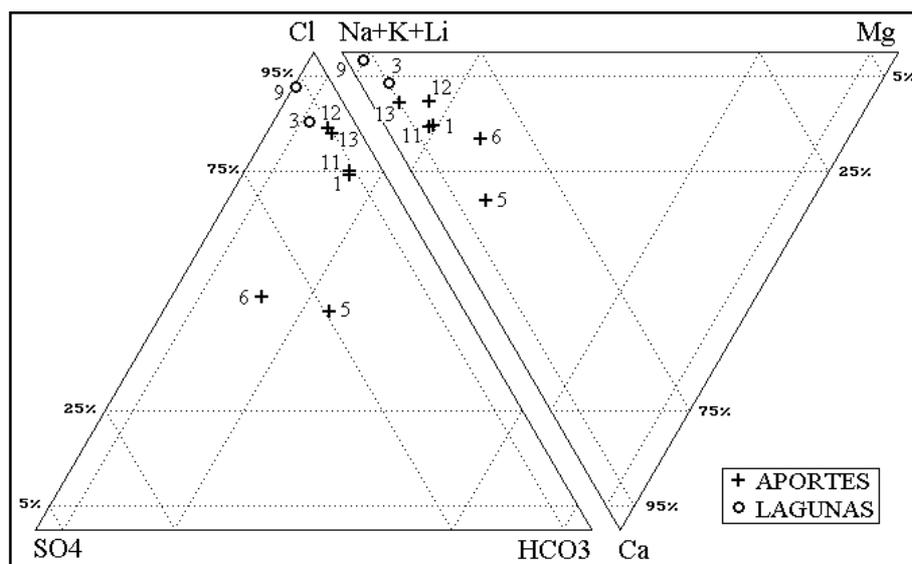


Fig.1 : Composición de las aguas de aporte y lagunas del salar de Tara.

Se distingue en los diagramas triangulares de la figura 1 dos grupos de aguas de aporte :

- las aguas 5 (río Zapaleri) y 6 (vertiente difusa), al oeste de la cuenca, son de tipo Na-(Ca) / Cl-SO₄-(HCO₃).

- las aguas de aporte de la orilla nor-oeste (1, 11, 12, 13) son todas de tipo Na / Cl. Cabe observar que, en los dos grupos de aguas, las salinidades varían bastante pero que las concentraciones porcentuales son casi constantes.

En la figura 2 se puede observar que todas las aguas de Tara se alinean muy cerca de la recta de equimolaridad Na = Cl, lo que indica una contribución de cloruro de sodio en las aguas de aporte, especialmente en las aguas de la orilla noroeste (1, 11, 12, 13).

El agua del río Zapaleri, con una salinidad de 287 mg/l STD, es demasiado diluida para provenir de redisolución de antiguas evaporitas. Su salinidad y su composición química la designan más bien como un agua de alteración de rocas volcánicas. El agua de la vertiente difusa 6, al sureste del salar, es 3,5 veces más salada que el agua del río Zapaleri, pero su composición es muy parecida. La única diferencia, que se puede observar claramente en los diagramas circulares, es una reducción de la concentración porcentual en HCO₃ (alc) y Ca de exactamente 7% entre el agua del río Zapaleri y el agua de la vertiente difusa. Eso sugiere fuertemente que el agua de la vertiente difusa es la misma que la del río Zapaleri, concentrada por evaporación con precipitación de carbonato de calcio (calcita). La vertiente difusa 6 proviene de la descarga de una napa 10 km más al sur del río Zapaleri. Eso invita a pensar en la existencia de napas de composición similar a la del río en gran parte del sector oriental de la cuenca.

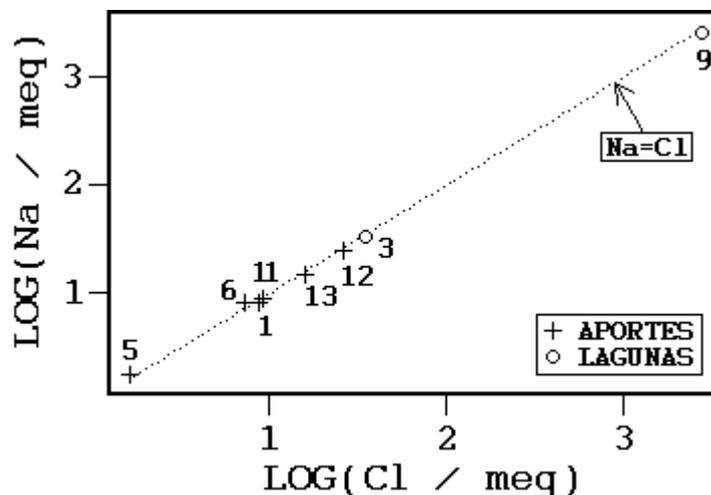


Fig. 2 : Relación entre Na y Cl en las aguas del salar de Tara

Por otra parte, no se observa correlación clara entre Ca y SO₄, lo que excluye una contribución de yeso antiguo en la composición de las aguas de aporte.

Química de las lagunas

Se ha extraído dos muestras de agua de laguna a cada extremo del salar: al norte (3) y al sur (9). La laguna norte es salobre (2,5 g/l STD) y la laguna sur es una salmuera (176 g/l STD). Las dos son de tipo Na / Cl con concentraciones menores en todos los demás componentes. Dentro de ellos, SO₄ es superior a Ca.

Vías evolutivas y relación con la geología de la cuenca

Todas las aguas de aporte evolucionan por evaporación hacia vías sulfatadas. Pero se puede distinguir las aguas de la parte oriental de la cuenca (río Zapaleri) que evolucionan hacia la vía *neutra* sulfatada y las aguas del sector noroeste que evolucionan hacia la vía *alcalina* sulfatada. La relación con la geología de la cuenca es algo ambigua. El agua del río Zapaleri no discrepa con la litología compleja de la parte oriental de la cuenca donde predominan rocas volcánicas con algunos niveles sedimentarios (Tom3, Fm. San Pedro y SO, sedimentos del Silúrico - Ordovícico). No hay que olvidar, sin embargo, que nos faltan informaciones sobre los sectores bolivianos y argentinos. Las vías evolutivas alcalinas sulfatadas reflejan una litología volcánica sin mayor influencia sedimentaria. Observamos que TAR-13 sigue una vía intermedia entre la alcalina sulfatada y la carbonatada, lo que corresponde más a aguas de alteración de terrenos exclusivamente volcánicos con muy poco azufre. Pero hemos visto que estas aguas han rediseñado cloruro de sodio de antiguas evaporitas. La Formación San Pedro, que aflora del otro lado de la cuenca, contiene niveles de halita en el sector del salar de Atacama. No aparece indicio de cloruro de sodio en el agua del río Zapaleri que drena esta formación, posiblemente porque ha sido ya lixiviado en superficie. Esta misma formación debe existir al oeste de la cuenca, recubierta por lavas e ignimbritas. Su lixiviación actual provee NaCl en las aguas de alteración de rocas volcánicas, lo que no modifica sus vías evolutivas, pero si aumenta considerablemente su salinidad.

Evolución cuantitativa de aguas

La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las dos lagunas TAR-3 y 9. Hemos recalculado la composición de TAR-3 al equilibrio después de precipitar la calcita. Los valores de la columna "desviación" son los coeficientes del chi-cuadrado adaptado que miden el grado de semejanza entre las soluciones de aporte evaporadas (TAR-xxE) y las soluciones reales. Las aguas de aporte evaporadas que más se asemejan a las dos lagunas son las de la orilla noroeste (1, 11, 12, 13). El exceso de NaCl en estas aguas de aporte se refleja perfectamente en las elevadas concentraciones en Na y Cl de las lagunas. El agua del río Zapaleri no parece tener mucha influencia en la composición de las dos lagunas estudiadas a pesar de constituir el principal aporte al salar. Hay dos explicaciones posibles :

- las aguas de aportes cargadas en NaCl pueden dominar en una mezcla con aguas mucho más diluidas aunque estas sean más abundantes. El río Zapaleri es 4 veces más diluido que los aportes del noroeste. En la mezcla, el agua H₂O proviene sobre todo del río Zapaleri mientras que los componentes disueltos provienen en su mayoría de las vertientes salobres del noroeste. Sin embargo, no se ha podido mejorar la similitud entre las aguas de lagunas y varias mezclas evaporadas de los dos tipos de aporte.

- las dos lagunas muestreadas no son alimentadas por el río Zapaleri. El sistema lagunar es más complejo que parece. Aquí sería preciso un estudio adicional sobre las lagunas.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
TAR-3.EQ	8,52	1,72	1210	154	9,95	24,1	774	35,8	5,26	30,3	25,5	
TAR-11E	8,64	2,62	1190	132	21,6	33,7	748	27,2	6,69	21,1	44,0	0,122
TAR-1E	8,69	2,86	1180	135	20,5	33,8	749	26,7	6,22	17,4	47,1	0,137
TAR-13E	8,55	2,23	1190	98,9	34,3	33,5	742	33,8	6,97	31,9	24,5	0,160
TAR-5E	8,50	1,78	831	597	13,1	33,5	607	107	5,79	47,5	64,7	0,373
TAR-12E	8,53	1,88	1290	108	13,9	3,83	763	23,7	2,01	36,0	55,9	0,389
TAR-6E	8,49	1,78	729	706	17,3	17,1	543	139	4,00	51,6	81,4	0,526
TAR-9	7,99	16,6	98000	9790	373	30,0	60700	3110	404	1020	1050	
TAR-1E	7,44	4,90	94700	10800	996	16,1	59700	2150	501	380	2000	0,261
TAR-11E	7,38	4,70	94900	10600	1060	16,0	59300	2170	535	392	2140	0,276
TAR-12E	7,51	5,82	98500	8260	835	14,0	58200	1810	154	742	3860	0,364
TAR-13E	6,99	3,23	95800	7990	1490	14,3	58700	2730	563	287	1870	0,369
TAR-5E	7,65	8,42	73800	34700	969	17,9	45800	9510	514	671	5700	0,561
TAR-6E	7,43	7,53	66800	41400	1250	17,1	39900	12700	367	566	7430	0,738

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las soluciones de las lagunas del salar de Tara.

Calidad de agua

El agua del río Zapaleri es la de mejor calidad, pero tiene un leve exceso en arsénico. En el sector nor-occidental, las aguas (1) y (11) están al límite de potabilidad para los componentes mayores, pero tienen 10 veces más arsénico que el límite permisible. El contenido de boro no las hace recomendable para un uso agrícola.

Balance hídrico

La incógnita sobre el origen de las lagunas estudiadas impide estimar sus infiltraciones. Solamente se puede obtener una idea del volumen de los aportes despreciando el término C_{ap}/C_L casi siempre muy pequeño :

$$V_{ap} = S(H_c - H_p) / (1 - C_{ap}/C_L) \sim S(H_c - H_p) \sim 600 \text{ l/s}$$

con : $S = 14 \text{ km}^2$; $H_c = 1,5 \text{ m/año}$; $H_p = 0,15 \text{ m/año}$.

Tomando un caudal promedio del río Zapaleri de 400 l/s, quedaría un caudal residual del orden de 200 l/s para los aportes desde el noroeste de la cuenca.

Conclusiones

El salar de Tara recibe dos tipos de aportes :

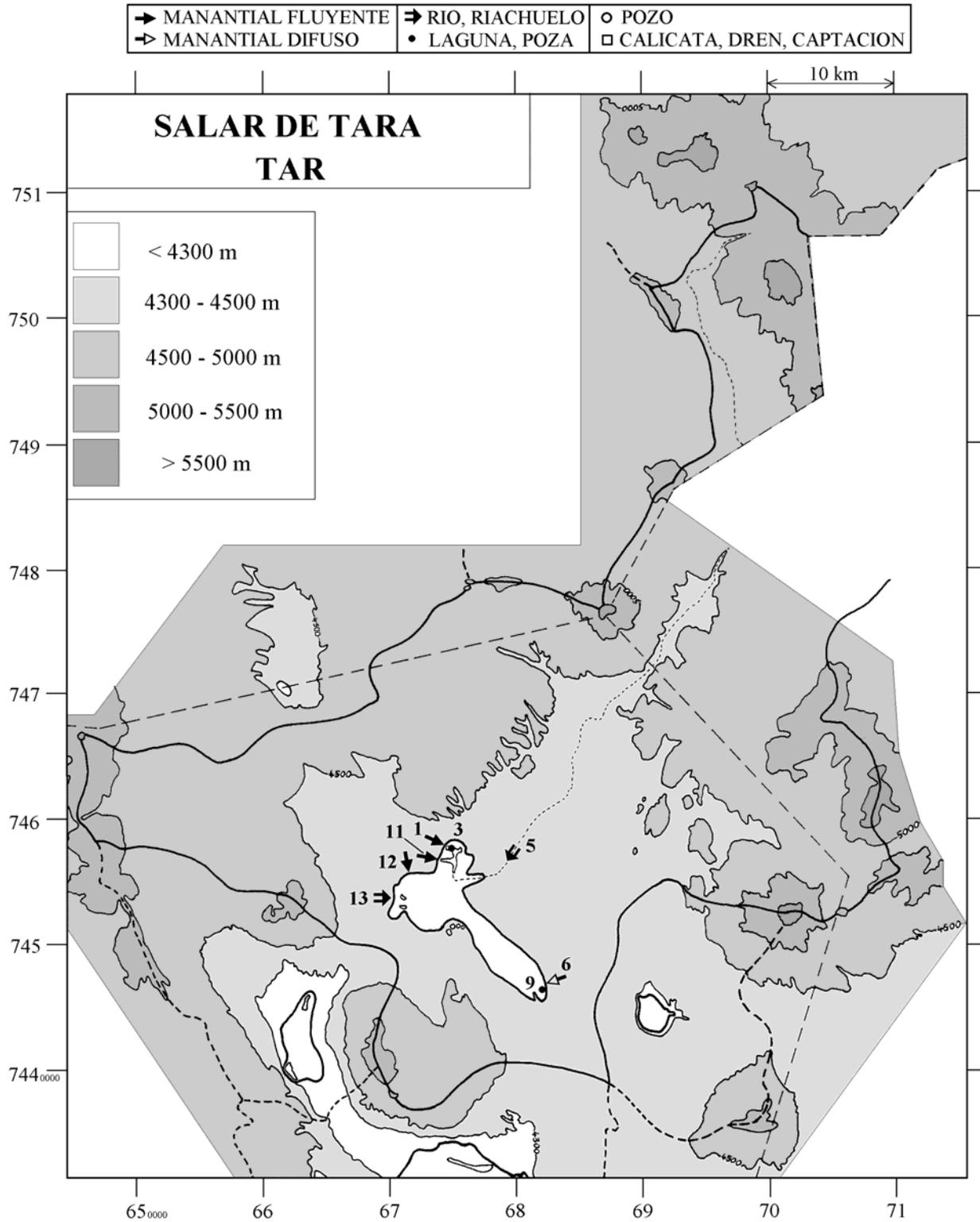
- el río Zapaleri de buen caudal (400 l/s) y de agua muy diluida (287 mg /l STD) de tipo Na-(Ca) / Cl-SO₄-(HCO₃). Los componentes disueltos provienen de la alteración de rocas, en su mayor parte volcánicas, de la cuenca de drenaje.

- vertientes más concentradas (promedio de 1200 mg/l STD) de tipo Na / Cl. El alto contenido en cloruro de sodio provienen de la redisolución de antiguas evaporitas por debajo de las formaciones volcánicas, probablemente la Formación San Pedro.

En lo que se refiere a los caudales entrantes, el río Zapaleri, al este de la cuenca, es el aporte de agua (H₂O) mas importante. Pero, en lo que concierne los componentes disueltos, son los aportes del sector noroeste de la cuenca, cargados en NaCl, que parecen ser los principales proveedores. Es probable que existen napas de composición parecidas a la del río Zapaleri al este del salar.

Referencias y estudios anteriores

Alonso, H. y Vargas, L. 1988. Hidroquímica de lagunas del Altiplano, Segunda Región. V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 Agosto de 1988, Actas, tomo II, D35-D43.



**SALAR DE TARA
TAR**

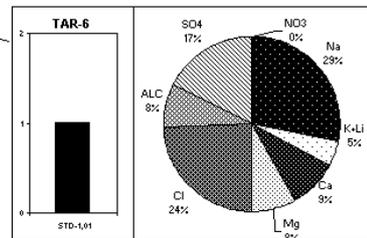
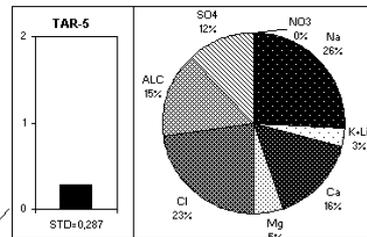
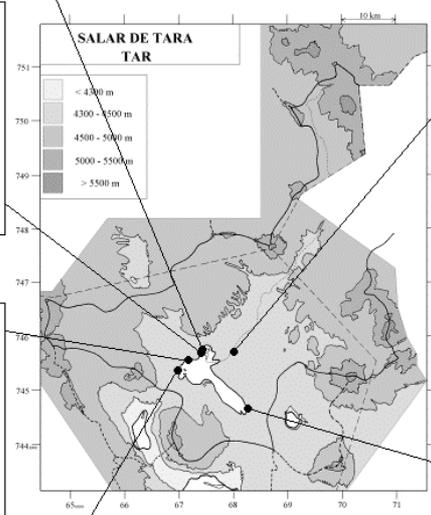
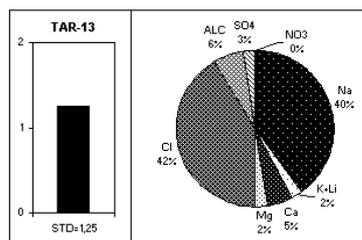
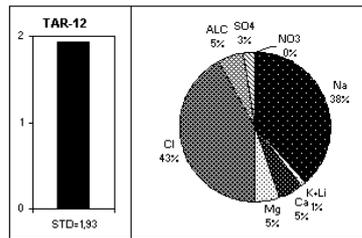
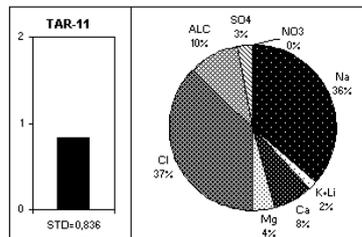
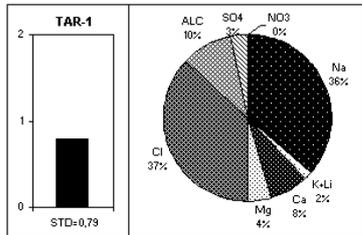
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
TAR-1	09/10/93	10 ^H 00	674325	7452500	4390	Manantial corriente
TAR-3	09/10/93	10 ^H 30	674725	7451900	4390	Laguna
TAR-5	09/10/93	11 ^H 15	679375	7451450	4395	Río Zapaleri
TAR-6	09/10/93	12 ^H 15	682175	7447825	4390	Manantial difuso
TAR-9	09/10/93	12 ^H 40	681825	7447450	4390	Laguna
TAR-11	08/12/94	10 ^H 30	673750	7457000	4390	Manantial corriente
TAR-12	08/12/94	11 ^H 15	671500	7455675	4390	Manantial corriente
TAR-13	08/12/94		670125	7453825	4395	Río Chico

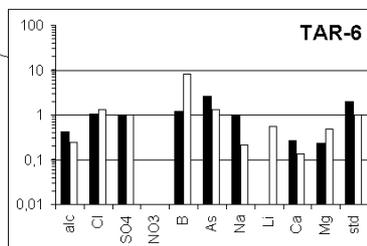
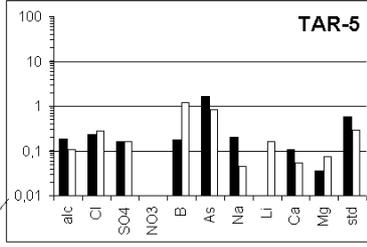
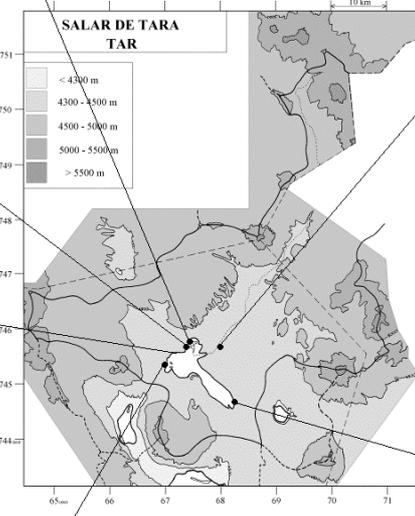
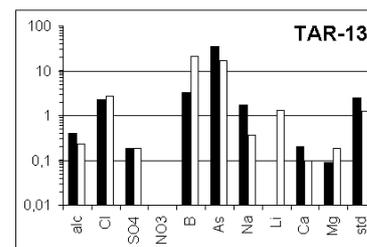
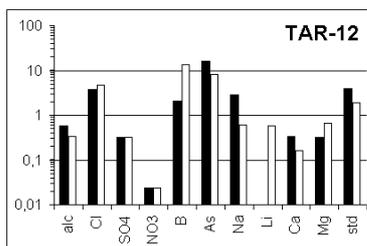
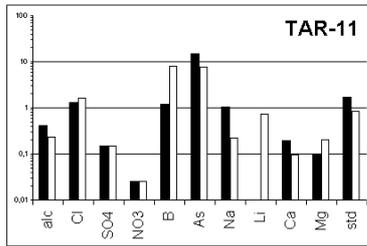
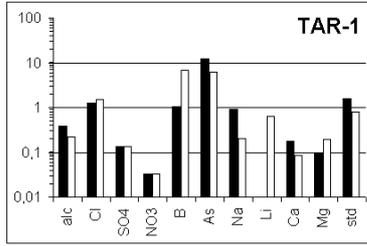
NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
TAR-1	1240	19	1,000	6,67	2,24	0,30	305	0,324	0,0171	34,1	1,43	nd	5,20	25,2	0,619	0,13	185	6,76	1,58	34,8	11,9
TAR-3	4170	13	1,002	8,15	2,69	0,36	1240	1,17	0,0260	154	nd	nd	9,95	24,1	0,981	0,27	757	35,8	5,26	49,7	25,5
TAR-5	367,0	6	1,000	8,72	1,05	0,27	56,8	0,089	0,0089	40,8	0,062	nd	0,897	22,3	0,0824	0,02	41,4	7,31	0,396	21,9	4,42
TAR-6	1529	16	1,001	8,14	2,44	1,6	257	0,280	0,0463	249	0,124	nd	6,08	6,02	0,132	0,13	191	48,9	1,41	54,5	28,7
TAR-9	169600	22	1,115	7,99	16,6	1,3	98000	87,9	1,17	9790	0,372	1,3	373	30,0	39,8	na	60700	3110	404	1020	1050
TAR-11	1460	22	1,000	6,14	2,35	na	326	0,399	0,0192	36,4	1,13	na	5,95	27,0	0,756	na	206	7,47	1,84	38,5	12,1
TAR-12	3560	22,7	1,001	6,00	3,36	na	937	0,999	0,0268	79,0	1,06	na	10,1	27,9	0,801	na	561	17,3	1,47	66,2	40,8
TAR-13	2160	na	1,001	7,88	2,29	na	557	0,542	0,0305	46,1	nd	na	16,0	35,6	1,72	na	343	15,8	3,25	39,9	11,4

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
TAR-1	789,8	137	0,06	44	11,18	11,59	3,7
TAR-3	2512	155	2,04	1,7	39,17	40,73	3,9
TAR-5	286,6	58,5	1,50	0,23	3,499	3,516	0,5
TAR-6	1013	142	1,98	1,6	14,84	14,96	0,8
TAR-9	176486	-	-	-	2915	2982	2,3
TAR-11	836,1	143	0	150	12,32	12,31	0,1
TAR-12	1932	205	0	280	31,72	31,42	0,9
TAR-13	1250	136	0,54	4,2	18,70	18,95	1,3

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %

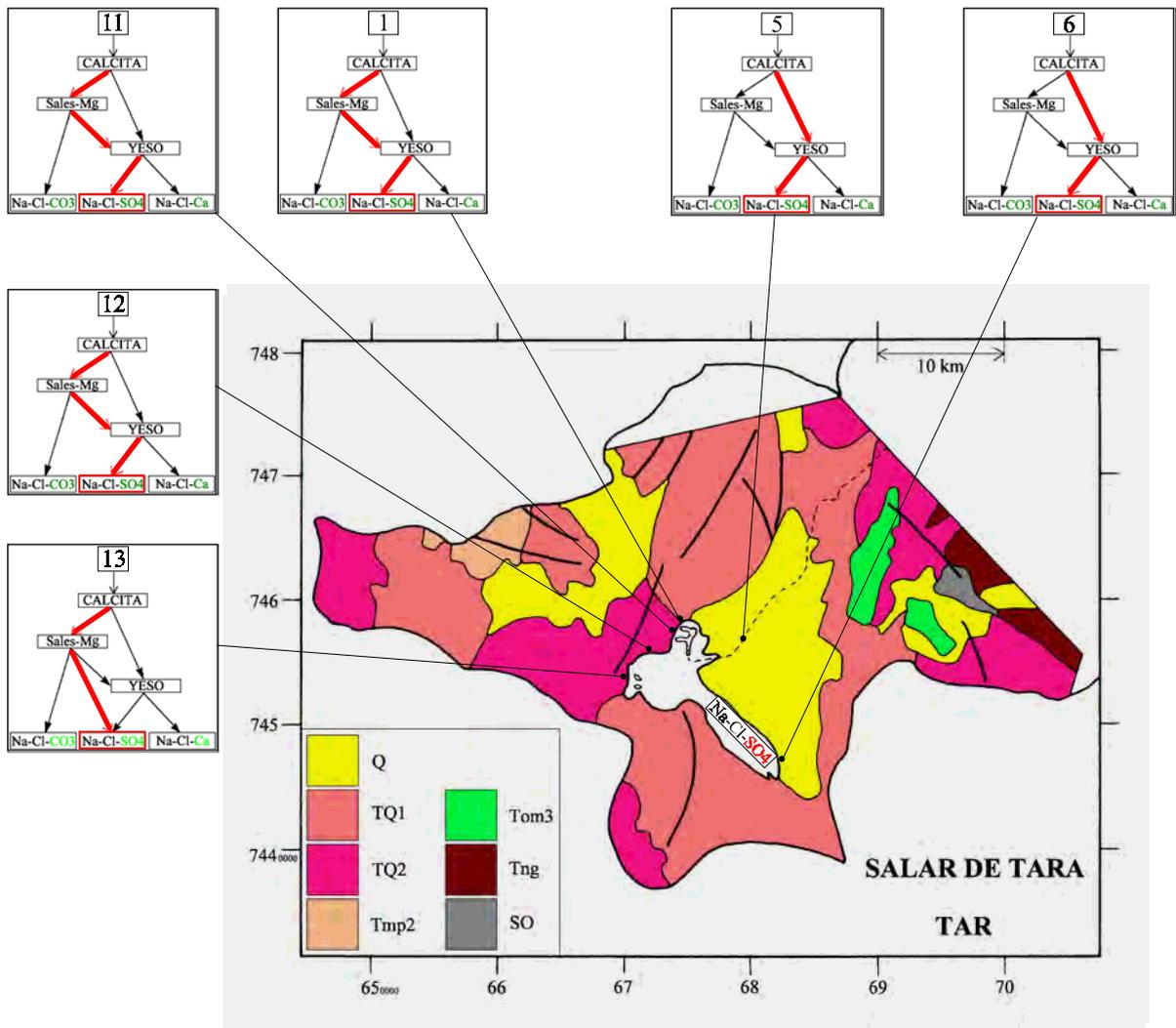




MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

TAR

- Q** : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.
- TQ1** : *Plioceno - Pleistoceno*. Ignimbritas dacíticas, tobas e intercalaciones de sedimentitas clásticas continentales.
- TQ2** : *Plioceno - Pleistoceno*. Coladas, tobas y brechas andesíticas y basálticas con intercalaciones de sedimentitas detríticas.
- Tmp2** : *Mioceno - Plioceno*. Ignimbritas riolíticas y riocácicas con intercalaciones sedimentarias.
- Tom3** : *Oligoceno - Mioceno*. Fm. San Pedro. Conglomerados, brechas, areniscas, lutitas y limolitas de facies continentales con yeso y capas de sal, al oeste del Salar de Atacama.
- Tng** : *Neogeno*. Rocas plutónicas e hipabisales.
- SO** : *Silúrico - Ordovícico*. Areniscas cuarcíferas y feldespáticas, lutitas, conglomerados, cherts y calizas.



LAGUNA HELADA

Introducción

La cuenca de laguna Helada se encuentra en el Altiplano de la II Región, a unos 8 km al este del salar de Tara, muy cerca de la frontera con Argentina. Es la cuenca mas oriental en todo el norte el Chile. La superficie de la laguna no parece variar notablemente en el curso del año. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4300 m
- superficie de la cuenca: 221 km²
- superficie del salar: 5,8 km²
- superficie de la laguna 5,8 km²
- precipitaciones: 180 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 0°C

Hemos encontrado solamente una vertiente en las orillas de la laguna; las demás vertientes surgen cuenca arriba. Existen pequeñas pozas en la cuenca de drenaje que parecen ser afloramiento de napa más que colectores de aguas de lluvia. Existen numerosas pozas y lagunitas de este tipo en otras cuencas del Altiplano chileno a todo lo largo de la frontera con Argentina.

Aportes de agua

La figura 1 presenta la composición de todas las aguas de la cuenca. Se observa una gran variedad de composición para un número reducido de aguas.

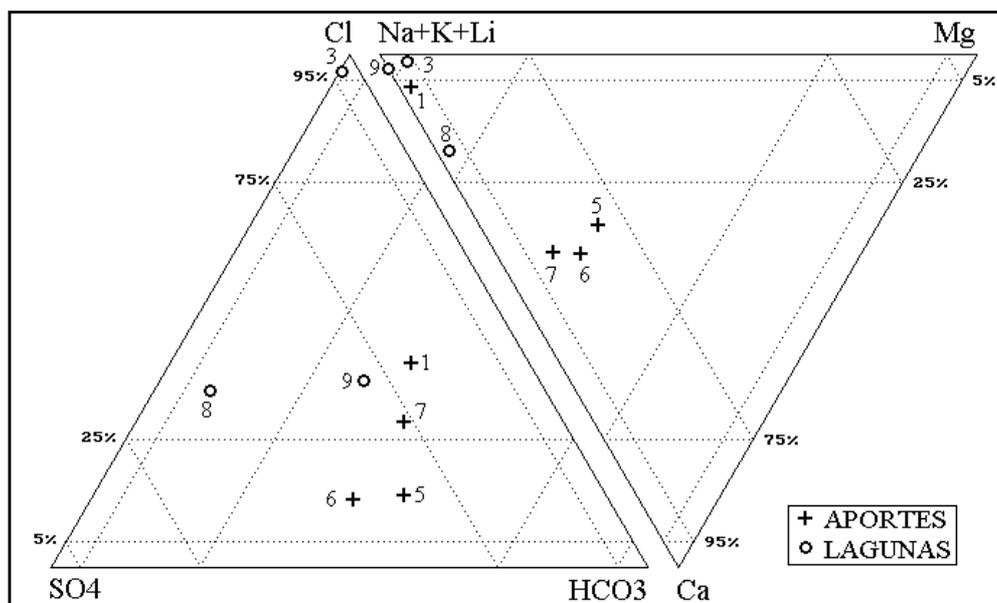


Fig.1. Composición de las aguas de aporte y de las salmueras de laguna Helada.

Aparecen dos tipos de aguas de aportes :

- la vertiente de la orilla (1) es de tipo : Na / Cl-HCO₃⁻(SO₄)
- las vertientes cuenca arriba (5, 6, 7) son de tipo : Na-Ca / HCO₃⁻-SO₄

No se observa en las aguas de aporte ninguna equimolaridad entre Na y Cl, de una parte, y Ca y SO₄, de otra parte. No aparece entonces contribución alguna de antiguas evaporitas en la composición de los aportes. Sus bajas salinidades (118-346 mg/l STD) sugieren más bien que la composición de las aguas de aporte proviene de la alteración de las rocas volcánicas de la cuenca de drenaje.

Composición de las lagunas

Cada una de las tres lagunas tiene una composición particular :

- laguna principal (3) : Na / Cl-(SO₄) (308 g/l STD)
- poza (8) : Na-(Ca) / SO₄-Cl (4,9 g/l STD)
- poza (9) : Na / CO₃-SO₄-Cl (2,9 g/l STD)

La salmuera de la laguna principal contiene más SO₄ que Ca, y está casi a saturación con la mirabilita (Na₂SO₄·10H₂O). El sulfato, a pesar de su contenido bajo en comparación al de Na y Cl, no puede ser despreciado pues juega un papel importante en la química de la laguna. El agua de la poza 9 tiene un pH superior a 10, lo que indica que las especies carbonatadas se encuentran en gran parte como CO₃. Es una lagunita carbonatada y su evolución ulterior por evaporación la lleva hacia una salmuera de carbonato de sodio. Es la única lagunita carbonatada que hemos encontrado en todas las cuencas del norte de Chile.

Vías evolutivas y relación con la geología

La vertiente 1, que entra en la gran laguna, sigue la vía carbonatada, en buen acuerdo con la litología volcánica de la cuenca, pero en desacuerdo con la composición neutra de la laguna. Ya se puede decir que la laguna no proviene de la evaporación de la única vertiente en su orilla. Las tres vertientes cuenca arriba siguen la vía alcalina sulfatada. Dos de ellas (5 y 7) siguen la variante directa, es decir sin pasar por la precipitación del yeso. Están al límite de seguir la vía carbonatada. Estas evoluciones son perfectamente coherentes con la litología exclusivamente volcánica de la cuenca con poco, o sin, azufre. La composición de la laguna principal corresponde, en sus rasgos mayores, a la evolución de las vertientes cuenca arriba.

Evolución cuantitativa de aguas

La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las tres lagunas. Las soluciones reales 8 y 9 son muy sobresaturadas en calcita y en sales de magnesio. Por eso hemos recalculado la composición de estas soluciones una vez llevadas al equilibrio después de precipitar esos minerales. Los valores de la columna "desviación" son los coeficientes del chi-cuadrado adaptado que miden el grado de semejanza entre las soluciones de aporte evaporadas (HEL-xE) y la soluciones reales equilibradas (HEL-x.EQ).

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
HEL-3	7,46	26,1	179000	7080	819	22,7	106000	7270	708	1520	2450	
HEL-7E	6,64	4,28	124000	44000	2800	12,7	68000	40300	626	239	5790	0,866
HEL-1E	10,1	1200	121000	23900	861	35,6	107000	11800	1220	0,24	0,968	1,010
HEL-5E	6,73	4,58	109000	61600	3090	15,4	55300	60400	426	67,1	4170	1,100
HEL-6E	6,96	8,90	54900	120000	3320	18,6	39500	54800	197	60,1	12500	1,550
HEL-8.EQ	8,86	1,79	842	1860	46,3	42,4	1000	418	1,76	170	14,6	
HEL-5E	8,83	5,04	594	1950	50,6	34,4	907	667	2,32	15,9	58,9	0,467
HEL-6E	8,65	3,30	468	2230	41,8	33,9	851	544	1,68	36,7	134	0,477
HEL-7E	8,74	4,02	1080	1480	44,6	34,0	1120	367	9,81	21,5	82,5	0,649
HEL-1E	9,47	23,3	1040	703	50,3	39,4	1450	102	10,6	0,86	3,38	1,000
HEL-9.EQ	10,4	12,9	541	582	40,0	80,9	719	348	1,34	0,66	0,05	
HEL-1E	9,34	14,8	649	438	31,3	37,6	901	63,3	6,58	1,20	4,81	0,863
HEL-5E	8,83	4,34	365	1200	31,1	34,4	557	410	1,43	13,0	49,3	0,873
HEL-6E	8,69	3,12	289	1380	25,8	34,0	525	336	1,04	25,3	94,3	0,967
HEL-7E	8,76	3,66	664	910	27,5	34,1	688	226	6,04	16,3	63,4	1,030

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las soluciones de laguna Helada. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Lo que se nota inmediatamente es la mala correlación entre todas las aguas de aportes y las lagunas. El mejor ajuste es entre la poza (8) y la vertiente (5) (desviación = 0,467). Sin embargo, el escrutinio de las concentraciones muestra altas divergencias para Ca, Mg y alc (HCO_3). Si nos fijamos solamente en los rasgos mayores, se puede observar, sin embargo, algunas tendencias coherentes. En primer lugar, la poza carbonatada (9) tiene su mejor relación con la única agua de vía evolutiva carbonatada (1). Si obviamente HEL-1 no puede alimentar la poza (9), eso indica que esta última recibe aguas similares a HEL-1. La poza (8) tiene su mejor correlación con la vertiente más cercana (5). La laguna principal tiene muy mala correlación con cualquier de los aportes. Basta observar las concentraciones en SO_4 , K y Ca para darse cuenta que los aportes estudiados tienen poca relación con la laguna. Ninguna mezcla evaporada de las cuatro aguas de aporte llega a una salmuera similar a la de la gran laguna. No se ha encontrado entonces el aporte principal de ninguna laguna. Se trata probablemente de napas subterráneas en la cuenca de drenaje.

Calidad de agua

A pesar de ser muy diluidos los aportes, dos solamente respetan las normas de potabilidad : (HEL-5 y 6). Por su parte, HEL-1 contiene 1,7 mg/ de arsénico, o sea 34 veces el máximo permisible para uso potable, y HEL-7 casi 3 veces más, presentando en los demás componentes concentraciones aceptables para el consumo humano. Hay demasiado boro en HEL-1 para un uso agrícola.

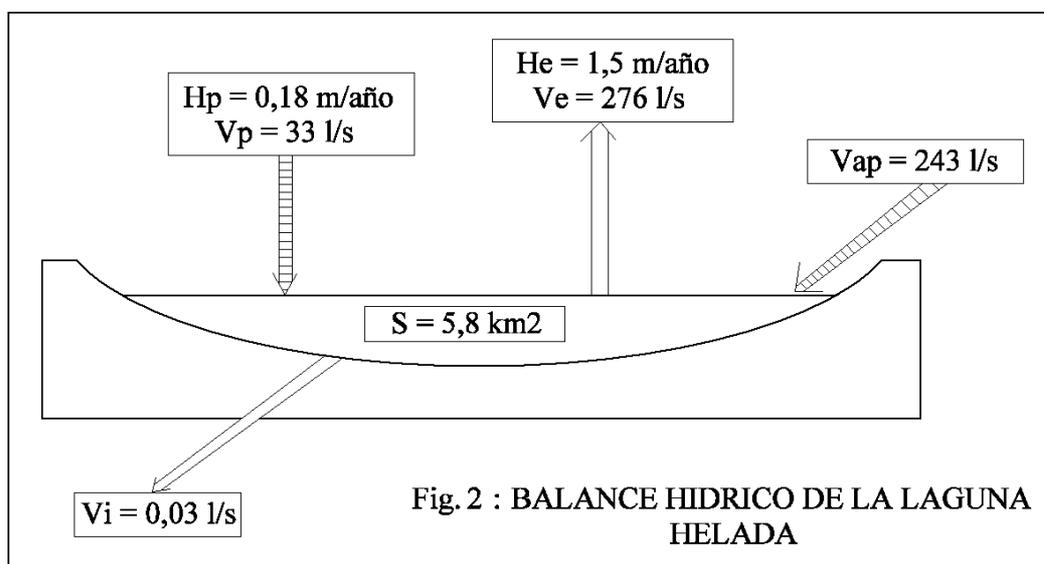
Balance hídrico de la laguna principal

Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. No conocemos la composición del mayor aporte a la laguna; pero todos los que hemos encontrado son diluidos. Es probable que el aporte principal tenga concentraciones del mismo orden de magnitud. Para estimar las infiltraciones hemos tomado el promedio de las concentraciones en Cl de las cuatro vertientes. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 1,5$ m/año
- $H_p = 0,18$ m/año
- $S = 5,8$ km²
- $C_{ap} = 22,7$ mg/l
- $C_L = 179\ 000$ mg/l

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 7\ 657\ 000$ m³/año = 243 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 971$ m³/año = 0,03 l/s

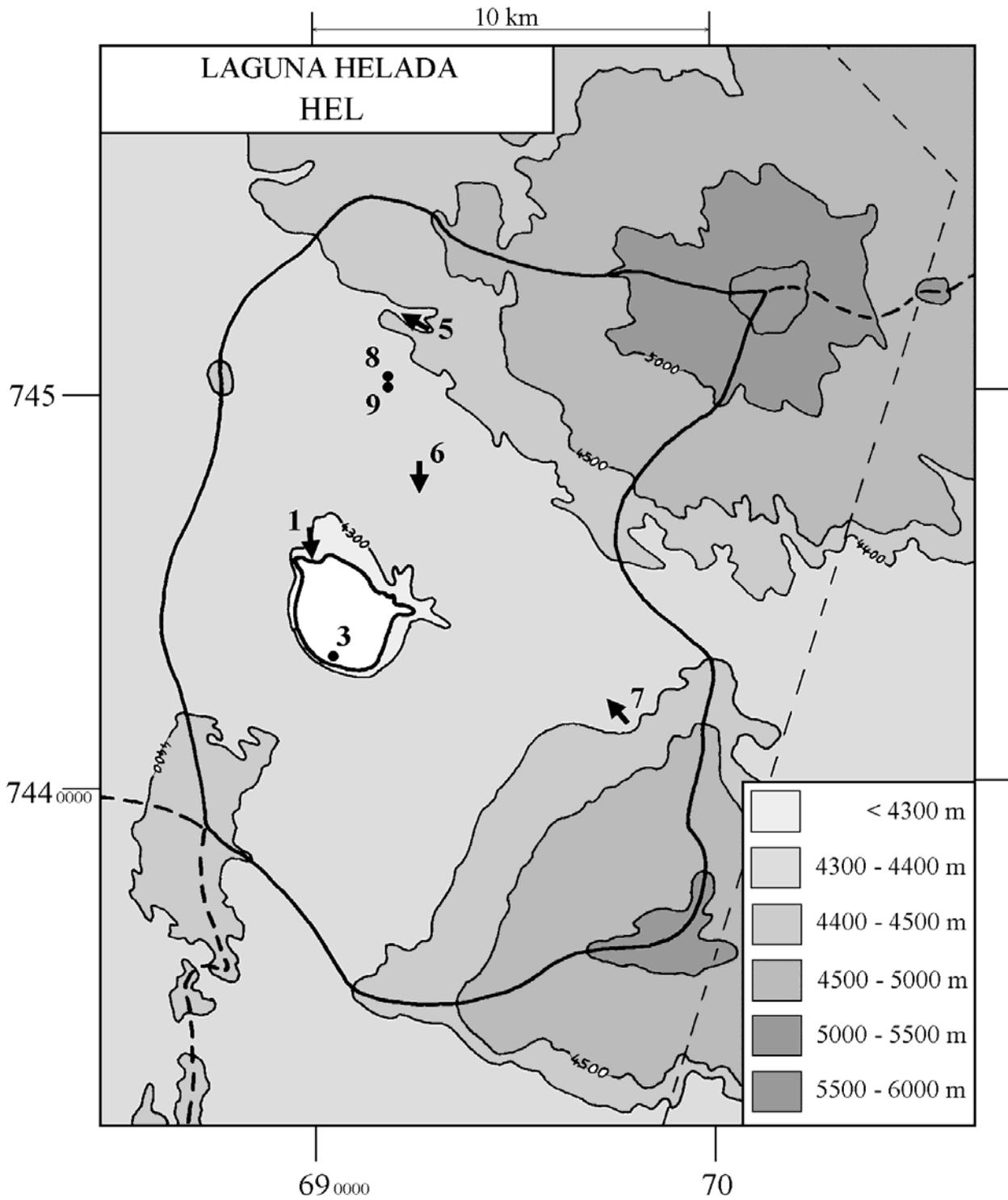


El caudal entrante es bastante elevado : 243 l/s, más o menos la mitad del caudal del río Zapaleri en la vecina cuenca de Tara. Una gruesa estimación visual del caudal de la vertiente (1), a la orilla de la laguna, dio 1 a 2 l/s. Es obvio que hay aportes adicionales, considerando que la contribución de la única vertiente cercana a la laguna es despreciable. En cuanto a las infiltraciones, estas son casi nulas. El coeficiente de escurrimiento (razón entre volumen caído y volumen entrante) es de 0,2.

Conclusiones

La cuenca de laguna Helada presenta un evidente interés en cuanto a recursos de agua. El factor limitante es el alto contenido en arsénico de las aguas. No se ha encontrado el principal aporte a la laguna. Se trata probablemente de varias napas de distintas composiciones, pero siempre de vía evolutiva carbonatada o alcalina sulfatada.

➔ MANANTIAL FLUYENTE	○ POZO
➤ MANANTIAL DIFUSO	□ CALICATA, DREN, CAPTACION
➡ RIO, RIACHUELO	• LAGUNA, POZA



**LAGUNA HELADA
HEL**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE	METROS	
HEL-1	09/10/93	14 ^H 45	689925	7446125	4300	Manantial corriente
HEL-3	09/10/93	15 ^H 30	690450	7443050	4380	Laguna
HEL-5	12/07/94	14 ^H 00	692852	7451702	4390	Manantial corriente
HEL-6	12/07/94	15 ^H 10	692173	7447619	4395	Manantial corriente
HEL-7	12/07/94	15 ^H 57	697657	7442501	4375	Manantial corriente
HEL-8	12/02/96	18 ^H 30	691781	7450362	4380	Lagunita
HEL-9	23/02/96	11 ^H 25	691753	7450393	4380	Lagunita

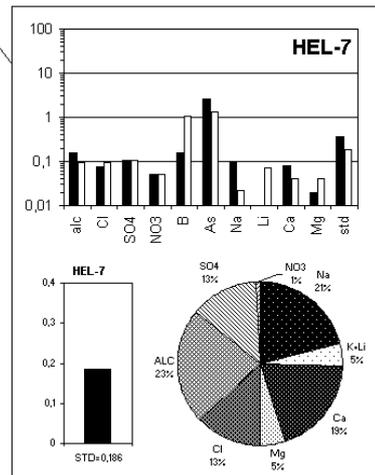
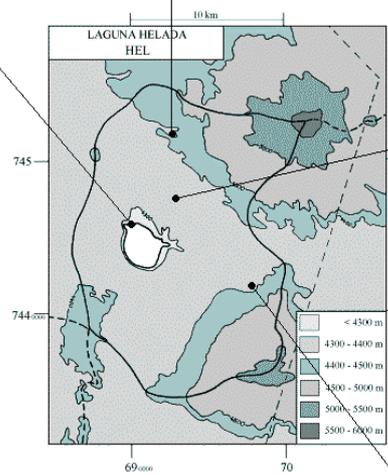
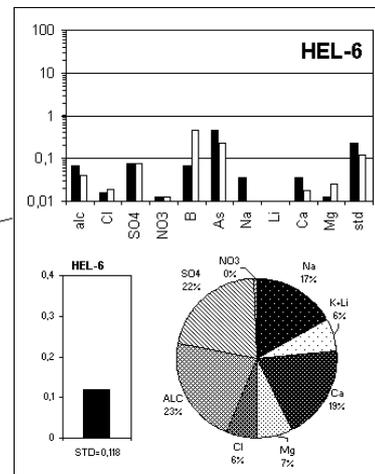
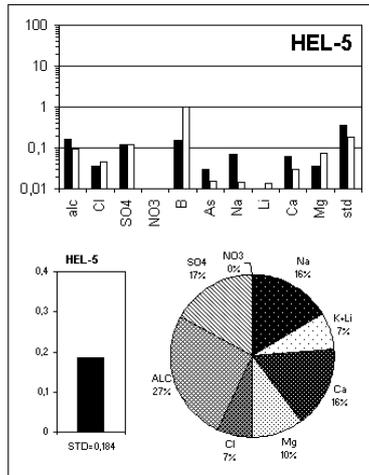
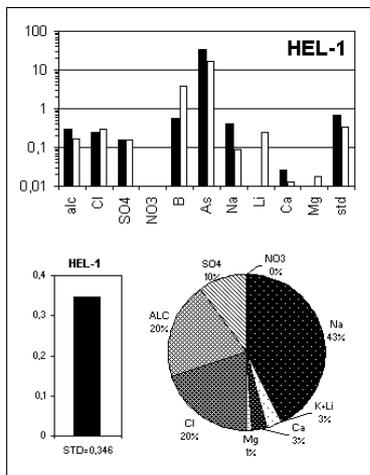
NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
HEL-1	440	9	na	1,000	9,17	1,69	0,7	58,9	0,019	0,0105	39,7	nd	nd	2,84	21,0	1,72	0,6	81,0	5,75	0,597	5,33	1,07
HEL-3	200000	24	na	1,196	7,46	26,1	1,6	179000	74,9	0,985	7080	0,620	2,3	819	22,7	73,6	na	106000	7270	708	1520	2450
HEL-5	212	0,4	na	1,000	7,10	0,937	na	8,88	0,025	0,0024	29,2	nd	na	0,757	22,3	0,002	na	13,5	9,97	0,035	12,2	4,42
HEL-6	107	7,8	na	1,000	7,42	0,399	na	3,87	0,015	0,0019	18,4	0,558	na	0,346	23,3	0,023	na	7,04	4,50	0,014	7,02	1,56
HEL-7	232	5,6	na	1,000	7,60	0,920	na	19,1	0,028	0,0042	26,1	2,23	na	0,789	17,4	0,130	na	19,9	6,49	0,174	15,9	2,45
HEL-8	6110	17,8	na	1,004	9,65	6,62	na	841	0,446	0,0423	1860	2,43	na	46,3	50,7	0,279	na	1010	418	1,76	259	19,4
HEL-9	3980	11,3	na	1,003	10,47	14,1	na	529	1,73	0,244	582	6,70	na	40,0	81,5	0,543	na	727	348	1,34	23,6	0,413

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l. NUMERO $\delta^{18}O$ δ^2H
 CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%	NUMERO	$\delta^{18}O$	δ^2H
HEL-1	346,2	81,7	4,98	0,11	4,138	4,212	1,8	HEL-1	na	na
HEL-3	308546	-	-	-	5166	5225	1,1	HEL-3	na	na
HEL-5	183,8	57,1	0,0	11	1,821	1,795	1,4	HEL-5	-10.6	-91.3
HEL-6	117,5	24,2	0,0	1,9	0,901	0,901	0,07	HEL-6	-11.6	-94.4
HEL-7	186,4	55,8	0,12	3,0	2,049	2,037	0,6	HEL-7	-11.26	-93.0
HEL-8	4851	65,9	45,2	0,02	69,19	69,16	0,04	HEL-8	10.3	15.6
HEL-9	2879	106	198	0,0	41,91	41,23	1,6	HEL-9	7.26	0.4

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
 S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %

Análisis de oxígeno-18 y deuterio



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

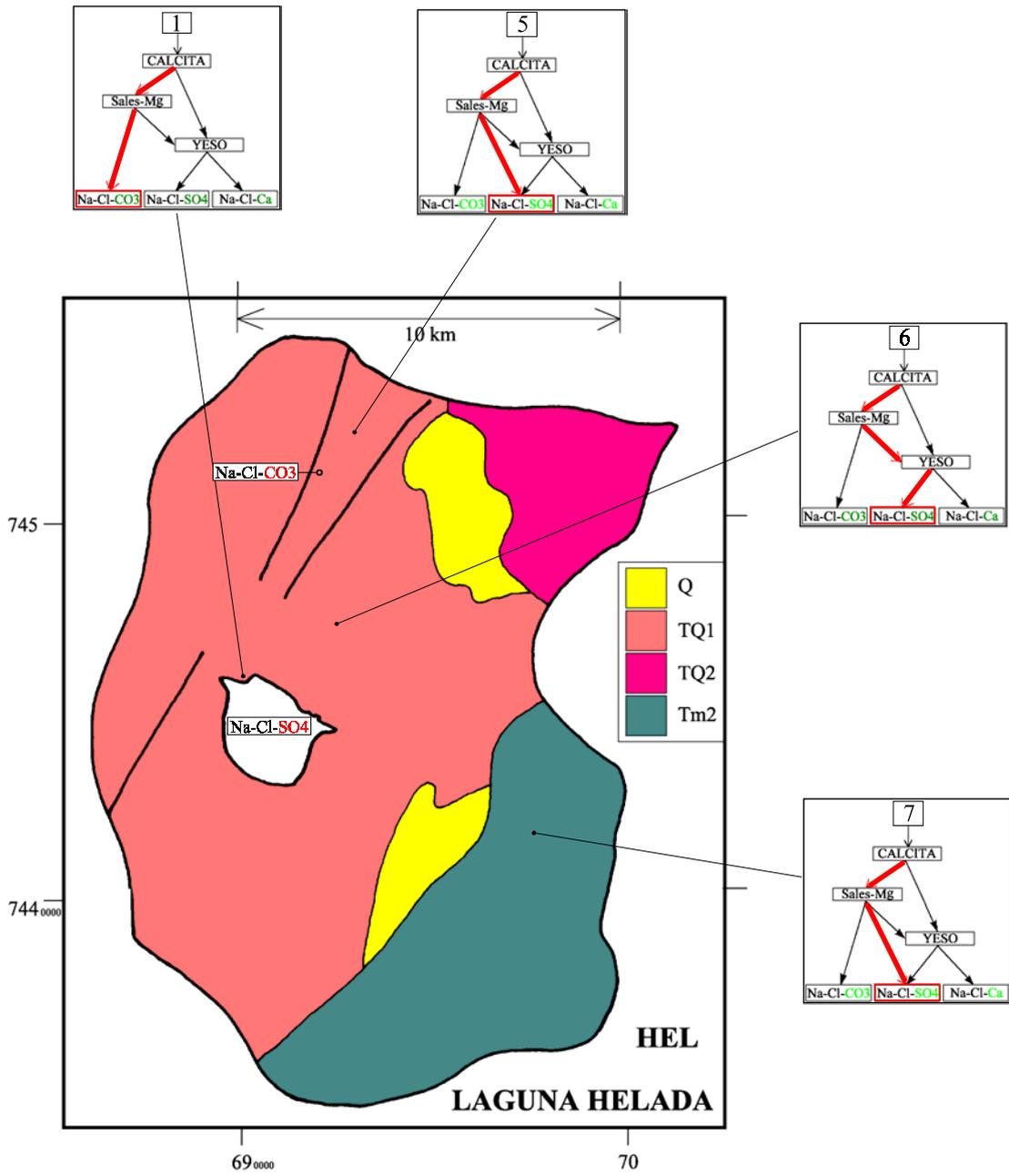
HEL

Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

TQ1 : *Plioceno - Pleistoceno*. Ignimbritas dacíticas, tobas e intercalaciones de sedimentitas clásticas continentales.

TQ2 : *Plioceno - Pleistoceno*. Coladas, tobas y brechas andesíticas y basálticas con intercalaciones de sedimentitas detríticas.

Tm2 : *Mioceno*. Tobas riolíticas y dacíticas, coladas andesíticas y dacíticas.



SALAR DE AGUAS CALIENTES 1

Introducción

El salar de Aguas Calientes 1 se encuentra en el norte del Altiplano de la II Región en la pampa del mismo nombre entre el cordón Quilapana al este y los cerros de la Pacana al oeste, flanqueado por otros dos salares: el salar de Tara y el salar de Pujsa. Es un salar de tipo playa con lagunas superficiales de extensión variable y una napa de salmuera a unos decímetros de profundidad. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4280 m
- superficie de la cuenca: 281 km²
- superficie del salar: 15 km²
- superficie de las lagunas: 2-3 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 1°C

Se sacó tres muestras de vertientes, una de la laguna principal y otra de la napa subterránea del salar.

Composición de las aguas y salmueras

Las composiciones de aguas del salar de Aguas Calientes 1 están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Las tres vertientes son todas fluyentes. Una es de agua salobre (11) y las dos otras de agua salada (1, 4). Hay que recalcar la salinidad particularmente elevada de la vertiente fluyente AC1-1 (24 g/l), así como su alta temperatura (52°C).

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VÍA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
AC1-11	1359	Na-(Ca) - (Mg)	/ Cl- (HCO3) - (SO4)	SO4 (N)
AC1-4	6233	Na-(Ca)	/ Cl	Ca
AC1-1	24245	Na-(Ca)	/ Cl	Ca
<u>SALMUERAS</u>				
AC1-6	108356	Na-(Ca)	/ Cl	Ca
AC1-8	122890	Na-(Ca)	/ Cl	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Aguas Calientes 1. SO₄ (N) = vía neutra sulfatada; Ca = vía calcica.

Se nota en seguida que Aguas Calientes 1 es un salar de tipo cálcico, es decir que sus salmueras contienen más calcio que sulfato. La vertiente salobre (11) contiene algo de Mg y HCO₃ además de sus componentes Na, Ca y Cl.

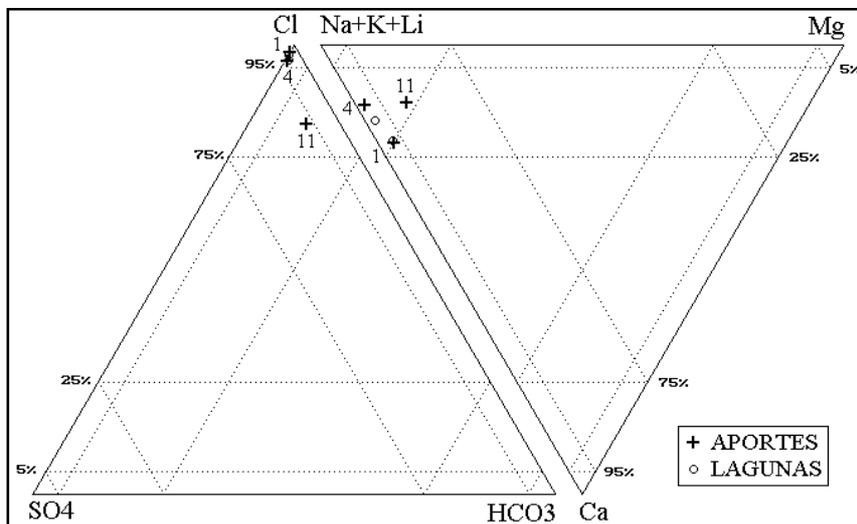


Fig.1 : Composición de las aguas de aporte y salmueras del salar de Aguas Calientes 1.

La salinidad elevada de los aportes no se debe a la redisolución de sales evaporíticas muy comunes como la halita (NaCl) y el yeso (CaSO₄.2H₂O), puesto que no se observa relaciones equimolares entre Na y Cl, ni tampoco entre Ca y SO₄. Al contrario, se puede observar en la figura 2 una excelente correlación equimolar entre Na+Ca y Cl para todas las aguas del salar.

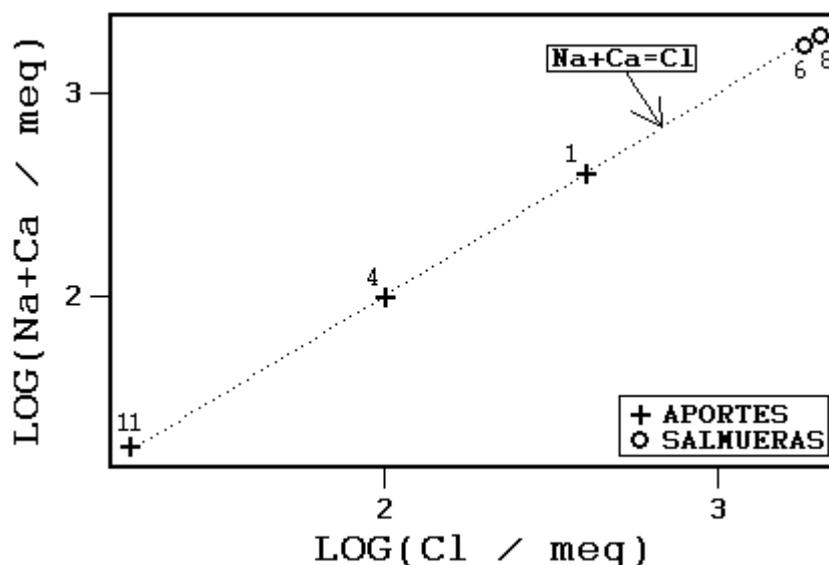


Fig.2 : Relación entre Na+Ca y Cl en las aguas y salmueras de Aguas Calientes 1

Eso sugiere una salinización de las napas diluidas de la cuenca de drenaje por aguas salinas de tipo Na-Ca / Cl que podrían provenir del exterior de la cuenca. No consideramos la posibilidad de redisolución de antiguas evaporitas de este tipo químico puesto que el cloruro de calcio es una sal

extremadamente soluble que solamente cristaliza a temperaturas muy bajas ($< - 40^{\circ} \text{C}$) que no se encuentran en la zona.

Vías evolutivas y relación con la geología

Las dos vertientes saladas (1 y 4) siguen al evaporarse la vía evolutiva cálcica en buena concordancia con la composición de las salmueras del salar, pero en total desacuerdo con la litología volcánica de la cuenca de drenaje y con la alta salinidad de los aportes. La vertiente salobre (11) sigue la vía neutra sulfatada. Si no fuera por su salinidad relativamente elevada, podría corresponder a un agua de alteración de rocas volcánicas ricas en azufre. El hecho de que esta agua tiene concentraciones iguales de $\text{Na}+\text{Ca}$ y Cl sugiere que también se trata de una salinización de agua diluida producto de alteración de rocas de la cuenca con salmueras de tipo $\text{Na}-\text{Ca} / \text{Cl}$, pero en menor grado que para las vertientes saladas (1) y (4).

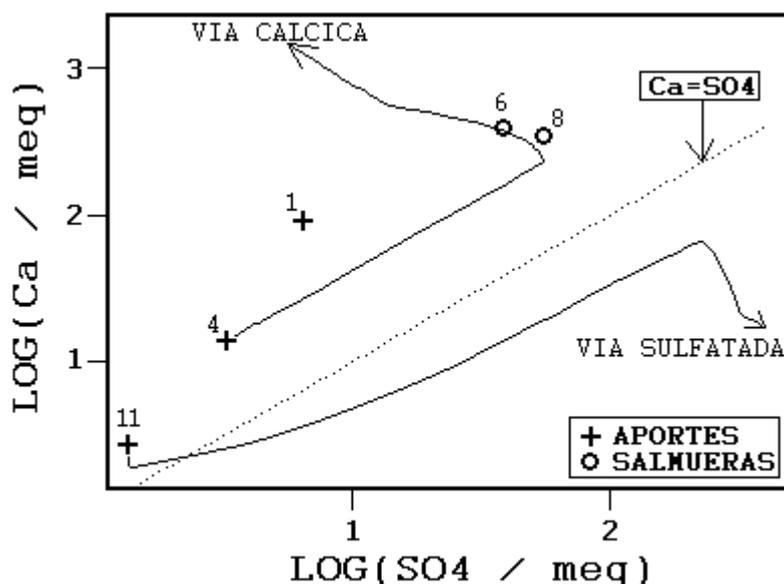


Fig.3 : Relación entre Ca y SO_4 en las aguas y salmueras de Aguas Calientes 1

La figura 3 muestra los trayectos evaporatorios de AC1-4 y AC1-11 en un diagrama Ca versus SO_4 . El agua salobre (11) se encuentra en el sector $\text{Ca} > \text{SO}_4$ exactamente como AC1-1 y AC1-4, pero su evolución por evaporación lleva a salmueras muy distintas. El trayecto evaporatorio de AC1-11 cruza la línea de equimolaridad $\text{Ca} = \text{SO}_4$ a causa de la precipitación importante de la calcita (CaCO_3) que consume Ca , pero no SO_4 . Lamentablemente no disponemos de muestra de laguna o napa del norte del salar en el sector de (11). Por eso no podemos saber si esta vertiente salobre tiene o no influencia en el salar y, por ende, su importancia en relación a los aportes salados del sur del salar.

Evolución cuantitativa de las aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la laguna (6) y de la napa (8) del salar.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
AC1-6	7,25	3,80	64600	1830	286	44,0	31100	805	145	7900	705	
AC1-1E	7,53	2,18	64600	1390	273	20,6	31000	827	147	8080	710	0,060
AC1-4E	7,64	2,50	62800	2650	310	20,5	34800	950	154	4690	406	0,126
AC1-11E	7,86	6,77	59100	6180	642	20,2	34300	1260	271	821	2420	0,674
AC1-8	7,63	13,5	71700	2640	531	36,4	37000	1180	169	6980	501	
AC1-4E	7,61	2,83	71600	2570	354	19,1	39700	1080	176	5160	463	0,066
AC1-1E	7,49	2,48	73300	1550	310	19,3	35100	938	167	9160	805	0,127
AC1-11E	7,74	6,19	67200	7030	703	18,8	39000	1430	308	913	2750	0,597

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con la laguna (6) y la napa (8) del salar de Aguas Calientes 1. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Tanto la laguna como la napa provienen de la evaporación del agua de la vertiente salada AC1-4. Los coeficientes de desviación son bajos. La vertiente evaporada 1 también tiene alguna relación con las salmueras. Notamos que la muestra de napa ha sido extraída a unos tres kilómetros de la vertiente (4). Este aporte parece ser muy importante. La vertiente salobre (11) produce una salmuera sulfatada bien distinta de las salmueras reales estudiadas.

Calidad de agua

Ningún agua de aporte puede ser aprovechada para un uso potable o agrícola. El agua menos concentrada (11) tiene exceso de Na, Cl, salinidad y sobre todo de arsénico (10 veces por encima de la norma de potabilidad). Puesto que la alta salinidad de los aportes se debe a una salinización de las napas diluidas de la cuenca de drenaje por salmueras de origen desconocido, la posibilidad de encontrar aguas diluidas de buena calidad en la cuenca de Aguas Calientes 1 no es muy alentadora.

Balance hídrico

Se puede establecer el balance hídrico de la laguna al suroeste del salar. Su alimentación proviene de la vertiente salada AC1-4. La altura de evaporación de la laguna es la evaporación potencial (1,5 m/año) reducida en 10% para tomar en cuenta la salinidad del agua (108 g/l). Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros del balance son:

- $H_c = 1,35$ m/año (1,5 - 0,15)
- $H_p = 0,15$ m/año
- $S = 3$ km²
- $C_{ap} = 3620$ mg/l (AC1-4)
- $C_L = 64600$ mg/l (AC1-6)

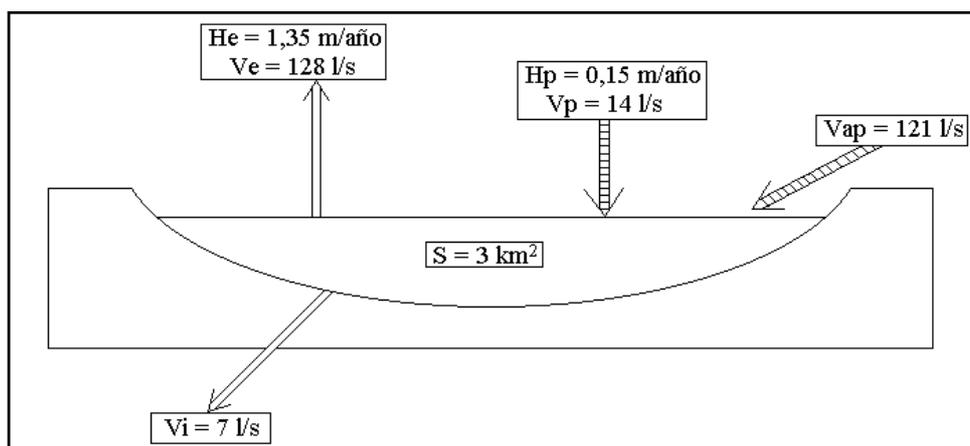


Fig.4 : Balance hídrico de la laguna suroeste del salar de Aguas Calientes 1.

Se obtiene:

Volumen de aportes: $V_{ap} = S(H_c - H_p) / (1 - C_{ap}/C_L) = 3,8 \times 10^6 \text{ m/año} = 121 \text{ l/s}$

Volumen de infiltraciones: $V_i = S(H_c - H_p) / (C_L/C_{ap} - 1) = 214\,000 \text{ m/año} = 7 \text{ l/s}$

El caudal entrante de 121 l/s es elevado. Corresponde no solamente a la vertiente (4), sino también a varios pequeños aportes similares a (4) a todo lo largo de la orilla suroeste del salar. El sector de la cuenca de drenaje que corresponde a AC1-4 tiene una superficie del orden de 50 km². La tasa de precipitaciones sobre esta superficie es de 238 l/s, lo que lleva a un coeficiente de escurrimiento muy elevado de 0,5 (121/238). Generalmente este coeficiente no sobrepasa 0,1 a 0,2 cuando las aguas de aporte provienen de precipitaciones sobre la cuenca de drenaje. Parece, entonces, que las aguas de aporte saladas de tipo Na-(Ca) / Cl provienen del exterior de la cuenca.

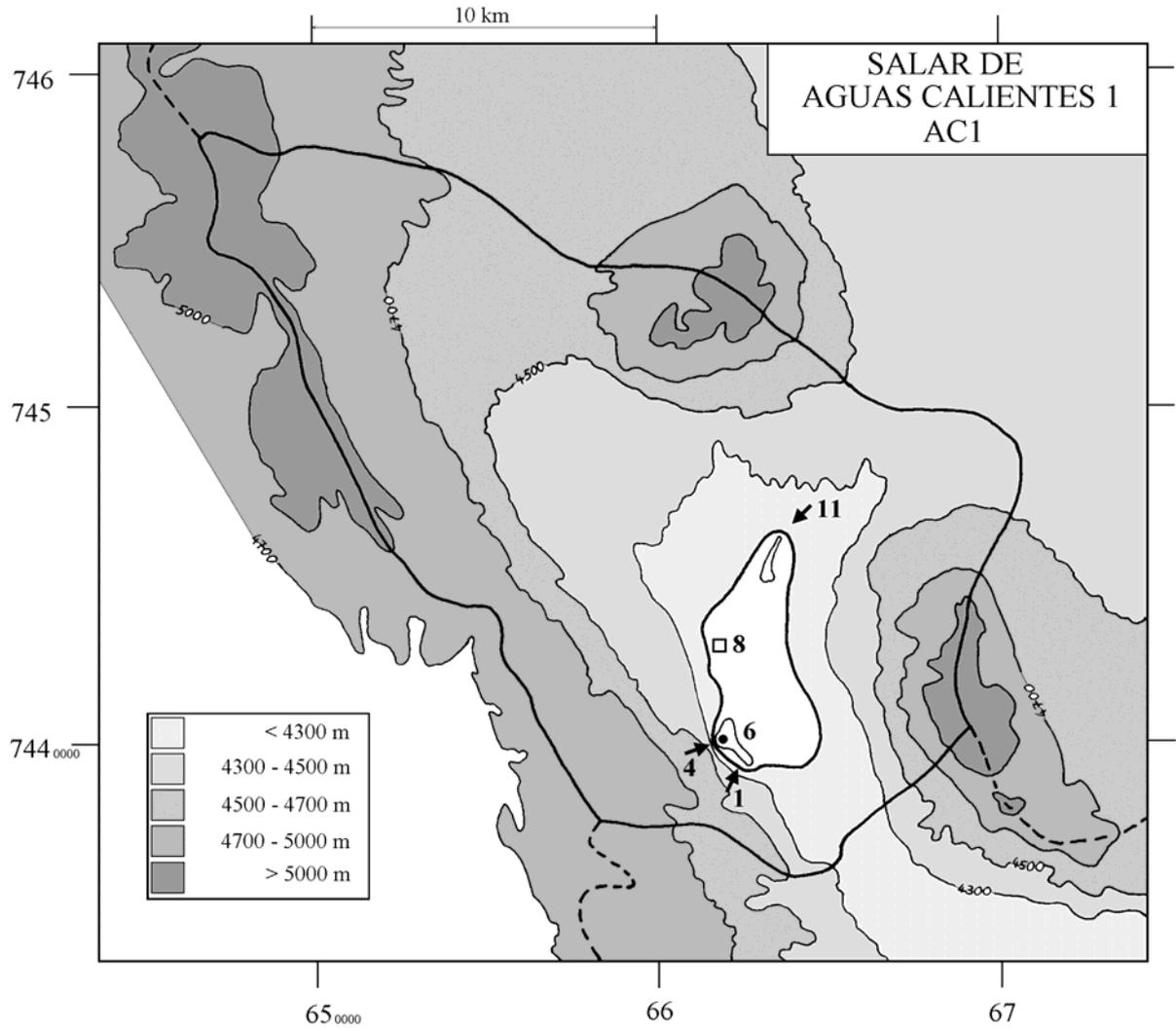
Conclusiones

Las aguas de aporte del salar de Aguas Calientes 1 son de mala calidad debido a una salinización por salmueras de tipo Na-(Ca) / Cl, de origen desconocido, probablemente afuera de la cuenca. El agua de la vertiente norte del salar, menos salina, muestra todavía algunos rasgos del agua diluida inicial. Su vía evolutiva es neutra sulfatada, mientras que las vertientes más contaminadas siguen la vía cálcica produciendo efectivamente salmueras de tipo Na-(Ca) / Cl. Las posibilidades de encontrar aguas diluidas de buena calidad son más elevadas en el norte de la cuenca.

Referencias y estudios anteriores

Alonso, H. y Vargas, L. 1988. Hidroquímica de lagunas del Altiplano, Segunda Región. V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 Agosto de 1988, Actas, tomo II, D35-D43.

➔ MANANTIAL FLUYENTE	⇒ RIO, RIACHUELO	○ POZO
⇒ MANANTIAL DIFUSO	• LAGUNA, POZA	□ CALICATA, DREN, CAPTACION



SALAR DE AGUAS CALIENTES 1

AC1

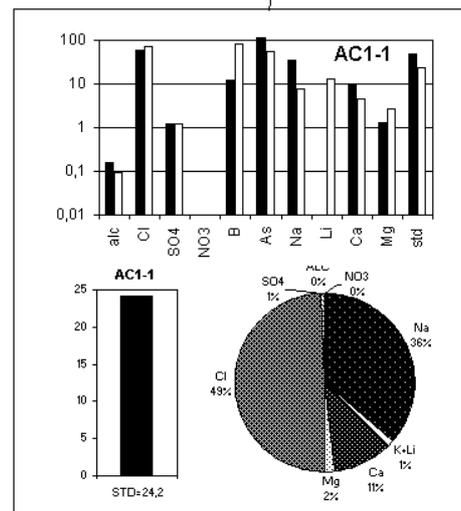
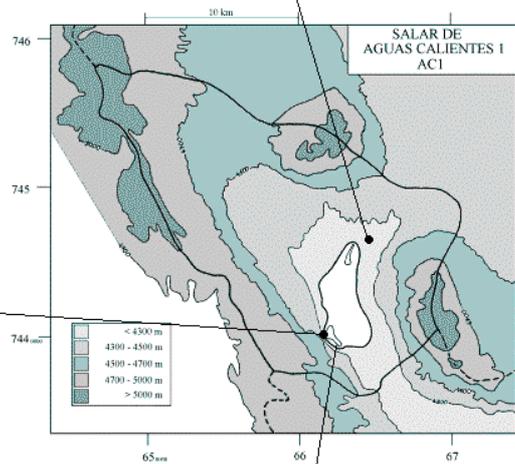
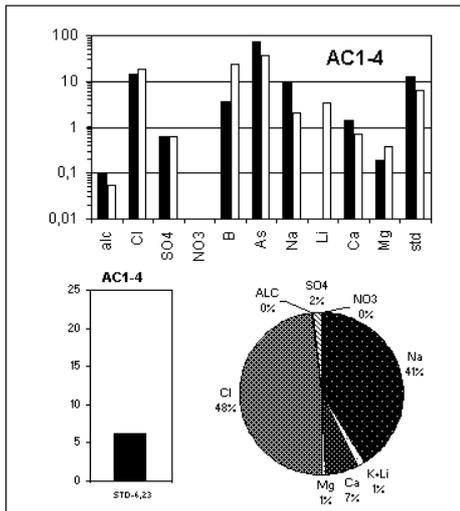
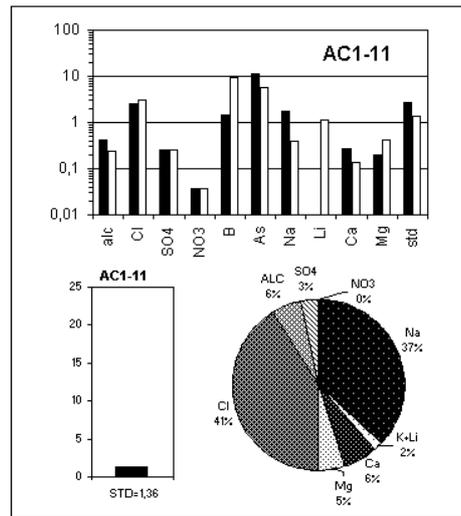
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
AC1-1	10/10/93	09 ^H 45	661925	7439250	4280	Manantial corriente
AC1-4	10/10/93	10 ^H 10	661775	7440450	4280	Manantial corriente
AC1-6	10/10/93	10 ^H 30	662225	7440575	4280	Laguna
AC1-8	10/10/93	11 ^H 30	661575	7442375	4280	Napa (cateo)
AC1-11	10/10/93	12 ^H 30	665375	7446575	4285	Manantial corriente

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
AC1-1	35200	52	1,017	6,74	0,917	1,65	14500	4,46	0,069	311	0,06	0,19	61,2	18,3	5,68	0,85	6950	185	33,0	1820	159
AC1-4	10300	17	1,004	7,33	0,554	1,44	3620	1,41	0,042	156	0,43	0,10	17,6	24,7	3,61	0,09	1940	54,0	8,74	277	23,1
AC1-6	120900	14	1,074	7,25	3,80	4,39	64600	22,4	0,113	1830	2,2	0,86	286	44,0	26,6	0,86	31100	805	145	7900	705
AC1-8	131500	6	1,083	7,63	13,5	3,04	71700	16,9	0,142	2640	0,12	1,20	531	36,4	55,0	0,20	37000	1180	169	6980	501
AC1-11	2240	17	1,001	6,98	2,36	0,285	614	0,584	0,020	63,8	1,7	0,10	7,33	29,7	0,58	0,13	352	13,0	2,80	54,1	25,0

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
 CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
AC1-1	24245	50,3	0,54	9,2	415,4	415,6	0,03
AC1-4	6233	31,8	0,12	2,0	102,8	105,9	2,9
AC1-6	108356	131	4,86	10	1844	1863	1,0
AC1-8	122890	462	28,3	17	2054	2089	1,7
AC1-11	1359	143	0,12	23	20,80	21,04	1,2

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
 S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

AC1

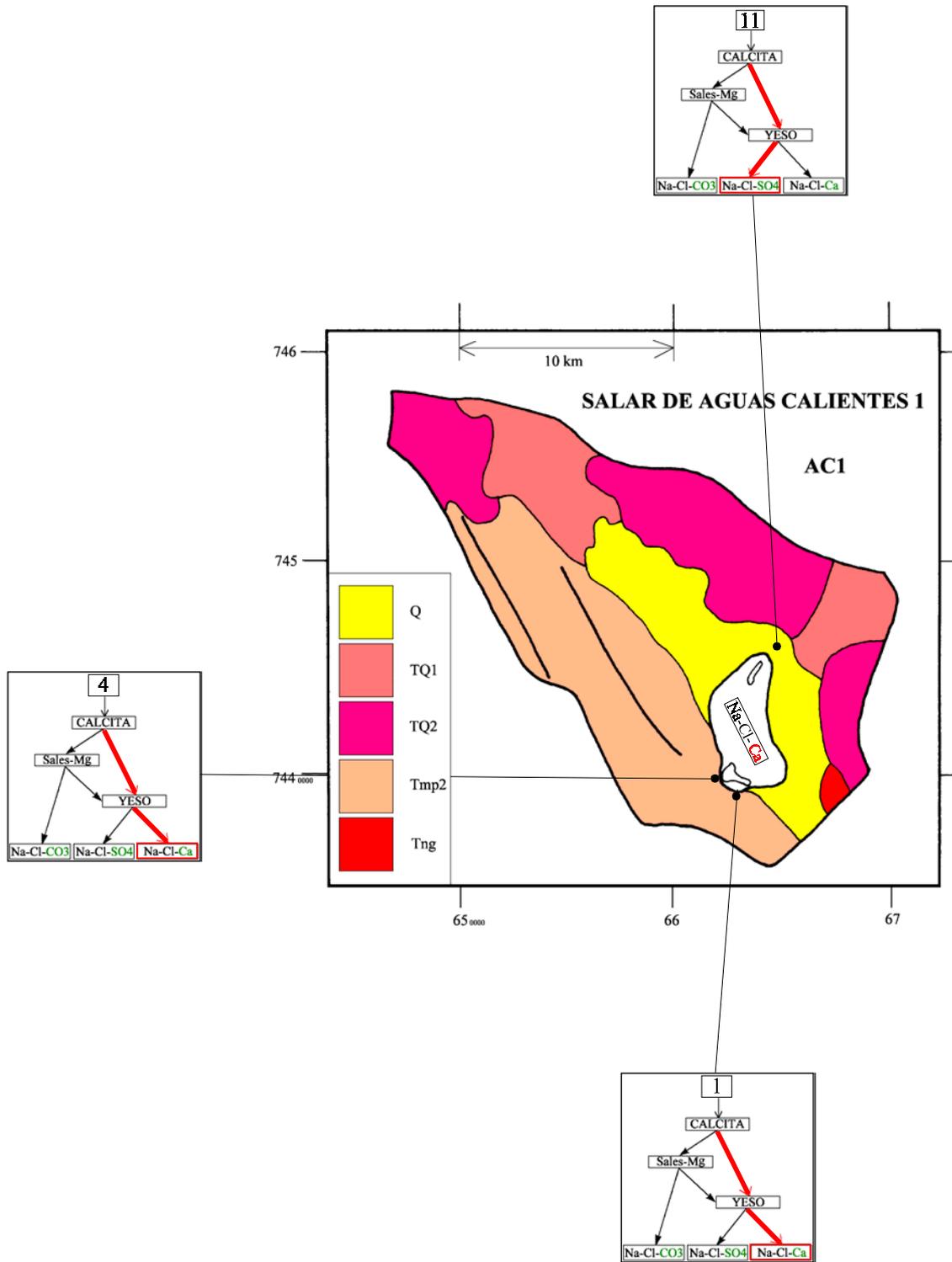
Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

TQ1 : *Plioceno - Pleistoceno*. Ignimbritas dacíticas, tobas e intercalaciones de sedimentitas clásticas continentales.

TQ2 : *Plioceno - Pleistoceno*. Coladas, tobas y brechas andesíticas y basálticas con intercalaciones de sedimentitas detríticas.

Tmp2 : *Mioceno - Plioceno*. Ignimbritas riolíticas y riodacíticas con intercalaciones sedimentarias.

Tng : *Neogeno*. Rocas plutónicas e hipabisales.



SALAR DE PUJSA

Introducción

El salar de Pujsa se encuentra al norte del Altiplano de la II Región al sur-oeste del salar de Tara y separado por un cordón de la cuenca del salar de Atacama, al oeste. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4500 m
- superficie de la cuenca: 634 km²
- superficie del salar: 18 km²
- superficie de las lagunas: 1-10 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 1°C

Es un salar de tipo playa con lagunas superficiales. No sabemos casi nada sobre la extensión y las variaciones de superficie de las lagunas. Existen antiguas islas de hielo en el salar que proveen aguas diluidas a las lagunas al derretirse (Hurlbert and Chang, 1984). No es posible, entonces, estimar el balance hídrico, aún muy aproximado, de las lagunas. Se ha muestreado tres aguas de aporte y una de laguna.

Composición de las aguas

Las composiciones de aguas del salar de Pujsa están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Se observa un gran dispersión de los puntos representativos.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
PSA-11	239	Na-(Ca)-(Mg)	/ SO ₄ -HCO ₃ -(Cl)	CO ₃
PSA-1	758	Ca-Na-(Mg)	/ SO ₄ -(HCO ₃)-(Cl)	SO ₄ (N)
PSA-8	1363	Na-(Mg)-(Ca)	/ SO ₄ -Cl-HCO ₃	SO ₄ (A)
<u>LAGUNA</u>				
PSA-5	57578	Na	/ SO ₄ -Cl	SO ₄

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Pujsa.
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada; SO₄ (A) = vía alcalina sulfatada CO₃ = vía carbonatada.

La característica más importante que hay que retener es el alto contenido en sulfato de todas las aguas. Pujsa es un salar de tipo sulfatado. Tres aportes no son suficientes para hacer correlaciones significativas entre los componentes. Notamos primero que la salinidad y la composición de los aportes diluidos (1) y (11) corresponden a aguas de alteración de rocas volcánicas con azufre.

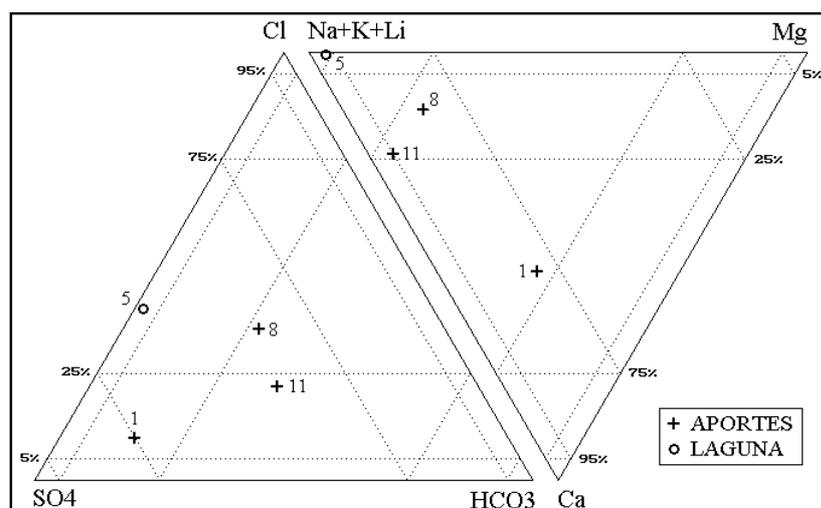


Fig.1: Composición de las aguas del salar de Pujsa

La salinidad mas alta de la vertiente difusa (8) que surge justo a la orilla del salar es más difícil de interpretar. Puede tratarse de una pre- evaporación de la napa diluida de aporte antes de escurrirse por la vertiente difusa, de una cuña salina, o también de la redisolución de sulfato de sodio del mismo salar llevado por el viento hacia las orillas (sales reciclados). Una redisolución de antiguas evaporitas es menos probable (aunque no descartada) puesto que los dos otros aportes, cuenca arriba, no han sido afectados por tal proceso.

Vías evolutivas y relación con la geología

Las tres aguas de aporte siguen al evaporarse tres vías evolutivas distintas, todas en buen acuerdo con la litología de la cuenca de drenaje:

- el agua más diluida (11) sigue la vía carbonatada
- la vertiente salobre (8) sigue la vía alcalina sulfatada
- el río (1) sigue la vía neutra sulfatada

La vía carbonatada de PSA-11 no se desarrolla en el salar, indicando un aporte menor.

Evolución cuantitativa de aguas

La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la laguna del salar.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
PSA-5	9,00	16,7	12200	24000	231	31,4	18100	985	59,3	107	306	
PSA-8E	8,49	15,2	14200	19700	669	29,7	16200	2550	104	94,2	433	0,224
PSA-1E	8,12	3,34	6030	33600	172	29,4	10200	1860	50,4	473	4250	0,596
PSA-11E	9,47	77,3	8350	23000	537	38,3	18400	329	78,9	2,62	8,83	0,909

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con la laguna del salar de Pujsa. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

El agua de aporte evaporada que mas se asemeja a la salmuera de la laguna es la vertiente salobre (8). Sin embargo, el acuerdo no es excelente; debe existir otros aportes no encontrados que se mezclan con PSA-8. Los dos otros aportes (1 y 11) producen al evaporarse salmueras muy distintas de la del salar. Se nota en particular las concentraciones muy dispares de Ca y Mg.

Calidad de agua

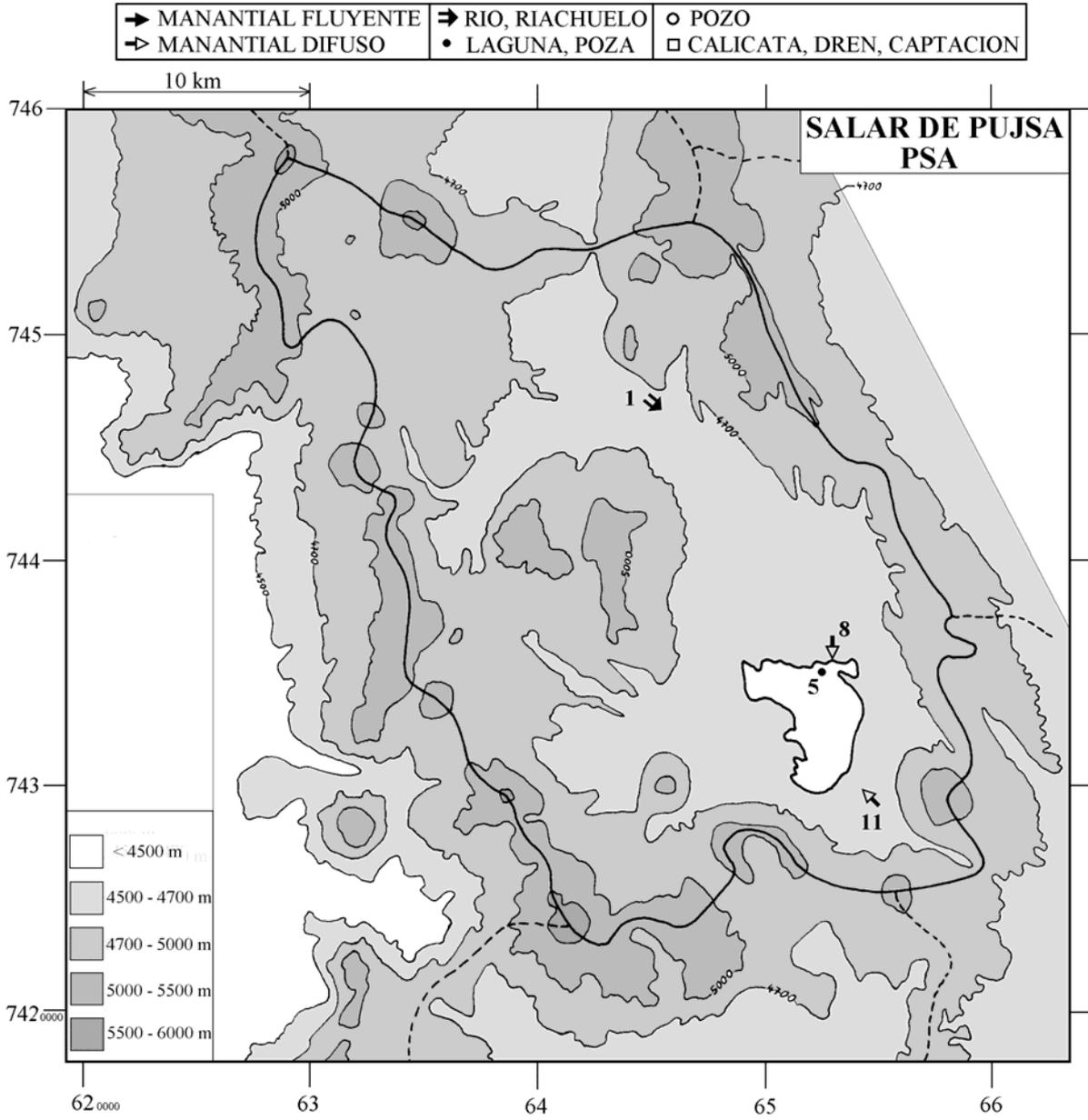
El agua más diluida (11) tiene concentraciones muy por debajo de las normas de potabilidad, excepto para el arsénico que sobrepasa 16 veces el límite permisible para agua potable. El contenido de boro la hace no recomendable para riego. PSA-1 está levemente por encima de la norma de potabilidad en sulfato, arsénico y salinidad total. PSA-8 tiene 20 veces más arsénico que esta norma y es demasiada salada.

Conclusiones

El salar de Pujsa recibe aguas de aporte de composición y salinidad variada, pero donde predominan los tipos químicos sulfatados. La composición química de la laguna, de tipo Na / SO₄-Cl, no proviene de la evaporación de los dos aportes cuenca arriba, sino del agua de una vertiente difusa a la orilla norte del salar. Sin embargo, deben existir aportes adicionales no detectados. La composición de los aportes y las vías evolutivas que siguen al evaporarse esta en acuerdo con la geología de la cuenca. La aptitud de uso de las aguas, aún las muy diluidas, está limitada en potabilidad por el alto contenido en arsénico.

Referencias

Hurlbert, S.H. y Chang, C.C.Y. 1984. Ancient ice islands in salt lakes of the Central Andes. Science, 224, 299-302.



**SALAR DE PUJSA
PSA**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
PSA-1	07/10/93	15 ^H 00	643900	7446775	4590	Vegas de Pujsa
PSA-5	10/10/93	15 ^H 15	652575	7435175	4500	Laguna
PSA-8	10/10/93	15 ^H 30	653125	7435750	4500	Manantial difuso
PSA-11	10/10/93	16 ^H 30	654800	7429200	4550	Manantial difuso

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
PSA-1	914	12	1,000	7,50	1,56	0,23	34,9	0,049	0,0127	368	nd	nd	0,995	26,8	0,0742	0,43	59,1	10,8	0,291	104	24,8
PSA-5	60800	19	1,032	9,00	16,7	0,80	12200	18,1	0,602	24000	0,25	0,9	231	31,4	79,4	0,76	18100	985	59,3	107	306
PSA-8	1696	14	1,000	8,88	5,01	0,40	226	0,283	0,0140	324	2,0	nd	13,8	40,6	1,09	nd	258	40,7	1,66	48,1	35,0
PSA-11	302	13	1,000	8,82	1,08	0,27	19,8	0,016	0,0047	55,2	4,2	nd	3,10	10,7	0,839	0,14	45,3	0,782	0,187	13,5	1,73

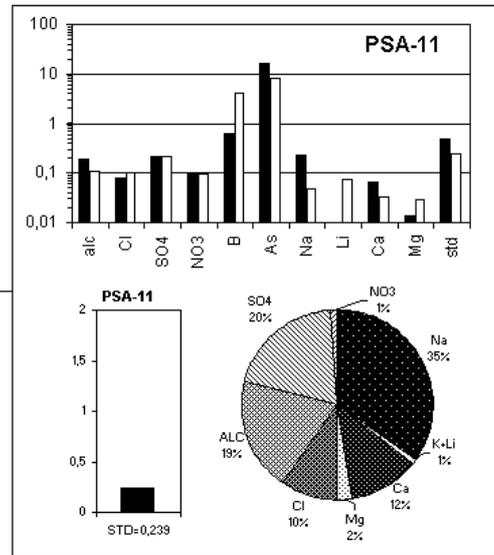
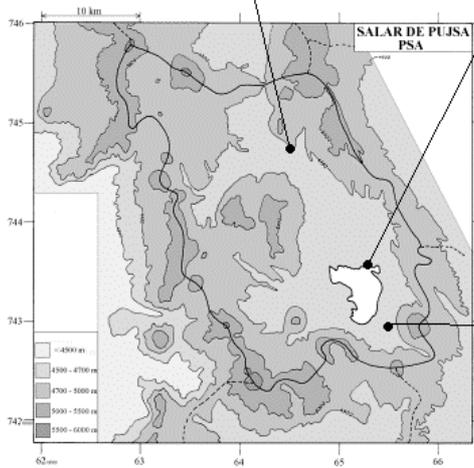
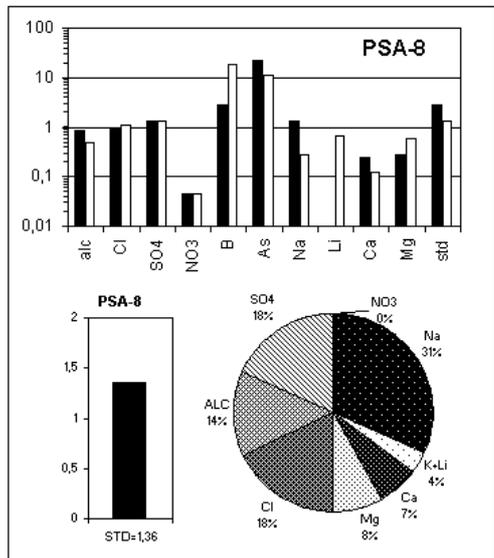
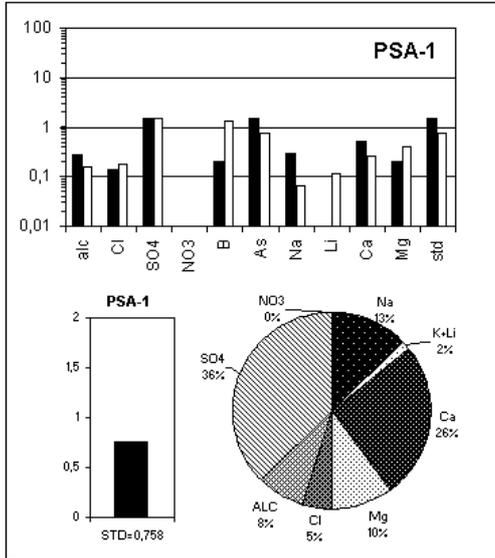
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
PSA-1	757,9	93,9	0,30	5,3	10,13	10,22	0,8
PSA-5	57578	198	50,1	0,17	849,3	860,0	1,2
PSA-8	1363	241	17,0	0,53	17,76	18,17	2,3
PSA-11	238,7	56,2	1,92	0,15	2,839	2,870	1,1

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

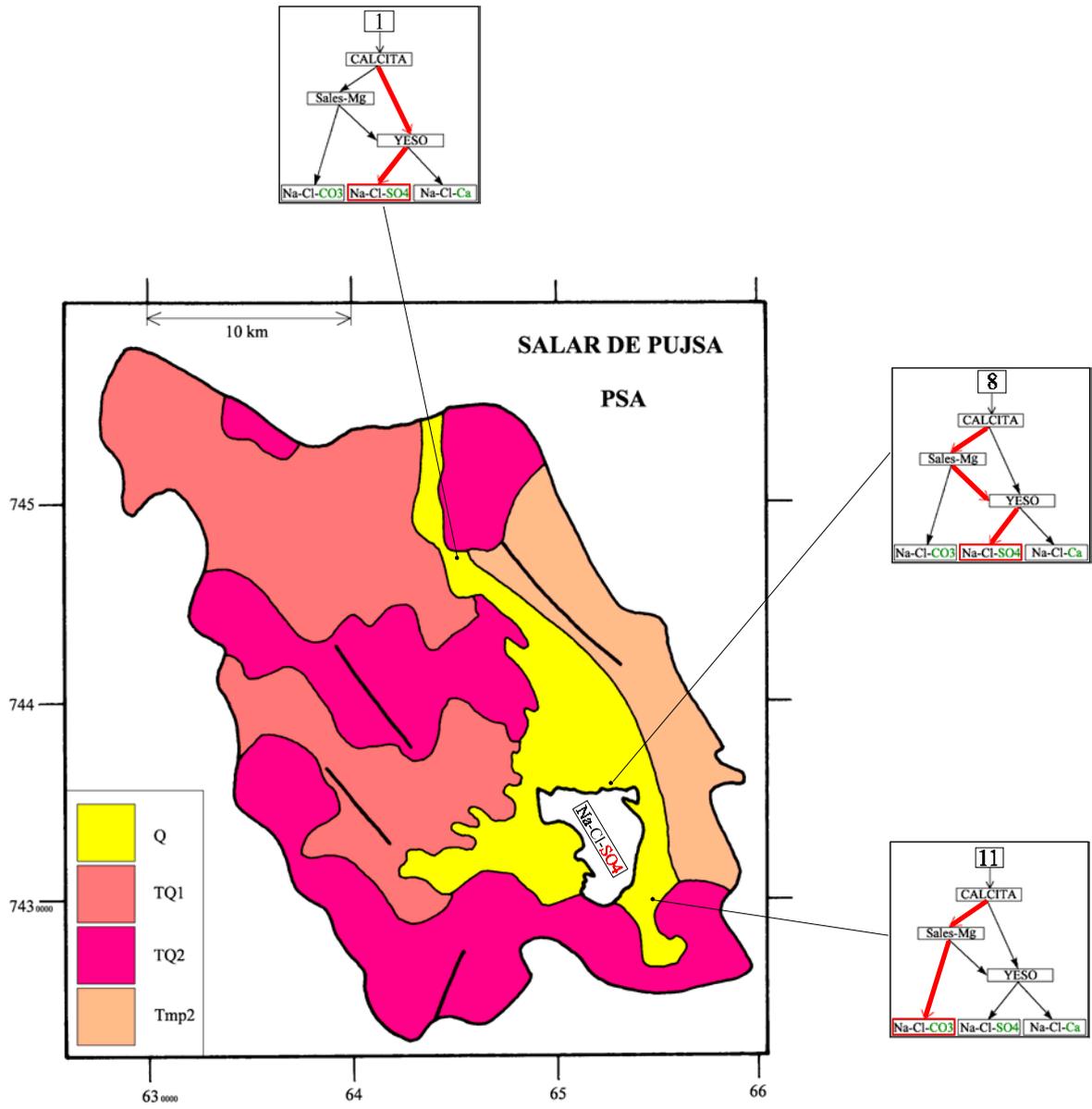
PSA

Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

TQ1 : *Plioceno - Pleistoceno*. Ignimbritas dacíticas, tobas e intercalaciones de sedimentitas clásticas continentales.

TQ2 : *Plioceno - Pleistoceno*. Coladas, tobas y brechas andesíticas y basálticas con intercalaciones de sedimentitas detríticas.

Tmp2 : *Mioceno - Plioceno*. Ignimbritas riolíticas y riolíticas con intercalaciones sedimentarias.



SALAR DE LOYOQUES

Introducción

El salar de Loyoques (o de Quisquiro) se encuentra en el Altiplano de la II Región al sur del salar de Tara. Es un salar de tipo playa con lagunas superficiales de extensión variable y una napa de salmuera a unos decímetros de profundidad. Es una boratera con niveles explotables de ulexita ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$). Los principales aportes superficiales son el río Salado en el sur, que nace en las vegas Ojos del Salado, y el estero Loyoques en el norte. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4150 m
- superficie de la cuenca: 676 km²
- superficie del salar: 80 km²
- superficie de las lagunas 5 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 1°C

Se ha muestreado todas las aguas de aporte que se encontraron, de la napa subterránea del salar y del río Salado. No se pudo extraer muestras de lagunas del salar principal, por problemas de acceso.

Aportes de agua

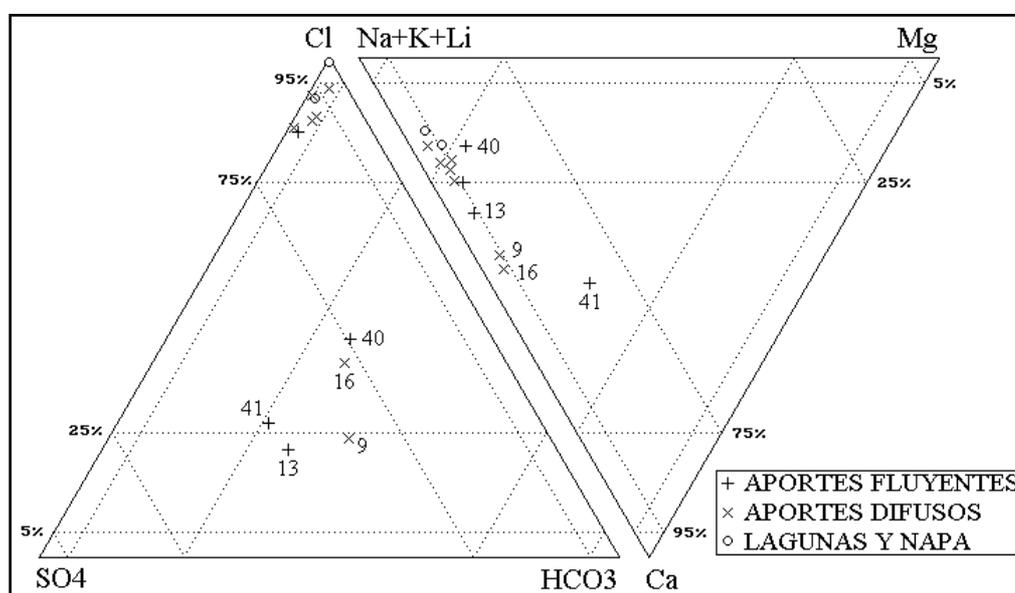


Fig.1 : Composición de las aguas de aporte y de las salmueras del salar de Loyoques.

Hemos prelevado 3 ríos, 2 vertientes fluyentes, 6 vertientes difusas y una napa en la orilla. El rango de salinidad va desde 163 mg/l hasta 15900 mg/l STD. La figura 1 presenta la composición de esas soluciones. Se distingue netamente dos grupos de aguas :

- LOY-9, 13, 16, 40 y 41 de tipo : Na-(Ca) / HCO₃-SO₄-Cl

- LOY-1, 5, 20, 24, 28, 32 y 35 de tipo : Na-(Ca) / Cl

El primer grupo tiene un rango de salinidad de 163 mg/l a 650 mg/l STD y se encuentra a lo largo de la orilla este, mientras que el segundo presenta salinidades desde 2710 mg/l hasta 15900 mg/l con sus aguas al oeste y al norte del salar. Sin embargo, el aporte más salado (LOY-5) se encuentra al este donde predominan las vertientes diluidas. Las figuras 2 y 3 muestran las relaciones entre Na y Cl, de una parte, y Na+Ca y Cl de otra parte.

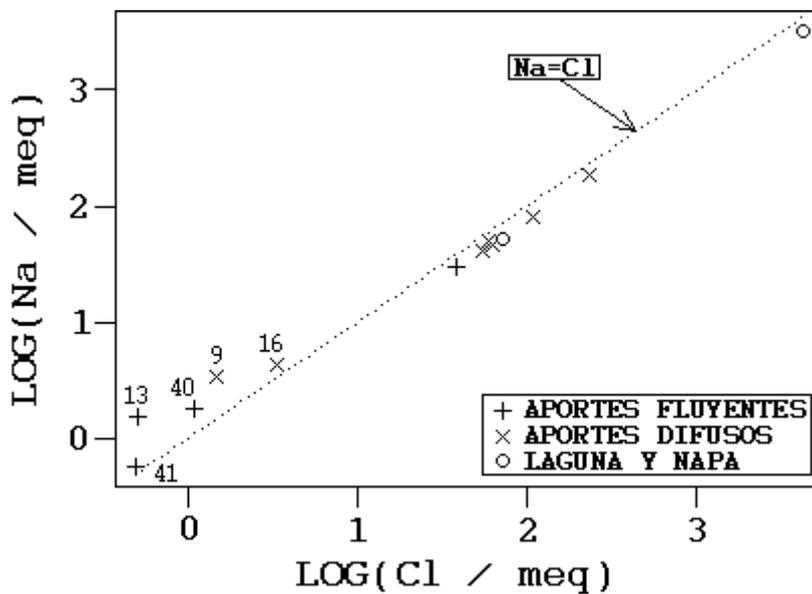


Fig.2 : Relación entre Na y Cl en las aguas del salar de Loyoques

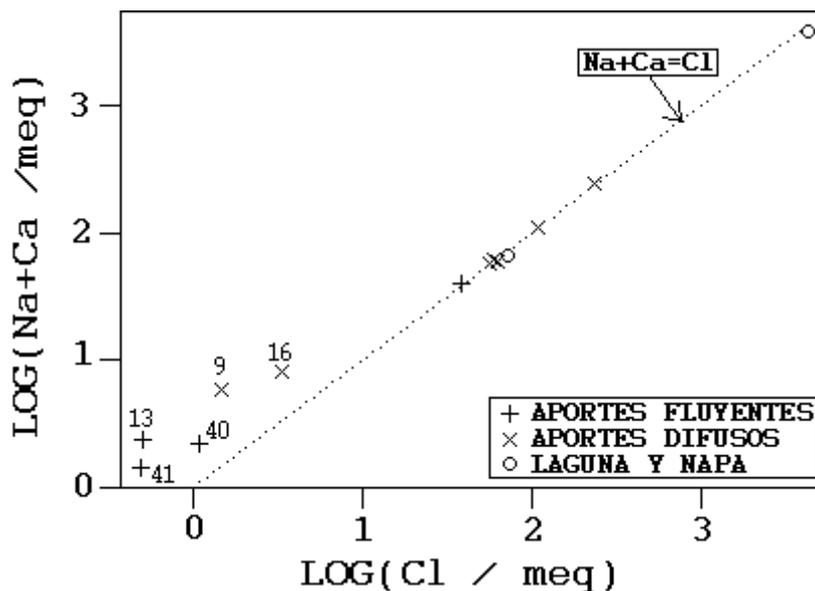


Fig.3 : Relación entre Na+Ca y Cl en las aguas del salar de Loyoques

Se distingue netamente los dos grupos de aguas de aporte. En ninguno de los dos grupos, Na y Cl se encuentran en concentraciones equimolares. Al contrario, las aguas del grupo salado presentan una excelente correlación equimolar entre Na+Ca y Cl. La figura 4 presenta la relación Ca versus SO₄. No aparece ninguna tendencia a la igualdad de las concentraciones entre Ca y SO₄. Estas relaciones sugieren que :

- las aguas de aporte diluidas no han redissuelto ningún tipo de antiguas evaporitas. Deben su composición esencialmente a la alteración de rocas volcánicas de la cuenca de drenaje

- las aguas de aporte saladas no deben su alta salinidad a la redisolución de las evaporitas mas comunes : la halita (NaCl) y el yeso (CaSO₄.2H₂O). Parece más bien que han sido salinizadas por soluciones salinas de tipo Na-Ca / Cl. No consideramos la posibilidad de redisolución de antiguas evaporitas de este tipo químico puesto que el cloruro de calcio es una sal extremadamente soluble que solamente cristaliza a temperaturas muy bajas (< - 40°C) no propias de esta zona.

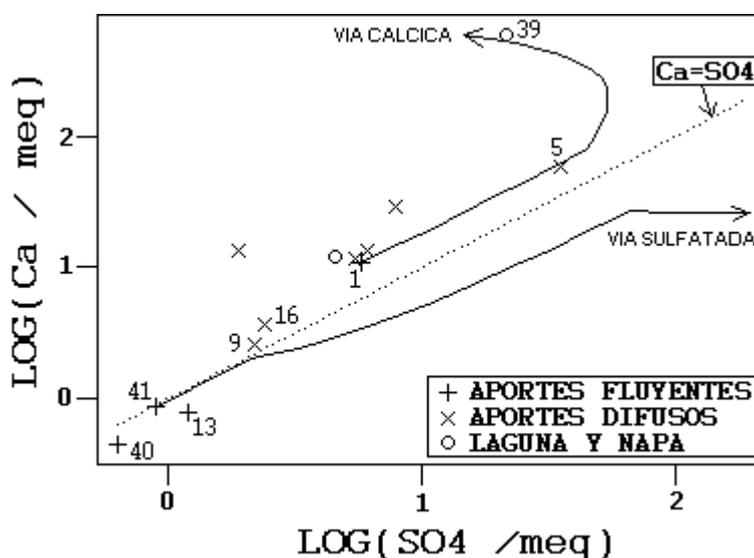


Fig.4 : Relación entre Ca y SO₄ en las aguas de Loyoques.

Se plantea aquí un problema. Con excepción de uno, todos los aportes salados aparecen como vertientes difusas, es decir que fluyen muy lentamente a lo largo de las orillas : podrían provenir estos aportes salados de la lixiviación de cuñas salinas por aguas diluidas ? Por ejemplo, la vertiente difusa (5) es casi una salmuera. Hay un solo aporte del grupo salado que no es una vertiente difusa : el Estero Loyoques (LOY-1), la que también es la menos concentrada del grupo (2710 mg/l STD). Es entonces la única agua del grupo salado para la cual estamos seguros, por ahora, de que se trata de un aporte. Las demás podrían ser una mezcla de aguas de aporte diluidas con salmueras del mismo salar.

Consideremos el caso de la vertiente difusa más concentrada: LOY-5 (15900 mg/l STD). Si esta solución proviniera de la mezcla de la salmuera subterránea (39) con aguas diluidas como LOY-40 (la más cercana), la concentración en SO₄ sería de 95 mg/l para una mezcla de misma salinidad que LOY-5 (6,5% LOY-39 con 93,5% LOY-40). Sin embargo, el contenido en sulfato

de LOY-5 es de 1680 mg/l, superior aún al de la salmuera subterránea (1030 mg/l). Eso sugiere que LOY-5 no es una mezcla de salmuera del salar con aportes diluidos.

Composición de la pequeña laguna y de la salmuera subterránea

La laguna de las vegas Ojos del Salado (20) y la napa subterránea del salar (39) son del mismo tipo químico : Na-(Ca) / Cl, a pesar de tener salinidades muy diferentes : 4 g/l para la lagunita y 242 g/l para la napa.

Vías evolutivas y relación con la geología

Las aguas de aporte diluidas siguen tres vías evolutivas :

- LOY-40 sigue la vía carbonatada, típica de aguas muy diluidas que drenan terrenos volcánicos sin azufre.

- LOY-9 y 13 siguen la vía alcalina sulfatada

- LOY-16 y 41 siguen la vía neutra sulfatada

Las vías sulfatadas están también en buen acuerdo con la litología. La transición de la vía alcalina hacia la vía neutra refleja probablemente un aumento del contenido en azufre, u otras mineralizaciones con azufre, en las rocas del sector oriental de la cuenca.

Las aguas de aporte saladas siguen todas la vía neutra calcica, típica de aguas de alteración de rocas sedimentarias. Como se puede ver en el mapa geológico no aparece ningún terreno sedimentario en la cuenca de Loyoques, por tanto estas soluciones no provienen de la alteración de las formaciones superficiales de la cuenca de drenaje.

Para recalcar las vías evolutivas cálcicas y sulfatadas que siguen los aportes de Loyoques, representamos en la figura 4 dos trayectos evaporatorios típicos:

- el agua (1) del grupo salado (estero Loyoques) se concentra por evaporación concentrándose en Ca en desmedro del sulfato. El trayecto pasa casi por el punto representativo de la napa subterránea. En lo que se refiere a Ca y SO₄, la salmuera del salar parece bien provenir de la evaporación del agua salobre del estero.

- el agua diluida de la vertiente 41 sigue la via sulfatada, concentrándose en SO₄.

Puesto que la composición de la salmuera subterránea es efectivamente de tipo Na-(Ca) /Cl, se puede decir de manera abreviada que el salar de Loyoques no corresponde a la litología de su cuenca de drenaje. El origen de las sales y salmueras del salar queda desconocido. Podrían provenir de niveles sedimentarios por debajo de las formaciones volcánicas o, también, del exterior de la cuenca. Las aguas de aporte diluidas no parecen tener mucha influencia en el salar.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la napa del salar.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
LOY-39	6,57	11,2	148000	1030	498	11,5	75000	1700	273	12000	2070	
LOY-24E	6,95	3,83	146000	836	701	9,91	71500	1630	194	15800	2190	0,038
LOY-35E	7,08	4,07	147000	981	628	9,68	72300	2620	325	13000	3010	0,045
LOY-5E	7,13	3,76	145000	1480	643	9,51	78200	2420	306	8210	2660	0,058
LOY-1E	6,90	3,26	145000	1260	838	9,55	75100	2700	338	9680	3110	0,080
LOY-28E	7,01	3,07	144000	2000	813	9,61	81300	3040	285	6030	1630	0,150
LOY-32E	6,56	2,44	142000	1510	1390	9,77	76800	3360	327	8040	2040	0,168
LOY-16E	6,99	3,86	121000	24000	1390	11,0	74100	10600	346	667	4030	1,010
LOY-9E	6,82	3,63	117000	25900	1730	11,3	70100	13300	398	636	4590	1,100
LOY-13E	6,82	4,34	99500	33000	2170	14,5	63200	15500	415	700	5500	1,210
LOY-40E	9,68	211	115000	21700	563	24,7	84600	7560	549	0,554	1,80	1,410
LOY-41E	7,17	10,4	71000	74600	1970	15,8	39300	22600	56,8	353	16500	1,680

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con la napa del salar de Loyoques.
ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

El punto más impactante es el salto en el coeficiente de desviación que separa exactamente el grupo salado del grupo diluido. Las aguas evaporadas del grupo salado (24E a 32E) tienen una buena correlación con la napa, con coeficientes de desviación de 0,038 hasta 0,168. Al contrario, las aguas del grupo diluido no presentan correlación con la napa; sus coeficientes de desviación son pésimos : de 1 a 1,68. Se desprende entonces que la napa del salar no proviene de la evaporación de las aguas diluidas, sino de las aguas de aporte saladas.

Hemos aplicado el mismo procedimiento comparativo con la vertiente más concentrada (LOY-5) como si ella fuera una salmuera de laguna o napa. La tabla 2 presenta el resultado de las simulaciones

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
LOY-5.EQ	7,93	0,694	8050	1680	37,6	25,5	4330	134	16,9	1130	147	
LOY-1E	7,92	0,762	8070	1670	50,9	31,4	4170	150	18,8	1210	173	0,019
LOY-24E	7,89	0,685	8800	870	44,4	31,3	4300	98,3	11,7	1300	132	0,074
LOY-28E	8,00	0,917	8490	1080	52,8	31,3	4810	180	16,9	771	96,2	0,076
LOY-32E	7,96	1,07	8270	1200	91,1	31,3	4470	195	19,0	946	118	0,108
LOY-35E	7,95	0,753	9240	391	41,2	31,2	4560	165	20,5	963	190	0,179
LOY-16E	8,10	1,35	5130	4670	77,0	31,9	4250	451	14,7	616	171	0,317
LOY-9E	8,71	5,80	3260	6400	103	33,1	4710	369	11,0	44,4	162	0,751
LOY-13E	8,71	5,93	2320	7190	104	33,4	4580	362	9,68	46,2	164	0,828
LOY-40E	9,14	16,3	4940	3790	138	35,2	5120	324	23,5	5,30	20,6	0,928
LOY-41E	8,17	1,99	3380	6310	118	32,3	2620	1100	2,70	526	791	1,030

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con la vertiente más salada (5).
ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Puesto que LOY-5 está muy sobresaturado respecto a la calcita, se ha debido equilibrar la solución precipitando este mineral. Se nota la excelente correlación entre el agua de la vertiente salada y la del estero evaporado (LOY-1E). En consecuencia, LOY-5 proviene de la evaporación de una agua casi idéntica a LOY-1. Eso confirma que no se trata de una mezcla de salmuera con agua diluida. Napas de aguas parecidas a la del estero (LOY-1) se descargan lentamente en vertientes difusas a lo largo de las orillas evaporándose a través de los sedimentos del borde del salar.

Calidad de aguas

Un agua solamente cumple estrictamente con las normas de potabilidad: LOY-41. Las cuatro otras aguas de aporte diluidas tienen un exceso de arsénico respecto a la norma de potabilidad: desde 2 veces para LOY-40 hasta 14 veces para LOY-9. Todos los demás componentes presentan concentraciones aceptables para este uso. En cuanto a las aguas de aporte saladas, todas están muy por encima de los límites permitidos para uso potable en varios componentes.

Balance hídrico

No tenemos ningún dato químico sobre las lagunas. Según los mapas, la superficie total de ellas es de 5 km². Podemos adelantar el orden de magnitud del volumen total de aportes V_{ap} a las lagunas (pero no al salar entero):

$$V_{ap} = S(H_e - H_p) = 6\,750\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 210 \text{ l/s}$$

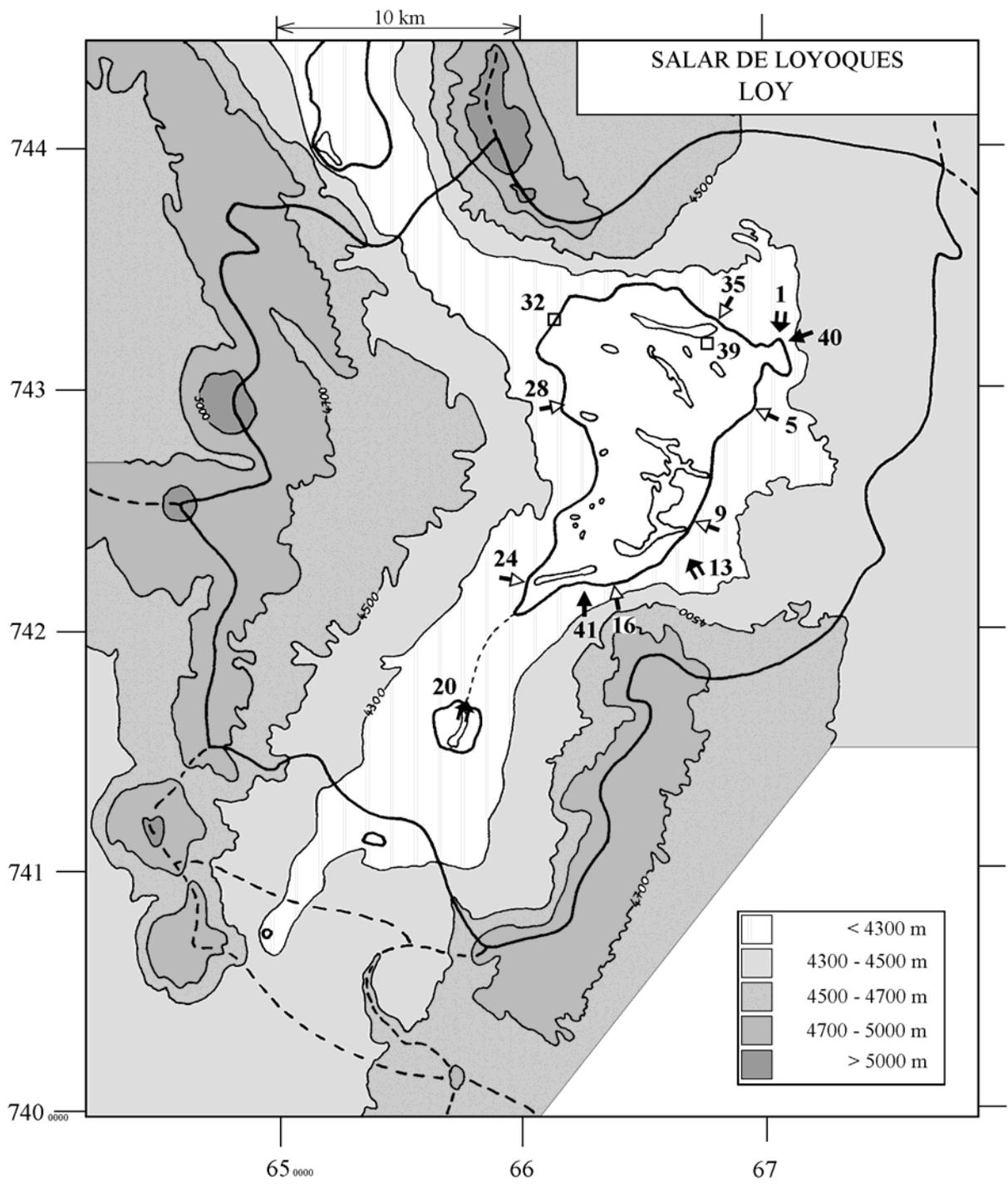
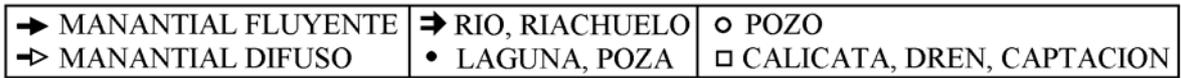
con: $S = 5 \times 10^6 \text{ m}^2$ $H_e = 1,5 \text{ m/año}$ $H_p = 0,15 \text{ m/año}$

Conclusiones

El salar de Loyoques recibe dos tipos de aportes muy distintos:

- aguas diluidas de tipo Na-(Ca) / HCO₃-SO₄-Cl
- aguas de salobres a saladas de tipo Na-(Ca) / Cl

Al evaporarse, las aguas diluidas siguen las vías carbonatadas o sulfatadas, mientras que las aguas saladas siguen la vía neutra cálcica. La salmuera subterránea, de tipo cálcica Na-(Ca) / Cl, proviene de la evaporación de los aportes salados y no de las aguas diluidas. Las vertientes saladas provienen de la descarga muy lenta de napas salobres de tipo Na-(Ca) / Cl que empiezan a evaporarse un poco antes de llegar al salar. Las aguas diluidas provienen de la alteración de rocas volcánicas de la cuenca. El origen de las aguas de aporte salobres es desconocido, sospechándose una contaminación por antiguas soluciones cálcicas. Las aguas salobres de Loyoques son muy parecidas a las del sector oriental del salar de Ascotán. Las aguas de aporte diluidas son de calidad buena a regular, con exceso de arsénico para uso potable. La importancia de estas últimas aguas en la cuenca es dudosa, puesto que no influyen en lo mínimo en la química del salar. Pero no olvidemos que la alta concentración de los aportes salados podría esconder la influencia de aportes muy diluidos aun en grandes volúmenes.



**SALAR DE LOYOQUES
LOY**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
LOY-1	08/10/93	09 ^H 30	680300	7432525	4155	Estero Loyoques
LOY-5	08/10/93	10 ^H 00	679950	7429525	4152	Manantial difuso
LOY-9	08/10/93	10 ^H 30	677625	7424300	4152	Manantial difuso
LOY-13	08/10/93	11 ^H 00	677175	7422150	4240	Río
LOY-16	08/10/93	11 ^H 45	673550	7421675	4152	Manantial difuso
LOY-20	08/10/93	12 ^H 30	667675	7416950	4150	Río Ojos del Salado
LOY-24	08/10/93	15 ^H 00	670325	7422625	4190	Manantial difuso
LOY-28	08/10/93	16 ^H 15	671500	7429550	4152	Manantial difuso
LOY-32	08/10/93	16 ^H 30	671325	7432850	4150	Napa (cateo)
LOY-35	08/10/93	17 ^H 00	677800	7432950	4152	Manantial difuso
LOY-39	08/10/93	17 ^H 35	677700	7431700	4150	Napa (cateo)
LOY-40	11/07/94		681113	7432404	4220	Manantial corriente
LOY-41	11/07/94	17 ^H 52	673092	7434684	4360	Manantial corriente

SALAR DE LOYOQUES
LOY

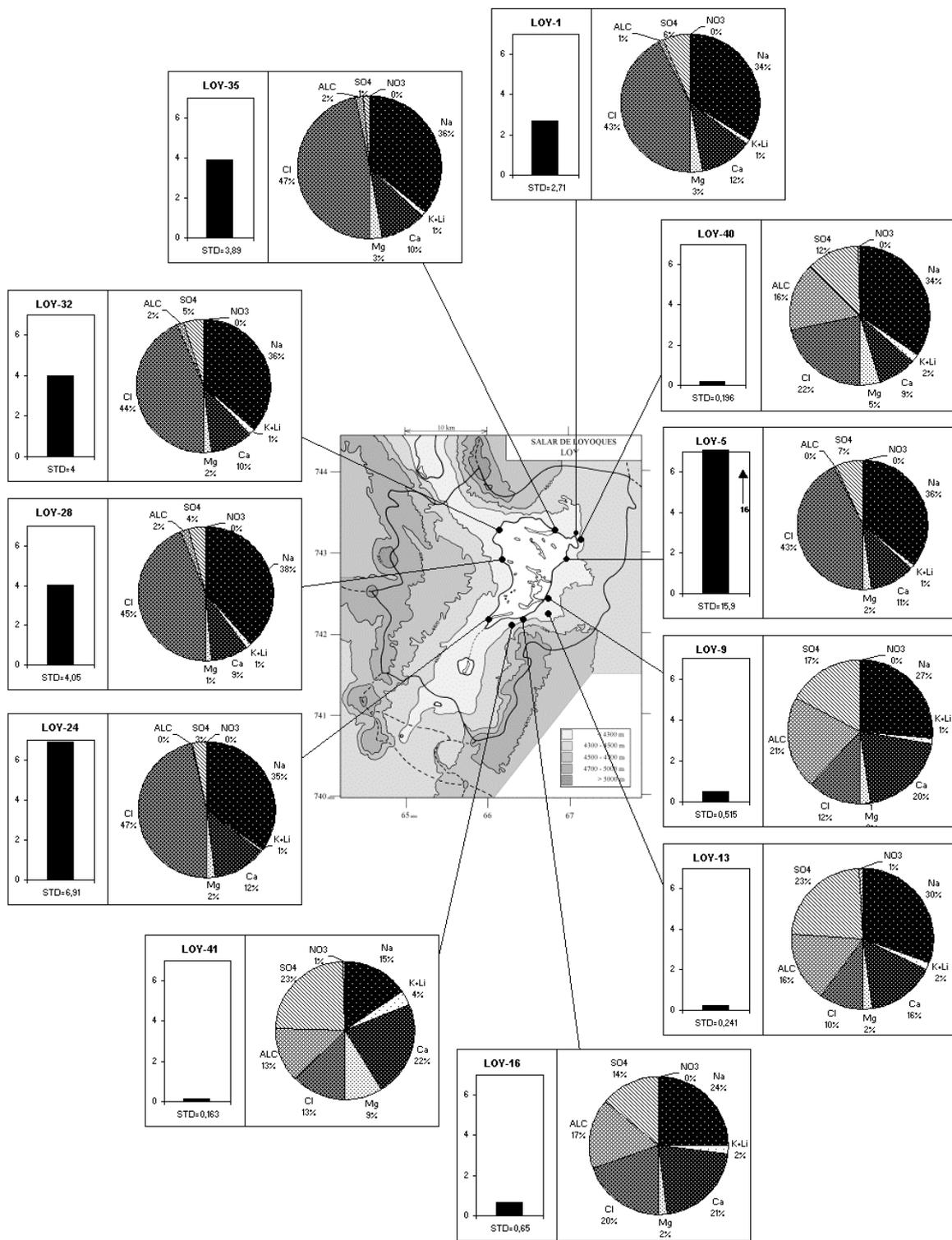
NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
LOY-1	4570	5	1,002	9,50	0,979	0,40	1360	0,278	0,0171	276	0,062	nd	8,44	17,5	0,428	0,22	676	24,8	3,11	219	28,7
LOY-5	16060	6	1,008	8,37	2,49	2,91	8170	1,55	0,0532	1680	0,434	0,2	37,6	25,5	7,94	0,99	4260	134	16,9	1170	147
LOY-9	637,0	6	1,001	7,41	2,61	1,16	53,3	0,042	0,0156	105	0,124	nd	1,69	23,9	0,712	0,38	78,2	6,02	0,180	50,9	3,47
LOY-13	279,0	17	1,000	8,08	0,828	0,46	18,3	0,026	0,0031	57,1	2,23	nd	0,822	24,9	0,588	nd	35,9	2,85	0,076	15,9	1,36
LOY-16	890,0	13	1,001	7,25	2,88	1,24	120	0,055	0,0189	115	nd	nd	1,82	19,8	0,202	0,29	101	10,6	0,347	73,8	4,03
LOY-20	7020	21	1,004	8,43	1,22	1,41	2280	0,491	0,0117	219	0,124	nd	7,93	22,5	0,706	0,68	1170	43,4	2,42	238	47,1
LOY-24	11140	17	1,005	7,30	0,812	1,63	3830	1,61	0,0452	377	0,062	nd	19,2	26,5	0,636	0,18	1850	42,6	5,05	573	57,1
LOY-28	6720	13	1,003	7,70	2,45	1,25	2090	0,382	0,0357	263	0,062	nd	12,9	19,5	0,127	0,40	1160	43,8	4,11	233	23,4
LOY-32	6590	10	1,003	7,88	2,24	0,42	2030	0,807	0,0418	290	2,54	nd	22,1	24,2	1,28	0,11	1060	47,3	4,61	269	28,7
LOY-35	6830	11	1,003	8,01	2,07	0,32	2200	0,443	0,0085	91,7	0,062	nd	9,66	20,7	0,030	0,18	1050	38,7	4,80	264	44,5
LOY-39	200000	5	1,160	6,57	11,2	0,19	148000	5,21	0,286	1030	43,4	1,3	498	11,5	12,9	na	75000	1700	273	12000	2070
LOY-40	307,0	10,1	1,000	7,54	0,814	na	39,4	0,041	0,0072	30,1	0,874	na	1,10	19,7	0,094	na	40,7	2,58	0,187	9,14	2,96
LOY-41	236,0	9,8	1,000	7,35	0,501	na	17,4	0,021	0,0019	43,0	1,63	na	0,605	28,6	0,028	na	13,4	5,67	0,014	17,6	4,06

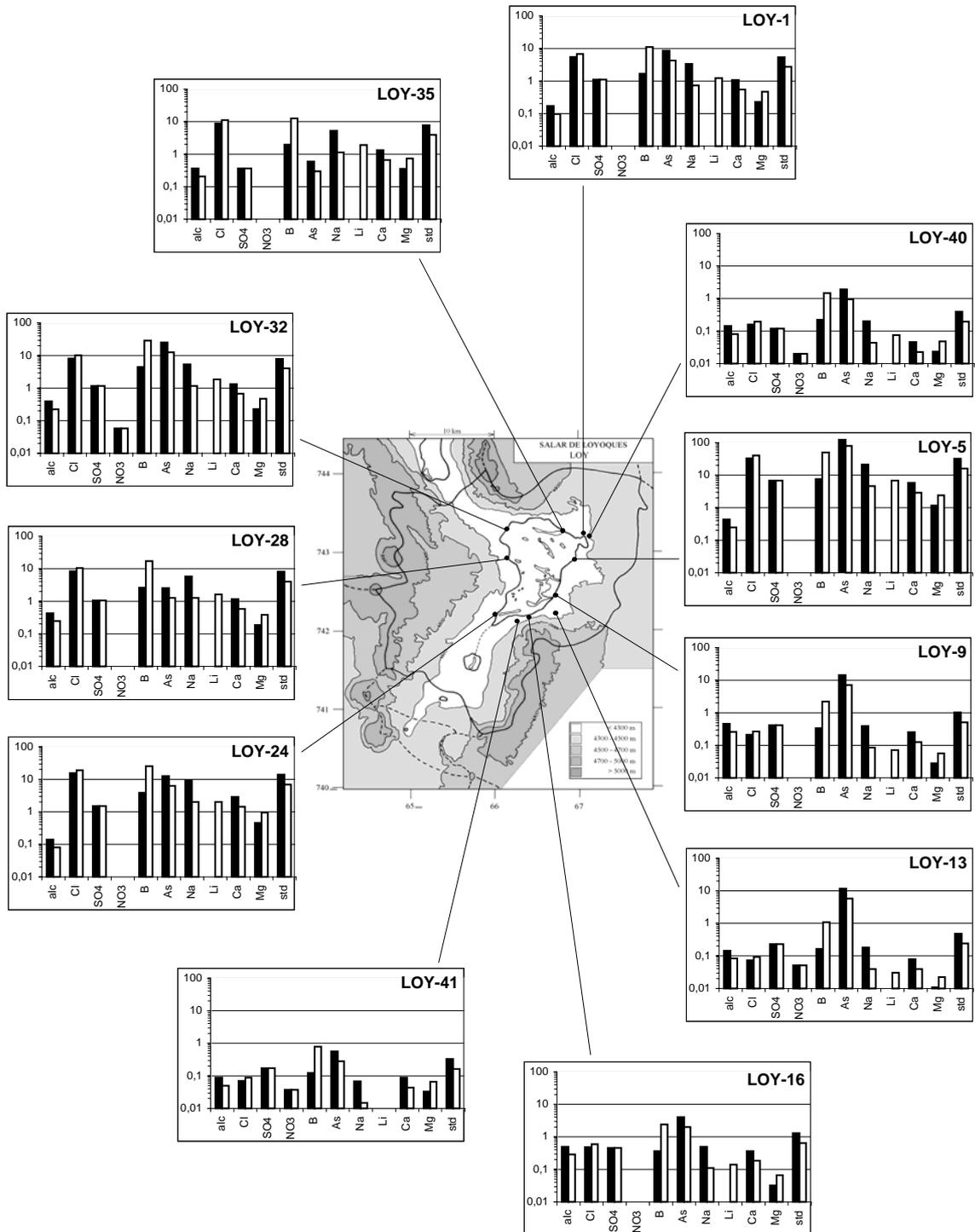
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%	NUMERO	$\delta^{18}O$	δ^2H
LOY-1	2710	13,1	4,92	0,008	43,76	45,17	3,2	LOY-40	-12.37	-102.1
LOY-5	15905	102	6,96	0,70	261,2	267,7	2,4	LOY-41	-12.32	-94.6
LOY-9	514,6	159	0,24	13	6,427	6,353	1,2			
LOY-13	240,9	48,7	0,36	0,66	2,550	2,593	1,7			
LOY-16	650,4	175	0,30	17	8,730	8,726	0,04			
LOY-20	4156	57,6	3,24	0,28	68,24	70,16	2,8			
LOY-24	6913	47,0	0,30	3,2	115,6	116,8	1,0			
LOY-28	4053	145	1,14	4,4	65,56	67,00	2,2			
LOY-32	3999	127	1,50	2,8	63,94	65,55	2,5			
LOY-35	3893	118	1,98	1,8	64,01	66,00	3,1			
LOY-39	242456	-	-	-	4111	4204	2,2			
LOY-40	196,4	49,3	0,06	2,7	2,563	2,566	0,1			
LOY-41	162,5	30,4	0,06	2,6	1,941	1,912	1,5			

Análisis de oxígeno-18
y deuterio

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %





MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

LOY

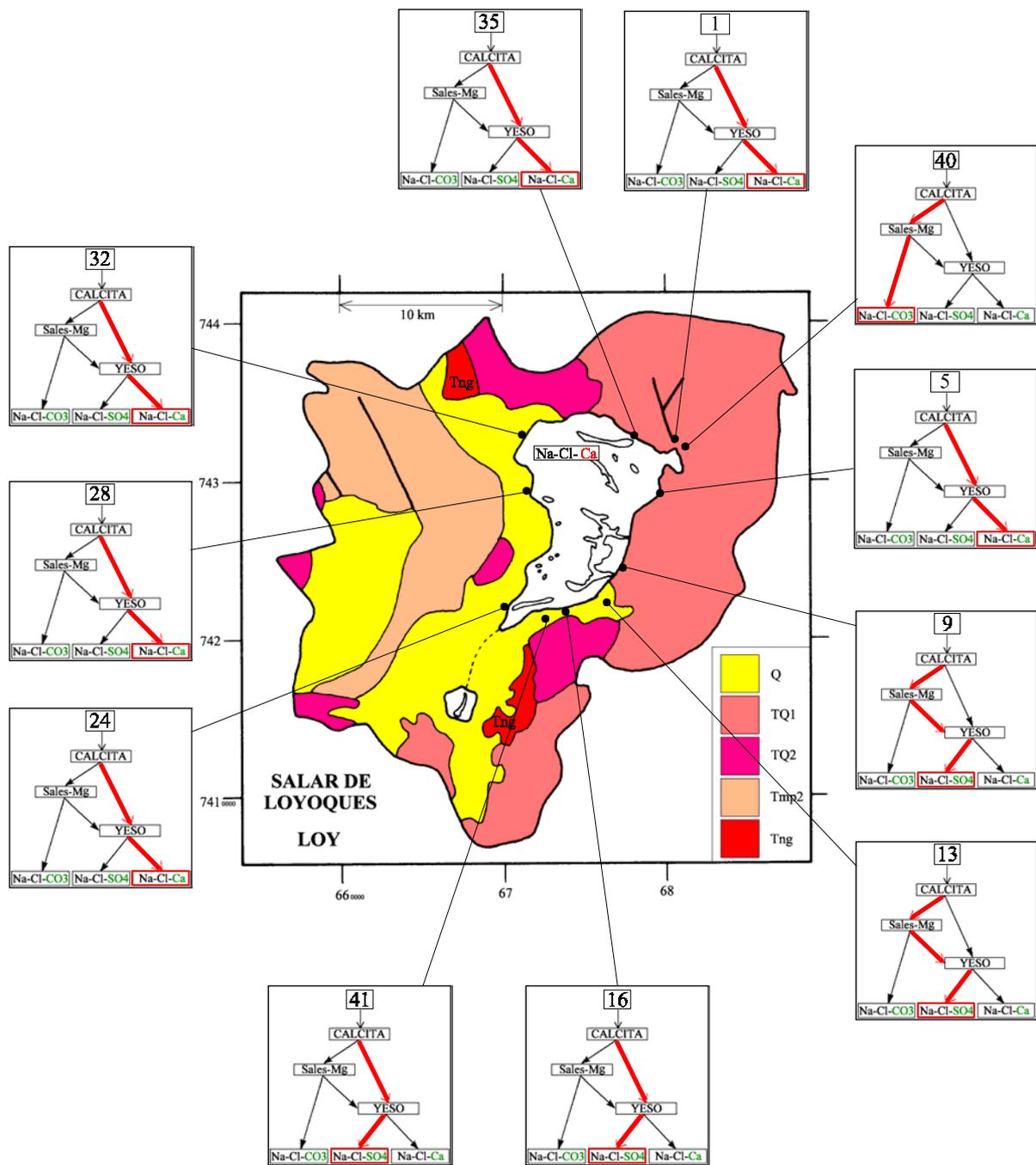
Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

TQ1 : *Plioceno - Pleistoceno*. Ignimbritas dacíticas, tobas e intercalaciones de sedimentitas clásticas continentales.

TQ2 : *Plioceno - Pleistoceno*. Coladas, tobas y brechas andesíticas y basálticas con intercalaciones de sedimentitas detríticas.

Tmp2 : *Mioceno - Plioceno*. Ignimbritas riolíticas y riodacíticas con intercalaciones sedimentarias.

Tng : *Neogeno*. Rocas plutónicas e hipabisales.



LAGUNA TRINCHERA LAGUNA CHIVATO MUERTO

Introducción

Las lagunas Trinchera y Chivato Muerto se encuentran en el Altiplano de la II Región. Son pequeñas depresiones con agua salada en la pampa que prolonga la cuenca del salar de Loyoques al sur. Presentan notorias variaciones estacionales de la superficie. Se puede considerar sus cuencas como sub-cuencas del salar de Loyoques. Chivato Muerto tiene un fuerte olor a compuestos sulfurados, que emanan con diferente intensidad según la época del año. Las curvas de nivel en el mapa de ubicación sugieren que el movimiento de las napas subterráneas debe hacerse de sur a norte según :

Chivato Muerto ==> Trinchera ==> Loyoques

Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

	<u>Trinchera</u>	<u>Chivato</u>
- altura:	4290 m	4295 m
- superficie de la cuenca:	59 km ²	41 km ²
- superficie del salar :	0,4 km ²	-
- superficie de la laguna	0,3 km ²	0,03 km ²
- precipitaciones:	200 mm/año	200 mm/año
- evaporación potencial:	1500 mm/año	1500 mm/año
- temperatura media:	0°C	0°C

No se ha encontrado ningún aporte nítido. En la orilla de la laguna Chivato Muerto hemos prelevado un agua más diluida que la laguna que podría corresponder a una mezcla de agua diluida de la napa contaminada por la cuña salina de la laguna. Hemos clasificado, sin mayor justificación esta agua dentro de las vertientes difusas, pero podría tratarse esencialmente de agua de la laguna. Además, esta agua es más salada que la laguna Trinchera. Hemos sacado una muestra de salmuera de cada laguna. Con solamente tres muestras, las interpretaciones no pueden ser más que muy preliminares.

Composición de las aguas

Las tres aguas tienen una similar composición porcentual (Fig.1) con leves variaciones en los componentes catiónicos menores Ca y Mg. Las salinidades y los tipos químicos son :

- Laguna Trinchera :	11 g/l	Na-(Ca) / Cl-(SO ₄)
- “ Vertiente ” Chivato Muerto	31 g/l	Na-(Mg) / Cl-SO ₄
- Laguna Chivato Muerto	97 g/l	Na-(Mg) / Cl-SO ₄

No se puede interpretar la salinidad de la “ vertiente ” puesto que que la influencia de la propia laguna es dominante, ni tampoco determinar la composición del agua que diluye la salmuera. Las

aguas de las dos lagunas pertenecen al mega-grupo sulfatado, lo que no es discrepante con la litología volcánica de la cuenca de drenaje. El agua de la “vertiente” pertenece a la vía neutra sulfatada, lo que tampoco nos permite concluir sobre un origen de los componentes por alteración de rocas volcánicas o sedimentarias o por redisolución de antiguas evaporitas.

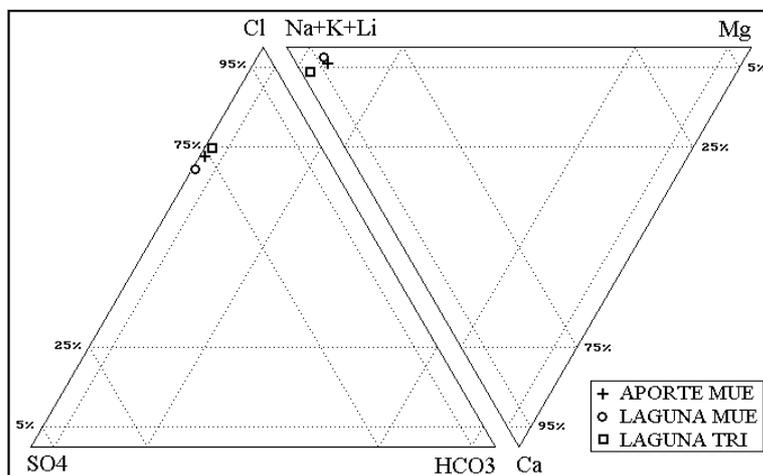


Fig.1: Composición de aguas de las lagunas del Chivato Muerto y de Trincherera

Calidad de agua

Las aguas son totalmente impropias para cualquier uso. Pero eso no descarta la posibilidad de encontrar napas de aguas diluidas en las cuencas de drenaje. La presencia de estas lagunas, indica por lo menos la existencia de napas no muy profundas en las cuencas de drenaje.

Balance hídrico

Puesto que no disponemos de la composición de los aportes es imposible calcular la tasa de infiltración. Lo único que podemos establecer es una estimación muy gruesa del volumen de aportes suponiendo que los aportes no son muy concentrados. La altura de evaporación potencial de la laguna Chivato Muerto debe ser reducida de 10 % para tomar en cuenta la salinidad de 97 g/l de la salmuera. Se obtiene :

- Chivato Muerto ($H_e = 1,35$ m/año ; $H_p = 0,2$ m/año ; $S = 0,03$ km²)

$$V_{ap} = S(H_e - H_p) = 34\,500 \text{ m}^3/\text{año} = 1 \text{ l/s}$$

- Trincherera ($H_e = 1,5$ m/año ; $H_p = 0,2$ m/año ; $S = 0,3$ km²)

$$V_{ap} = S(H_e - H_p) = 390\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 12 \text{ l/s}$$

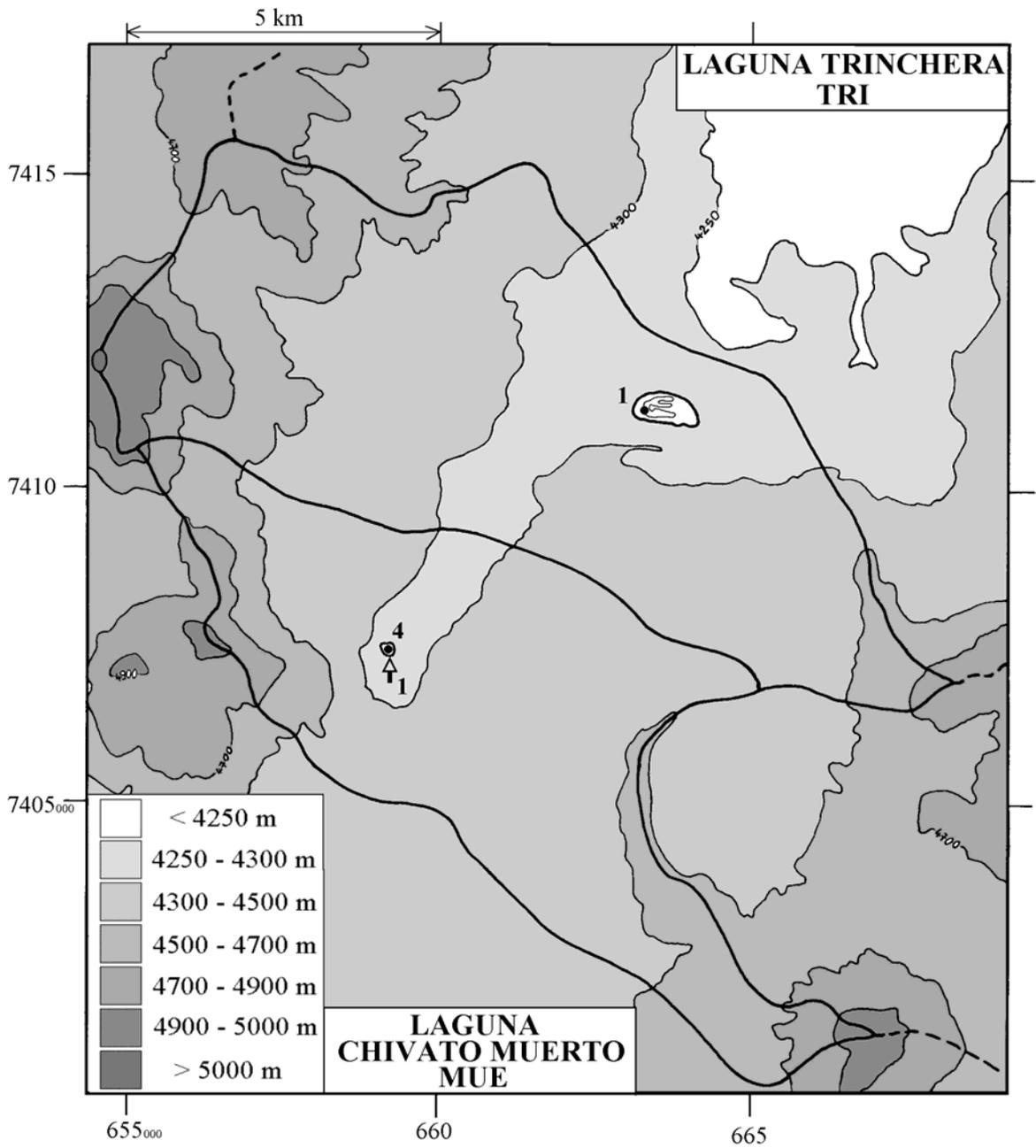
Los caudales entrantes son muy débiles. Esto sugiere que las lagunas son afloramientos del nivel freático del área. En otras palabras son como ventanas abiertas sobre las napas donde las aguas se evaporan.

Conclusiones

Las dos pequeñas lagunas Trincheras y Chivato Muerto no presentan gran interés como recursos de agua. Parecen ser simplemente afloramientos de napas. Por lo menos indican la existencia de napas subterráneas poco profundas, sobre las cuales no tenemos ninguna idea de su composición y calidad.

Referencias y estudios anteriores

Alonso, H. y Vargas, L. 1988. Hidroquímica de lagunas del Altiplano, Segunda Región. V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 Agosto de 1988, Actas, tomo II, D35-D43.



**LAGUNA CHIVATO MUERTO / LAGUNA TRINCHERA
MUE / TRI**

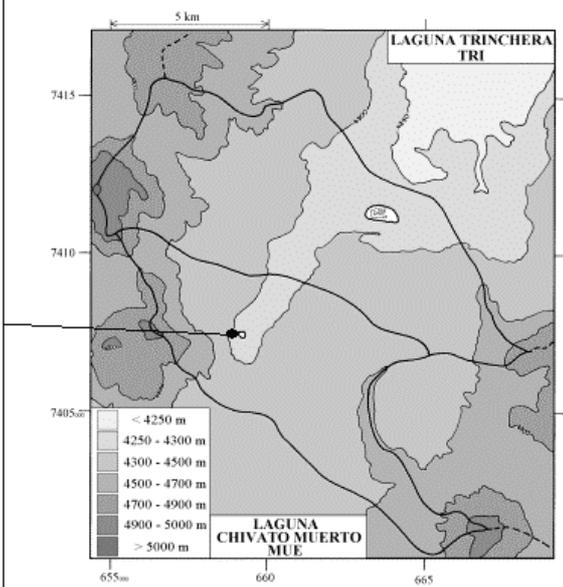
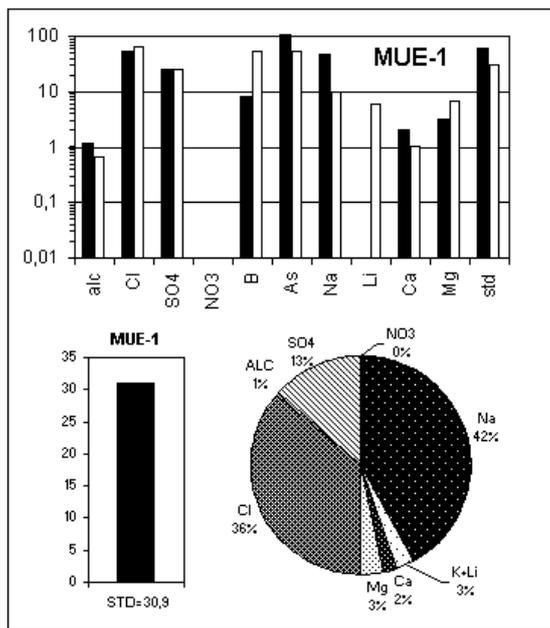
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
MUE-1	11/10/93	10 ^H 50	659300	7406775	4295	Manantial difuso
MUE-4	11/10/93	11 ^H 10	659250	7407175	4295	Laguna
TRI-1	11/10/93	10 ^H 15	663325	7411400	4290	Laguna

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
MUE-1	39200	11	1,023	8,67	6,73	6,0	12900	3,05	0,095	6290	nd	0,3	39,6	20,8	5,36	0,3	9320	981	15,1	405	401
MUE-4	97900	10	1,070	8,71	12,0	6,7	38700	9,99	0,897	22500	0,2	0,8	225	43,1	18,7	2,3	30800	1820	46,4	790	1240
TRI-1	18200	7	1,01	7,49	2,73	5,9	4650	1,13	0,128	1980	3,2	0,1	18,3	13,6	4,14	0,04	3520	162	4,91	216	41,8

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
 CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
MUE-1	30916	278	31,1	0,70	485,5	502,1	3,4
MUE-4	97153	128	29,9	0,26	1535	1571	2,3
TRI-1	10841	163	0,6	7,9	172,1	175,3	1,9

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
 S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

TRI / MUE

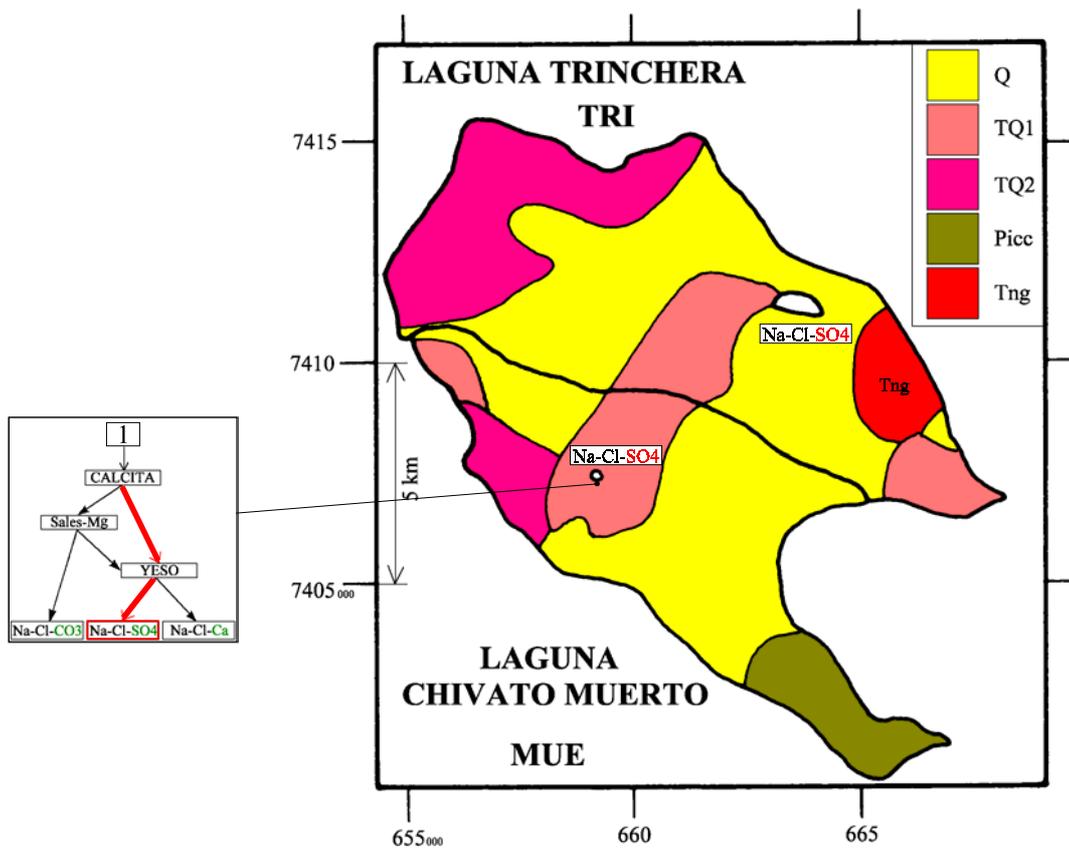
Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

TQ1 : *Plioceno - Pleistoceno*. Ignimbritas dacíticas, tobas e intercalaciones de sedimentitas clásticas continentales.

TQ2 : *Plioceno - Pleistoceno*. Coladas, tobas y brechas andesíticas y basálticas con intercalaciones de sedimentitas detríticas.

Picc : *Plioceno*. Depósitos piroclásticos no consolidados de cenizas, pómez y bloques.

Tng : *Neogeno*. Rocas plutónicas e hipabisales.



SALAR DE AGUAS CALIENTES 2

Introducción

El salar de Aguas Calientes 2 se encuentra en el sector central del Altiplano de la II Región. El aporte superficial más importante es el río Pili en el norte. Otro aporte importante es la quebrada de Chamaca que, a igual que el anterior, forma unas vegas al desembocar en el salar. Es un salar de tipo playa con varias lagunas de extensión variable, siendo la principal la de Aguas Calientes en el sur. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4200 m
- superficie de la cuenca: 1168 km²
- superficie del salar: 134 km²
- superficie de las lagunas: 9 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura: 1°C

Se pudo obtener solamente 6 muestras: 5 de vertientes y una de laguna. Son muy pocas para un estudio adecuado de un salar de este tamaño.

Composición de las aguas

Las composiciones de aguas del salar de Aguas Calientes 2 están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Se muestrearon 2 vertientes fluyentes y tres difusas. Todas surgen a la orilla misma del salar y tienen salinidades elevadas. Cuatro son salobres (AC2-1, 4, 7 y 13), desde 2530 mg/l hasta 5930 mg/l de STD, y una salada (AC2-15), con 13600 mg/l de STD. La única laguna que se ha podido muestrear tiene una salinidad de 11500 mg/l de STD, o sea inferior a la salinidad de la vertiente más concentrada.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VÍA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
AC2-1	2530	Na-Ca-(Mg)	/ Cl-SO4-(HCO3)	SO4 (N)
AC2-13	3797	Na-Ca-(Mg)	/ Cl-SO4	Ca
AC2-4	3902	Na-Ca	/ Cl-SO4	SO4 (N)
AC2-7	4202	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-SO4-(HCO3)	SO4 (N)
AC2-10	13656	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO4)	Ca
<u>LAGUNA</u>				
AC2-15	11544	Na-Ca-(Mg)	/ Cl-(SO4)	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Aguas Calientes 2. SO₄ (N) = vía neutra sulfatada; Ca = vía cálcica.

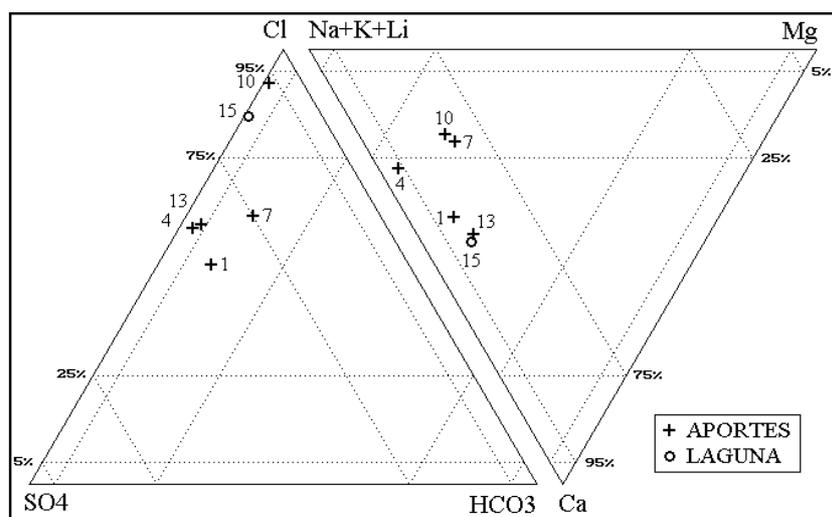


Fig.1: Composición de los aportes y de una laguna del salar de Aguas Calientes 2.

Las cuatro vertientes salobres tienen una composición más o menos homogénea mientras que la vertiente salada tiene una composición aniónica particular, mucho más rica en cloruro. Una primera pregunta se refiere al origen de las altas salinidades de los aportes. Las figuras 2 y 3 presentan las relaciones Na versus Cl y Ca versus SO₄. Los puntos representativos de la vertiente fluyente (1) se encuentran casi exactamente encima de las rectas de equimolaridad Na = Cl y Ca = SO₄, lo que indica una redisolución de halita (NaCl) y yeso (CaSO₄·2H₂O). Es muy probable que el mismo proceso afecta también, en parte, las aguas salobres de aporte (4, 7 y 13) cuyos puntos no se encuentran muy alejados de las rectas equimolares. Al contrario, el agua salada de la vertiente difusa (10) tiene sus puntos más alejados de las rectas, casi como los de la laguna (15). Eso sugiere que la alta salinidad de la vertiente más concentrada se debe a una cuña de la salmuera del salar en la napa que se descarga en esta orilla. La formación sedimentaria más común en este sector con antiguas evaporitas es la Formación San Pedro. No aparece en la cuenca de Aguas Calientes 2, pero podría encontrarse recubierta por niveles volcánicos.

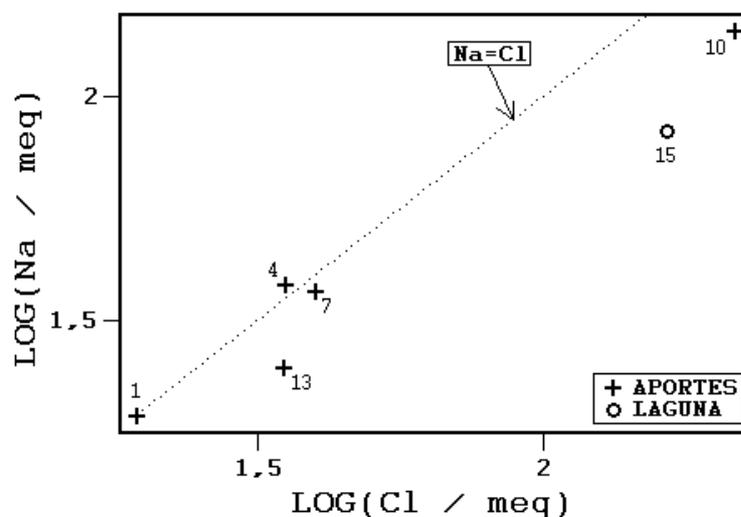


Fig.2 : Relación entre Na y Cl en las aguas del salar de Aguas Calientes 2.

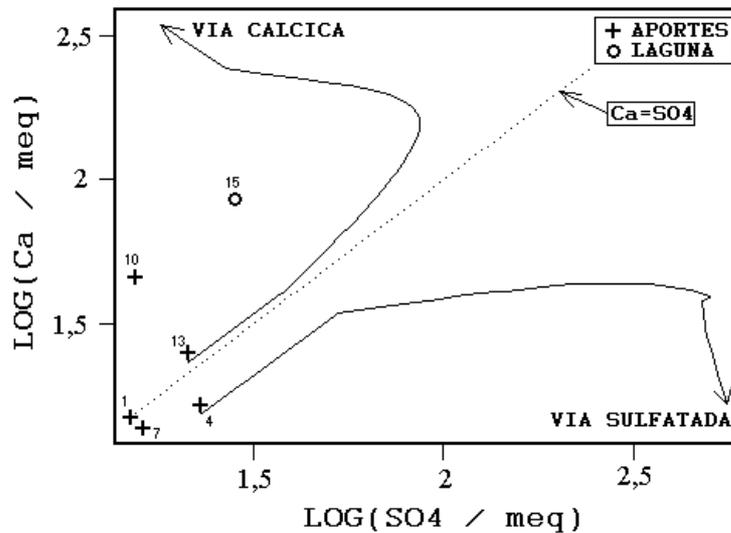


Fig.3 : Relación entre Ca y SO₄ en las aguas del salar de Aguas Calientes 2.

Vías evolutivas y relación con la geología

Tres vertientes salobres (1, 4, 7) siguen la vía evolutiva neutra sulfatada. La vertiente salada (10) y la vertiente salobre (13) siguen la vía cálcica. Dos trayectos evaporatorios típicos quedan representados en la figura 2. Las aguas iniciales (4 y 13) no son muy diferentes. Pero al evaporarse, su composición cambia drásticamente. La laguna estudiada proviene de la evaporación de aportes de vía evolutiva cálcica, y no sulfatada. Sin embargo, faltan muestras de otras lagunas y de la napa subterránea para caracterizar con más precisión la química del salar. Las aguas de aporte no corresponden a la litología superficial de la cuenca. La vía evolutiva cálcica caracteriza terrenos sedimentarios que no aparecen en el mapa geológico. La vía neutra sulfatada puede corresponder tanto a terrenos volcánicos ricos en azufre como a niveles sedimentarios. Pero las altas salinidades excluyen un simple origen a partir de la alteración de rocas volcánicas. Hemos visto que antiguas evaporitas han probablemente contribuido a las altas salinidades de los aportes.

Evolución cuantitativa de aguas

La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la laguna. La composición de la laguna ha sido equilibrada con la calcita.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
AC2-15.EQ	7,86	0,477	5840	1320	18,3	28,5	1920	196	3,61	1700	231	
AC2-13E	7,95	0,630	5040	2160	22,6	32,0	2300	386	4,45	1020	323	0,118
AC2-1E	8,03	0,793	4290	3000	26,4	32,1	2780	120	6,24	739	273	0,214
AC2-4E	8,04	0,830	4130	2990	33,1	32,2	2870	365	10,6	711	97,5	0,389
AC2-7E	8,18	1,39	4610	2550	56,8	32,2	2750	254	9,15	368	468	0,459

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con una laguna del salar de Aguas Calientes 2. (ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l).

El agua de aporte cuya evaporación produce la salmuera más parecida a la de la laguna (15) es la vertiente más cercana (AC2-13). Sin embargo, se nota ciertas discrepancias, especialmente en Ca y SO₄, que indican otros aportes a la laguna.

Calidad de aguas

Es obvio, en vista de las altas salinidades de los aportes, que todas las aguas prelevadas están muy lejos de cumplir con las normas de potabilidad y de uso agrícola. La menos mala es la vertiente (1) con una salinidad 5 veces superior al límite de potabilidad, pero sin exceso de arsénico. El hecho de que las altas salinidades se deban a la redisolución de antiguas evaporitas limita las posibilidades de encontrar aguas netamente más diluidas y en grandes cantidades en la cuenca de Aguas Calientes 2.

Balance hídrico

De las varias lagunas, tenemos datos químicos solamente de una. Según los mapas, la superficie total del agua es de 9 km². Podemos adelantar el orden de magnitud del volumen total de aportes V_{ap} a las lagunas (pero no al salar entero):

$$V_{ap} = S(H_c - H_p) = 12\,150\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 385 \text{ l/s}$$

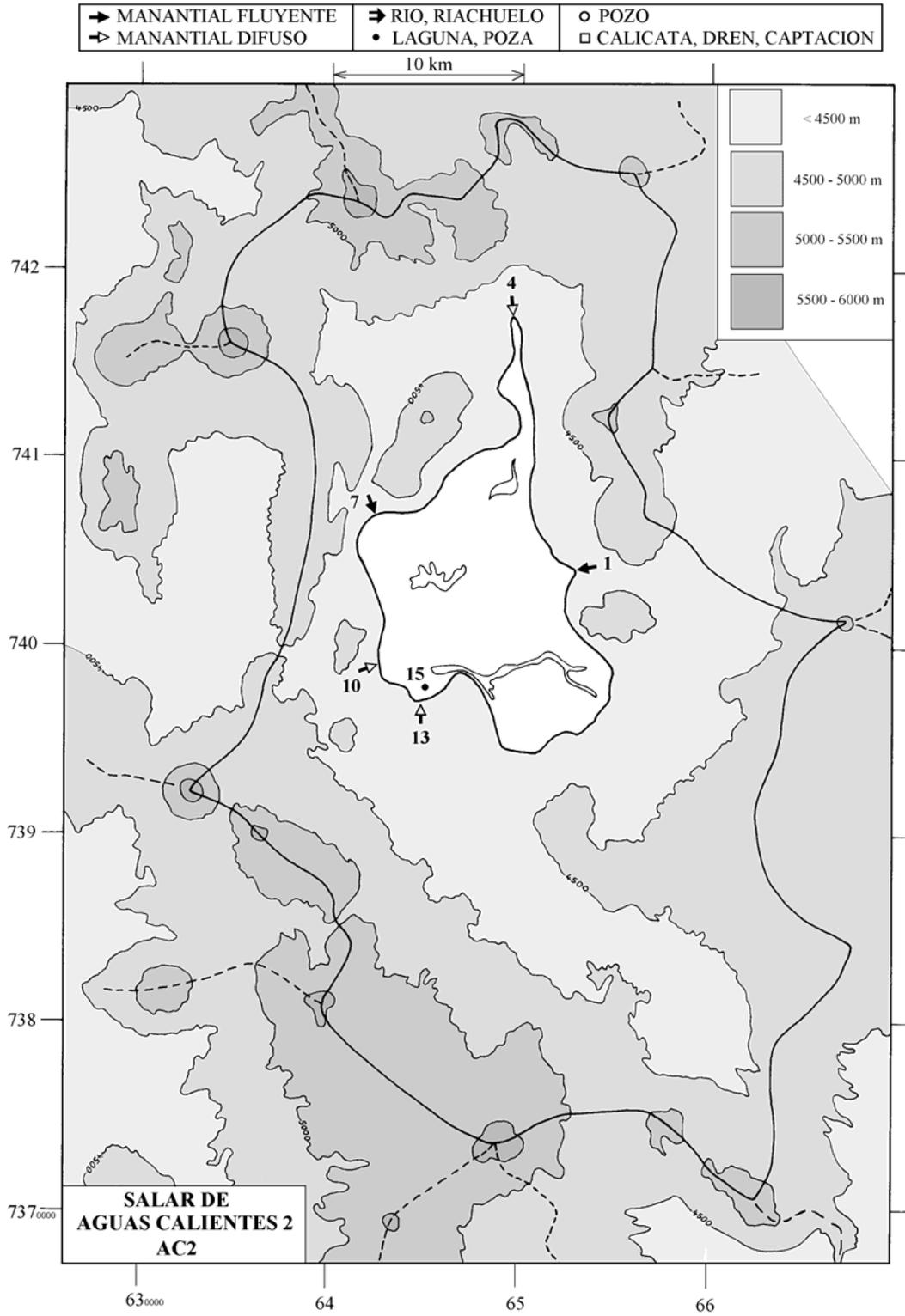
con: $S = 9 \times 10^6 \text{ m}^2$ $H_c = 1,5 \text{ m/año}$ $H_p = 0,15 \text{ m/año}$

Conclusiones

El salar de Aguas Calientes 2 recibe aguas de aporte salobres y saladas de mala calidad. Las sales disueltas en esas aguas provienen de la redisolución de antiguas evaporitas (halita y yeso) que se encuentran enteradas por debajo de las formaciones volcánicas de la cuenca de drenaje. Podría tratarse de la Formación San Pedro bien desarrollada al oeste de la cuenca en el sector del salar de Atacama. La única salmuera superficial analizada es de tipo Na-Ca / Cl. Pero falta contar con mayor cantidad de análisis de las lagunas y de la napa del salar para poder caracterizar más precisamente la química del salar.

Referencias y estudios anteriores

Alonso, H. y Vargas, L. 1988. Hidroquímica de lagunas del Altiplano, Segunda Región. V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 Agosto de 1988, Actas, tomo II, D35-D43.



**SALAR DE AGUAS CALIENTES 2
AC2**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
AC2-1	11/10/93	11 ^H 30	653425	7404025	4200	Vegas de Chamaca
AC2-4	11/10/93	12 ^H 35	649550	7417750	4250	Manantial difuso
AC2-7	11/10/93	13 ^H 30	642350	7406950	4230	Manantial corriente
AC2-10	11/10/93	14 ^H 15	642675	7398575	4200	Manantial difuso
AC2-13	13/10/93	16 ^H 40	645300	7396950	4200	Manantial difuso
AC2-15	13/10/93	17 ^H 00	645750	7398225	4200	Laguna

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
AC2-1	3500	3	1,002	8,22	4,12	4,18	689	0,209	0,028	720	0,12	nd	4,23	22,1	0,046	0,14	444	19,2	1,00	298	43,7
AC2-4	5680	16	1,003	9,27	1,78	3,55	1260	0,615	0,023	1100	0,19	nd	10,1	27,0	0,485	0,25	869	111	3,22	329	29,6
AC2-7	5930	15	1,004	7,28	8,60	1,98	1420	0,943	0,131	781	nd	0,5	17,4	35,0	1,19	0,16	840	77,8	2,80	277	143
AC2-10	25600	17	1,010	8,03	3,34	1,18	7700	2,25	0,170	743	0,12	0,1	25,5	27,5	1,76	0,11	3220	234	5,83	914	486
AC2-13	5210	14	1,003	7,81	2,55	1,81	1250	1,05	0,062	1030	0,06	nd	5,57	46,8	0,734	0,25	566	95,0	1,10	501	79,5
AC2-15	16960	14	1,009	7,67	1,62	1,94	5860	3,58	0,113	1350	0,99	0,1	18,3	47,3	1,38	0,14	1920	196	3,61	1720	231

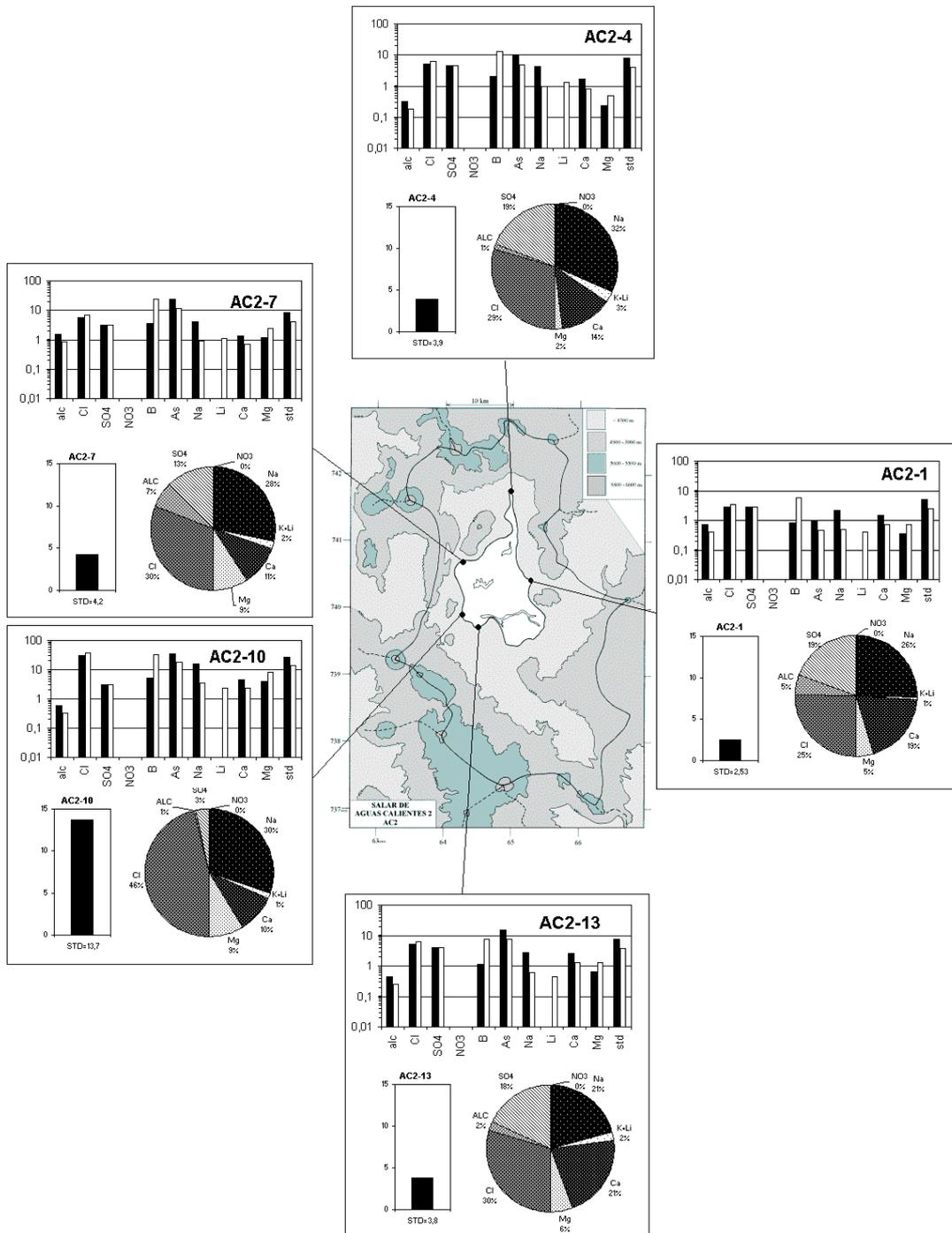
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
AC2-1	2530	239	5,16	2,9	38,42	38,74	0,83
AC2-4	3902	37,2	13,0	0,03	59,96	60,48	0,86
AC2-7	4202	519	2,10	40	64,50	65,01	0,79
AC2-10	13656	170	8,52	2,1	232,4	235,9	1,5
AC2-13	3797	148	2,40	3,5	58,74	59,26	0,88
AC2-15	11544	88,5	2,28	2,8	193,6	195,0	0,70

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

AC2

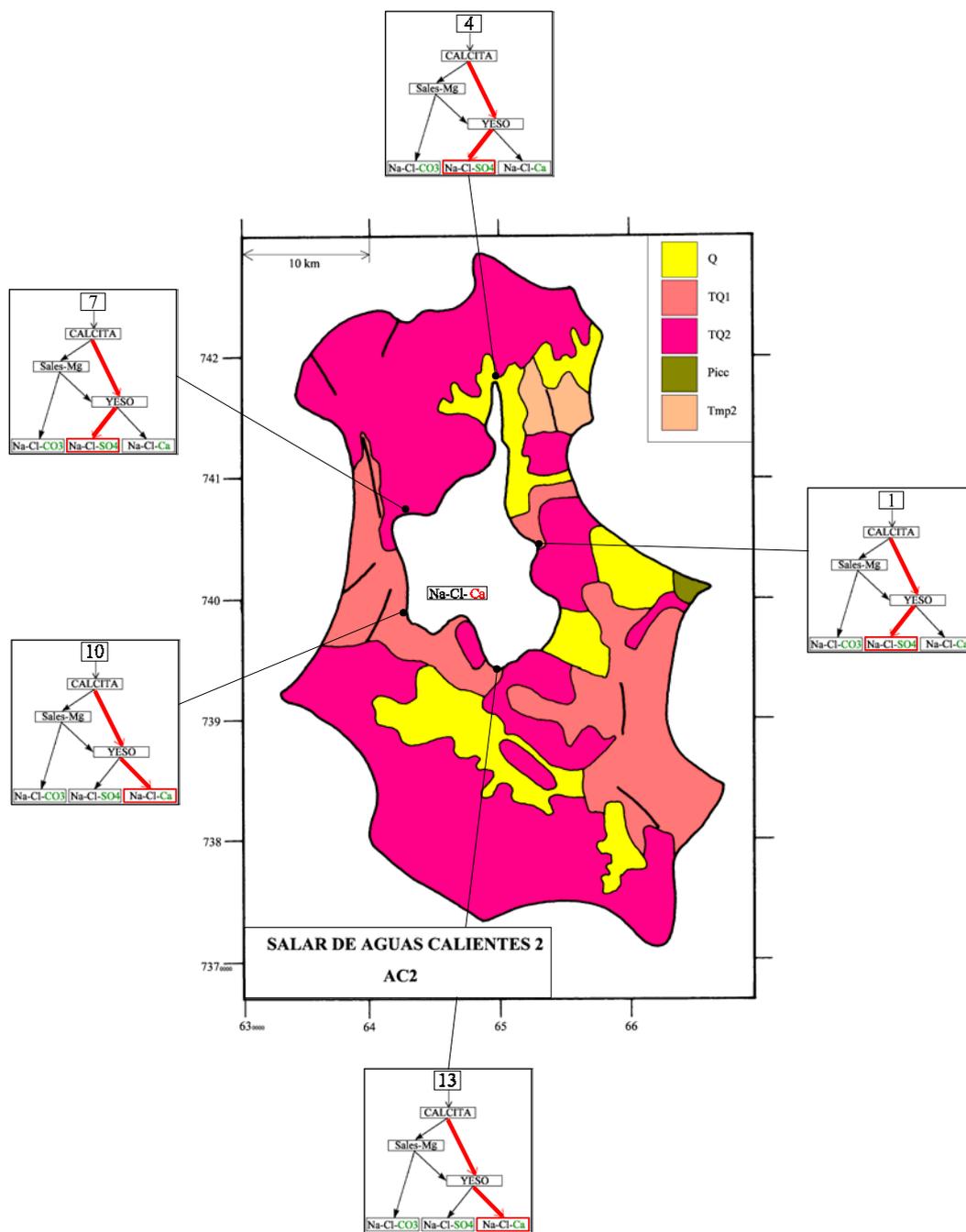
Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

TQ1 : *Plioceno - Pleistoceno*. Ignimbritas dacíticas, tobas e intercalaciones de sedimentitas clásticas continentales.

TQ2 : *Plioceno - Pleistoceno*. Coladas, tobas y brechas andesíticas y basálticas con intercalaciones de sedimentitas detríticas.

Picc : *Plioceno*. Depósitos piroclásticos no consolidados de cenizas, pómez y bloques.

Tmp2 : *Mioceno - Plioceno*. Ignimbritas riolíticas y riodacíticas con intercalaciones sedimentarias.



LAGUNA LEJIA

Introducción

La laguna Lejía se encuentra en el Altiplano de la II Región. Su cuenca es colindante con la del salar de Atacama al oeste y la del salar Aguas Calientes 2 al este. El activo volcán Lascar domina la cuenca de drenaje al norte. La paleohidrología de la laguna ha sido estudiada detalladamente por Grosjean et al., 1995. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4325 m
- superficie de la cuenca: 193 km²
- superficie de la laguna 1,9 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 1°C

La única alimentación que hemos encontrado es una vertiente difusa al oeste de la laguna. Hemos extraído solamente dos muestras : la vertiente y la laguna. Las interpretaciones son entonces muy preliminares.

Composición de las aguas

El agua de la vertiente difusa tiene una salinidad 1,3 g/l STD. La laguna es una salmuera de 70 g/l STD. Los tipos químicos son :

- vertiente : Na-Mg-(Ca) / HCO₃-SO₄-(Cl)
- laguna : Na-Mg / SO₄-Cl

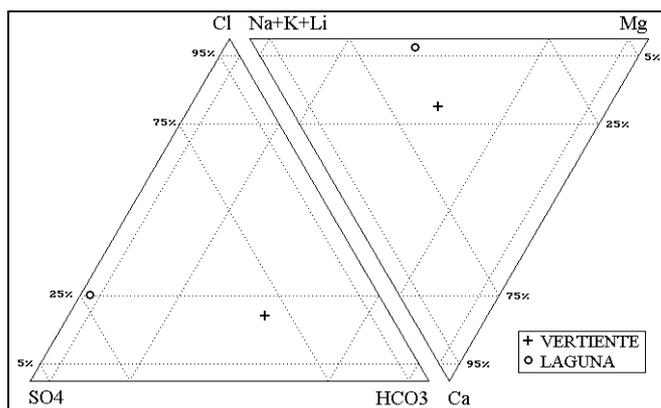


Fig.1. Composición de las aguas de la laguna Lejía

Se observa en la figura 1 la posición de los puntos representativos de las aguas de la laguna Lejía. No son composiciones muy comunes en los salares y lagunas del norte de Chile, especialmente en lo que se refiere a la laguna. Es la salmuera de mas alto porcentaje en magnesio que hemos

encontrado en el norte chileno. La sobrepasan solamente las aguas diluidas de las lagunas Cotacotani y Chungará en el extremo norte. En anexo, presentamos los análisis de elementos trazas realizados por ICP-MS del agua de la laguna.

La composición porcentual de la vertiente difusa corresponde a un agua de alteración de rocas volcánicas con azufre. La salinidad relativamente elevada de esta agua se debe probablemente a la pre-evaporación de la napa a través de los sedimentos de la orilla o a una mezcla con la cuña salina. No se detecta ninguna correlación equimolar entre aniones y cationes que sugieren la redisolución de antiguas salmueras o evaporitas.

Evolución de aguas

El agua de la vertiente sigue la vía evolutiva alcalina sulfatada que refleja generalmente terrenos volcánicos con algo de azufre. Por otra parte, hay concordancia entre esta vía evolutiva y la composición sulfatada de la laguna. Entonces, hay buena adecuación entre la litología volcánica de la cuenca, la vía evolutiva del único aporte prelevado y la composición de la laguna. Hay que recalcar que no son muchos los salares y lagunas en el Altiplano de la II Región cuyo quimismo refleja el ambiente geológico.

La tabla 1 presenta la composición calculada del agua de la vertiente evaporada por simulación computacional hasta la salinidad de la laguna. La columna "desviación" da el coeficiente del chi-cuadrado adaptado que mide el grado de semejanza entre la solución evaporada y la solución real.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>LEJ-1</u>	8,23	27,4	9730	37800	213	12,8	13300	1180	26,9	533	5220	
LEJ-3E	8,29	6,76	13900	31100	323	28,7	18500	2310	63,1	510	1780	0,306

Tabla 1 : Comparación del agua evaporada de la vertiente difusa con la laguna Lejía. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

La concordancia entre la salmuera calculada y la salmuera real no es muy buena, sobre todo para Mg, Li y K. La primera explicación es que hay otros aportes, en particular subterráneos, que alimentan la laguna con la misma composición global y la misma vía evolutiva. Eso es evidente al establecer el balance hídrico (ver mas abajo). Otra posibilidad es la depositación de cenizas del volcan Lascar directamente sobre la laguna durante las frecuentes erupciones.

Calidad de aguas

La vertiente difusa tiene un contenido de arsénico 4 veces superior a la norma de potabilidad. La otra limitación es un leve exceso de la salinidad total. Es posible encontrar napas de aguas diluidas más arriba en la cuenca, puesto que no parece haber salinización de aguas diluidas por antiguas salmueras o evaporitas. Sin embargo, la presencia del activo volcán Lascar con fumarolas permanentes podría acarrear problemas.

Balance hídrico

Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 1,5$ m/año
- $H_p = 0,15$ m/año
- $S = 1,9$ km²
- $C_{ap} = 111$ mg/l
- $C_L = 9730$ mg/l

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 2\,600\,000$ m³/año = 82 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 29\,600$ m³/año ~ 1 l/s

No se observa ningún flujo en alguna vertiente difusa. Es probable que la laguna sea alimentada principalmente por una napa subterránea de composición parecida a la vertiente.

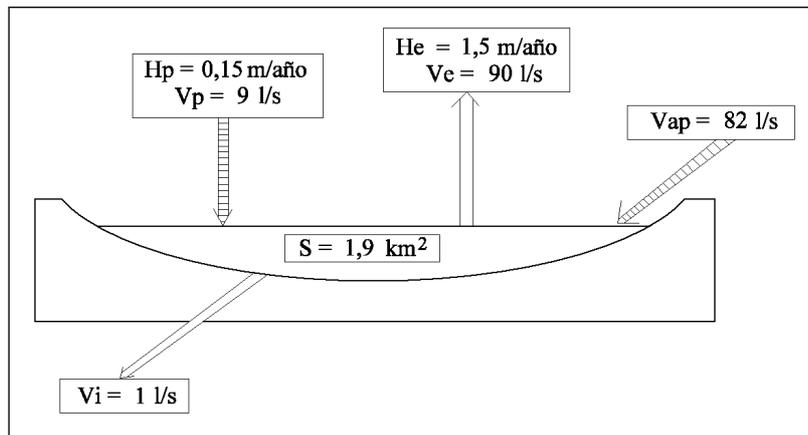


Fig.2 : Balance hídrico de la laguna Lejía.

Conclusiones

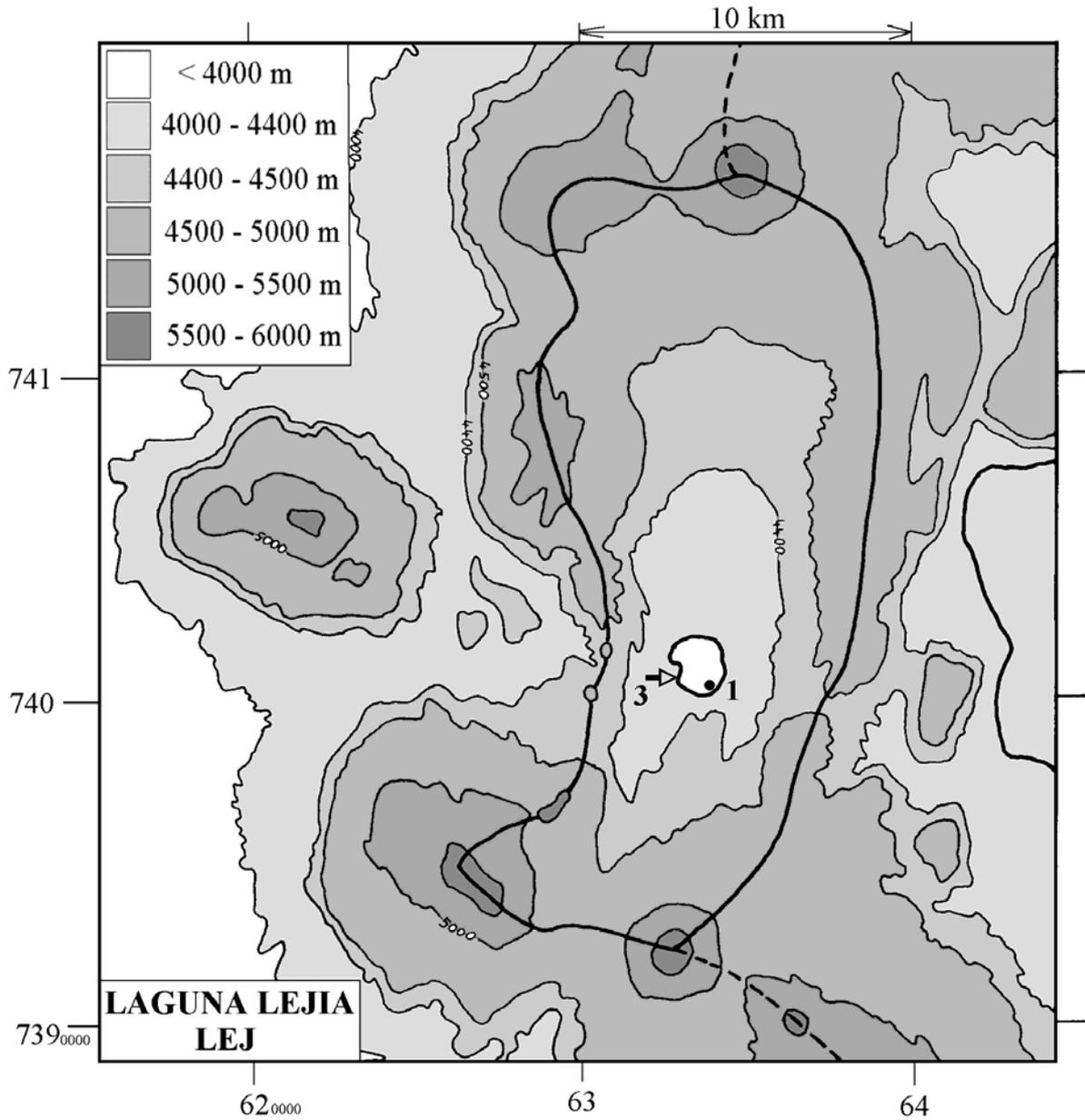
Tenemos muy pocos datos para sacar conclusiones firmes. La cuenca de la laguna Lejía podría presentar potencialidades para recursos de agua, si no fuera por la presencia muy cercana del activo volcán Lascar. La composición del agua de la única vertiente difusa que hemos prelevado proviene bien de la alteración de rocas volcánicas con leve contenido de azufre. La laguna es del mega-grupo sulfatado con un contenido porcentual excepcionalmente elevado en magnesio.

Referencias y estudios anteriores

Alonso, H. y Vargas, L. 1988. Hidroquímica de lagunas del Altiplano, Segunda Región. V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 Agosto de 1988, Actas, tomo II, D35-D43.

Grosjean, M. 1994. Paleohydrology of the Laguna Lejía (north Chilean Altiplano) and climatic implications for late-glacial times. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 109, 89-100.

➔ MANANTIAL FLUYENTE	○ POZO
➤ MANANTIAL DIFUSO	□ CALICATA, DREN, CAPTACION
➡ RIO, RIACHUELO	• LAGUNA, POZA



**LAGUNA LEJIA
LEJ**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
LEJ-1	13/10/93	17 ^H 45	634000	7400575	4325	Laguna
LEJ-3	13/10/93	18 ^H 10	632975	7400525	4326	Manantial difuso

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
LEJ-1	53600	11	1,060	8,23	27,4	5,8	9730	9,99	1,46	37800	0,3	1,4	213	12,8	47,9	na	13300	1180	26,9	533	5220
LEJ-3	1584	0	1,001	7,97	8,17	1,2	111	0,081	0,028	250	0,6	nd	2,59	41,7	0,202	0,02	153	18,6	0,507	67,0	77,0

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
 CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

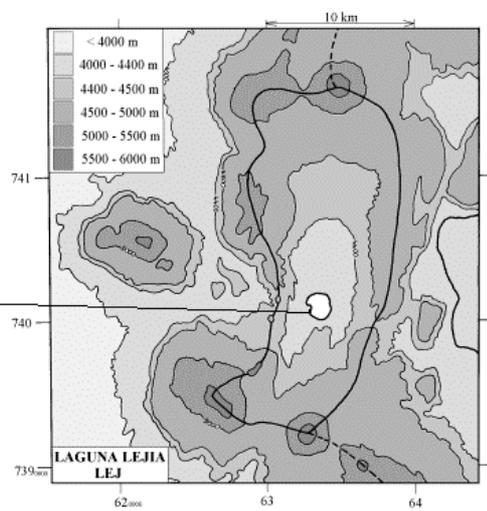
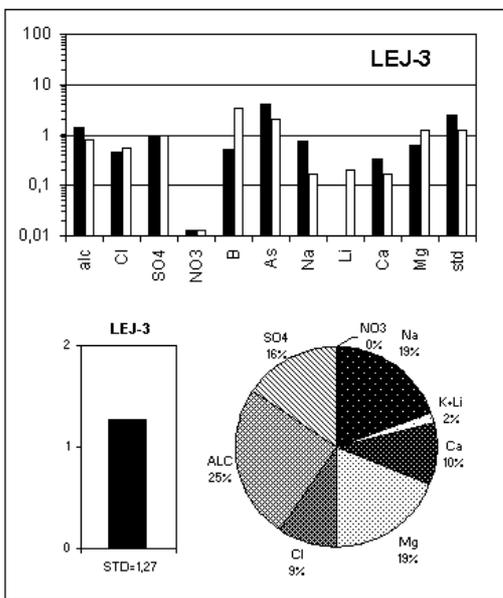
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
LEJ-1	70273	1140	131	7	1070	1090	1,9
LEJ-3	1273	490	3,84	12	16,89	16,59	1,8

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
 S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %

Análisis de elementos trazas por ICP-MS del agua de la laguna Lejía (LEJ-1)

		$\mu\text{g} / \text{l}$			$\mu\text{g} / \text{l}$
Vanadio	V	124	Samario	Sm	nd
Cromo	Cr	6,0	Europio	Eu	0,0039
Cobalto	Co	5,4	Gadolinio	Gd	0,019
Niquel	Ni	3,3	Terbio	Tb	0,0031
Cobre	Cu	9,9	Disprobio	Dy	0,020
Cinc	Zn	5,7	Holmio	Ho	0,0032
Rubidio	Rb	379	Erbio	Er	0,0030
Estroncio	Sr	398	Tulio	Tm	0,0045
Itrio	Y	0,027	Iterbio	Yb	0,0092
Circonio	Zr	0,040	Lutecio	Lu	0,0011
Niobio	Nb	0,077	Hafnio	Hf	0,0067
Molibdeno	Mo	20,9	Tantalio	Ta	0,0028
Rutenio	Ru	0,15	Tungsteno	W	5,1
Rodio	Rh	0,035	Renio	Re	0,13
Plata	Ag	0,030	Osmio	Os	0,064
Paladio	Pd	0,024	Iridio	Ir	0,018
Cadmio	Cd	0,15	Platino	Pt	0,091
Indio	In	0,013	Oro	Au	0,018
Estaño	Sn	0,040	Talio	Tl	nd
Antimonio	Sb	1,6	Plomo 206	Pb	0,85
Cesio	Cs	7,0	Plomo 207	Pb	0,92
Bario	Ba	12,6	Plomo 208	Pb	0,73
Lantano	La	0,15	Bismuto	Bi	0,0061
Cerio	Ce	0,0011	Torio	Th	0,0050
Praseodimio	Pr	nd	Uranio	U	10,9
Neodimio	Nd	0,0054			

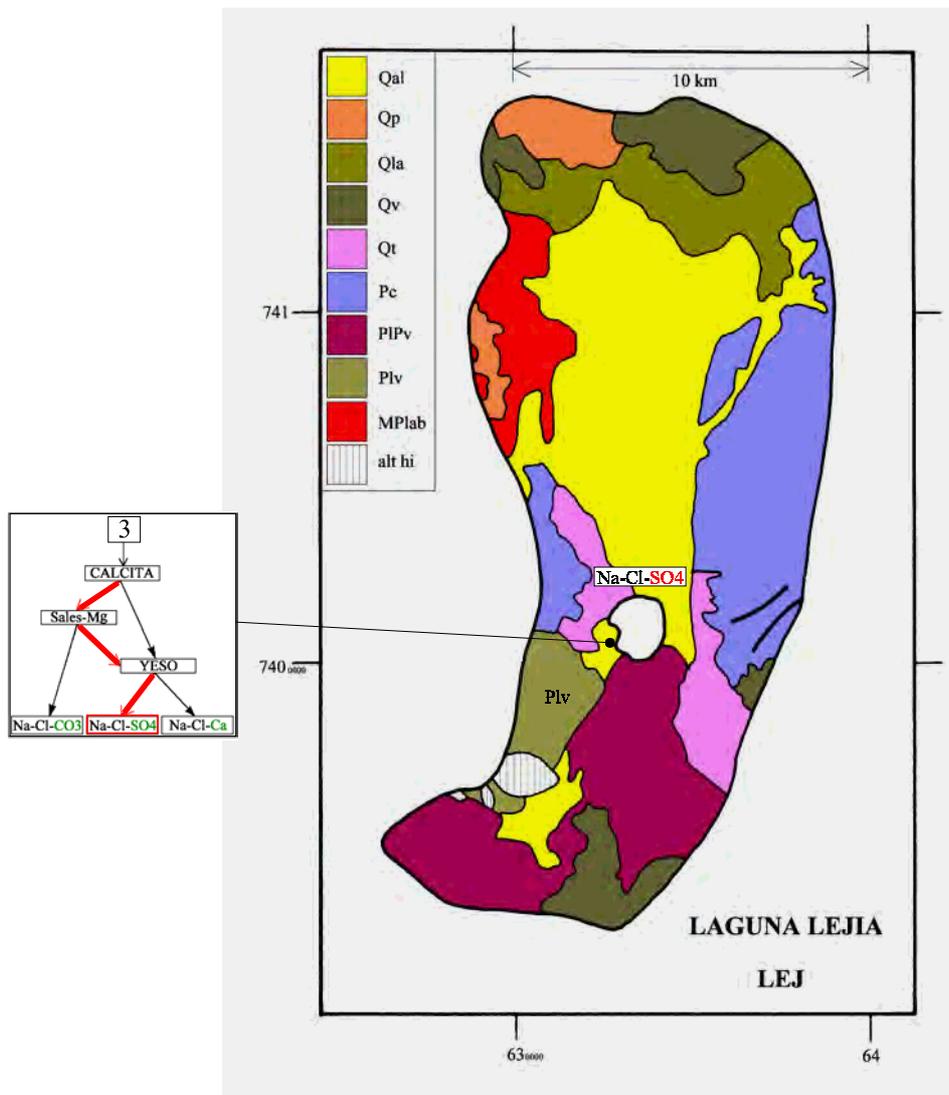
En microgramos por litro; nd = no detectado



MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

LEJ

- Qal** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales: gravas, arenas y limos.
- Qp** : *Cuaternario*. Piroclastos, escoria volcánica, pómez y ceniza.
- Qla** : *Cuaternario*. Lahares, depósitos mal seleccionados de bolones y ceniza localmente litificada.
- Qv** : *Cuaternario*. Estrato-volcanes IV. Dacitas y andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o biotita, basaltos y andesitas basálticas subordinadas.
- Qt** : *Cuaternario*. Ignimbrita Tuyajto. Toba de cristales y vidrio.
- Pc** : *Pleistoceno*. Ignimbrita Cajón. Toba dacítica y andesítica de cristales vidrio y pómez debilmente soldada.
- PIPv** : *Plioceno - Pleistoceno*. Andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o de biotita y dacitas, basaltos y andesitas basálticas subordinados.
- Plv** : *Plioceno*. Estrato-volcanes II. Andesitas de piroxeno y andesitas de hornblenda y/o biotita. Dacitas subordinadas.
- MPlab** : *Mioceno - Plioceno*. Porfido andesítico de biotita y hornblenda.
- alt hi** : alteración hidrotermal.



LAGUNA MISCANTI

Introducción

La laguna Miscanti se encuentra en el Altiplano de la II Región a menos de un kilómetro del borde oriental de la cuenca del salar de Atacama, a los pies del volcán del mismo nombre. Su cuenca colinda al sur con la cuenca de la pequeña laguna Miñique de la cual lo separa un pequeño portezuelo. Generalmente los estudios asocian las dos lagunas en un solo sistema. La laguna salobre Miscanti se encuentra a unos 10 metros más arriba que la laguna salada Miñique, por lo que se supone que las aguas de la laguna Miscanti se infiltran hacia la laguna Miñique. La paleolimnología de la laguna ha sido estudiada por Valero-Garcés et al. (1996). Las principales características morfométricas y climatológicas de la laguna Miscanti son:

- altura: 4120 m
- superficie de la cuenca: 303 km²
- superficie de la laguna 13,4 km²
- precipitaciones: 180 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 2°C

Hemos encontrado dos vertientes difusas a la orilla de la laguna y una vertiente fluyente cuenca arriba. La vertiente fluyente ha sido captada para conducirla a través de una tubería hasta el poblado de Peine, en la cuenca del salar de Atacama. Entonces este aporte ya no alimenta más la laguna Miscanti. Sin embargo, lo consideraremos en el estudio puesto que la napa que se descarga en esta vertiente debe seguir alimentando de manera difusa la laguna. La captación solamente remueve 2 l/s de la napa.

Composición de los aportes y de la laguna

Las composiciones de aguas la laguna Miscanti están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Se observa una gran variación en la composición de los aportes

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
MIS-9	217	Ca-(Na)-(Mg)	SO ₄ -(HCO ₃)	SO ₄ (N)
MIS-1	636	Na-Mg-Ca	SO ₄ -(HCO ₃)-(Cl)	SO ₄ (N)
MIS-5	705	Na-(Ca)	Cl-SO ₄ -(HCO ₃)	CO ₃
<u>LAGUNA</u>				
MIS-3	5224	Na-(Mg)-(Ca)	SO ₄ -Cl	SO ₄
MIS-8	5308	Na-(Mg)-(Ca)	SO ₄ -Cl	SO ₄

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas de la laguna Miscanti.
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada; CO₃ = vía carbonatada.

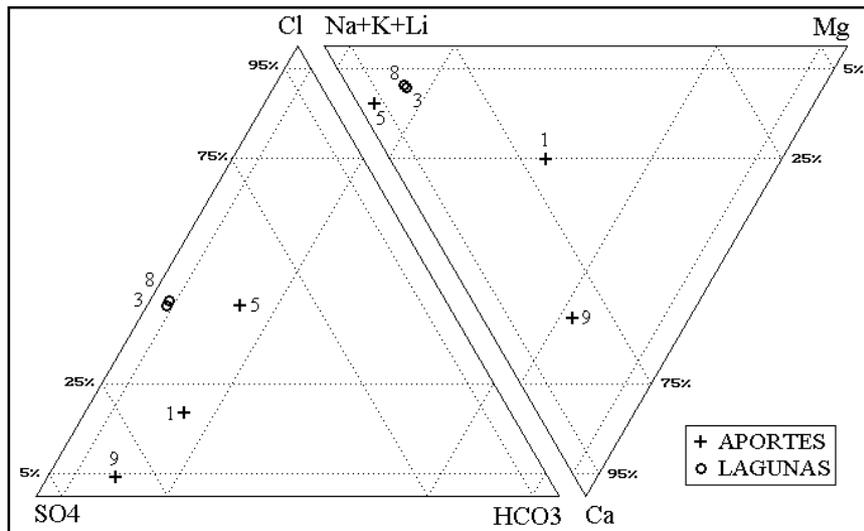


Fig.1 : Composición de las aguas de aporte y de la laguna Miscanti.

La laguna es salobre y netamente de tipo aniónico sulfatado. No se observa en las aguas de aporte las relaciones de equimolaridad entre Na y Cl, Na+Ca y Cl, Ca y SO₄, Na y Cl+SO₄ que indican una redisolución de antiguas evaporitas o salmueras. Considerando también la baja salinidad de los aportes, se puede asumir que la composición de los aportes se debe a la alteración de rocas volcánicas de la cuenca de drenaje.

Vías evolutivas y relación con la geología

La vertiente difusa (1), al norte de la laguna, y la vertiente fluyente (9), cuenca arriba, siguen al evaporarse la vía neutra sulfatada, lo que corresponde bien a la composición de la laguna y a la litología volcánica de la cuenca. El alto contenido en sulfato de estos aportes, y su vía evolutiva neutra sulfatada, indican la presencia de azufre en estos sectores de la cuenca. El aporte MIS-5 es distinto: sigue la vía evolutiva carbonatada, lo que caracteriza terrenos volcánicos sin o con poco azufre. Esta vía no logra desarrollarse porque las aguas de la vertiente (5) se mezclan con las otras aguas de aporte de vía neutra. Sin embargo debe tener alguna influencia en la composición de la laguna. Veamos entonces el aspecto cuantitativo de la evolución de aguas por evaporación.

Evolución cuantitativa de aguas

La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional (MIS-xE) hasta la salinidad de la laguna (MIS-3.EQL). El agua de la laguna siendo sobresaturada en calcita (CaCO₃), se ha equilibrado su composición con este mineral. El aporte cuya evaporación produce la solución que más se acerca a la composición de la laguna es la vertiente norte (1). Sin embargo su coeficiente de desviación no es muy bueno. Varios componentes discrepan notablemente. El aporte MIS-5 tampoco tiene un buen coeficiente de desviación, lo que es normal puesto que esta agua evoluciona hacia una salmuera carbonatada bien distinta del agua sulfatada de la laguna.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>MIS-3.EQL</u>	8,43	1,74	1150	1960	24,0	30,4	1290	198	1,11	109	101	
60%(1)+40%(5)	8,54	2,34	914	2300	26,3	30,6	1150	201	0,992	69,3	208	0,079
MIS-1E	8,38	1,53	615	2810	16,3	33,2	884	143	0,842	141	343	0,222
MIS-5E	8,85	5,10	1250	1610	38,0	34,3	1460	269	1,15	13,4	32,3	0,388
MIS-9E	8,12	0,822	151	3290	13,0	33,2	549	204	0,233	459	276	0,771

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con la laguna Miscanti.
ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Puesto que la laguna esta alimentada por las dos vertientes, hemos simulado la evaporación de varias mezclas de las dos aguas. La que produce la solución evaporada con el desvio más bajo es una mezcla de 60% de MIS-1 y 40% de MIS-5. El ajuste, sin ser perfecto, es notablemente mejor que el de cada aporte evaporado solo. Los dos componentes que menos se ajustan son Ca y Mg. Se podría mejorar todavía el ajuste jugando con otros parámetros como la temperatura o la presión parcial del CO₂. Por otra parte, es posible que entren otros aportes no detectados. La vertiente fluyente (9) no parece tener mucha influencia en la composición de la laguna. El coeficiente de desviación de su agua evaporada es bastante elevado.

Calidad de aguas

El agua de la vertiente captada para la alimentación del pueblo de Peine es de excelente calidad y apta para cualquier uso, doméstico o agrícola. Las aguas de las dos vertientes difusas contienen demasiado arsénico para el consumo humano y valores aceptables para el boro en riego, según la experiencia regional.

Balance hídrico

La laguna Miscanti presenta condiciones favorables para establecer su balance hídrico con una buena precisión, por lo menos mejor que un simple orden de magnitud. Se trata de una laguna permanente, de superficie poco variable, y cuyos aportes han sido relativamente bien identificados. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros del balance son:

- H_e = 1,5 m/año
- H_p = 0,18 m/año
- S = 13,4 km²
- C_{ap} = 88,2 mg/l (60% MIS-1 + 40% MIS-5)
- C_L = 1180 mg/l (promedio de MIS-3 y MIS-8)

Se obtiene:

$$\text{Volumen de aportes: } V_{ap} = S(H_e - H_p) / (1 - C_{ap}/C_L) = 19 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} = 606 \text{ l/s}$$

$$\text{Volumen de infiltraciones: } V_i = S(H_e - H_p) / (C_L/C_{ap} - 1) = 1,4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} = 45 \text{ l/s}$$

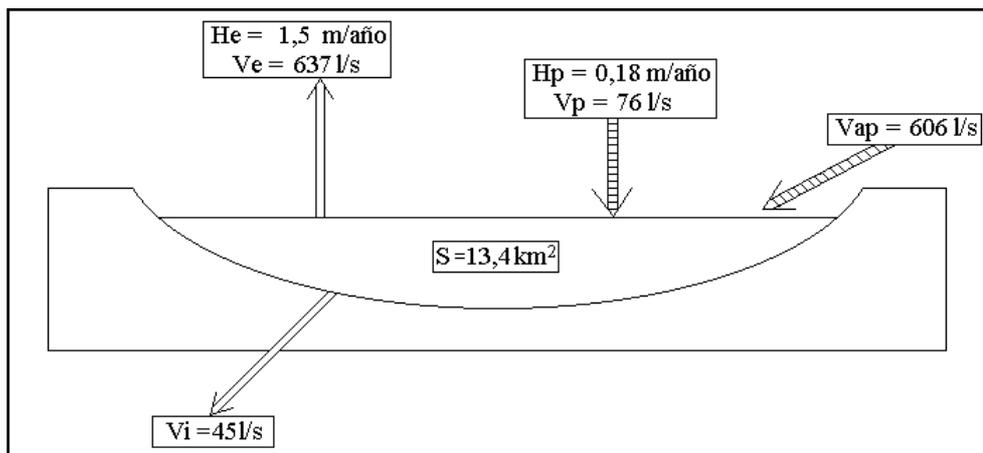


Fig.2 : Balance hídrico de la laguna Miscanti.

El volumen de aportes es elevado, lo que sugiere la existencia de importantes napas en la cuenca de drenaje. Con tal volumen es sorprendente que no haya vertientes fluyentes de buen caudal. Aun considerando que toda la orilla de la laguna es una inmensa vertiente difusa, el caudal sería de 40 mililitros por segundo y por metro de orilla. Toda la orilla sería un verdadero pantano. Por eso, es más probable que la laguna es alimentada en gran parte por descarga de napas debajo de la superficie de la laguna. El volumen de las infiltraciones tiene gran importancia en la discusión del balance hídrico de la vecina laguna Miñique. El valor que adelantamos está basado sobre una concentración promedio ponderada en Cl de los dos aportes MIS-1 y 5. Considerando las composiciones extremas (MIS-1 solo y MIS-5 solo) podemos precisar el rango de incertidumbre de la tasa de infiltración : $28 \text{ l/s} < Vi < 74 \text{ l/s}$.

Conclusiones

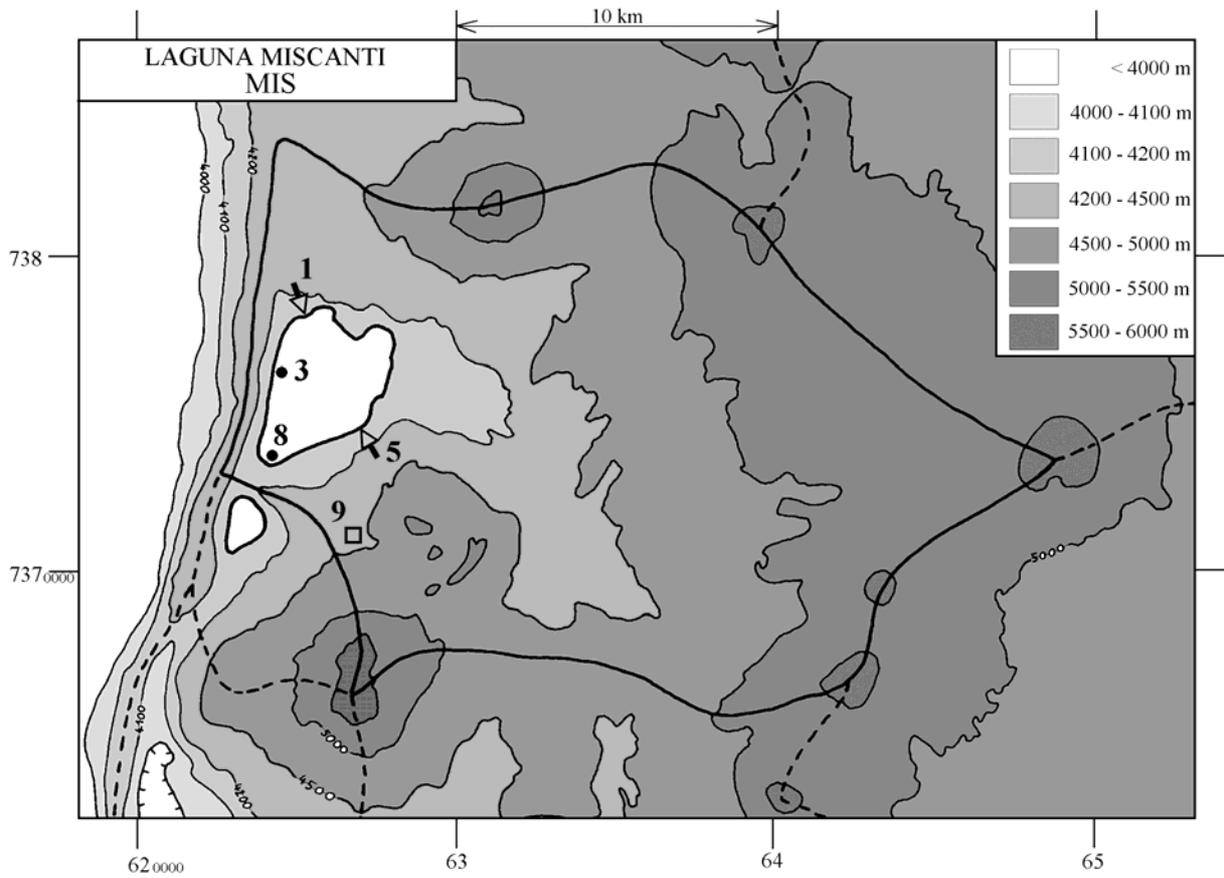
La cuenca de laguna Miscanti presenta interesantes potencialidades hídricas. Las aguas de aporte son diluidas y no muestran contaminación por antiguas evaporitas. El caudal entrante en la laguna es de unos 600 l/s, valor elevado en esta zona árida. La alimentación se hace sobre todo por descarga de napas subterráneas en la laguna. La composición de la laguna es de agua salobre de tipo Na / $\text{SO}_4\text{-Cl}$ y proviene de la evaporación de una mezcla de aguas de aporte de vía evolutiva carbonatada con aguas de vía evolutiva neutra sulfatada.

Referencias y estudios anteriores

Alonso, H. y Vargas, L. 1988. Hidroquímica de lagunas del Altiplano, Segunda Región. V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 Agosto de 1988, Actas, tomo II, D35-D43.

Valero-Garcés, B.L.; Grosjean, M.; Schwalb, A.; Geyh, M.; Messerli, B.; Kelts, K. 1996. Limnogeology of Laguna Miscanti: evidence for mid to late Holocene moisture changes in the Atacama Altiplano (Northern Chile). *Journal of Paleolimnology* 16, 1-21.

➔	MANANTIAL FLUYENTE	○	POZO
↘	MANANTIAL DIFUSO	□	CALICATA, DREN, CAPTACION
➔	RIO, RIACHUELO	•	LAGUNA, POZA



**LAGUNA MISCANTI
MIS**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE	METROS	
MIS-1	14/10/93	10 ^H 00	625075	7378250	4121	Manantial difuso
MIS-3	14/10/93	10 ^H 30	624375	7376250	4120	Laguna
MIS-5	14/10/93	11 ^H 00	626700	7374075	4120	Manantial difuso
MIS-8	14/10/93	11 ^H 45	624100	7373475	4120	Laguna
MIS-9	17/04/97	11 ^H 00	626893	7370964	4250	Manantial corriente

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
MIS-1	998	30	1,001	7,77	1,64	0,3	55,7	0,072	0,023	255	nd	nd	1,48	24,4	0,102	0,13	80,0	13,0	0,076	42,9	31,1
MIS-3	7200	9	1,004	8,56	3,05	7,1	1150	1,06	0,0088	1990	0,06	nd	24,0	47,0	1,99	0,07	1280	198	1,11	136	101
MIS-5	1020	22	1,000	8,89	1,66	1,9	137	0,109	0,012	175	nd	nd	4,12	30,8	0,202	0,45	157	29,2	0,125	23,7	3,50
MIS-8	7000	9	1,004	8,53	3,04	7,2	1210	0,983	0,0075	1990	0,06	nd	24,3	47,3	2,14	0,09	1300	198	1,14	136	102
MIS-9	292	19	1,000	7,61	0,356	na	3,16	0,029	na	108	1,3	na	0,27	28,6	0,003	na	11,5	4,26	0,005	33,2	5,76

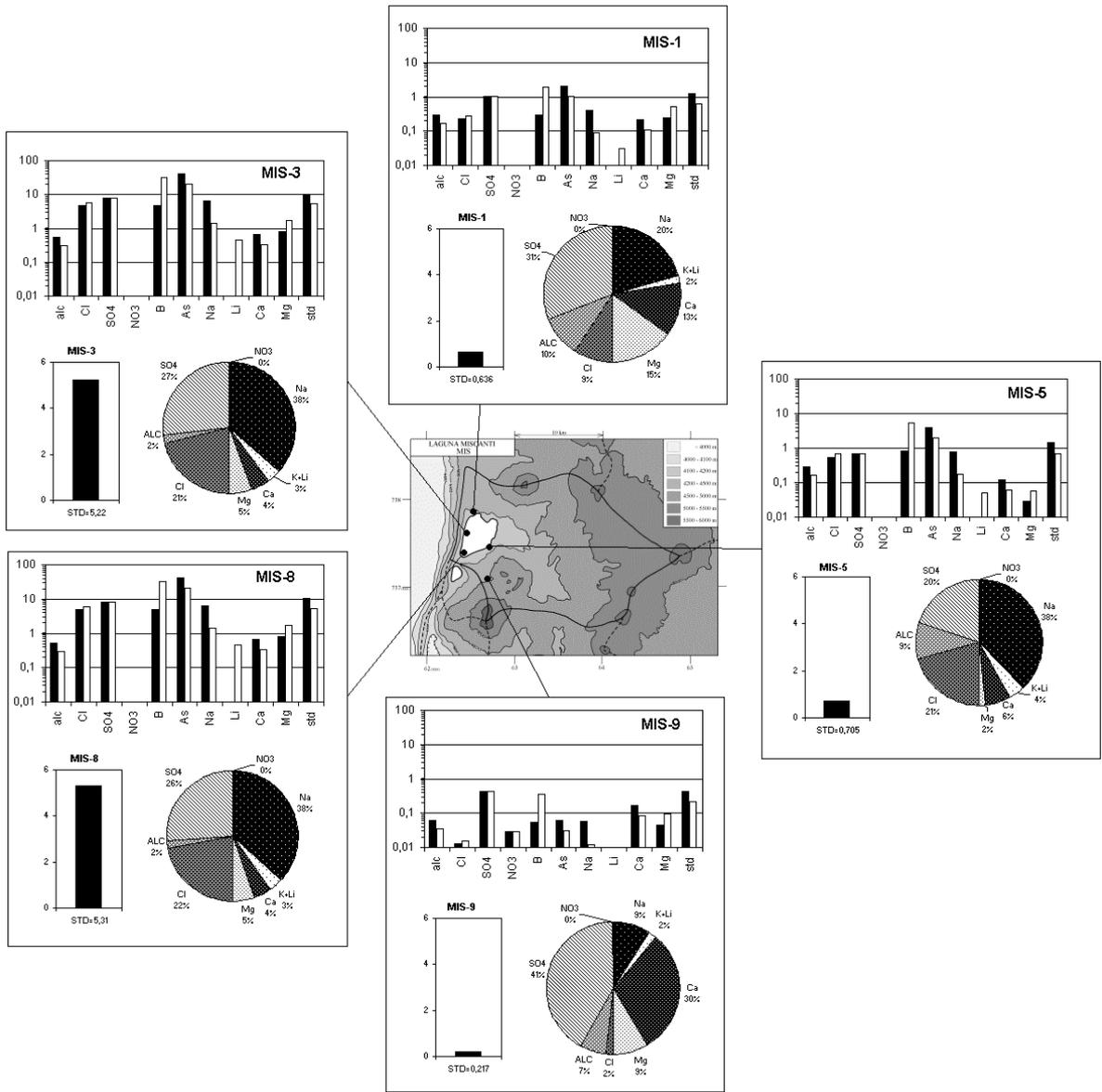
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
MIS-1	635,6	97,0	0,84	2,2	8,530	8,549	0,2
MIS-3	5224	146	6,24	0,62	75,91	77,24	1,7
MIS-5	705,2	76,3	4,68	0,15	9,097	9,259	1,8
MIS-8	5308	148	5,88	0,70	77,09	78,83	2,2
MIS-9	217,2	21,2	0,06	0,84	2,738	2,706	1,2

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

MIS

Q : *Cuaternario*. Depósitos aluviales: gravas, arenas y limos.

Qv : *Cuaternario*. Estrato-volcanes IV. Dacitas y andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o biotita, basaltos y andesitas basálticas subordinadas.

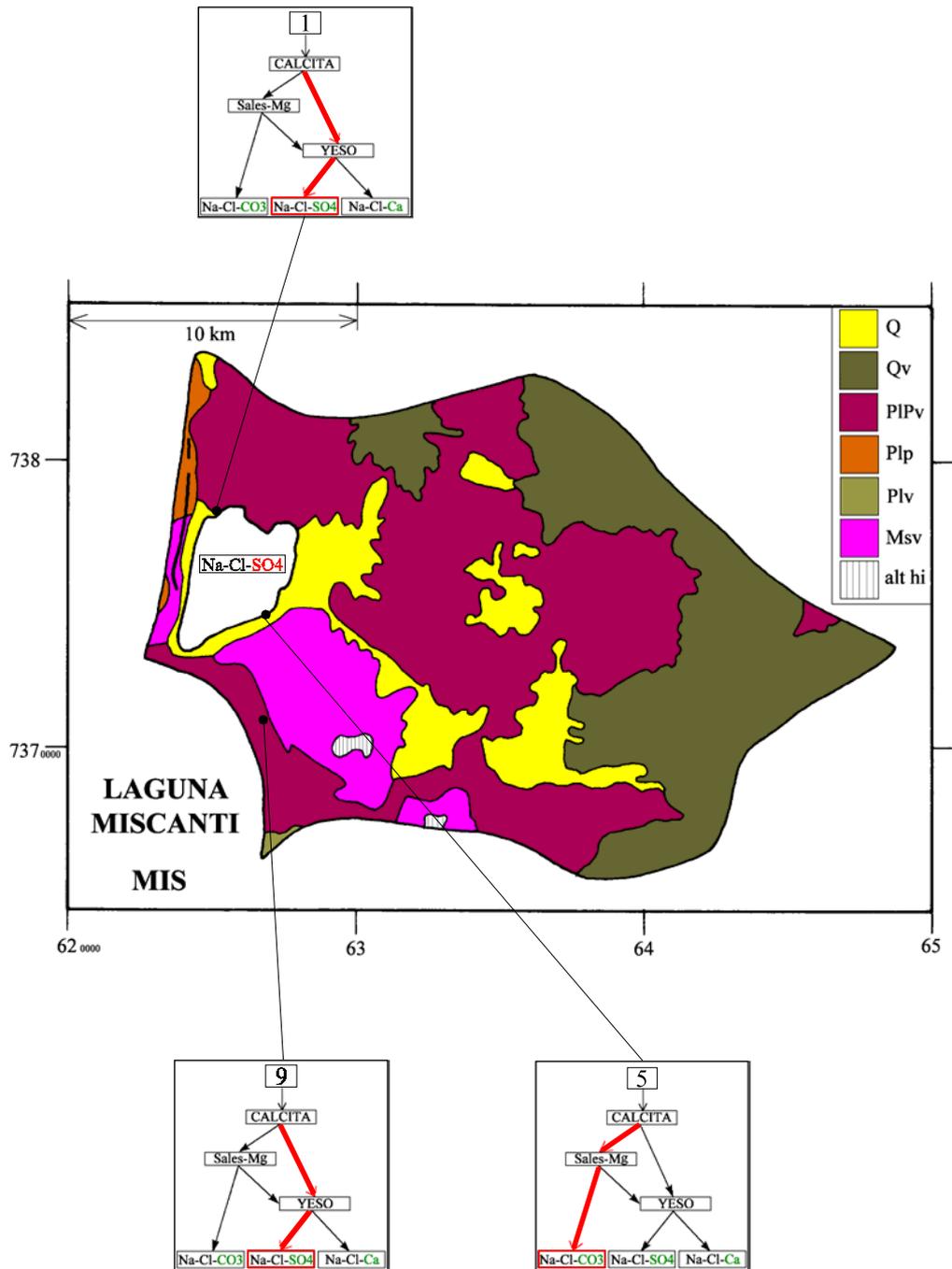
PIPv : *Plioceno - Pleistoceno*. Andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o de biotita y dacitas, basaltos y andesitas basálticas subordinados.

Plp : *Plioceno*. Ignimbrita Patao. Toba dacítica de vidrio y escasos pómez y cristales.

Plv : *Plioceno*. Estrato-volcanes II. Andesitas de piroxeno y andesitas de hornblenda y/o biotita. Dacitas subordinadas.

Msv : *Mioceno sup.* Andesitas de piroxeno, subordinamente dacitas, andesitas de hornblenda y/o biotita, basaltos y andesitas basálticas.

alt hi : alteración hidrotermal.



LAGUNA MIÑIQUE

Introducción

La laguna Miñique se encuentra en el Altiplano de la II Región cerca del borde oriental de la cuenca del salar de Atacama. Hacia el sur un cordón de baja altura la separa del Callejón Varela, que podría haber sido una antigua vía de desagüe. Al norte su cuenca colinda con la cuenca de la laguna Miscanti, de la cual la separa un cordón de lavas de unos 1200 m de ancho. El portezuelo entre las dos cuencas es muy bajo. Generalmente los estudios asocian las dos lagunas en un solo sistema. La laguna salada Miñique se encuentra unos 10 metros más bajo que la laguna salobre Miscanti, por lo que se supone que las aguas de la laguna Miscanti se infiltran hacia la laguna Miñique. Las principales características morfométricas y climatológicas de la laguna Miñique son:

- altura: 4120 m
- superficie de la cuenca: 27,5 km²
- superficie de la laguna 1,6 km²,
- precipitaciones: 180 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 2°C

Hemos extraído cuatro muestras. No se observa ningún aporte fluyente. Se ha encontrado solamente una vertiente difusa (6). Las aguas de laguna (1) y (3) fueron obtenidas en la misma orilla y el agua (8) un poco más adentro de la laguna.

Composición de las aguas

Presentamos en la figura 1 la composición de las aguas de la laguna Miñique y también de la laguna Miscanti.

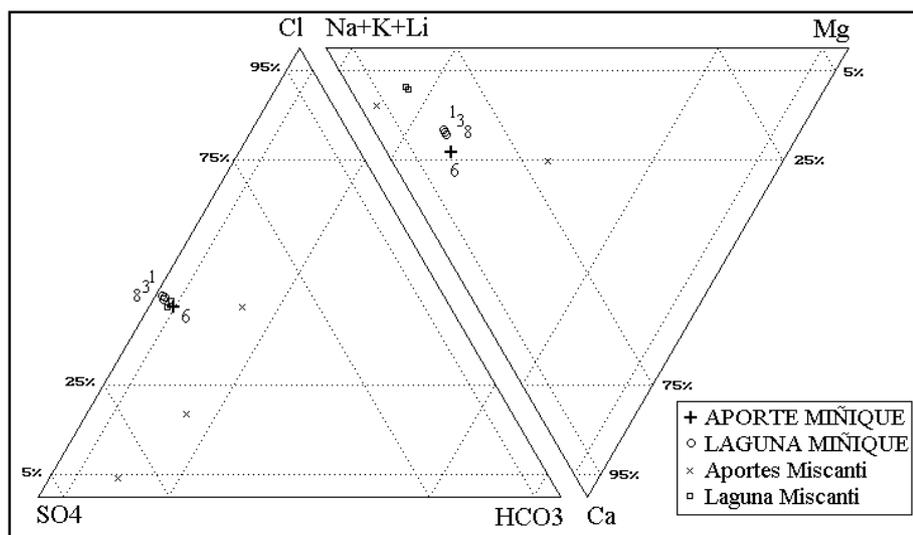
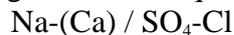


Fig.1 : Composición de las aguas de las lagunas Miñique y Miscanti.

Todas la aguas, vertiente y laguna, de Miñique tienen una composición homogénea:



La composición aniónica de sus aguas es rigurosamente la misma que la laguna Miscanti. No es así para los cationes. Las aguas de Miñique tienen más calcio que las de la laguna Miscanti. La salinidad del aporte difuso es de 3,7 g/l, un valor elevado que no corresponde a un agua de alteración de rocas volcánicas. No se observa en esta agua las relaciones de equimolaridad entre Na y Cl, Na+Ca y Cl, Ca y SO₄, Na y Cl+SO₄ que indican una redisolución de antiguas evaporitas o influencia de salmueras.

La ubicación de esta vertiente justo del otro lado del cordón de separación entre Miscanti y Miñique parece indicar que la vertiente proviene de infiltraciones de la laguna Miscanti. Sin embargo topamos con un problema : el calcio. No solamente las aguas de la laguna Miñique son más concentradas que Miscanti en Ca (136 mg/l), sino también el agua de la vertiente difusa (6) con una concentración de 254 mg/l Ca. La laguna Miscanti contiene solamente 136 mg/l Ca. En la tabla 1 presentamos las razones entre las concentraciones de la laguna Miscanti y de la vertiente difusa de Miñique. Se nota que todos los componentes, menos el calcio, están más diluidos en la vertiente que en la laguna. Por una parte, eso indica que la vertiente no proviene solamente de infiltraciones de la laguna Miscanti, sino de una mezcla entre el agua de la laguna y otra más diluida. Pero esta agua diluida debería tener una concentración excepcionalmente elevada en calcio.

NUMERO	ALC	CL	SO4	B	AS	NA	K	LI	CA	MG	STD
MIS-8	3,04	1210	1990	24,3	2,14	1300	198	1,14	136	102	5308
MIN-6	2,72	831	1400	14,8	0,996	761	79,8	0,666	254	82,6	3702
<i>razón</i>	<i>1,12</i>	<i>1,46</i>	<i>1,42</i>	<i>1,64</i>	<i>2,14</i>	<i>1,71</i>	<i>2,48</i>	<i>1,71</i>	<u>0,54</u>	<i>1,23</i>	<i>1,43</i>

MIS-8 : laguna Miscanti ; MIN-6 : vertiente difusa Miñique
 ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Tabla 1 : Comparación del agua de la vertiente difusa de Meñique con el agua de la laguna Miscanti.

Es mucho más simple y probable que el agua de la vertiente difusa MIN-6 sea una mezcla entre un agua diluida y la salmuera de la laguna Miñique, es decir una cuña salina a dentro de una napa diluida que se descarga lentamente en la laguna. El mejor argumento que sostiene esta hipótesis es la casi perfecta similitud entre las concentraciones porcentuales de la vertiente y de la laguna (Fig.1).

Evolución cuantitativa de aguas

No disponemos entonces de ningún agua de aporte a la laguna Miñique, sino solamente de una mezcla entre una napa diluida y la laguna. La evaporación simulada del agua de la vertiente difusa produce una solución muy similar a la de la laguna (Tabla 2), lo que sugiere que la napa

alimentando la laguna por el nor-noreste de la cuenca constituye la alimentación principal de la laguna.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>MIN-8</u>	8,43	3,04	2220	3620	38,1	44,5	1990	266	1,58	541	228	
MIN-6E	8,11	1,01	2230	3700	39,7	32,6	2060	214	1,79	546	222	0,016

ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Tabla 2 : Comparación del agua evaporada de la vertiente difusa con la laguna Miñique.

ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Esto es consistente con las observaciones de terreno. No hemos encontrado otro sector de la orilla donde las aguas sean más diluidas, lo que hubiera indicado un aporte en la cuña salina. Al contrario, las muestras (1) y (3), pegadas a las orillas sur y oeste son aún levemente más concentradas que la laguna (8).

Vía evolutiva y relación con la geología

La vertiente difusa sigue la vía evolutiva neutra sulfatada. Pero no sabemos cual vía sigue el agua de napa antes de mezclarse con el agua de la laguna. Lo único que podemos decir es que no hay discrepancia entre esta vía y la geología volcánica de la cuenca de drenaje. Miñique es una laguna sulfatada, un tipo muy común en terrenos volcánicos con presencia de azufre.

Calidad de agua

El agua de la vertiente difusa (6) carece de aptitud para uso potable o agrícola. Pero no se puede descartar la presencia de napas diluidas en el sector oriental de la cuenca.

Balance hídrico

No se puede aplicar las ecuaciones del balance hídrico puesto que desconocemos la composición de los aportes diluidos iniciales. Por otra parte, la concentración de la laguna no es muy elevada (~10 g/l STD) lo que impide despreciar las infiltraciones. Lo único que se puede estimar es el volumen *mínimo* de los aportes, que corresponde a una concentración nula de los componentes entrantes ($C_{ap} = 0$; agua destilada) :

$$V_{ap} = S(H_e - H_p) / (1 - C_{ap}/C_L) = S(H_e - H_p)$$

Con $S = 1,6 \times 10^6 \text{ m}^2$, $H_e = 1,5 \text{ m/año}$ y $H_p = 0,18 \text{ m/año}$ se obtiene

$$V_{ap} = 2\ 112\ 000 \text{ m}^3/\text{año} = 67 \text{ l/s}$$

Conclusiones

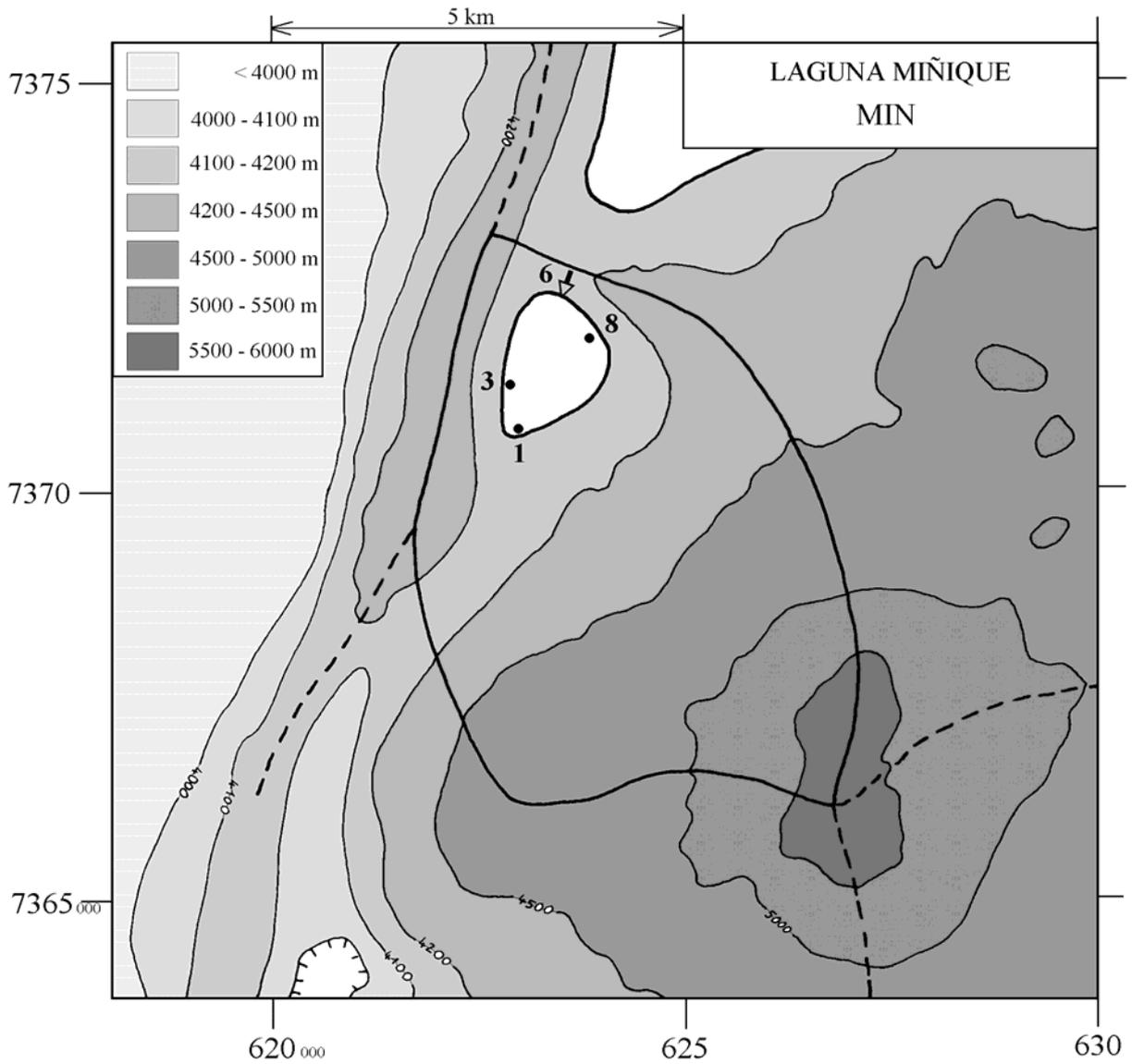
La laguna Miñique tiene una composición química de tipo Na-(Ca) / SO₄-Cl, con una proporción de calcio netamente más elevada que en la vecina laguna Miscanti que es de tipo Na / SO₄-Cl. La única alimentación encontrada es una vertiente difusa y salobre al norte del salar. La composición de este aporte no corresponde a la laguna Miscanti, especialmente en calcio. Concuera mucho

más con la composición de la propia laguna Miñique, lo que sugiere que la vertiente difusa es la descarga de una napa diluida en la cuña salina de la laguna. El caudal entrante de la napa diluida es igual o superior a 67 l/s y proviene del este y noreste de la cuenca.

Referencias y estudios anteriores

Alonso, H. y Vargas, L. 1988. Hidroquímica de lagunas del Altiplano, Segunda Región. V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 Agosto de 1988, Actas, tomo II, D35-D43.

➔ MANANTIAL FLUYENTE	➔ RIO, RIACHUELO	○ POZO
➔ MANANTIAL DIFUSO	• LAGUNA, POZA	□ CALICATA, DREN, CAPTACION



**LAGUNA MIÑIQUE
MIN**

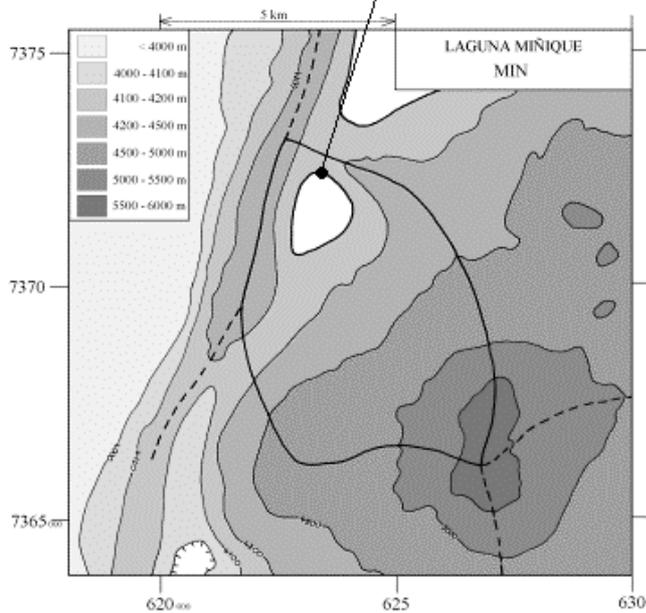
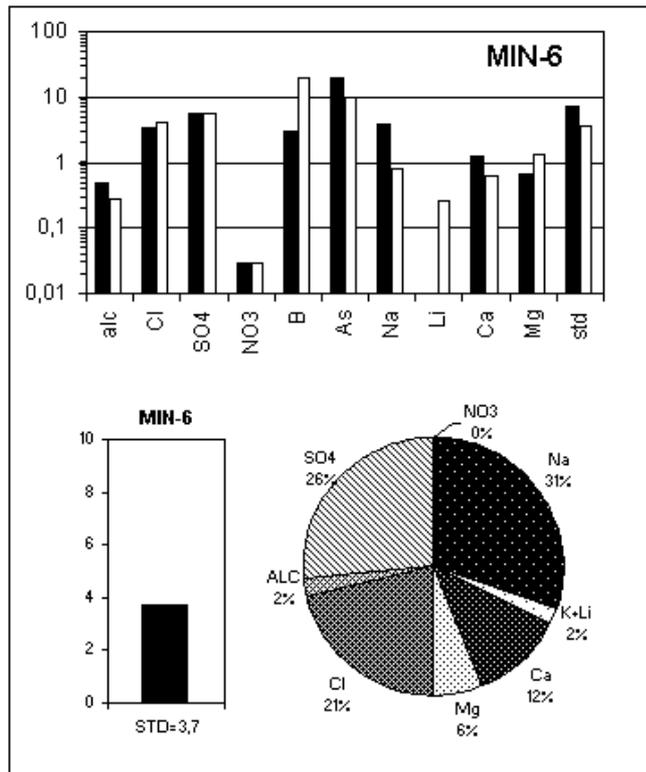
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE	METROS	
MIN-1	14/10/93	12 ^H 00	623025	7370400	4120	Laguna
MIN-3	14/10/93	12 ^H 15	622675	7371450	4120	Laguna
MIN-6	14/10/93	13 ^H 00	623425	7372300	4122	Manantial difuso
MIN-8	14/10/93	13 ^H 30	623700	7371775	4120	Laguna

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
MIN-1	13380	14	1,009	8,67	2,18	3,2	2650	2,40	0,0223	4300	0,06	0,1	44,9	47,3	2,86	0,09	2390	315	1,89	602	270
MIN-3	12090	16,5	1,008	8,52	3,20	3,1	2380	1,93	0,0217	3840	nd	0,1	40,2	44,2	2,60	0,07	2130	294	1,72	561	240
MIN-6	4960	16	1,003	7,62	2,72	1,4	831	0,721	0,0253	1400	1	nd	14,8	34,4	0,996	nd	761	79,8	0,666	254	83
MIN-8	12040	13,5	1,008	8,43	3,04	2,9	2220	1,90	0,0127	3620	0,6	0,1	38,1	44,5	2,26	0,02	1990	266	1,58	541	230

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
MIN-1	10912	44,3	5,28	0,12	164,3	166,6	1,4
MIN-3	9874	118	10,4	0,44	148,3	150,5	1,5
MIN-6	3702	160	1,20	5,3	54,72	55,42	1,3
MIN-8	9279	127	8,22	0,66	139,4	141,2	1,3

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

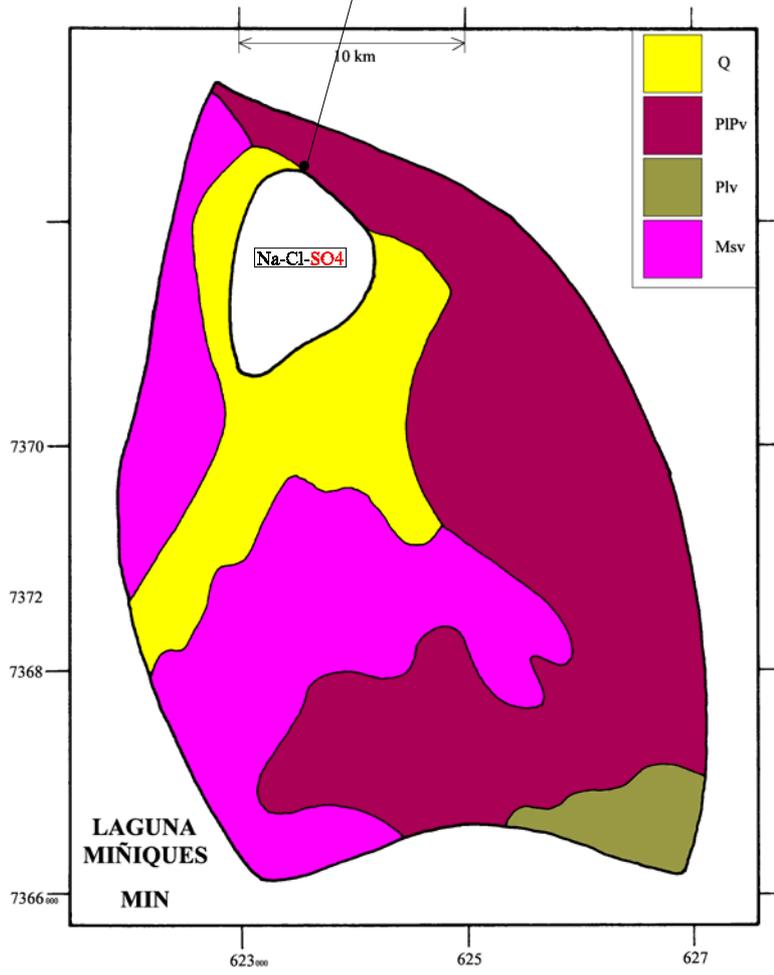
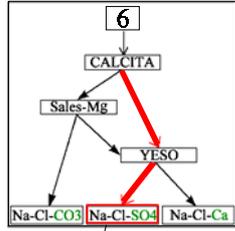
MIN

Q : *Cuaternario*. Depósitos aluviales: gravas, arenas y limos.

PIPv : *Plioceno - Pleistoceno*. Andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o de biotita y dacitas, basaltos y andesitas basálticas subordinados.

Piv : *Plioceno*. Estrato-volcanes II. Andesitas de piroxeno y andesitas de hornblenda y/o biotita. Dacitas subordinadas.

Msv : *Mioceno sup.* Andesitas de piroxeno, subordinamente dacitas, andesitas de hornblenda y/o biotita, basaltos y andesitas basálticas.



SALAR DEL LACO

Introducción

El salar del Laco se encuentra en el rincón sureste del Altiplano de la II Región, delimitada por un anfiteatro de cerros y volcanes de alturas cercanas y sobre los 5000 m. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4250 m
- superficie de la cuenca: 306 km²
- superficie del salar: 16,2 km²
- superficie de las lagunas: 2,2 km²
- precipitaciones: 200 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 1°C

Es un salar de tipo playa con una laguna poco profunda. Se obtuvieron tres aguas de aporte y una de laguna.

Composición de las aguas

Las composiciones de aguas del salar de Laco están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Hemos sacado muestras de la laguna y de tres aportes : dos vertientes difusas y una napa

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
LAC-1	601	Na-(Ca)-(Mg)	Cl-(SO4)-(HCO3)	SO4 (N)
LAC-4	636	Na-(Ca)-(Mg)	Cl-SO4-(HCO3)	SO4 (N)
LAC-7	2076	Na-(Ca)-(Mg)	Cl-(SO4)-(HCO3)	SO4 (N)
<u>LAGUNA</u>				
LAC-5	24433	Na-(Ca)-(Mg)	Cl-(SO4)	SO4

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar del Laco.
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada.

Puesto que el agua de la laguna tiene mas sulfato que calcio (en meq), se puede clasificar el salar del Laco en el mega-grupo de salares sulfatados. Es difícil hacer correlaciones significativas entre los componentes con solamente tres aportes. Notamos primero que la salinidad y la composición de los aportes diluidos (1) y (4) pueden corresponder a aguas de alteración de rocas volcánicas con azufre. La salinidad mas alta de la vertiente difusa (7), que surge justo a la orilla

del salar, se debe o bien a la pre-evaporación de la napa diluida de aporte antes de escurrirse por la vertiente o a una cuña salina del salar. No se observa en el diagrama circular de LAC-7 equimolaridad entre Na y Cl o entre Na+Ca y Cl, dos indicios de redisolución de antiguas evaporitas o salmueras.

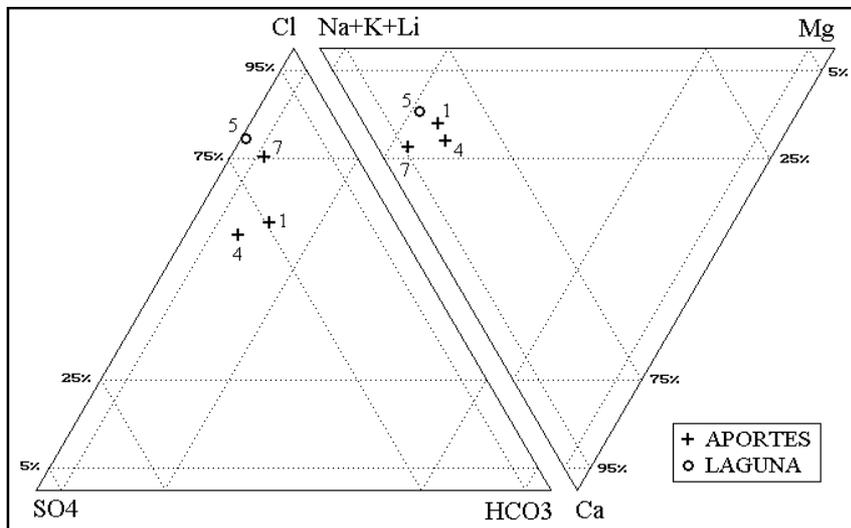


Fig.1 : Composición de las aguas del salar del Lago

Vía evolutiva y relación con la geología

Las tres aguas de aporte siguen al evaporarse la misma vía evolutiva neutra sulfatada. Esta vía caracteriza aguas que drenan rocas volcánicas con azufre (o mineralizaciones) o terrenos volcano-sedimentarios. No hay contradicción con lo que sabemos de la litología de la cuenca.

Evolución cuantitativa de aguas

La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional (LAC-xE) hasta la salinidad de la laguna del salar (LAC-5EQ).

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
LAC-5.EQ	7,45	1,37	11400	3790	40,1	17,2	6460	571	9,16	1090	598	
LAC-4E	8,10	1,44	9110	6260	67,8	30,8	6290	661	8,29	687	762	0,117
LAC-7E	7,97	1,13	11500	3270	84,8	30,5	6410	1070	20,3	1130	318	0,216
LAC-1E	8,36	2,80	9700	5420	85,9	30,9	6760	722	9,25	202	794	0,304

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con la laguna del salar del Lago.
ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

El agua de la laguna, sobresaturada respecto a la calcita (CaCO₃), ha equilibrado su composición con este mineral. La napa de la orilla oeste es el agua cuya evaporación mejor se acerca a la composición de la laguna. Pero, se observa diferencias en SO₄ y Ca que sugieren otros aportes no

encontrados. Las diferencias en boro y silice no son significativas, siendo estos componentes removidos comunamente por arcillas y diatomeas, respectivamente.

Calidad de agua

Las dos aguas, napa y vertiente difusa, de la orilla oeste tienen calidad aceptable para el consumo humano, pero un exceso de boro para el riego. El agua de la vertiente difusa (7) no cumple ni con las normas de potabilidad ni con las de riego. Se nota en particular un fuerte exceso de arsénico: 15 veces por encima del límite de potabilidad. Si la interpretación de la salinidad elevada de la vertiente norte como una cuña salina o una pre-evaporación de napa de aporte diluida es correcta, podrían entonces encontrarse napas diluidas en el norte de la cuenca.

Balance hídrico

Se puede adelantar un orden de magnitud del balance hídrico de la laguna principal del salar. No tenemos datos sobre las variaciones de su superficie. La principal alimentación proviene del sector occidental del salar. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros del balance son:

- $H_e = 1,5 \text{ m/año}$
- $H_p = 0,2 \text{ m/año}$
- $S = 2,2 \text{ km}^2$
- $C_{ap} = 184 \text{ mg/l (LAC-4)}$
- $C_L = 11500 \text{ mg/l (LAC-5)}$

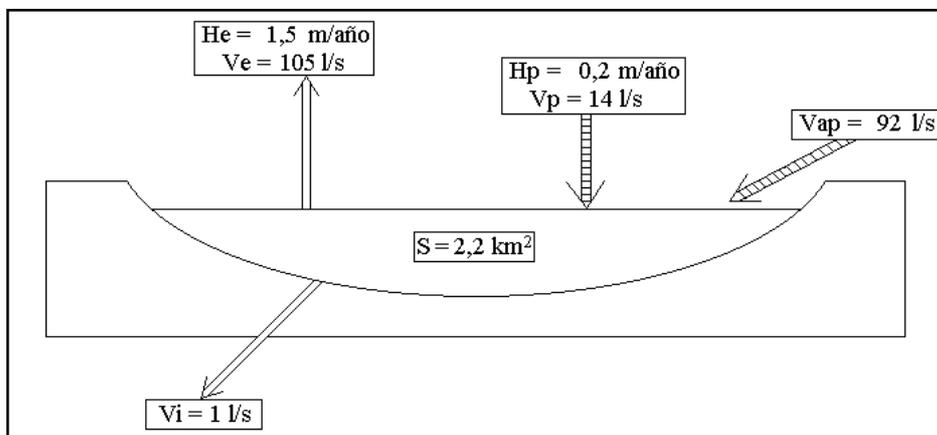


Fig.2 : Balance hídrico de la laguna del salar del Laco.

Se obtiene:

Volumen de aportes: $V_{ap} = S(H_e - H_p) / (1 - C_{ap}/C_L) = 2,9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} = 92 \text{ l/s}$

Volumen de infiltraciones: $V_i = S(H_e - H_p) / (C_L/C_{ap} - 1) = 46800 \text{ m}^3/\text{año} = 1,5 \text{ l/s}$

Redondeamos en la figura 2 las infiltraciones a 1,0 l/s para no considerar decimales poco significativos. Puesto que no se ha encontrado vertientes fluyentes, toda la alimentación se hace por descarga de napa en la orilla del salar.

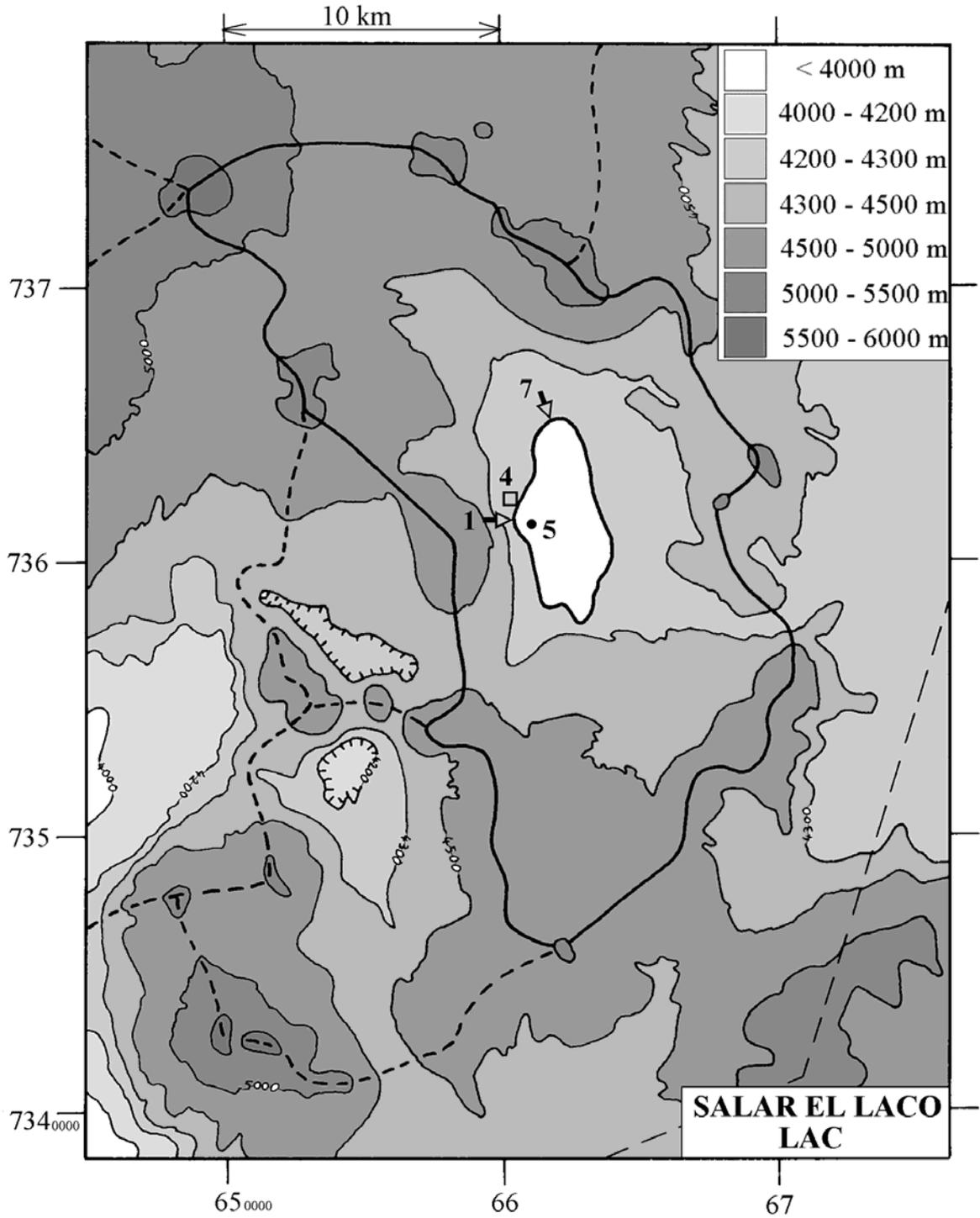
Conclusiones

El salar del Laco está alimentado por descarga de napas de aguas diluidas que siguen al evaporarse la vía neutra sulfatada sin discrepancia con la litología de la cuenca. El salar pertenece al grupo sulfatado cuyas salmueras están enriquecidas en sulfato en desmedro del calcio. Las aguas diluidas son de buena calidad. La cuenca de drenaje podría contener reservas interesantes de aguas diluidas.

Referencias y estudios anteriores

Alonso, H. y Vargas, L. 1988. Hidroquímica de lagunas del Altiplano, Segunda Región. V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 Agosto de 1988, Actas, tomo II, D35-D43.

➔ MANANTIAL FLUYENTE	○ POZO
➤ MANANTIAL DIFUSO	□ CALICATA, DREN, CAPTACION
➡ RIO, RIACHUELO	• LAGUNA, POZA



**SALAR EL LACO
LAC**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
LAC-1	13/10/93	12 ^H 30	660300	7361675	4251	Manantial difuso
LAC-4	13/10/93	13 ^H 00	660575	7362025	4250	Napa (cateo)
LAC-5	13/10/93	13 ^H 15	660950	7361425	4250	Laguna
LAC-7	13/10/93	13 ^H 50	661200	7364750	4252	Manantial difuso

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
LAC-1	962	12	1,001	7,35	1,35	1,05	193	0,146	0,0046	106	0,1	nd	1,68	27,9	0,002	0,31	129	14,1	0,180	29,9	15,5
LAC-4	966	8	1,001	9,19	0,96	0,93	185	0,120	0,0058	138	nd	nd	1,36	28,3	0,016	0,07	125	13,3	0,167	37,7	15,3
LAC-5	32800	16,5	1,019	7,92	4,16	4,45	11500	3,57	0,231	3790	0,06	0,2	40,1	17,2	2,48	0,16	6350	571	9,16	1150	598
LAC-7	3240	18,5	1,002	8,34	2,14	0,97	859	0,468	0,0275	276	0,1	nd	6,25	38,6	0,786	0,07	462	79,0	1,49	140	23,4

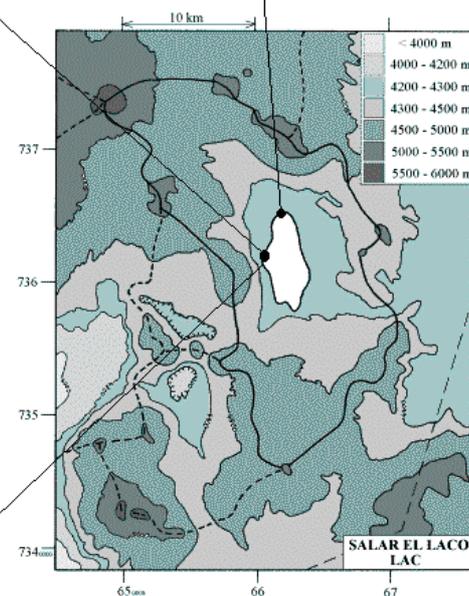
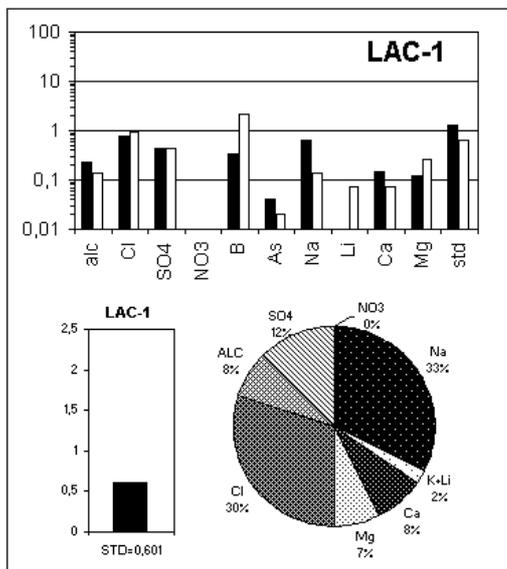
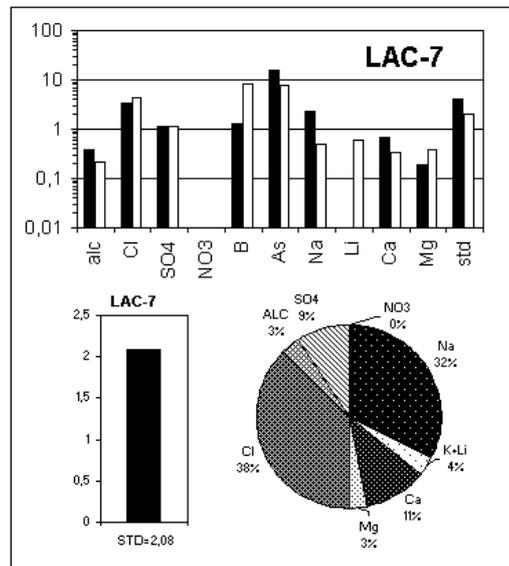
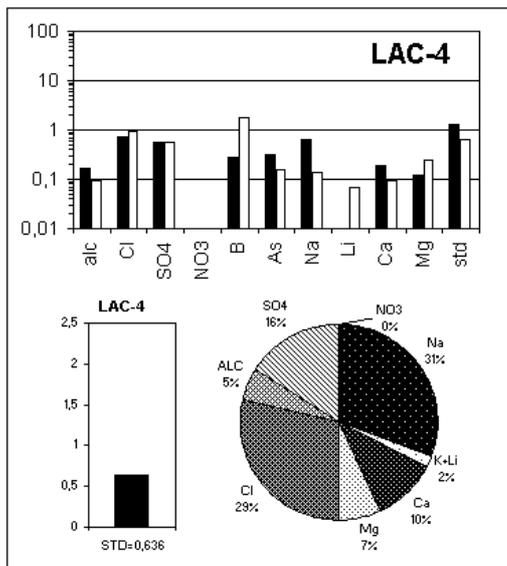
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
LAC-1	601,0	81,7	0,12	6,2	8,799	9,039	2,7
LAC-4	635,8	40,4	4,1	0,05	8,938	9,110	1,9
LAC-5	24433	216	8,4	3,1	398,3	408,5	2,5
LAC-7	2076	116	3,7	0,75	31,23	32,16	2,9

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

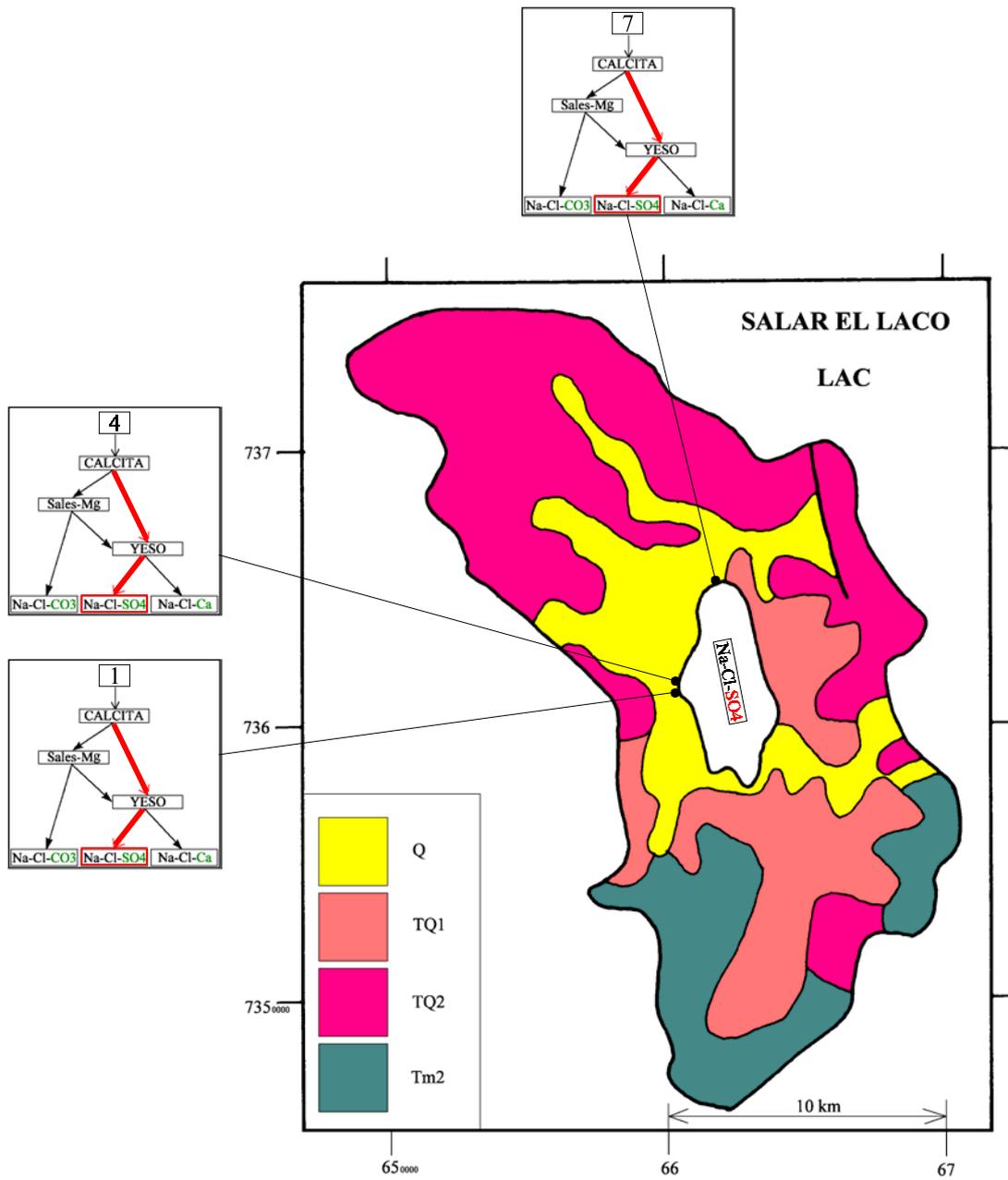
LAC

Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

TQ1 : *Plioceno - Pleistoceno*. Ignimbritas dacíticas, tobas e intercalaciones de sedimentitas clásticas continentales.

TQ2 : *Plioceno - Pleistoceno*. Coladas, tobas y brechas andesíticas y basálticas con intercalaciones de sedimentitas detríticas.

Tm2 : *Mioceno*. Tobas riolíticas y dacíticas, coladas andesíticas y dacíticas.



LAGUNA TUYAJTO

Introducción

La laguna Tuyajto se encuentra en el sur del Altiplano de la II Región y constituye el nivel de base de una cuenca que colinda al oeste con la cuenca del salar Aguas Calientes 3. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4010 m
- superficie de la cuenca: 245 km²
- superficie de la laguna: 2,9 km²
- precipitaciones: 180 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 1°C

La única alimentación visible es un río en bofedal con varias ramas que drenan el sector oriental de la cuenca de drenaje. Hemos extraído solamente dos muestras: el río y la laguna. Las interpretaciones son entonces muy preliminares.

Composición de las aguas

El agua del río tiene una salinidad elevada de 6,6 g/l STD. La laguna es una salmuera de 131 g/l STD. Los tipos químicos son (Fig.1):

- río : Na-(Ca)-(Mg) / Cl-(SO₄)
- laguna Na-(Mg) / Cl-(SO₄)

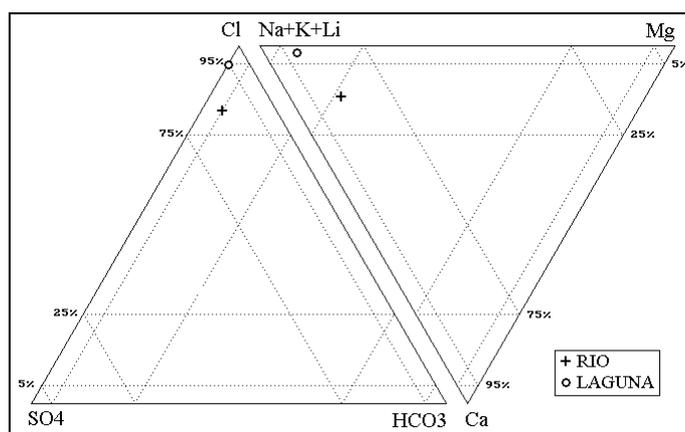


Fig.1. Composición de las aguas de la laguna Tuyajto

Para tener un indicio del origen de la alta salinidad del río, comparamos las concentraciones en miliequivalentes de cationes y aniones que forman las principales sales evaporíticas o tipos de salmueras que generalmente salinizan las aguas diluidas. Se ha obtenido :

- Na = 34,7 % Cl = 41,6 % (halita)
- Na+Ca = 41,7 % Cl = 41,6 % (salmueras Na-Ca / Cl)
- Na+Mg = 40,9 Cl = 41,6 % (salmueras Na-Mg / Cl)
- Ca = 7,0 % SO4 = 6,6 % (yeso)

Se nota que la mejor concordancia equimolar corresponde a una salinización por salmueras Na-Mg-Ca / Cl. Sin embargo, no se puede sacar conclusiones definitivas con un solo punto.

Evolución de aguas

El agua del río sigue la vía evolutiva neutra sulfatada lo que puede corresponder tanto a rocas sedimentarias como a rocas volcánicas con azufre. De todas maneras la alta salinidad del río indica claramente que su composición no proviene de la alteración de rocas volcánicas de la cuenca de drenaje. Lo que se puede notar es la buena concordancia entre la vía evolutiva del agua del río y la composición de la laguna Na-(Mg) / Cl-(SO₄).

La tabla 1 presenta la composición calculada del agua del río evaporada por simulación computacional hasta la salinidad de la laguna. La columna "desviación" da el coeficiente del chi-cuadrado adaptado que mide el grado de semejanza entre la solución evaporada y la solución real.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>TUY-4</u>	7,42	7,00	75300	5530	95,8	32,5	44400	2210	33,7	930	2140	
TUY-1E	7,88	2,63	72300	9200	171	19,3	40600	2600	50,5	1670	3740	0,164

Tabla 1 : Comparación del agua evaporada del río con la laguna Tuyajto.
ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

La alcalinidad del agua calculada TUY-1E no incluye los boratos que entran efectivamente en la alcalinidad de la laguna. Observamos que la concentración de los componentes menores en la laguna, excepto la sílice, es netamente inferior a su concentración en el agua evaporada por computación. Las razones de las concentraciones para SO₄, B, K, Li, Ca y Mg son parecidas : entre 1,5 y 1,8. Esta discrepancia puede también interpretarse como un exceso de Na y Cl en la laguna. Eso sugiere fuertemente que la laguna ha sido enriquecida en cloruro de sodio reciclado. Sales eflorescentes cristalizan alrededor de la laguna por evaporación de napas subterráneas a través de los sedimentos cuaternarios. En época de lluvia estas sales constituidas esencialmente de halita (NaCl) son lixiviadas y aportadas a la laguna.

Calidad de aguas

En vista de su alta salinidad el agua del río no presenta ningún interés domestico o agrícola. Si su alta salinidad es efectivamente producto de una salinización por antiguas salmueras, la posibilidad de encontrar aguas muy diluidas un poco más arriba en la cuenca de drenaje no es muy alentadora.

Balance hídrico

La altura de evaporación de la laguna debe ser reducida en un 10 % debido a su alta salinidad. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 1,35$ m/año (1,5 - 0,15)
- $H_p = 0,18$ m/año
- $S = 2,9$ km²
- $C_{ap} = 3161$ mg/l
- $C_L = 75\ 300$ mg/l

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p) / (1 - C_{ap} / C_L) = 3\ 540\ 000$ m³/año = 112 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p) / (1 - C_L / C_{ap}) = 150\ 000$ m³/año ~ 5 l/s

No se observó un caudal tan elevado de 112 l/s. Es probable que la laguna sea alimentada principalmente por una napa subterránea de composición similar a la del río, el cual sería simplemente un afloramiento de esta napa.

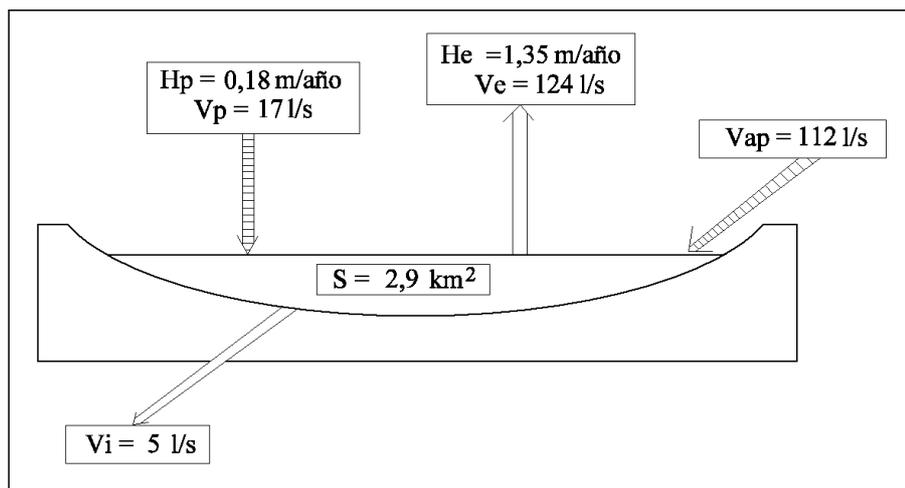
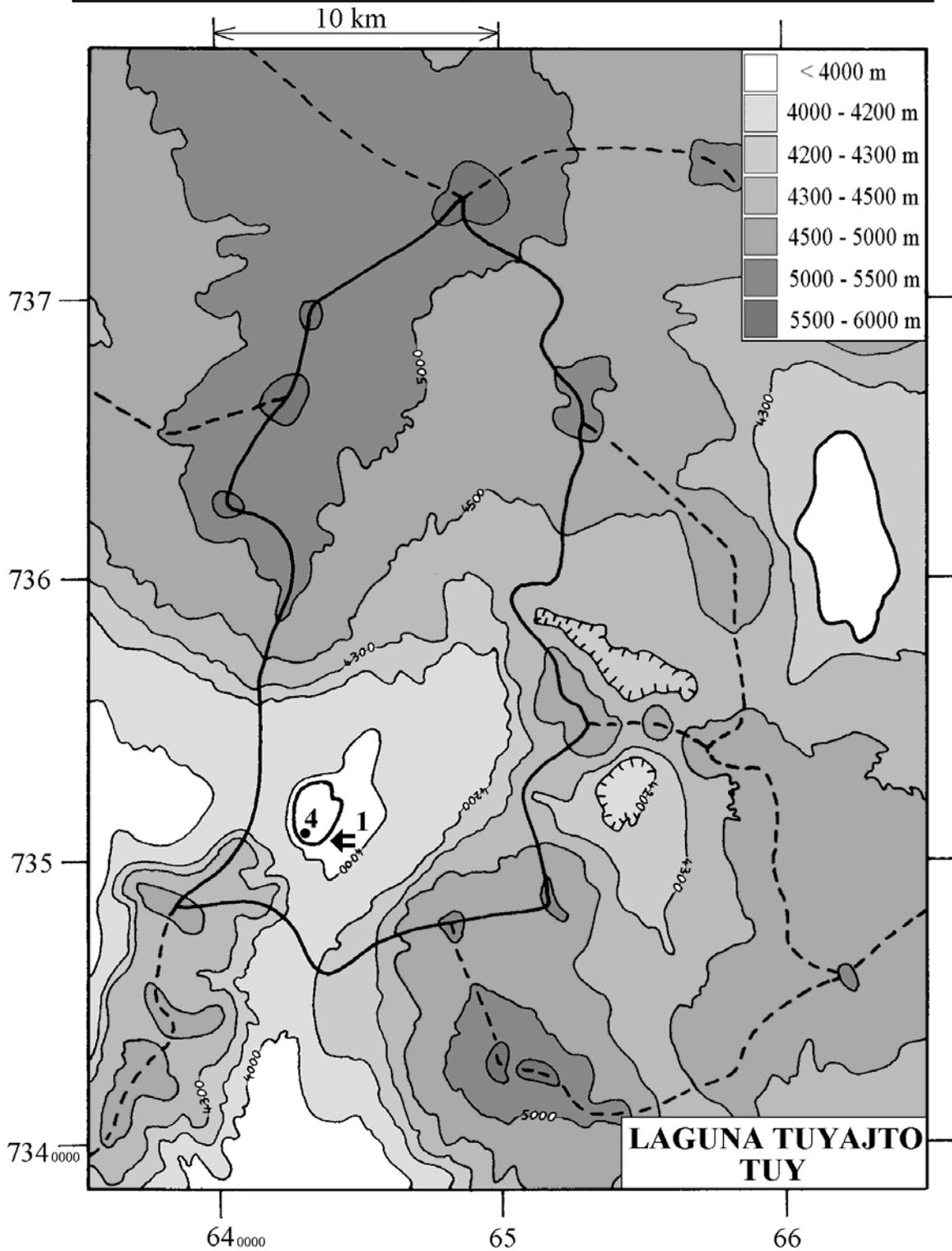


Fig.1 : Balance hídrico de la laguna Tuyajto

Conclusiones

Tenemos muy pocos datos para sacar conclusiones firmes. La cuenca de la laguna Tuyajto no parece presentar potencialidades alentadoras para recursos de agua, por lo menos cerca de la laguna donde las napas no son muy profundas. La única agua de aporte que hemos encontrado está salinizada, probablemente por antiguas salmueras de tipo Na-Mg-Ca / Cl de origen desconocido.

➔ MANANTIAL FLUYENTE	○ POZO
➤ MANANTIAL DIFUSO	□ CALICATA, DREN, CAPTACION
➡ RIO, RIACHUELO	• LAGUNA, POZA



**LAGUNA TUYAJTO
TUY**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
TUY-1	13/10/93	10 ^H 30	644250	7350525	3993	Río
TUY-4	13/10/93	11 ^H 00	643500	7350825	3990	Laguna

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
TUY-1	10070	1	1,005	7,27	5,59	0,76	3160	0,775	0,041	679	0,87	nd	7,33	41,4	0,482	0,23	1710	111	2,17	300	160
TUY-4	142500	3,5	1,088	7,42	7,00	1,6	75300	13,0	0,225	5530	0,87	0,7	95,8	32,5	4,91	na	44400	2210	33,7	930	2100

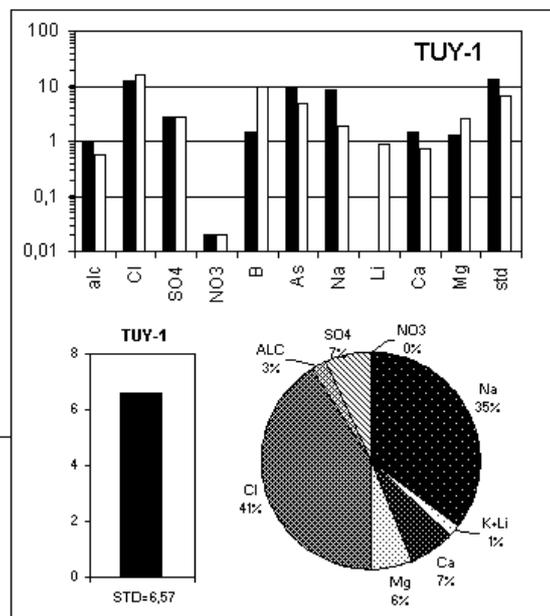
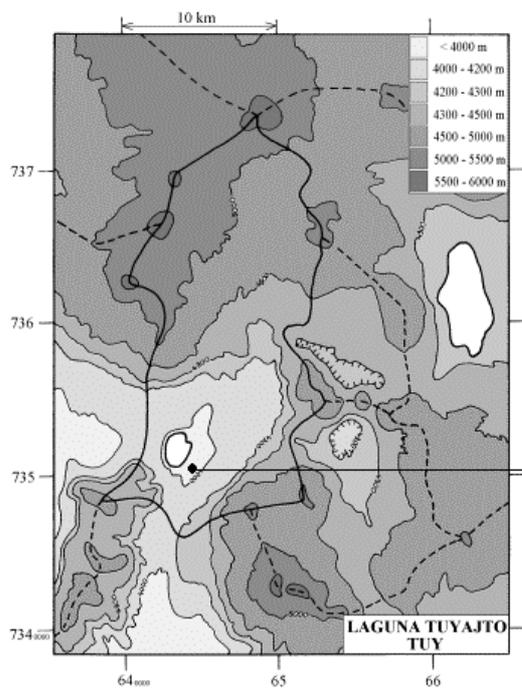
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
TUY-1	6572	339	0,90	36	105,5	108,7	3,0
TUY-4	131204	388	7,56	20	2214	2242	1,3

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones(meq/l); DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

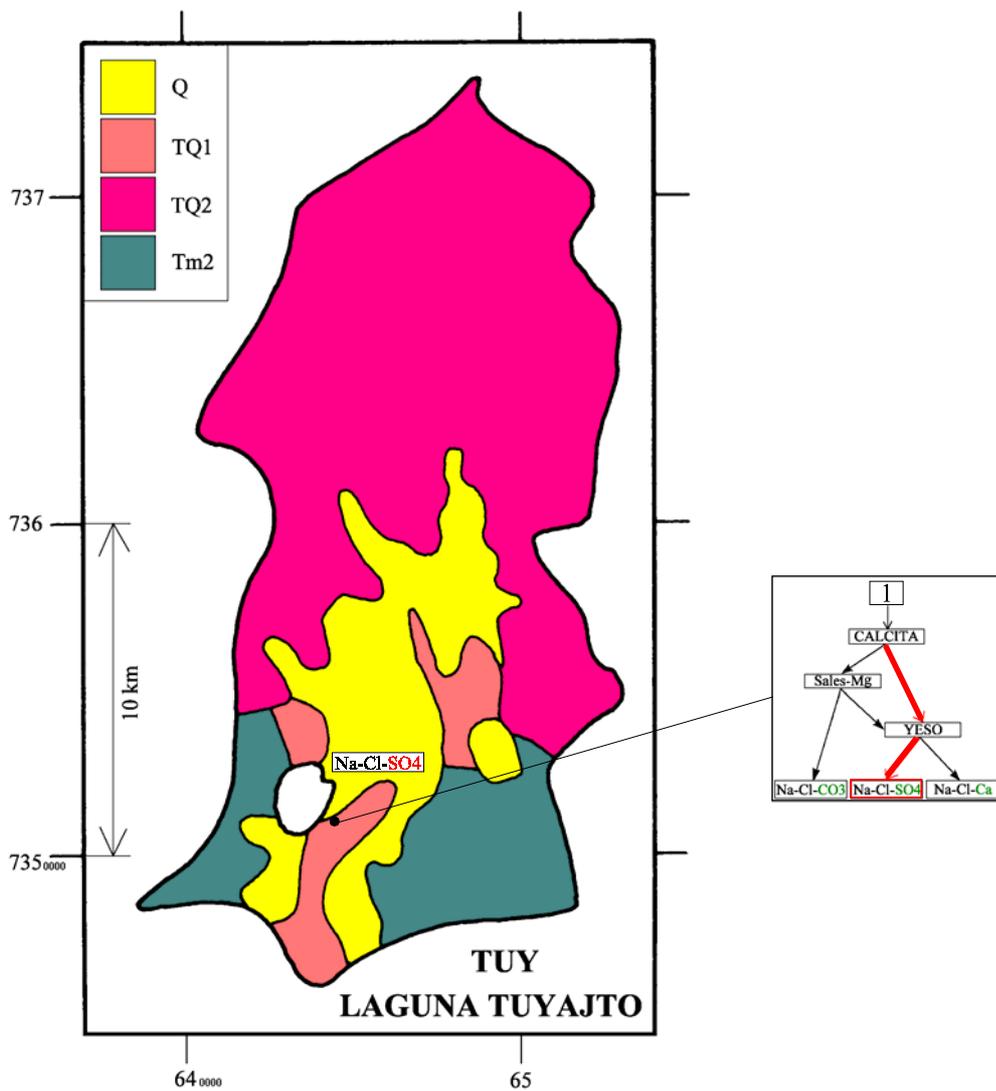
TUY

Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

TQ1 : *Plioceno - Pleistoceno*. Ignimbritas dacíticas, tobas e intercalaciones de sedimentitas clásticas continentales.

TQ2 : *Plioceno - Pleistoceno*. Coladas, tobas y brechas andesíticas y basálticas con intercalaciones de sedimentitas detríticas.

Tm2 : *Mioceno*. Tobas riolíticas y dacíticas, coladas andesíticas y dacíticas.



SALAR DE AGUAS CALIENTES 3

Introducción

En el presente trabajo se denomina como salar de Aguas Calientes 3 al cuerpo salino, con una estrangulación central, que en mapas del IGM y del Sernageomín se designan separadamente como salar de Aguas Calientes la parte norte y salar de Talar la parte sur del estrechamiento. Es un salar de tipo playa con lagunas poco profundas de extensión variable.

- altura: 3950 m
- superficie de la cuenca: 476 km²
- superficie del salar: 46 km²
- superficie de las lagunas: 2-3 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 1°C

En cada sub-salar se sacó muestras de una vertiente fluyente, de dos vertientes difusas y de una laguna.

Composición de los aportes y lagunas

Las composiciones de aguas del salar de Aguas Calientes 3 están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VÍA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
AC3-7	2425	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	SO ₄ (N)
AC3-14	2809	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
AC3-12	3988	Ca-Na-(Mg)	/ SO ₄ -Cl	SO ₄ (N)
AC3-1	5207	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-(SO ₄)	SO ₄ (N)
AC3-10	8577	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	Ca
AC3-13	10071	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-SO ₄	SO ₄ (N)
<u>LAGUNAS</u>				
AC3-15	3792	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-(SO ₄)	SO ₄
AC3-4	25032	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Aguas Calientes 3. SO₄ (N) = vía neutra sulfatada; Ca = vía cálcica.

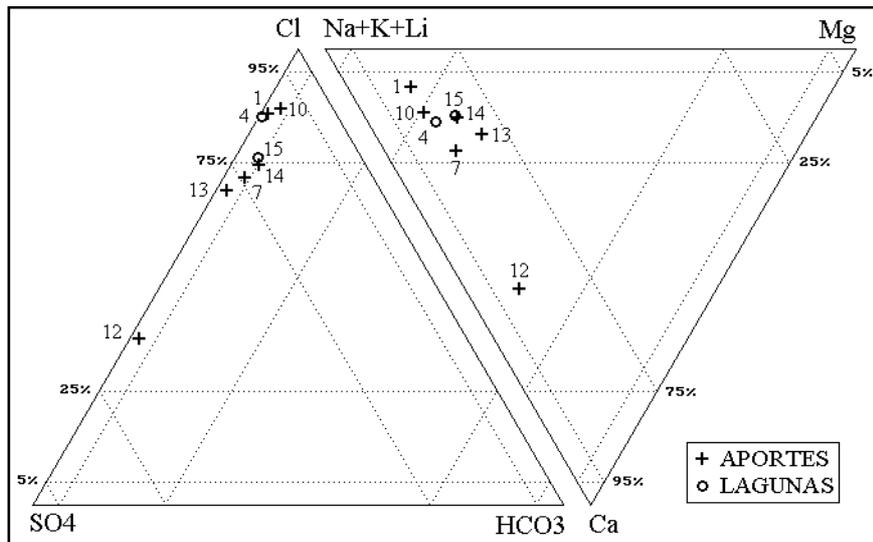


Fig.1 : Composición de las aguas de aporte y salmueras del salar de Aguas Calientes 3.

Observando el diagrama de aniones, se distingue tres tipos de aguas de aporte por su contenido en sulfato:

- AC3-1 y 10 de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl-(SO₄)
- AC3-7, 13, 14 de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl-SO₄
- AC3-12 de tipo Ca-Na / SO₄-Cl bien distinta de las demás.

Todos los aportes tienen una salinidad elevada que no corresponde a aguas de alteración de rocas volcánicas. Las menos concentradas son las dos vertientes fluyentes (2 - 3 g/l STD). Las vertientes difusas son más saladas (4 g/l hasta 10 g/l STD). El origen de la alta salinidad puede sugerirse de la figura 2.

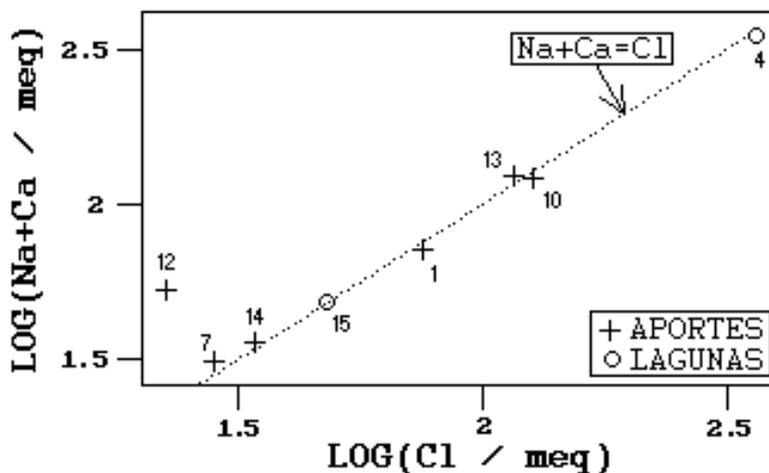


Fig.2 : Relación entre Na+Ca y Cl en las aguas de Aguas Calientes 3.

Con excepción de la vertiente (12), los puntos de todas las vertientes y lagunas se encuentran muy cerca de la recta de equimolaridad $Na+Ca = Cl$, lo que indica que la alta salinidad de los

aportes se debe a un mezcla de salmueras de tipo Na-Ca / Cl con napas diluidas de la cuenca de drenaje.

Hay un problema con el origen de las altas concentraciones en sulfato de las aguas de aporte. Se nota en la figura 3 una cierta correlación equimolar entre Ca y SO₄, lo que sugiere una redisolución del yeso (CaSO₄·2H₂O). Se observa también que la recta de regresión es paralela y muy cerca de la recta de equimolaridad Ca = SO₄. Además el coeficiente de correlación es elevado (0,95). Sin embargo, no se puede considerar conjuntamente un aporte de salmuera de tipo Na-Ca / Cl y una redisolución de CaSO₄. La concentración en Ca debería ser netamente superior a la de SO₄, puesto que Ca proviene de dos fuentes y SO₄ de una solamente. La buena correlación entre Ca y SO₄ podría tener otro origen que la redisolución del yeso. El problema queda pendiente.

El agua de la vertiente (12) presenta concentraciones equimolares en Na y Cl, lo que sugiere una redisolución de halita (NaCl). Las concentraciones más altas de las vertientes difusas puede provenir de una mezcla con la cuña salina o de la pre-evaporación de las napas antes de descargarse en las orillas del salar.

Composición de las lagunas

Las dos muestras de lagunas tienen las siguientes salinidades y composiciones :

- laguna (4) es de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl-(SO₄) con salinidad de 25 g/l
- laguna (15) de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl-SO₄ con salinidad de 3,8 g/l

Laguna (15) es salobre y menos concentrada que todas las vertientes difusas. Las dos lagunas no parecen tener composiciones porcentuales muy diferentes : un poco más sulfato en (15) que en (4). Sin embargo, esta pequeña diferencia es fundamental : laguna (4) contiene más Ca que SO₄, al contrario de laguna (15) que tiene más SO₄ que Ca. Al seguir evaporándose estas soluciones, se obtiene salmueras drásticamente distintas :

- salmuera de tipo Na-Ca / Cl para AC3-4
- salmuera de tipo Na / Cl-SO₄ para AC3-15

Desarrollaremos este punto en el paragrafo sobre las vías evolutivas.

Vías evolutivas y relación con la geología

Todas las aguas de aporte siguen la vía evolutiva neutra sulfatada, excepto AC3-10 que sigue la vía cálcica. Presentamos dos trayectos evaporatorios típicos en la figura 3.

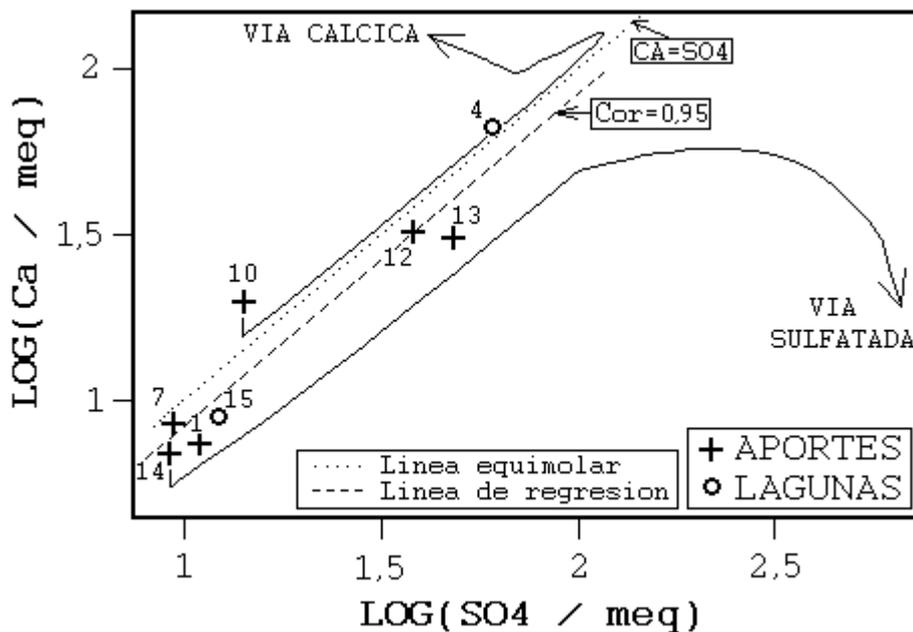


Fig.3 : Relación entre Ca y SO₄ en las aguas de Aguas Calientes 3.

Las altas salinidades de los aportes inducen a buscar terrenos sedimentarios con sales evaporíticas, los que no existen en la superficie de la cuenca. La vía evolutiva neutra sulfatada puede corresponder igualmente a terrenos sedimentarios o volcánicos con azufre. La vía cálcica discrepa con la geología volcánica de la cuenca. Otra discrepancia es la composición de la laguna norte (4) de tipo Na-Ca / Cl, mientras que sus aportes más cercanos (1 y 7) siguen la vía evolutiva sulfatada. Eso sugiere que la principal alimentación de la laguna norte proviene de la vertiente (10) más distante, pero que sigue la vía cálcica.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 1 presenta la composición calculada de las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las aguas (4) y (15) de lagunas. Para la laguna salobre (15), se considera solamente los aportes más diluidos. Las aguas de las lagunas son muy sobresaturadas en calcita. Por eso hemos recalculado la composición de estas soluciones una vez llevadas al equilibrio después de precipitar la calcita. Los valores de la columna "desviación" son los coeficientes del chi-cuadrado adaptado que miden el grado de semejanza entre las soluciones de aporte evaporadas (AC3-xxE) y la solución real equilibrada (AC3-xx.EQ).

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>AC3-4.EQ</u>	8,18	0,942	4410	679	9,60	28,6	2370	153	2,78	312	202	
AC3-10E	8,16	0,875	4450	685	9,69	28,8	2390	154	2,80	313	204	0,00007
AC3-1E	8,25	1,13	4230	854	15,3	32,4	2400	241	3,22	213	202	0,065
AC3-7E	8,07	0,779	3570	1650	18,7	32,4	1950	225	2,00	522	231	0,174
AC3-14E	8,19	1,13	3780	1390	31,5	32,5	2120	159	7,54	296	301	0,267
AC3-12E	8,03	0,683	2730	2660	12,7	32,5	1660	190	1,86	682	261	0,267
<u>AC3-15.EQ</u>	8,30	1,17	1670	589	13,2	29,4	931	68	3,19	147	128	
AC3-14E	8,29	1,12	1690	619	14,0	33,1	944	71	3,36	144	134	0,003
AC3-7E	8,17	0,834	1590	738	8,38	33,0	870	101	0,89	243	103	0,197

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las de lagunas AC3-4 y AC3-15 del salar de Aguas Calientes 3. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Tenemos una concordancia excepcional entre las aguas de las lagunas y algunos de sus aportes. La laguna norte recibe aparentemente toda su agua de la vertiente difusa (10). Las vertientes (1) y (7), más cerca de la laguna, no parecen tener influencia sobre su composición. La concordancia es tan buena que podemos preguntarnos si la relación no es inversa y cabe la pregunta: ¿ Acaso lo que tomamos por una vertiente difusa (AC3-10) no sería una salida de agua desde salar ? (tal caso ocurre en Coposa). Hay un argumento en contra de esta hipótesis. La laguna tiene una composición de tipo cálcico. El principal aporte a la laguna debe entonces seguir la vía calcica al evaporarse. AC3-10 es la única agua que sigue tal vía ; las dos otras vertientes (1 y 7) siguen la vía neutra sulfatada por lo que no pueden constituir aportes mayores a la laguna.

También aparece un problema en la laguna sur. Su alimentación proviene obviamente de la vertiente fluyente (14). Aquí no hay ninguna duda sobre el movimiento de las aguas. Pero existe una vertiente difusa más cerca a la laguna (AC3-13) cuya salinidad es 3 veces más elevada. No sabemos cual es la relación entre esta vertiente y la laguna.

Calidad de agua

No hemos encontrado ningún agua de calidad aceptable para uso potable o agrícola, ya que todas sobrepasan ampliamente las normas respectivas. Como hemos visto que la alta salinidad de los aporte se debe en gran parte a la redisolución de antiguas salmueras o evaporitas, la posibilidad de encontrar aguas muy diluidas un poco más arriba en la cuenca de drenaje no es muy alentadora.

Balace hídrico

La buena identificación de los aportes de cada laguna debería permitir establecer los balances hídricos de las dos lagunas estudiadas. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son :

- Laguna norte :

- $H_e = 1,5$ m/año
- $H_p = 0,15$ m/año
- $S = 1,4$ km²
- $C_{ap} = 4470$ mg/l (AC3-10)
- $C_L = 12800$ mg/l (AC3-4)

- Laguna sur

- $H_e = 1,5$ m/año
- $H_p = 0,15$ m/año
- $S = 0,8$ km²
- $C_{ap} = 1210$ mg/l (AC3-14)
- $C_L = 1700$ mg/l (AC3-15)

Laguna norte :

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 2\,900\,000$ m³/año = 92 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 1\,000\,000$ m³/año = 32 l/s

Laguna sur :

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 3\,750\,000$ m³/año = 119 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 2\,700\,000$ m³/año = 85 l/s

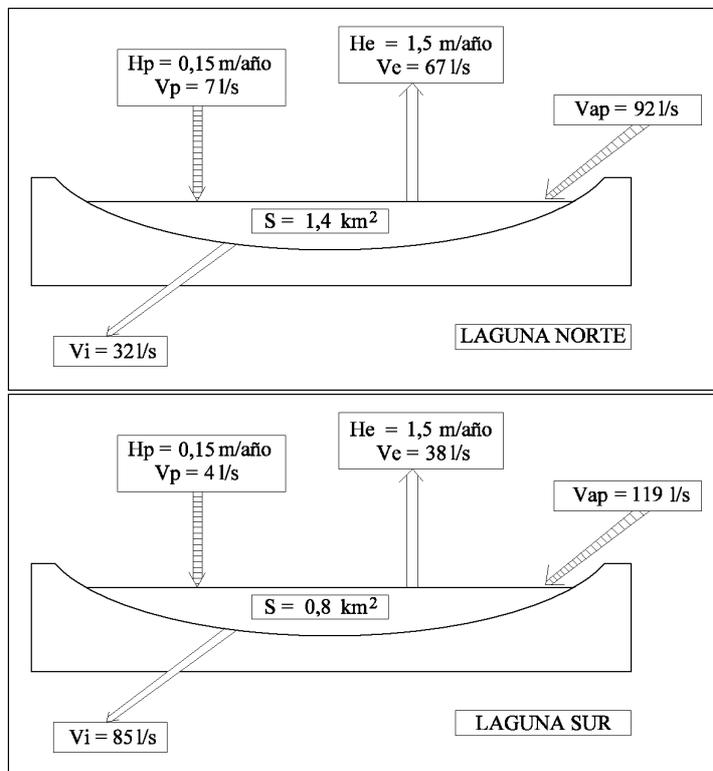


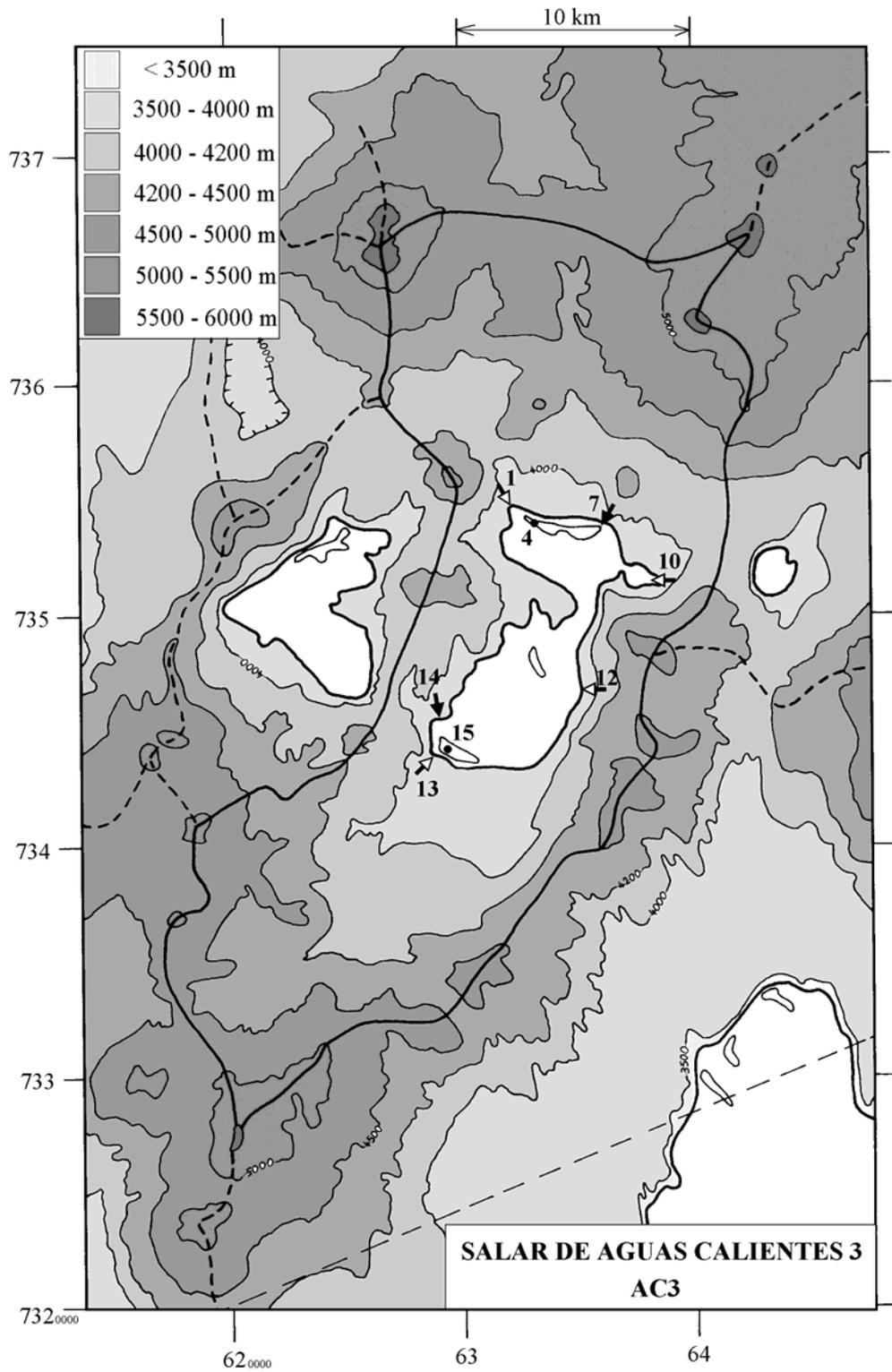
Fig.4 : Balance hídrico de dos lagunas del salar de Aguas Calientes 3

Caudales de aportes de 92 l/s para la vertiente difusa AC3-10 y 119 l/s para la vertiente fluyente AC3-14 no fueron observados en terreno. Es posible que las superficies de las lagunas utilizadas en los cálculos no correspondan al equilibrio, sino a su máxima extensión después de la época de lluvia. Las tasas de infiltración son muy elevadas, en particular en la laguna sur. Para comprobar todos estos valores sería necesario una investigación más detallada.

Conclusiones

El salar de Aguas Calientes 3 presenta varios problemas. El origen de la alta salinidad no es totalmente clara. Se observa una salinización por salmueras cálcicas de tipo Na-Ca / Cl, como en los salares de Ascotán, Carcote y Aguas Calientes 1; pero se sospecha también una redisolución de yeso. Sin embargo, si estas dos fuentes fuesen los principales aportes en Na, Ca, Cl y SO₄, no se observaría las relaciones equimolares entre Na+Ca y Cl de una parte, y Ca y SO₄ de otra parte. Existen probablemente varias napas con diferentes composiciones que se mezclan en el salar. Existen en las lagunas los dos tipos de soluciones evaporadas, cálcicas al norte y sulfatadas al sur. Otro problema es la casi perfecta igualdad, muy excepcional, entre la composición de las lagunas y uno de sus aportes, a pesar de que otros, de composición distinta, también alimentan las lagunas. Finalmente, los balances hídricos de las dos lagunas no parecen muy realistas. Se recomienda el estudio de este salar para alumnos que desearían adquirir una buena experiencia en este tema. En lo que se refiere a calidad de agua, no hay muchas posibilidades de encontrar aguas diludas en cantidades aprovechables en la cuenca de Aguas Calientes 3.

➔ MANANTIAL FLUYENTE	➔ RIO, RIACHUELO	○ POZO
➤ MANANTIAL DIFUSO	• LAGUNA, POZA	□ CALICATA, DREN, CAPTACION



**SALAR DE AGUAS CALIENTES 3
AC3**

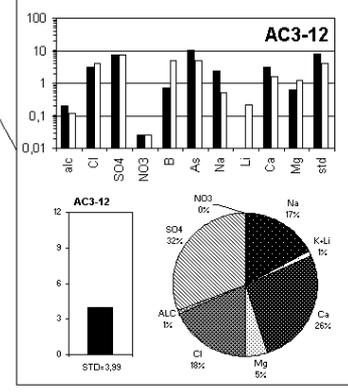
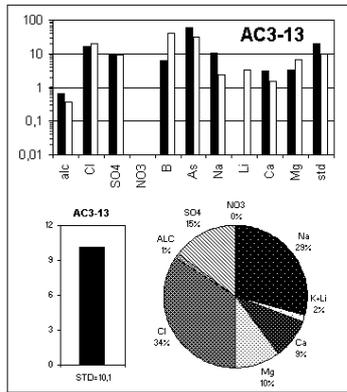
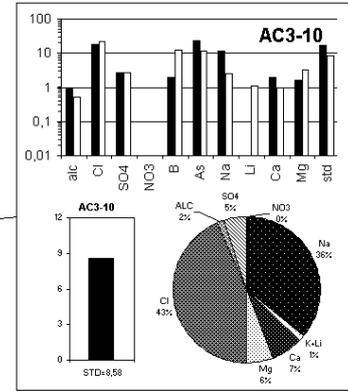
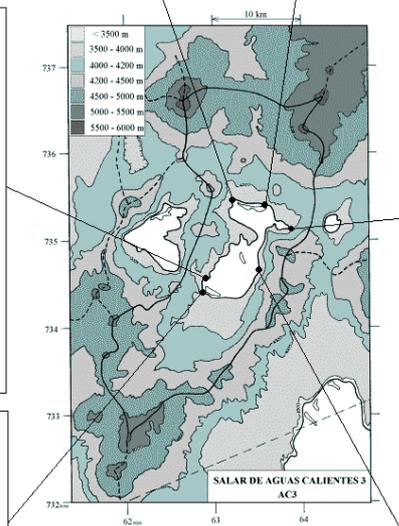
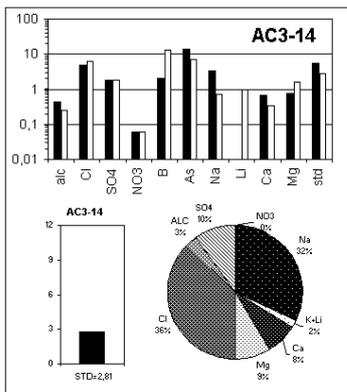
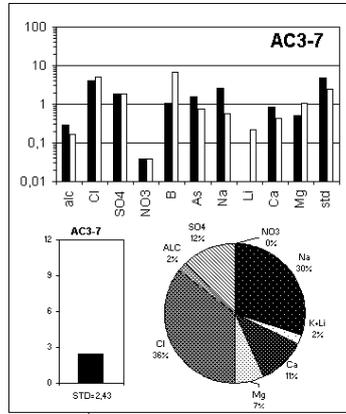
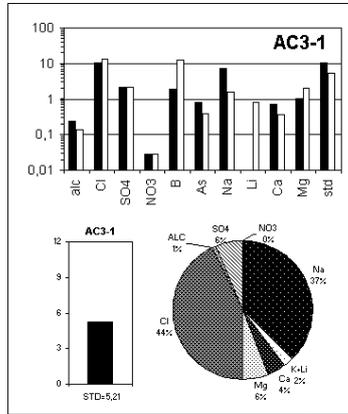
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
AC3-1	12/10/93	10 ^H 30	632350	7354925	3952	Manantial difuso
AC3-4	12/10/93	11 ^H 00	632875	7354250	3950	Laguna
AC3-7	12/10/93	11 ^H 45	636450	7353650	3951	Manantial corriente
AC3-10	12/10/93	12 ^H 30	638700	7351525	3960	Manantial difuso
AC3-12	12/10/93	13 ^H 15	635175	7346525	3952	Manantial difuso
AC3-13	12/10/93	14 ^H 30	628875	7343950	3952	Manantial difuso
AC3-14	12/10/93	15 ^H 00	628750	7345950	3955	Manantial corriente
AC3-15	12/10/93	18 ^H 30	629500	7344250	3950	Laguna

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
AC3-1	9600	9,5	1,004	7,73	1,40	0,91	2660	1,14	0,058	530	1,2	nd	9,49	26,0	0,040	0,23	1470	150	2,00	146	125
AC3-4	34400	5,5	1,019	7,89	2,95	2,66	12800	3,72	0,121	2910	0,50	0,2	29,5	45,9	2,44	0,49	6560	489	8,19	1340	651
AC3-7	3810	26,5	1,002	7,34	1,63	0,63	994	0,839	0,039	453	1,7	nd	5,15	48,2	0,078	0,04	524	61,8	0,548	172	63,4
AC3-10	13680	0	1,006	8,12	5,10	0,95	4470	1,02	0,025	679	nd	nd	9,60	28,6	1,16	0,18	2320	152	2,78	395	202
AC3-12	4920	13,5	1,003	8,00	1,18	2,32	792	0,337	0,073	1820	1,1	nd	3,68	36,1	0,506	0,32	483	55,1	0,541	642	75,8
AC3-13	13900	16	1,008	8,25	3,77	1,82	4120	3,2	0,127	2320	0,19	0,1	30,9	22,8	3,09	0,45	2150	171	8,33	610	399
AC3-14	4540	16	1,003	7,08	2,54	0,57	1210	1,09	0,043	440	2,7	0,2	9,98	40,6	0,698	0,16	662	50,4	2,39	138	95,3
AC3-15	6160	7	1,003	9,10	2,72	0,74	1700	1,46	0,059	588	0,06	0,1	13,2	37,5	0,861	0,31	911	68,0	3,19	178	128

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
AC3-1	5207	82,4	0,60	2,4	85,51	87,52	2,3
AC3-4	25032	158	4,62	3,2	419,1	424,8	1,3
AC3-7	2425	97,6	0,48	5,7	38,24	39,14	2,3
AC3-10	8577	295	6,18	4,4	141,6	145,3	2,6
AC3-12	3988	65,9	1,74	1,0	60,75	61,62	1,4
AC3-13	10071	182	10,9	1,3	162,3	168,3	3,6
AC3-14	2809	154	0,30	18	45,14	45,89	1,6
AC3-15	3792	93,9	16,6	0,1	61,22	63,04	2,9

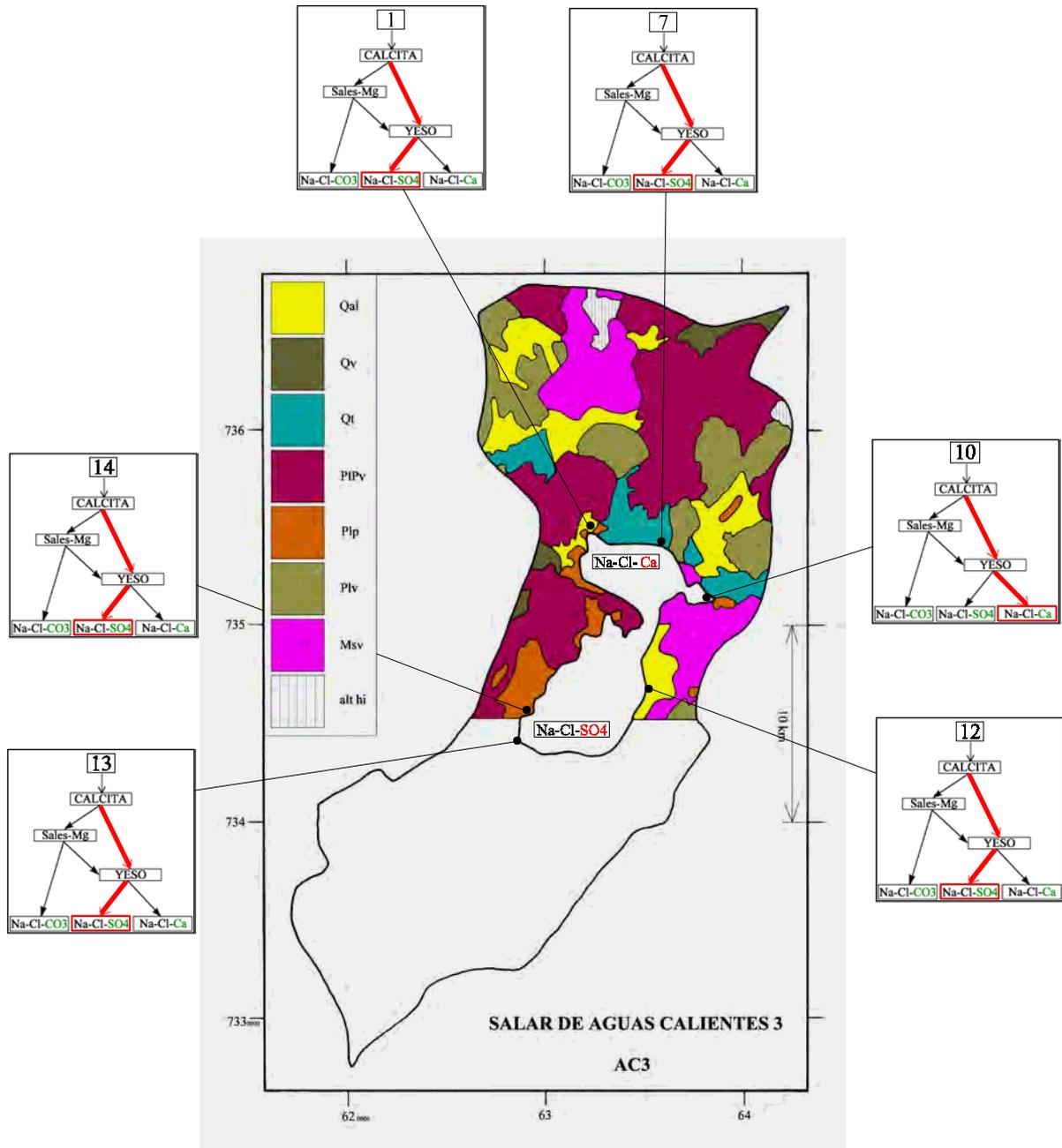
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

AC3

- Qal** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales: gravas, arenas y limos.
- Qv** : *Cuaternario*. Estrato-volcanes IV. Dacitas y andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o biotita, basaltos y andesitas basálticas subordinadas.
- Qt** : *Cuaternario*. Ignimbrita Tuyajto. Tobas de cristales y vidrio.
- PIPv** : *Plioceno - Pleistoceno*. Andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o de biotita y dacitas, basaltos y andesitas basálticas subordinados.
- Plp** : *Plioceno*. Ignimbrita Patao. Toba dacítica de vidrio y escasos pómez y cristales.
- Plv** : *Plioceno*. Estrato-volcanes II. Andesitas de piroxeno y andesitas de hornblenda y/o biotita. Dacitas subordinadas.
- Msv** : *Mioceno sup.* Andesitas de piroxeno, subordinadamente dacitas, andesitas de hornblenda y/o biotita, basaltos y andesitas basálticas.
- alt hi** : alteración hidrotermal.



SALAR DE CAPUR

Introducción

El salar de Capur se encuentra al sur del Altiplano de la II Región hacia el oeste del salar Aguas Calientes 3. Su cuenca colinda con la del salar de Atacama. A pesar de estar cercana a importantes rutas de comunicación, es un salar muy poco conocido por su difícil acceso, tanto para llegar a él como para rodearlo. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 3950 m
- superficie de la cuenca: 137 km²
- superficie del salar: 27 km²
- superficie de las lagunas: 0,9 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 1°C

Es un salar de tipo playa con lagunas superficiales que no parecen variar mucho de extensión de un año al otro. Cuando lo visitamos, las lagunas tenían exactamente la misma forma y superficie que figuraban en el mapa topográfico IGM 1/50 000. Por dificultad de acceso, hemos podido solamente estudiar el sector norte, donde se encuentra el principal sistema lagunar y por consecuencia, también los principales aportes. Sin embargo, existen otras lagunas al sur.

Composición de las aguas

Las composiciones de aguas del salar de Capur están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. A lo largo de la orilla norte del salar surgen numerosas vertientes fluyentes de débil caudal (0,5-1 l/s) y con leve influencia termal ($t \sim 20^\circ\text{C}$). Hemos comprobado que todas tenían similares parámetros físico-químicos como temperatura, conductividad y pH. Por eso nos hemos limitado a muestrear dos vertientes alejadas entre sí unos 500 m (CPR-2 y 4); Después, hemos sacado un perfil de salmueras de concentración creciente en las lagunas.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
CPR-4	6593	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-(SO4)	Ca
CPR-2	6812	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-(SO4)	Ca
<u>LAGUNAS</u>				
CPR-1	12320	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-(SO4)	Ca
CPR-3	20553	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-(SO4)	Ca
CPR-5	50991	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl	Ca
CPR-6	70256	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl	Ca
CPR-7	221806	Na-(Mg)	/ Cl	Ca

Fig.1. Composición de las aguas de aporte y de las lagunas del salar de Capur.

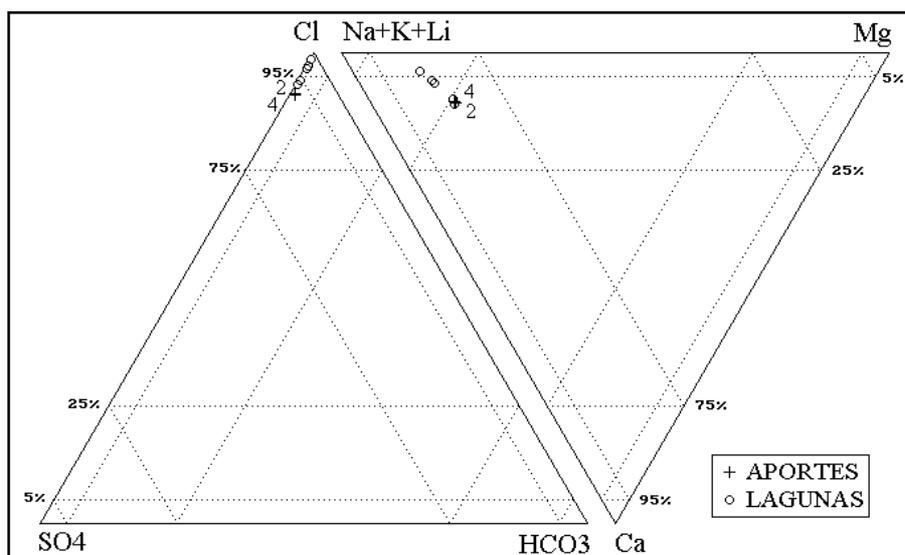


Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Capur.
Ca = vía cálcica.

Representamos en la figura 1 la composición química de todos los aportes y lagunas del salar de Capur. Las aguas de vertientes son saladas (6,5-7 g/l STD), de tipo Na-(Mg)-(Ca) / Cl. El sistema lagunar muestra una concentración salina creciente de las aguas hacia el sur (de 12 hasta 222 g/l STD). Las aguas menos saladas (1 y 3) son de tipo Na-(Mg)-(Ca) / Cl, mientras que las salmueras más concentradas tienen menor porcentaje de calcio y son de tipo Na-(Mg) / Cl. Se plantea ahora la pregunta del origen de la alta salinidad de los aportes. Siendo fluventes, no se trata de cuña salina o de pre-evaporación de napa. Hemos buscado las mejores relaciones equimolares entre cationes y aniones que podrían indicar cuales sales evaporíticas o salmueras han salinizado las napas de la cuenca de Capur. No hemos encontrado relaciones significativas entre Na y Cl, ni entre Ca y SO₄, ni entre Na y Cl+SO₄, ni entre Na+Ca y Cl. La única significativa es entre Na+Mg+Ca y Cl, como se puede ver en la figura 2.

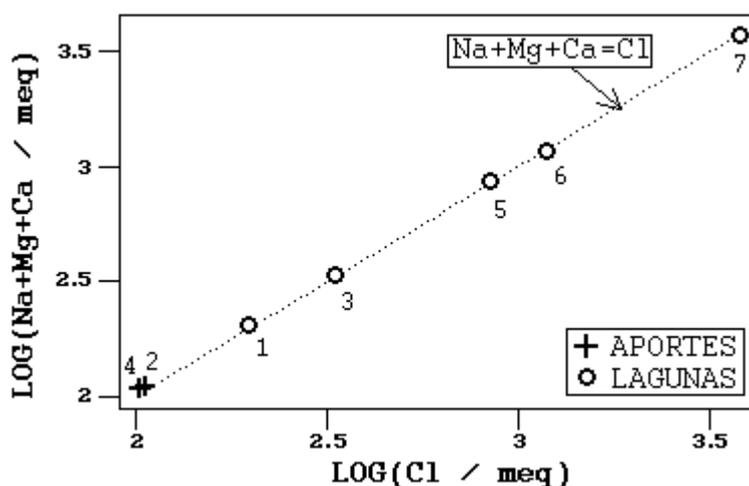


Fig.2 : Relación entre Na+Mg+Ca y Cl en las aguas del salar de Capur.

Eso sugiere una salinización de las napas diluidas por salmueras del mismo tipo Na-Mg-Ca / Cl y de origen desconocido. Es poco probable que se trate de sales, puesto que los cloruros de magnesio y calcio son extemadamente solubles y no precipitan en las condiciones climáticas que imperan en los Andes. La composición de las aguas de aporte del norte de Capur no proviene de la simple alteración de las rocas volcánicas de la cuenca de drenaje.

Vías evolutivas

Ya hemos visto que la composición de las aguas de aporte no tiene relación con la geología superficial. Igualmente, la vía evolutiva cálcica que sigue estas aguas al evaporarse no tiene relación con la litología. Por otra parte, hay buena concordancia entre la vía evolutiva cálcica y la composición de las lagunas.

Evolución cuantitativa de aguas

La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta las salinidades de las dos salmueras CPR-3 (menos concentrada) y CPR-7 (más concentrada). Los valores de la columna "desviación" son los coeficientes del chi-cuadrado adaptado que miden el grado de semejanza entre las soluciones de aporte evaporadas (CPR-xE) y la solución real. Se nota una buena correlación entre los dos aportes evaporados y la salmuera menos concentrada. La desviación aumenta entre los aportes más evaporados y la salmuera más concentrada, pero queda todavía baja. Hay menos SO₄, B, K, Li, Ca y Mg en la salmuera real que en la calculada, lo que sugiere procesos geoquímicos no previstos en el modelo, como reducción de sulfato en sulfuros y neoformaciones arcillosas.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
CPR-3	8,11	1,40	11900	914	26,7	26,4	5770	500	7,70	694	663	
CPR-2E	8,04	0,930	11400	1300	33,4	30,5	5640	533	7,64	719	661	0,020
CPR-4E	8,04	0,939	11400	1310	33,1	14,0	5660	522	7,49	701	668	0,056
CPR-7	7,36	5,84	134000	2140	225	29,4	72000	4300	68,2	3100	5760	
CPR-2E	7,54	4,74	133000	3640	388	10,3	65500	6200	88,8	3470	7680	0,178
CPR-4E	7,55	4,73	133000	3870	384	10,3	65700	6060	87,0	3260	7760	0,180

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las soluciones del salar de Capur. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Calidad de aguas

Considerando la alta salinidad de los aportes, es evidente que las aguas de aporte del sector norte de Capur no presentan capacidad de uso potable o agrícola. Como hemos visto que la alta salinidad de los aporte se debe a la salinización por antiguas salmueras, la posibilidad de encontrar aguas muy diluidas un poco más arriba en el norte la cuenca de drenaje es muy baja.

Balance hídrico

Solamente se puede establecer el orden de magnitud de los parámetros del balance hídrico de la laguna norte. Su superficie es de 0,55 km².

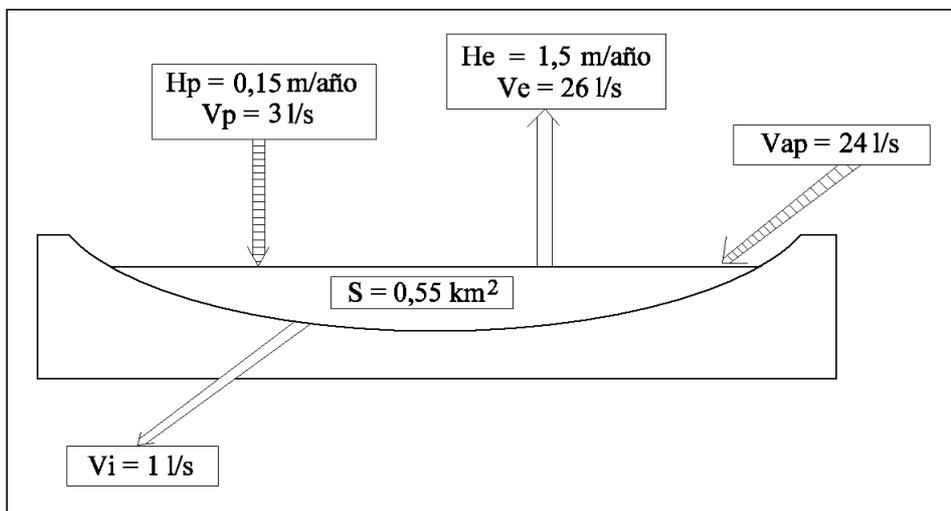


Fig.3 : Balance hídrico de la laguna Capur Norte

En la estimación de las infiltraciones, no hay problema en la composición de los aportes, pero si lo hay para estimar la composición de la laguna. Hemos visto que sus aguas se concentran en un factor de 10 hacia el sur. Lo único que se puede hacer, es suponer que las aguas se infiltran en los sedimentos del fondo y que la tasa de infiltración es la misma en toda la laguna.

Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 1,5$ m/año
- $H_p = 0,15$ m/año
- $S = 0,55$ km²
- $C_{ap} = 3700$ mg/l (promedio entre CPR-2 y 4)
- $C_L = 73\ 000$ mg/l (promedio entre CPR-3 y 7)

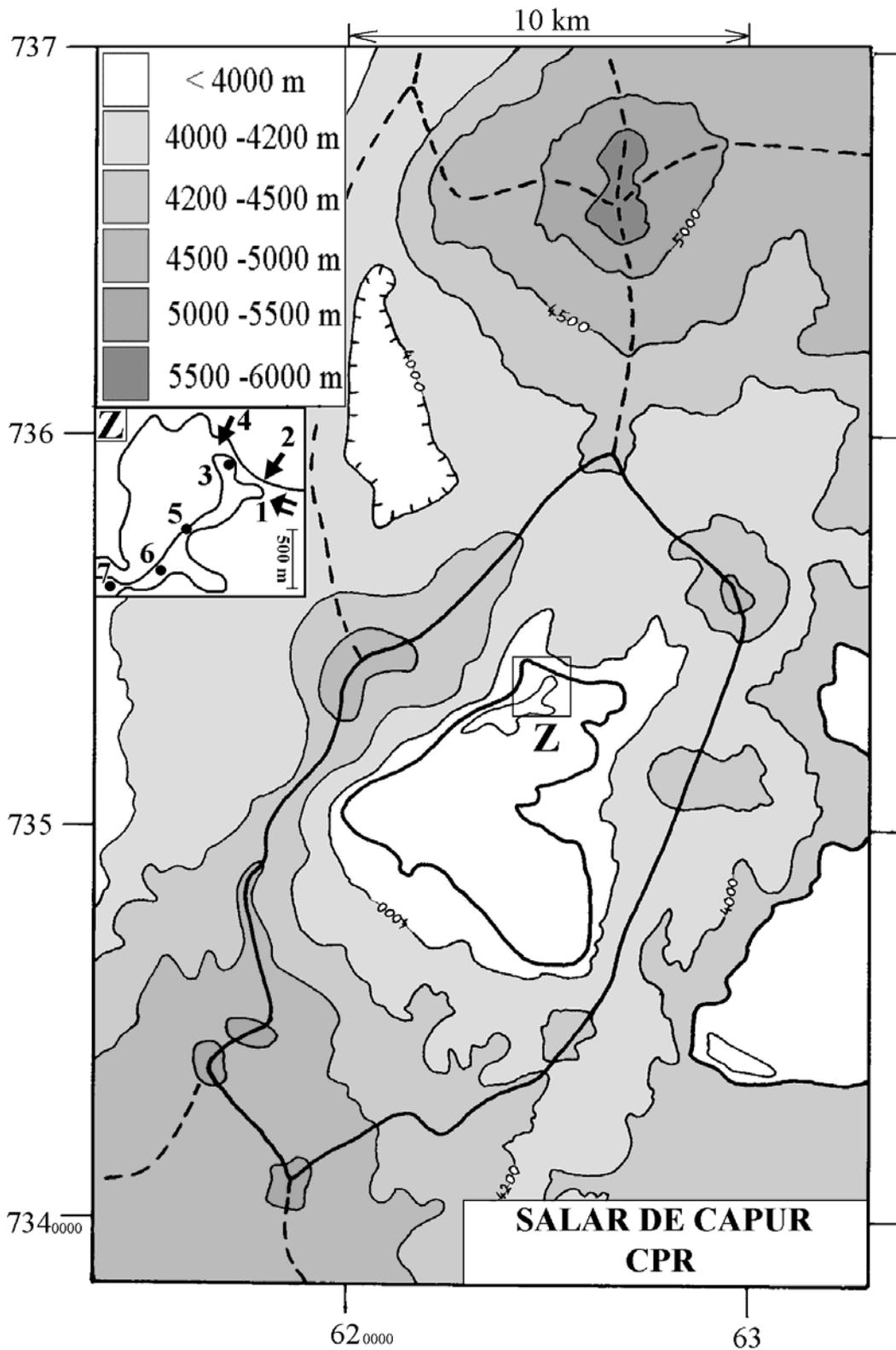
Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 780\ 000$ m³/año = 24 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 39\ 000$ m³/año = 1 l/s

Conclusiones

El salar de Capur recibe por su orilla norte aguas de aporte saladas de tipo Na-(Mg)-(Ca) / Cl cuya composición proviene de salinización de aguas diluidas por salmueras de origen desconocido. La cuenca no presenta buenas potencialidades para recursos de agua. Por una parte, el caudal entrante por toda la orilla norte es débil (24 l/s) ; y por otra, puesto que la alta salinidad de los aportes se debe a la redisolución de antiguas salmueras, la posibilidad de encontrar aguas muy diluidas un poco más arriba en la cuenca de drenaje, no es muy alentadora.

➔ MANANTIAL FLUYENTE	○ POZO
➤ MANANTIAL DIFUSO	□ CALICATA, DREN, CAPTACION
➡ RIO, RIACHUELO	• LAGUNA, POZA



**SALAR DE CAPUR
CPR**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM ESTE	NORTE	ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
CPR-1	19/04/97	13 ^H 30	625489	7353635	3950	Río interior salar
CPR-2	19/04/97	13 ^H 40	625454	7353661	3955	Manantial corriente
CPR-3	19/04/97	14 ^H 00	625138	7353932	3950	Laguna
CPR-4	19/04/97	14 ^H 15	624985	7353987	3955	Manantial corriente
CPR-5	19/04/97	14 ^H 50	624750	7353387	3950	Laguna
CPR-6	19/04/97	15 ^H 00	624478	7353067	3950	Laguna
CPR-7	19/04/97	15 ^H 20	624250	7352920	3950	Laguna

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
CPR-1	20400	14,4	5,9	1,010	8,57	0,973	6990	1,97	0,040	633	1,92	18,5	29,4	0,0330	3430	293	4,44	461	396
CPR-2	11750	18,1	5,1	1,005	7,61	1,04	3760	1,34	0,021	427	3,35	11,0	29,1	0,0334	1870	176	2,52	252	218
CPR-3	32700	10,3	5,9	1,015	8,11	1,40	11900	3,23	0,035	914	1,98	26,7	26,4	0,0330	5770	500	7,70	694	663
CPR-4	11300	22,8	3,9	1,005	7,57	1,07	3620	1,30	0,024	421	3,78	10,6	32,5	0,0380	1840	167	2,40	240	214
CPR-5	75200	11,6	6,4	1,038	7,97	2,25	30100	6,08	0,050	1270	0,992	60,5	27,7	0,0700	15600	1120	17,3	1170	1500
CPR-6	98700	10,5	5,1	1,051	7,98	2,66	42200	8,23	0,061	1440	0,868	82,4	29,4	0,0921	21500	1410	23,1	1400	2000
CPR-7	213000	13,4	1,3	1,147	7,36	5,84	134000	22,6	0,135	2140	1,24	225	29,4	0,211	72000	4300	68,2	3100	5760

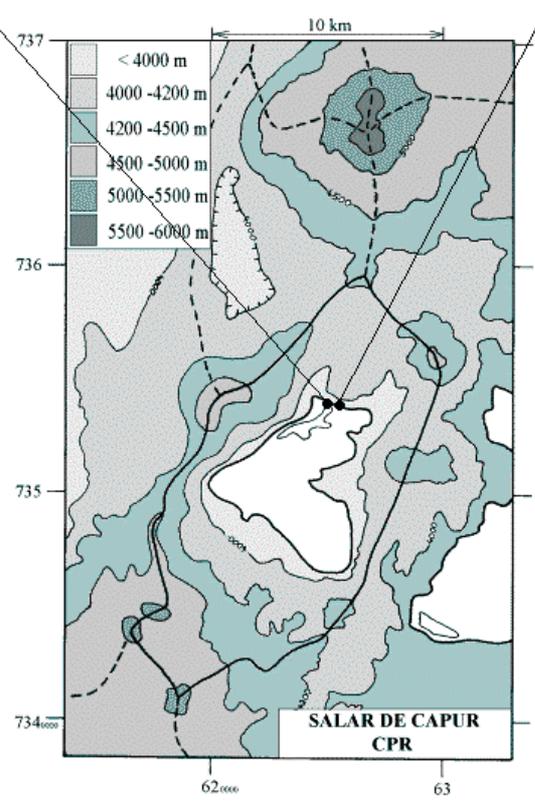
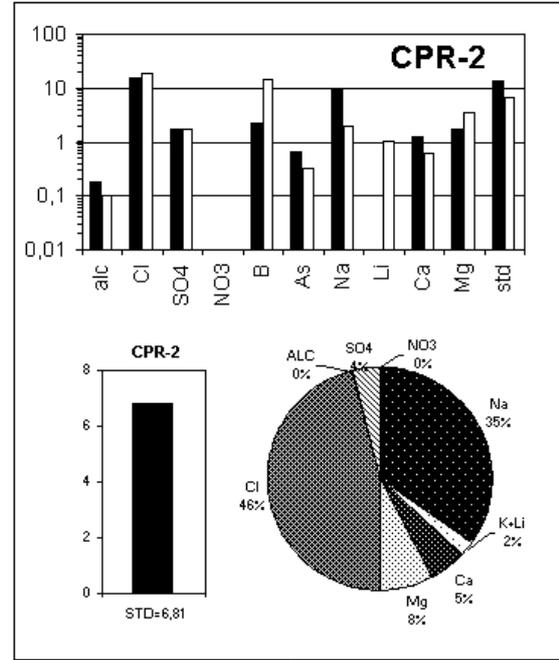
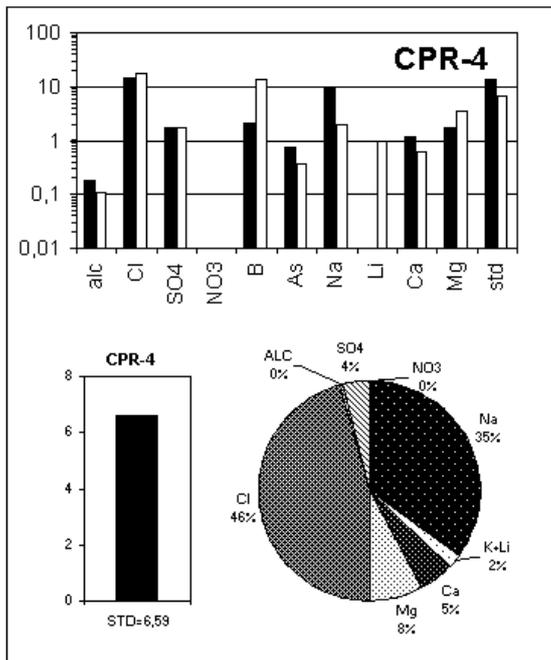
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
CPR-1	12320	24,2	2,82	0,08	212,7	211,2	0,8
CPR-2	6812	59,7	0,60	1,9	116,5	115,9	0,5
CPR-3	20553	61,6	2,88	0,66	354,1	354,4	0,1
CPR-4	6593	61,6	0,66	2,0	114,3	111,9	2,2
CPR-5	50991	85,4	4,98	1,1	891,8	875,7	1,8
CPR-6	70256	83,6	6,18	1,1	1207	1223	1,3
CPR-7	221806	-	-	-	3878	3820	1,5

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

CPR

Qal : *Cuaternario*. Depósitos aluviales: gravas, arenas y limos.

Qv : *Cuaternario*. Estrato-volcanes IV. Dacitas y andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o biotita, basaltos y andesitas basálticas subordinadas.

PIPv : *Plioceno - Pleistoceno*. Andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o de biotita y dacitas, basaltos y andesitas basálticas subordinados.

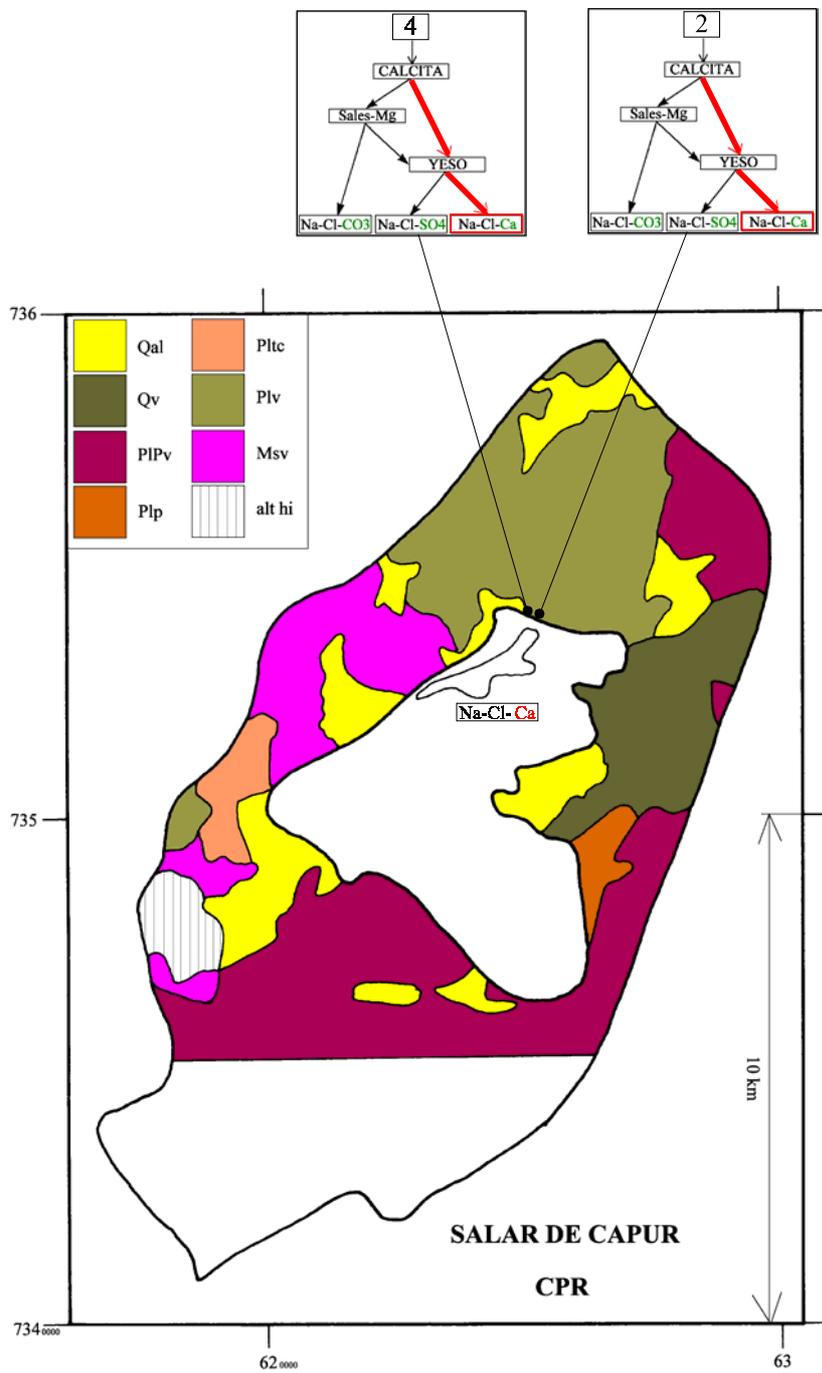
Plp : *Plioceno*. Ignimbrita Patao. Toba dacítica de vidrio y escasos pómez y cristales.

Pltc : *Plioceno*. Ignimbrita Tucucaro. Toba dacítica de vidrio y escasos pómez y cristales.

Plv : *Plioceno*. Estrato-volcanes II. Andesitas de piroxeno y andesitas de hornblenda y/o biotita. Dacitas subordinadas.

Msv : *Mioceno sup.* Andesitas de piroxeno, subordinamente dacitas, andesitas de hornblenda y/o biotita, basaltos y andesitas basálticas.

alt hi : alteración hidrotermal.



SALAR DE IMILAC

Introducción

El salar de Imilac se encuentra en la Segunda Región, adyacente al borde oriental de la Cordillera de Domeyko, entre los salares de Atacama y Punta Negra. La forma del salar y su cuenca de drenaje no están muy bien definidas. En los mapas topográficos y geológicos, el salar aparece dividido en dos partes: una en forma de rombo, al oeste, y la otra de forma muy alargada e irregular, al este. Hemos estudiado solamente la parte occidental, puesto que es la única donde hemos encontrado agua. Es también la costra mejor delimitada en el fondo de una depresión topográficamente cerrada. Su cuenca de drenaje pertenece a la Cordillera de Domeyko. Es el único salar entre los que hemos estudiado que no tiene relación con la alta Cordillera de los Andes. La parte alargada, al este, se parece mucho a las costras de sales del Valle Central. En algunos estudios, se considera el salar de Imilac como un satélite del salar de Punta Negra. En realidad, al observar el mapa topográfico, se nota que Imilac es una sub-cuenca de Atacama. Las principales características morfológicas y climatológicas del salar son:

- altura: 2949 m
- superficie de la cuenca: 189 km²
- superficie del salar: 9,8 km²
- superficie de las lagunas: 0,16 km²
- precipitaciones: 40 mm/año
- evaporación potencial: 2000 mm/año
- temperatura media: 10°C

Es una costra de sulfato de calcio (yeso) con abundantes limos salinos. Hay dos tipos de lagunas:

- "ojos" de unos 10 m de diámetro y 3 m de profundidad, al norte (IMI-5 y 6)
- lagunas someras al sur (IMI-2 y 7)

Hemos extraído cuatro aguas de aporte: dos aguas de napa en pozos entubados (1 y 4), una de un dren (3) y una vertiente difusa (8). El pozo (1) es artesiano pues el agua sale naturalmente del tubo. El nivel piezométrico está entre 1 y 2 metros por encima del suelo y no conocemos su nivel freático. Se sacaron dos muestras de la vertiente difusa (8): una superficial y la otra en una pequeña calicata (8D).

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas del salar de Imilac están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Se puede distinguir tres grupos de agua:

- la napa artesiana (1) y la lagunita (2) tienen aguas diluidas muy sulfatadas y de misma composición porcentual
- el agua del dren (3) es salada con concentraciones parecidas en Cl y SO₄.

- la vertiente difusa y salada (8) y la tres lagunas (5, 6, 7) son de tipo Na / Cl con cantidades menores de Ca y SO₄. Las lagunas son del mega-grupo cálcico con más calcio que sulfato.

El agua del pozo (4) esta contaminada. Su elevado pH y su bajo contenido en Ca y Mg indican una interacción con concreto o algún tipo de cemento. Su concentración en arsénico (0,1 microgramo por litro) es entre 1000 y 5000 veces inferior a su concentración en las demás aguas, lo que resulta probablemente de una reacción con el hierro de la tubería.

APORTES	SALINIDAD mg/l	TIPO QUÍMICO		VIA EVOLUTIVA
		Cationes	Aniones	
IMI-1	565	Na-(Ca)	SO ₄ -Cl-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
IMI-4	1865	Na	Cl-(HCO ₃)	CO ₃
IMI-3	6193	Na-Ca	Cl-SO ₄	SO ₄ (N)
IMI-8	10084	Na-(Ca)	Cl-(SO ₄)	Ca
IMI-8D	12268	Na-(Ca)	Cl-(SO ₄)	Ca
LAGUNAS				
IMI-2	643	Na-Ca	SO ₄ -Cl-(HCO ₃)	SO ₄
IMI-7	33362	Na-(Ca)	Cl-(SO ₄)	Ca
IMI-6	48710	Na-(Ca)	Cl-(SO ₄)	Ca
IMI-5	89929	Na-(Ca)	Cl-(SO ₄)	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Imilac.
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada; CO₃ = vía carbonatada; Ca = vía cálcica.

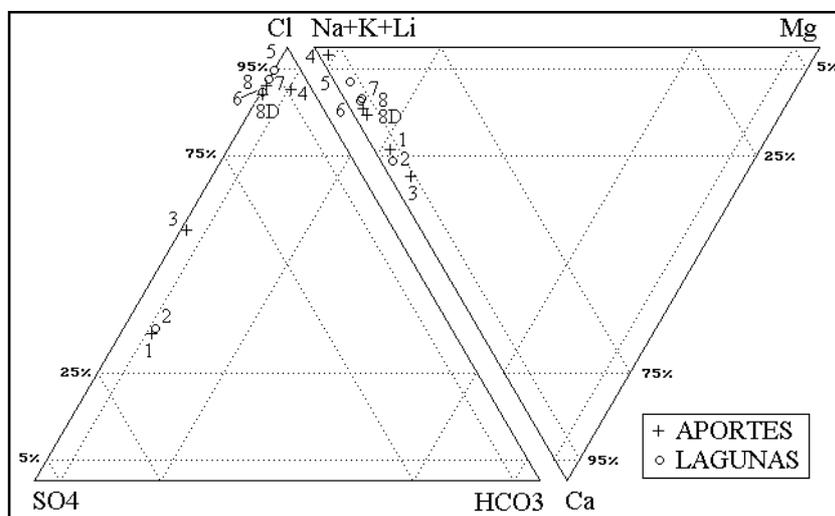


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Imilac

La vertiente difusa 8/8D tiene la misma composición porcentual que las salmueras (6 y 7) del salar, lo que podría corresponder a una contaminación de aguas diluidas por la cuña salina. Por otra parte, Imilac presenta concentraciones muy altas en nitrato (1000 - 2000 mg/l) y en yodo (hasta 8 mg/l). Dentro de los salares estudiados, solamente Pintados tiene más nitrato. Esta

característica relaciona a Imilac más con los salares del Valle Central que con los de la Cordillera de los Andes.

Origen de los componentes disueltos

De los cuatro aportes extraídos, dos presentan una composición dudosa: la napa (4) esta obviamente contaminada por los materiales del pozo y la vertiente difusa (8/8D) probablemente también por la misma salmuera del salar. Quedan solamente dos aportes por examinar: la napa (1) y el dren (3) (ver diagramas circulares). El agua diluida de la napa artesiana (1) presenta concentraciones porcentuales parecidas en Na y SO₄. La suma Na+SO₄ corresponde al 65 % de la salinidad del agua (en mg/l), lo que podría sugerir una salinización del agua de napa por sulfato de sodio del agua de napa. Sin embargo, el alto contenido en sulfato podría también provenir de la oxidación de azufre. Es obvio que la napa (1) no se limita a la cuenca topográficamente cerrada que rodea el salar ya que se encuentra exactamente en la continuación de la Quebrada Guanaqueros en el extremo sur-oeste de la cuenca de Atacama. En los volcanes que cierran la quebrada al este, hay importantes yacimientos de azufre.

El agua salada del dren (3) presenta relaciones aproximadamente equimolares entre Na y Cl, de una parte, y Ca y SO₄, de otra parte. Los cuatro componentes corresponden al 96% de la salinidad total, lo cual refleja la redisolución de halita (NaCl) y yeso (CaSO₄.2H₂O) de antiguas evaporitas. En lo que se refiere al yeso, no hay que buscarlo muy lejos, puesto que el salar esta rodeado por una formación sedimentaria (Pampa de Mulas) con lindos y abundantes cristales de yeso. El exceso de SO₄ (20%) sobre el calcio (15%) podría tener el mismo origen que en la napa artesiana (1), o sea, la oxidación de azufre. Más aun, el agua salada del dren 3 podría provenir, en parte, de la salinización de la napa (1) por antiguas sales evaporíticas.

Vías evolutivas y relación con la geología

Se observa cuatro vías evolutivas en Imilac. Dos no son fiables: la vía carbonatada de la napa contaminada 4 y la vía cálcica de la vertiente difusa 8/8D mezclada con la salmuera cálcica del salar. Los dos aportes que quedan (1 y 3) pertenecen a la misma vía evolutiva neutra sulfatada. Eso tiende a confirmar lo visto anteriormente: los aportes del este del salar han probablemente lixiviado terrenos volcánicos con azufre afuera de la cuenca topográfica. La cuenca hidrogeológica de Imilac abarca probablemente la Quebrada Guanaqueros al sur de la cuenca de Atacama.

La composición cálcica de las salmueras del salar no proviene de la evaporación de los aportes orientales. Refleja más bien la litología en parte sedimentaria de la Cordillera de Domeyko. En el presente, lo esencial de los aportes proviene de la Cordillera al este del salar. Las sales y salmueras de Imilac se han depositadas en una época más húmeda cuando el salar recibía aportes desde la Cordillera de Domeyko.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las diversas lagunas. No hemos incluido el agua contaminada IMI-4. Los valores de la columna "desviación" son los coeficientes del chi-cuadrado adaptado

que miden el grado de semejanza entre las soluciones de aporte evaporadas (IMI-xE) y las lagunas (IMI-x).

<u>NUMERO</u>	<u>PH</u>	<u>ALC</u>	<u>CL</u>	<u>SO4</u>	<u>B</u>	<u>SI</u>	<u>NA</u>	<u>K</u>	<u>LI</u>	<u>CA</u>	<u>MG</u>	<u>DESV.</u>
<u>IMI-2</u>	8,66	0,580	115	259	1,97	4,34	151	12,1	0,18	50,9	2,92	
IMI-1E	8,12	0,575	109	270	1,92	5,16	148	12,9	0,15	44,7	3,73	0,015
<u>IMI-5</u>	7,47	1,27	50100	3780	36,5	5,18	30400	782	17,0	2370	590	
IMI-8E	7,71	0,813	50500	3370	63,3	25,8	29700	768	15,3	3210	505	0,220
IMI-3E	8,01	2,24	41600	13200	126	23,7	29700	1500	20,5	949	1080	0,563
IMI-1E	8,23	6,78	20000	36100	352	31,6	27200	2370	27,5	579	685	1,080
<u>IMI-6</u>	7,20	1,66	25300	3910	24,5	14,8	15500	481	9,99	1940	321	
IMI-8E	7,80	0,624	26300	3050	33,0	28,3	15500	400	7,99	2210	263	0,069
IMI-3E	8,02	1,33	21900	7970	66,2	12,5	15600	790	10,8	927	565	0,242
IMI-1E	8,22	3,63	10700	19800	188	34,7	14500	1260	14,7	537	365	0,774
<u>IMI-7</u>	7,97	1,31	18000	1920	17,1	9,91	10800	320	5,30	1380	200	
IMI-8E	7,86	0,584	17800	2300	22,4	19,2	10500	271	5,41	1600	178	0,057
IMI-3E	8,01	1,03	14600	5950	44,1	8,30	10400	526	7,18	888	376	0,280
IMI-1E	8,20	2,53	7180	13700	126	35,8	9770	850	9,88	518	246	0,868

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las aguas del salar de Imilac
ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

El agua de la laguna diluida IMI-2 proviene de la misma napa que IMI-1. Su muy baja salinidad indica que se infiltra rápidamente en los sedimentos del salar. El aporte evaporado que más se asemeja a la composición de las lagunas es la vertiente difusa (8). Eso es normal si se trata de una cuña salina. Los aportes evaporados (1 y 3), al contrario, no concuerdan con las salmueras; los coeficientes de desviación son elevados (0,242 a 1,08). Eso confirma bien que las salmueras del salar no provienen de la evaporación de los aportes orientales.

Calidad de aguas

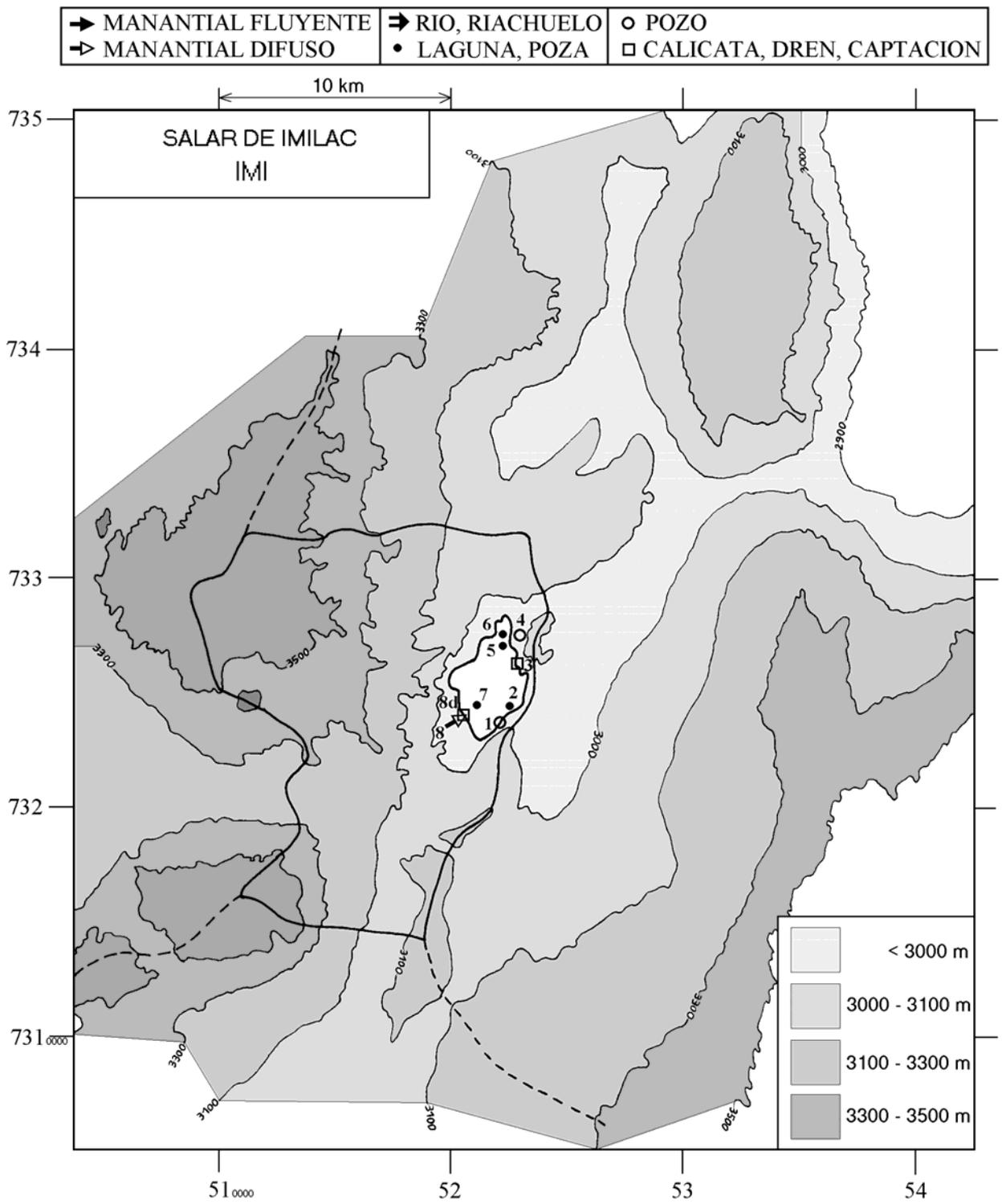
El agua de la napa artesiana (1) es la única que presenta una salinidad aceptable para el consumo humano y el riego. Sin embargo, contiene 10 veces más arsénico que el máximo permitido por la norma de potabilidad.

Conclusiones

El salar de Imilac se asemeja más a los salares fósiles del Valle Central que a los salares de la Cordillera de los Andes. Ni su cuenca, ni el salar mismo tienen límites bien definidos. Sus sales y salmueras cálcicas no resultan de la evaporación de los principales aportes sulfatados actuales que provienen de la alta Cordillera al este del salar. Las sales se depositaron en épocas más húmedas cuando la Cordillera de Domeyko recibía más precipitaciones. El salar está alimentado al este por una napa de agua diluida, localmente artesiana, que podría constituir un recurso interesante a pesar de su elevado contenido en arsénico.

Referencias y estudios anteriores

Mongard, C. 1984. Hidrogeología del salar de Punta Negra (e Imilac). Tesis de Grado para optar al Título de Geóloga, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, 232p.



SALAR DE IMILAC
IMI

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
IMI-1	28/05/94	10 ^H 15	521950	7323610	2949	Napa (pozo)
IMI-2	28/05/94	10 ^H 50	522350	7324135	2949	Laguna
IMI-3	28/05/94	11 ^H 50	523025	7326010	2949	Napa (dren)
IMI-4	28/05/94	12 ^H 35	522875	7327450	2960	Napa (pozo ES-11)
IMI-5	28/05/94	13 ^H 00	522350	7326990	2949	Laguna
IMI-6	28/05/94	14 ^H 15	522270	7327505	2949	Laguna
IMI-7	28/05/94	15 ^H 20	521090	7324350	2949	Laguna
IMI-8	28/05/94	18 ^H 10	520625	7324250	2949	Manantial difuso
IMI-8D	28/05/94	18 ^H 10	520625	7324250	2949	Napa (cateo)

SALAR DE IMILAC
IMI

NUMERO	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
IMI-1	10,5	na	1,000	8,46	0,506	95,9	0,162	0,207	233	3,14	1,69	4,54	0,47	132	11,3	0,132	39,3	3,28
IMI-2	4	8,3	1,000	8,66	0,580	115	0,168	0,166	259	0,577	1,97	4,34	0,35	151	12,1	0,180	50,9	2,92
IMI-3	6	8,6	1,005	7,51	1,15	1970	0,625	0,740	1900	51,1	6,10	1,15	0,31	1460	72,7	0,992	593	52,0
IMI-4	13,5	na	1,000	9,44	1,74	1000	0,288	0,330	60,0	0,285	1,70	0,165	0,0001	665	18,8	0,562	11,0	7,05
IMI-5	11	7,0	1,063	7,47	1,27	50100	0,669	8,08	3780	1840	36,5	5,18	0,51	30400	782	17,0	2370	590
IMI-6	8	5,7	1,036	7,20	1,66	25300	0,713	4,34	3910	1070	24,5	14,8	0,48	15500	481	9,99	1940	321
IMI-7	11	6,5	1,027	7,97	1,31	18000	0,919	3,44	1920	613	17,1	9,91	0,41	10800	320	5,30	1380	200
IMI-8	10,5	5,0	1,008	7,20	0,408	5330	0,459	1,32	696	156	6,77	5,80	0,11	3220	82,1	1,64	489	53,9
IMI-8D	8,5	4,2	1,010	6,98	1,09	6430	0,553	1,51	1010	128	8,06	6,52	0,13	3800	93,8	1,88	642	66,1

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

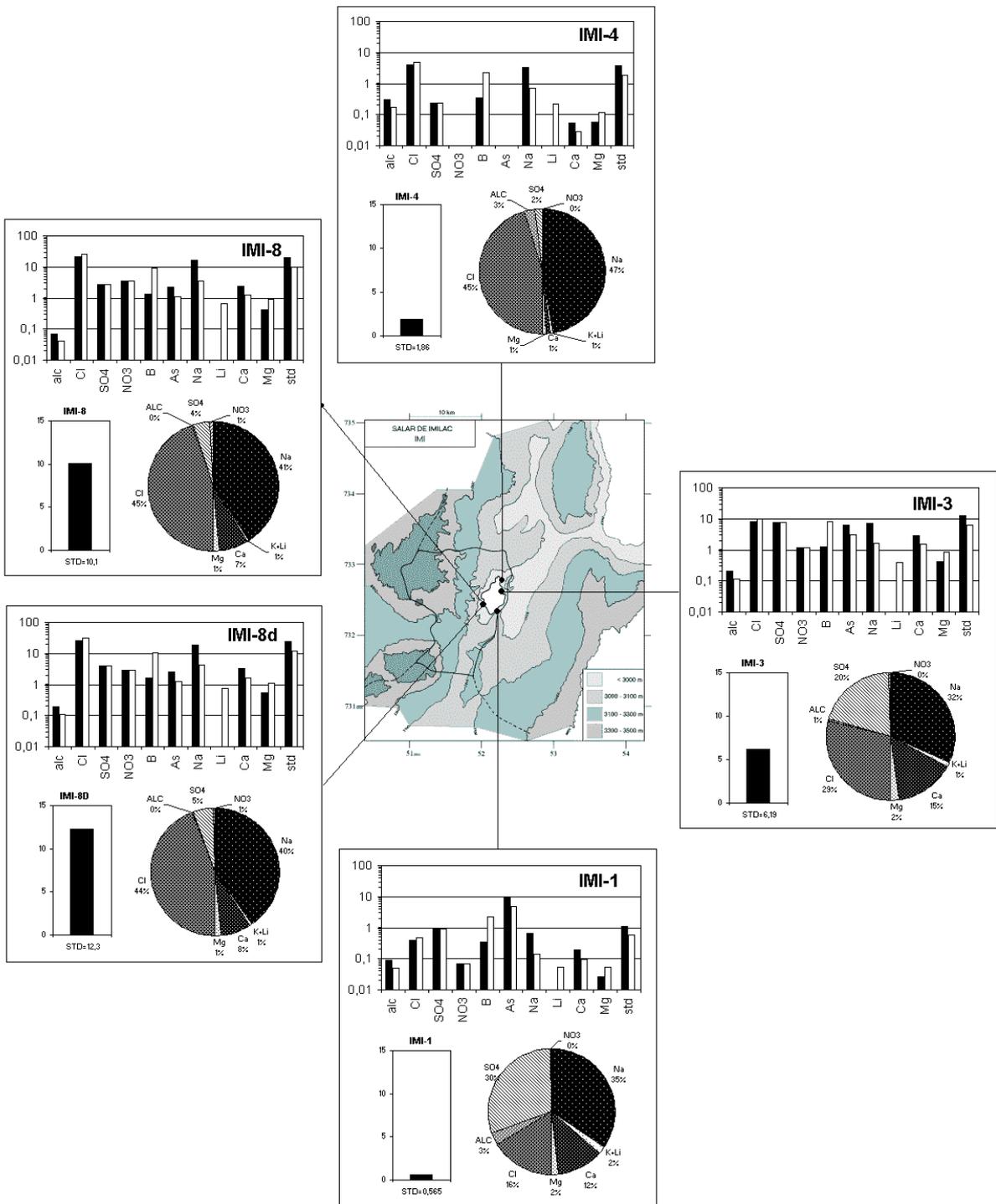
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
IMI-1	564,6	28,4	0,54	0,18	8,299	8,118	2,2
IMI-2	642,7	31,7	0,84	0,15	9,676	9,231	4,7
IMI-3	6193	68,3	0,42	3,7	99,48	97,08	2,4
IMI-4	1865	72,6	13	0,04	30,59	31,20	2,0
IMI-5	89929	64,7	1,3	2,6	1509	1520	0,7
IMI-6	48710	97,0	0,66	8,4	808,9	813,4	0,6
IMI-7	33362	65,9	2,3	0,92	562,4	558,2	0,8
IMI-8	10084	24,3	0,06	2,2	171,2	167,4	2,2
IMI-8D	12268	65,9	0,12	11	205,1	205,2	0,02

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

IMI

Qal : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales modernos: gravas, arenas y limos.

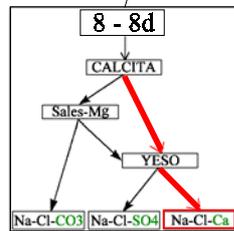
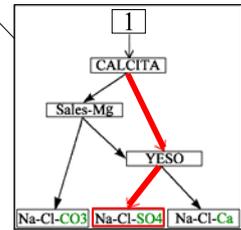
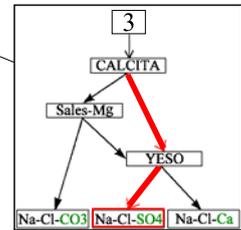
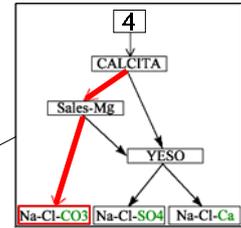
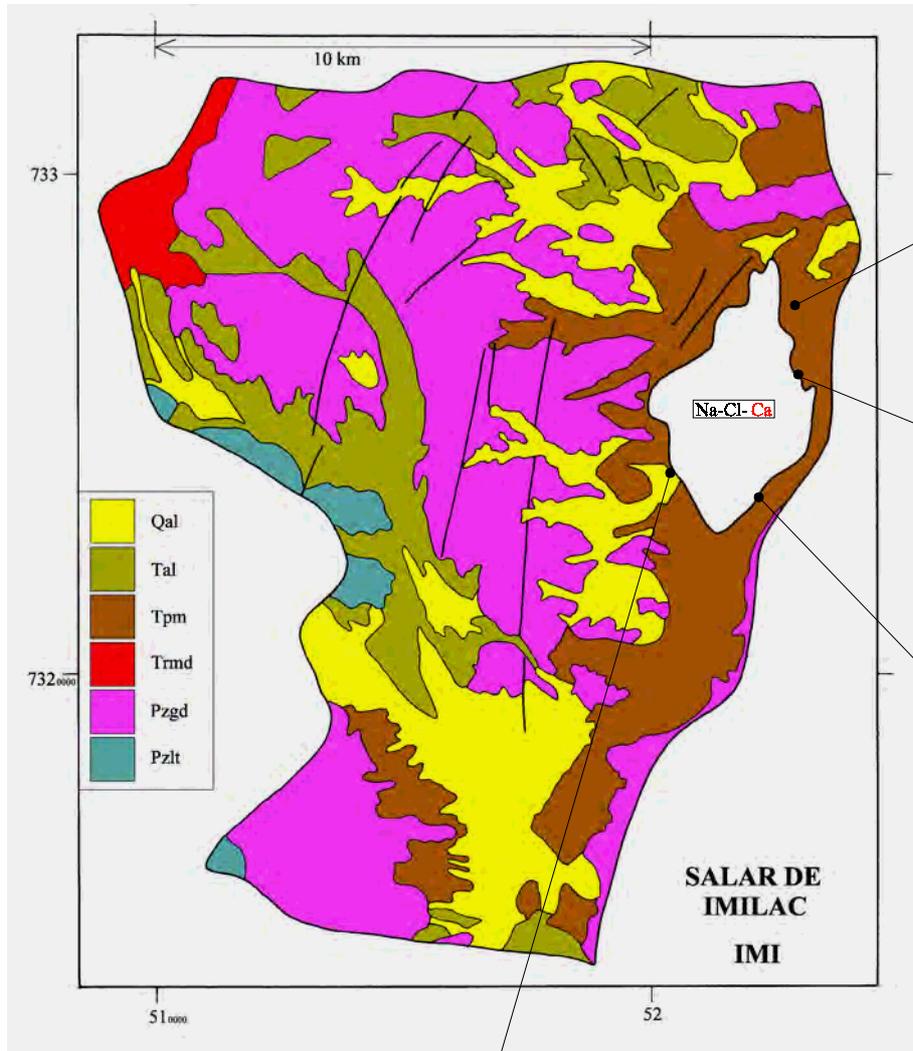
Tal : *Mioceno sup. - Plioceno*. Depósitos aluviales y coluviales antiguos: gravas, arenas y limos con intercalaciones de ceniza volcánica. En zona de falla estan localmente cementadas por carbonatos y presentan niveles de travertinos. Facies de limos con abundante yeso.

Tpm : *Oligoceno sup. - Mioceno inf.* Gravas, conglomerados y areniscas con intercalaciones de ceniza volcánica e ignimbritas, localmente cementadas por carbonatos y con niveles de travertinos. Presentan facies salinas con limos yesíferos y capas de yeso.

Trmd : *Trias sup. Granitoides*. Monzonitas, granodioritas, tonalitas surcadas por filones riolíticos.

Pzgd : *Carbonífero sup. - Pérmico*. Granitoides. Granodioritas, dioritas, granitos y gabros.

Pzlt : *Carbonífero sup - Pérmico*. Volcanitas y sedimentitas volcanoclásticas indiferenciadas con escasas intercalaciones de calizas.



SALAR DE PUNTA NEGRA

Introducción

El salar de Punta Negra se encuentra en la II Región, en una depresión tectónica entre la Cordillera de Domeyko y la Cordillera de los Andes, al sur del salar de Atacama. Su cuenca se caracteriza por grandes variaciones morfológicas, climatológicas y geológicas. El imponente volcán Llullaillaico, que cierra la cuenca al este, culmina a 6800 m de altura, es decir 4000 m más arriba que el salar. Las precipitaciones, casi nulas en la Cordillera de Domeyko, ascienden a 250 mm/año en la Cordillera de los Andes. En cuanto a la geología de la cuenca, es una mezcla compleja de terrenos sedimentarios, de formaciones volcánicas y de rocas plutónicas. El salar es una costra de sal (yeso y halita) con pocas y pequeñas lagunas someras. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura de salar: 2945 m
- superficie de la cuenca: 4263 km²
- superficie del salar: 250 km²
- superficie de las lagunas 0,1 - 0,2 km²
- precipitaciones: 50 mm/año (salar) - 250 mm/año (cuenca oriental)
- evaporación potencial: 2000 mm/año (salar)
- temperatura media: 10°C (salar)

El descubrimiento del yacimiento de cobre de Minera Escondida incentivo numerosos estudios sobre la hidrogeología de la cuenca. La empresa minera explota las napas del sector oriental de la cuenca. Además de los estudios hidrogeológicos, cabe señalar que Minera Escondida, en su programa de gestión ambiental, monitorea los parámetros físicos, químicos y biológicos de las lagunas del salar.

Composición de las aguas

Se puede distinguir claramente cuatro grupos de agua según su posición en la cuenca :

- el anillo exterior : son aportes en sectores elevados de la cuenca, tales como vertientes fluyentes, ríos y una napa.
- el anillo interior : son napas cerca, pero no pegadas, a la orilla del salar.
- aguas de orilla : son napas o vertientes difusas pegadas a la orilla.
- las lagunas dentro del salar.

La tabla 1 resume las características químicas de las aguas de cada grupo. La figura 1 presenta las composiciones de los componentes mayores en diagramas triangulares. Aparece enseguida una característica bien peculiar : la alta salinidad de la mayor parte de los aportes del anillo exterior,

es decir de las aguas ubicadas más arriba en la cuenca. Las aguas del anillo interior, mucho más cercanas al salar, no tienen mayor salinidad, como podría esperarse. Las aguas de la orilla, pegadas al salar, tienen una salinidad elevada probablemente a causa de una cuña salina o de la pre-evaporación de las napas al llegar a las orillas.

	SALINIDAD (mg/l)	TIPO QUÍMICO		VIA EVOLUTIVA
		CATIONES	ANIONES	
<u>ANILLO EXTERIOR</u>				
PUN-22	196	Na-Ca-(Mg)	/ HCO ₃ -SO ₄ -(Cl)	CO ₃
PUN-23	272	Ca-Na-(Mg)	/ HCO ₃ -SO ₄ -(Cl)	SO ₄ (N)
PUN-12	816	Na-Ca-(Mg)	/ SO ₄ -(Cl)-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
PUN-13	1206	Na-Ca-(Mg)	/ SO ₄ -Cl-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
PUN-15	2945	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	SO ₄ (N)
PUN-17	3197	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	Ca
PUN-14	5400	Na-(Ca)-(Mg)	/ SO ₄ -Cl-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
<u>ANILLO INTERIOR</u>				
PUN-24	480	Na-(Ca)	/ Cl-(SO ₄)	Ca
PUN-19	549	Na-(Ca)	/ Cl-(HCO ₃)-(SO ₄)	CO ₃
PUN-21	603	Na-Ca	/ Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)	Ca
PUN-20	636	Na	/ Cl-HCO ₃ -(SO ₄)	CO ₃
PUN-18	2818	Na-(Ca)	/ Cl-(SO ₄)	Ca
PUN-16	3325	Na-Ca-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	Ca
PUN-11	3735	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)	SO ₄ (A)
<u>ORILLA</u>				
PUN-8	6877	Na	/ Cl	Ca
PUN-4	10432	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl	Ca
PUN-10	14160	Na-Ca	/ Cl	Ca
<u>LAGUNAS</u>				
PUN-7	9451	Na	/ Cl	Ca
PUN-3	10532	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	Ca
PUN-2	12750	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	Ca
PUN-5	17815	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl	Ca
PUN-1	20245	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	Ca
PUN-9	41958	Na-(Ca)	/ Cl	Ca
PUN-6	233344	Na	/ Cl	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de las aguas de Punta Negra
CO₃ = vía carbonatada ; SO₄ (A) = vía alcalina sulfatada
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada ; Ca = vía calcica.

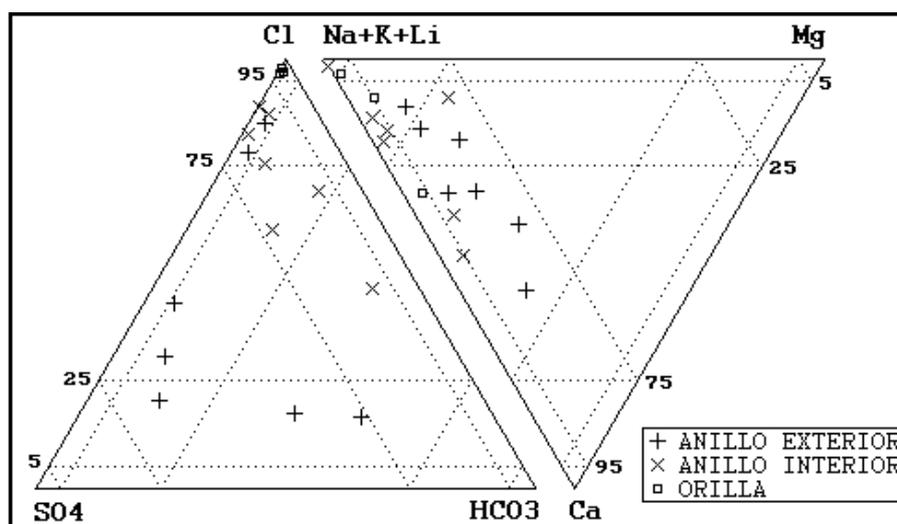


Fig.1 : Composición de las aguas de aporte del salar de Punta Negra

Origen de las sales disueltas

Las aguas *diluidas* de los dos anillos (22, 23, 19, 21, 24) no plantean mayor problema en cuanto al origen de sus componentes disueltos por alteración de rocas. La vertiente (22), que surge en las faldas del volcán Lullaillaico, con Na y HCO₃ como componentes principales, es una típica agua de alteración de roca volcánica. El agua del río (23) tiene Ca como catión principal, lo que refleja los terrenos mayormente sedimentarios que lixivian. La composición de las aguas de napa (19, 21 y 24), con Na y Cl dominantes, corresponde a terrenos sedimentarios predominantes alrededor del salar.

Se plantea un problema de contaminación para el agua de napa (20). Su pH muy elevado (9,70) asociado a un contenido anormalmente bajo de Mg (0,06 mg/l) indica casi seguramente una contaminación por los cementos del pozo. El calcio es probablemente también afectado porque un aumento de pH induce la transformación del bicarbonato en carbonato, lo que provoca la precipitación de carbonato de calcio. La vecina agua de napa (19) tiene también un pH un poco elevado (9,01), pero no presenta reducción apreciable de su contenido de magnesio. Podría entonces presentar una muy leve contaminación de la misma índole.

El problema principal es el origen de la alta salinidad de gran parte de las aguas de aporte. Si para las tres aguas salobres del anillo interior (11, 16 y 18) se podría abogar el efecto de la cuña salina del salar, eso no puede ser para las aguas salobres del anillo exterior. Tales salinidades en aguas de aportes se deben casi siempre a la disolución de antiguas evaporitas o salmueras. Hemos buscado correlaciones equimolares entre cationes y aniones que indiquen sales evaporíticas redisueltas. Las presentamos en la figura 2. El agua de vertiente 14 del anillo exterior es la más concentrada (5,4 g/l) de todas las aguas de aporte de los dos anillos. Su composición debería reflejar más nitidamente las influencias de las sales o salmueras redisueltas. Por eso indentificamos esta agua en cada diagrama.

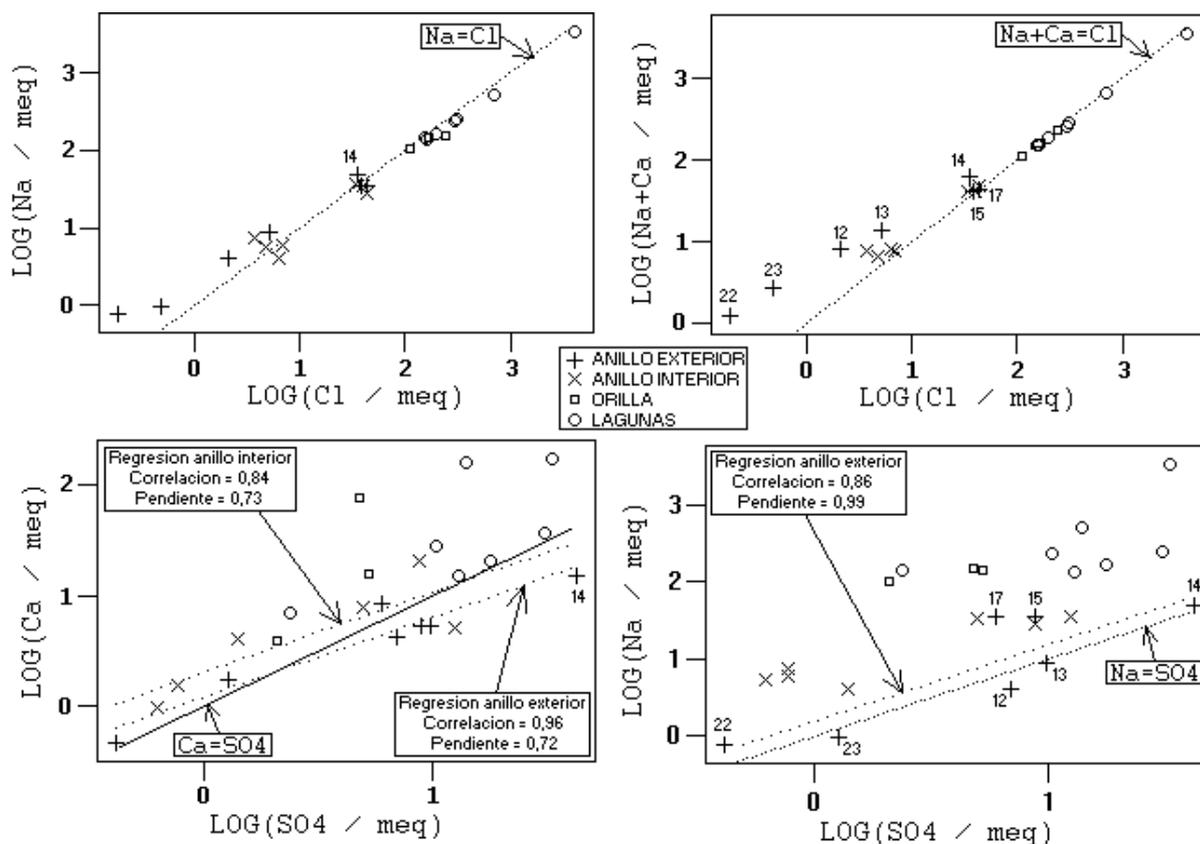


Fig.2 : Correlaciones entre los principales cationes y aniones en las aguas de Punta Negra.

En el diagrama Na / Cl los puntos representativos de las aguas de aporte de los dos anillos tienden a acercarse a la recta equimolar Na = Cl al aumentar la concentración. Eso indica un aporte de Na y Cl en concentraciones similares. Sin embargo, los puntos presentan alguna dispersión de cada lado de la recta indicando que el cloruro de sodio no es el único componente responsable del aumento de salinidad de los aportes.

En el diagrama Na+Ca / Cl, aparece una diferencia entre las aguas de los dos anillos. Las del anillo interior son más cerca de la recta equimolar Na+Ca = Cl que las del anillo exterior, con dos excepciones : (15 y 17) que son las dos aguas de menor cota del anillo exterior. Eso sugiere que las aguas del anillo interior, y estas dos más bajas del anillo exterior, han redisolto apreciables cantidades de salmueras de tipo Na-Ca / Cl. Los puntos de las aguas del anillo exterior se acercan también progresivamente a la recta equimolar, pero sin llegar a ella. Por ejemplo, las concentraciones en Na+Ca y Cl de PUN-14 divergen en 56 % y sus logaritmos en 15 %. Es probable que haya también alguna influencia de salmueras calco-sódicas en el aumento de las salinidades de las aguas de aporte del anillo exterior, pero esta contribución no debe ser preponderante. Estas aguas han redisolto más cloruro de sodio que cloruro de calcio.

La correlación entre SO₄ y Ca no sugiere la redisolución de sulfato de calcio o yeso. Hemos figurado las rectas de regresión para cada anillo. Sus pendientes, del orden de 0,72, son netamente diferentes de la pendiente de 1 de la recta equimolar Ca = SO₄. El agua (14), la más concentrada de los aportes, es también la más alejada de la recta equimolar.

La correlación Na versus SO₄ presenta algo interesante. Los puntos de las aguas del anillo exterior se acercan a la recta equimolar Na = SO₄. La recta de regresión de esos puntos es

paralela y cerca de la recta equimolar. Su pendiente es 0,99 y el coeficiente de correlación de 0,86. El desplazamiento de la recta de regresión por encima de la recta equimolar se debe a la influencia de las aguas más bajas del anillo exterior (15 y 17). Ya hemos visto que estas aguas son más parecidas a las del anillo inferior. Si nos fijamos en el agua (14), vemos que su punto se encuentra cerca de la recta equimolar. Todo eso parece indicar una contribución de sulfato de sodio en las aguas salobres del anillo exterior.

En resumen, las aguas salobres más altas del anillo exterior deben su salinidad principalmente a la redisolución de cloruro y sulfato de sodio, mientras que las aguas salobres del anillo interior, y las más bajas del anillo exterior, han redisolto mayormente cloruro de sodio y calcio. Estos componentes provienen de antiguas evaporitas o salmueras asociadas. Hay que recalcar que los dos tipos de sales o salmueras corresponden precisamente a las vías evolutivas sulfatadas y cálcicas y a los dos mega-grupos de salmueras y sales de los salares chilenos.

Queda el problema del origen de la alta salinidad de las aguas de orilla (4, 8 y 10). En los diagramas de correlación de la figura 2, esas aguas parecen asociadas a las aguas de lagunas. En la figura 3 presentamos las relaciones entre la salinidad y las concentraciones porcentuales (o relativas a la salinidad) de Li y B para todas las aguas. Se puede observar dos cosas. Primero, las aguas de aporte de los dos anillos tienen concentraciones porcentuales crecientes en Li y B cuando aumenta la salinidad, con buenos coeficientes de correlación. Por otra parte, las aguas de lagunas y orillas son parecidas entre si, pero se diferencian netamente de las aguas de aporte. Eso sugiere fuertemente que las aguas de vertientes difusas de la orilla son en realidad cuñas salinas de la napa del salar. El aumento del porcentaje de Li y B en las aguas de aporte asociado al origen de la elevación de salinidad por disolución de antiguas salmueras o evaporitas, parece indicar que son más salmueras que sales las que contaminan las napas diluidas de la cuenca. En efecto, estos componentes tienden a concentrarse en las salmueras residuales, sin precipitar en las sales evaporíticas comunes.

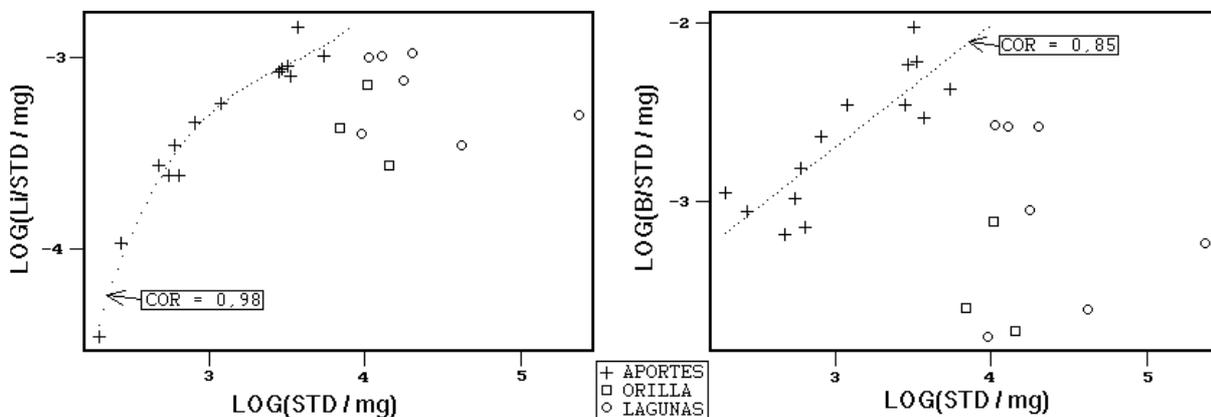


Fig.3 : Concentraciones porcentuales de Li y B relativas a la salinidad en aguas del salar de Punta Negra

Vías evolutivas y relación con la geología

Las vías evolutivas están indicadas en la tabla 1 y en el mapa geológico. Las aguas del anillo exterior evolucionan mayormente según la vía neutra sulfatada reflejando así la salinización de las napas de este sector por salmueras o sales de sulfato de sodio. El agua muy diluida 22 sigue la

vía carbonatada en buen acuerdo con la litología volcánica de esta parte de la cuenca. En caso de un origen de los componentes disueltos por alteración de rocas, la vía neutra sulfatada refleja la presencia de rocas sedimentarias, como el caso del agua diluida PUN-23, o de rocas volcánicas con azufre. En el caso de Punta Negra, esta vía evolutiva se debe a antiguas evaporitas que han sido redisueltas. Las aguas del anillo interior tienden a seguir la vía cálcica lo que refleja la salinización de las napas por salmueras cloruradas cálcicas.

Pero aparecen algunas excepciones. Las aguas diluidas PUN-19 y PUN-20 que siguen la vía carbonatada, estarían contaminadas por el cemento del pozo, por lo que no se puede interpretar sus vías evolutivas. Sin embargo podemos notar que son aguas diluidas, como lo son casi siempre las aguas de aporte que siguen la vía carbonatada, y que se encuentran cuenca abajo de PUN-22, un agua de alteración que sigue la misma vía. Es posible que la contaminación debida a los pozos no haya cambiado la vía evolutiva.

El agua de napa (11) es el único aporte que tenemos al oeste de la cuenca. Es también el único que sigue la vía evolutiva alcalina sulfatada. Eso podría deberse a alguna influencia de las rocas plutónicas (KTg) que caracterizan la geología del nor-oeste de la cuenca. Aguas de alteración de rocas plutónicas tienden a seguir preferencialmente las vías carbonatadas o sulfatadas, dependiendo de las mineralizaciones o impurezas que contienen.

Se puede observar en la tabla 1 que las vías evolutivas traducen de manera simple y mucho mejor los varios tipos de aguas y el origen de sus componentes que los criterios habituales.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la laguna PUN-1. Las demás aguas de lagunas presentan características similares. Los valores de la columna "desviación" son los coeficientes del chi-cuadrado adaptado que miden el grado de semejanza entre las soluciones de aporte evaporadas (PUN-xxE) y PUN-1.

El agua de aporte evaporada que más se acerca a la composición de la laguna (1) es la napa (18) con un coeficiente de desviación bajo. Es interesante notar que la segunda agua más parecida es el río (17) ubicado exactamente cuenca arriba de (18), pero con un coeficiente de desvío no tan bueno. Globalmente, las aguas evaporadas del anillo interior, y las más bajas del anillo exterior, se acercan netamente más de las aguas de lagunas que las del anillo exterior. Las aguas superficiales del salar de Punta Negra provienen de la evaporación de aguas de napas cercanas al salar de tipo químico cálcico. Las aguas sulfatadas cuenca arriba no tienen influencia sobre la composición de las lagunas. La pregunta es si las aguas sulfatadas podrían cambiar su composición química al contacto de antiguas salmueras cálcicas y “transformarse” en aguas salobres cálcicas al acercarse del salar. Si un tal proceso es factible para aguas muy diluidas, es mucho más complicado para aguas salobres. Para cambiar la vía evolutiva de un agua ya salada, hay que aportar considerables cantidades de nuevos componentes para alterar la composición química del agua salada inicial. Es probable, entonces, que las aguas de los sectores elevados al este de la cuenca no contribuyan significativamente a la alimentación del salar.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
PUN-1	8,17	2,50	11000	1490	52,6	30,5	5840	641	21,0	726	267	
PUN-18E	7,80	0,714	10500	1710	69,4	35,3	5520	742	16,7	1130	171	0,058
PUN-17E	7,97	1,93	10000	1840	194	35,4	4970	813	18,3	921	452	0,181
PUN-21E	7,77	0,548	10600	1550	41,7	35,7	4170	674	9,44	2350	245	0,190
PUN-16E	7,78	1,09	10500	1670	131	35,7	4110	585	17,3	2160	347	0,199
PUN-15E	8,09	1,77	9330	2990	120	17,5	5800	364	17,8	550	427	0,200
PUN-4E	8,03	0,762	11800	494	15,7	35,1	6450	493	14,7	592	227	0,247
PUN-11E	8,37	2,57	8370	4060	73,2	32,4	5490	1030	36,4	161	542	0,363
PUN-14E	8,14	1,85	5370	7640	97,9	36,3	4810	442	23,0	554	744	0,382
PUN-24E	7,91	0,549	10700	1630	13,7	27,0	6030	411	5,77	1150	90,4	0,407
PUN-13E	8,17	1,99	4420	8680	99,6	36,7	4720	452	16,7	516	762	0,439
PUN-12E	8,20	1,94	3210	10100	79,2	36,8	4060	533	16,0	482	1090	0,547
PUN-23E	8,18	1,49	3260	9490	44,5	36,8	4130	731	5,45	495	977	0,633
PUN-8E	8,27	1,21	11800	301	5,13	35,4	7240	418	8,85	187	71,5	0,811
PUN-10E	7,76	0,330	12100	330	3,76	16,5	5030	272	5,55	2190	169	0,825
PUN-19E	9,38	23,3	9090	1610	30,2	45,0	6880	807	7,08	1,47	4,34	0,928
PUN-20E	9,91	140	5130	1490	18,2	69,5	7150	322	6,13	0,345	0,923	1,170
PUN-22E	9,74	77,5	2000	6040	66,3	59,5	5790	1210	2,13	0,569	1,49	1,480

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con el agua de laguna PUN-1 del salar de Punta Negra. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Calidad de agua

Hay dos aguas de excelente calidad para cualquier uso : PUN-22 (manantial Tocomar) y 23 (Río Frío). Las dos se encuentran muy arriba en la cuenca. Las aguas de napa al sur del salar (19, 20, 24) también cumplen con las normas chilenas de potabilidad y de riego, pero con algunos componentes al límite (salinidad, As). Muy arriba en la cuenca, PUN-12 (Zorras 1) y PUN-13 (Zorritas) sobrepasan levemente los límites en As o boro de esas normas y podrían ser aprovechada para uso potable con restricciones. El agua de napa PUN-21, al norte de la cuenca, cumple con las normas de potabilidad y riego, con excepción del arsénico en leve exceso. Todas las demás aguas son salobres y muy lejos de las normas de potabilidad y riego.

Balance hídrico

No disponemos de suficientes datos para establecer los balances hídricos de cada laguna. Solamente podemos intentar establecer un grueso orden de magnitud de los aportes superficiales al salar despreciando las infiltraciones de las lagunas a dentro del salar. Se obtiene :

$$V_{ap} = S(H_c - H_p) = 390\ 000\ m^3/año = 12\ l/s$$

con - $H_c = 2\ m/año$; $H_p = 0,05\ m/año$; $S = 0,2\ km^2$

Para un salar de este tamaño, un flujo superficial del orden de 12 l/s es muy bajo. No es muy alentador para el aprovechamiento de las napas alrededor del salar pues podría bajar rápidamente su nivel. La tasa de precipitación que cae sobre la cuenca oriental es del orden de 6000 l/s. Las perdidas por infiltración en napas profundas debe ser importante.

Conclusiones

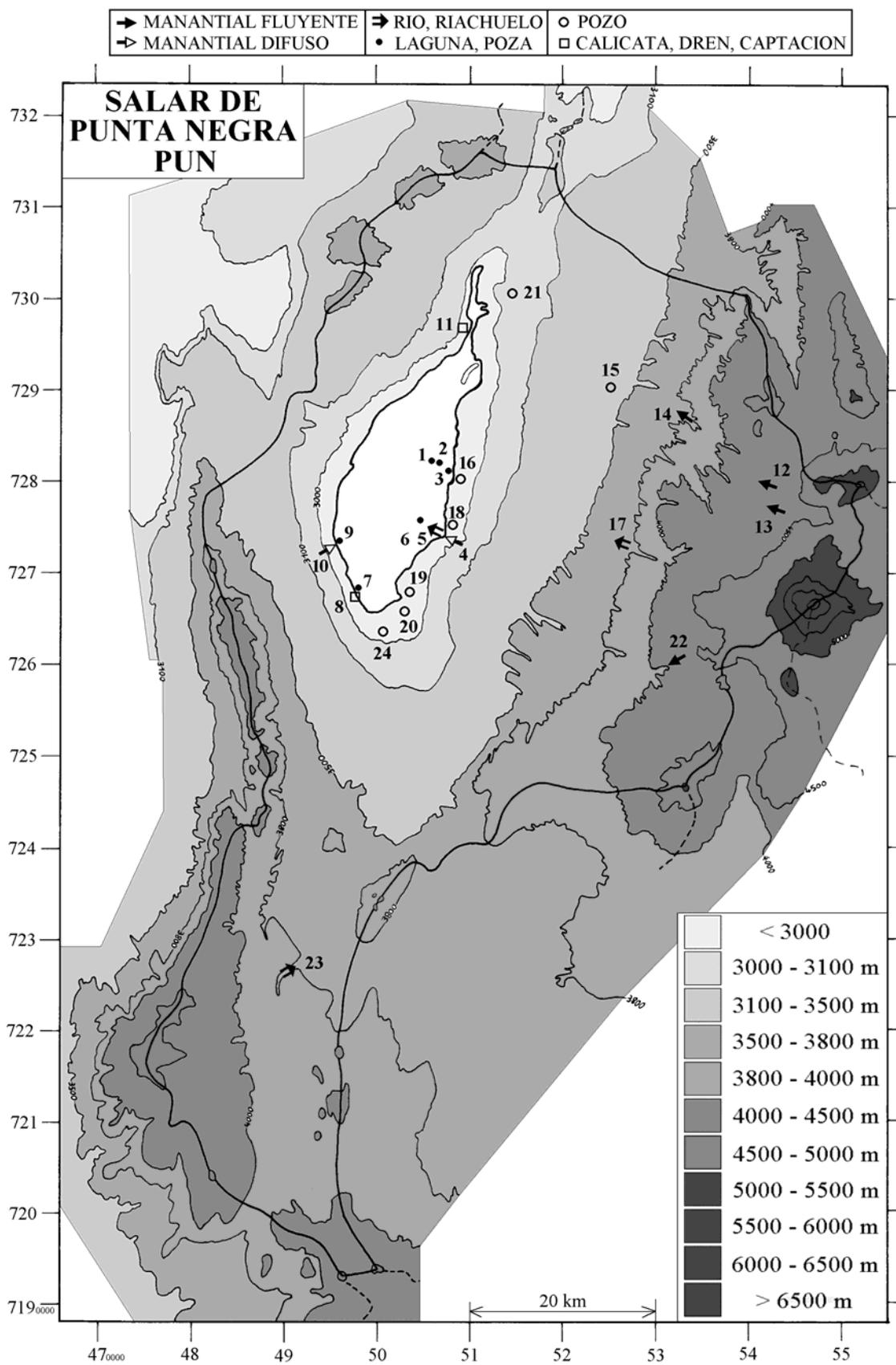
Las aguas de aporte de la cuenca del salar de Punta Negra presentan la particularidad de sufrir una doble salinización por antiguas salmueras o por sales evaporíticas. Las napas más altas en la cuenca disuelven sulfato y cloruro de sodio y evolucionan hacia la vía sulfatada, mientras que las napas más cercanas al salar disuelven cloruro de sodio y de calcio y evolucionan hacia la vía cálcica. Cuando las aguas de aporte no han sido contaminadas por agentes geológicos, tienden a evolucionar hacia la vía carbonatada, reflejando el origen de sus componentes por alteración de rocas volcánicas, o hacia la vía sulfatada cuando drenan terrenos sedimentarios (Río Frío). Las salmueras del salar pertenecen al mega-grupo Na-Ca / Cl, donde la concentración en Ca es superior a la de SO₄. Proviene de la evaporación de las aguas de aportes cálcicas de las napas cerca del salar. El caudal entrante superficialmente de 12 l/s es muy bajo ; corresponde a menos de 1 % de las aguas que caen sobre la cuenca. Se plantea el problema de la pérdida de estas aguas. Puede haber varias napas sobrepuestas en la cuenca. La salinización de las napas diluidas de la cuenca, asociada al escaso caudal superficial entrante al salar, no ofrecen buenas perspectivas para una explotación intensa y prolongada de las napas alrededor del salar.

Referencias y estudios anteriores

Minera Escondida Ltda 1995. Resumen sobre la hidrogeología y recursos hídricos en la cuenca de Punta Negra. Informe inédito, Junio de 1995.

Mongard, C. 1984. Hidrogeología del salar de Punta Negra (e Imilac). Tesis de Grado para optar al Título de Geóloga, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, 232p.

Orellana J. y Ramirez G. 1972. Hidrología general, salar de Punta Negra. CORFO, Departamento de recursos hidráulicos, 24p.



SALAR DE PUNTA NEGRA
PUN

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
PUN-1	24/05/94	13 ^H 15	506460	7284025	2945	Laguna (Esc: VCL-2 o 2L)
PUN-2	24/05/94	14 ^H 15	507325	7283560	2945	Laguna (Esc: 2C)
PUN-3	24/05/94	14 ^H 50	508325	7282310	2945	Laguna (Esc: 2V)
PUN-4	24/05/94	16 ^H 30	507305	7273960	2950	Manantial difuso (Esc: 3S)
PUN-5	24/05/94	17 ^H 00	506525	7274500	2945	Dren (Esc: 3C)
PUN-6	25/05/94	11 ^H 15	504275	7276815	2945	Laguna (Esc: 3L2)
PUN-7	25/05/94	13 ^H 25	499270	7267345	2945	Laguna (Esc: V3L)
PUN-8	25/05/94	13 ^H 40	499240	7267190	2945	Cateo (Esc: V3S)
PUN-9	25/05/94	16 ^H 00	496925	7272770	2945	Laguna (Esc: VCL-4)
PUN-10	25/05/94	16 ^H 20	496810	7272635	2946	Manantial difuso (Vegas)
PUN-11	25/05/94	18 ^H 00	507925	7293925	2960	Pique San Carlos(Esc: VCL-1)
PUN-12	26/05/94	12 ^H 15	542635	7279800	4190	Manantial corriente (Zorras 1)
PUN-13	26/05/94	13 ^H 25	542100	7277250	4190	Manantial corriente (Zorritas)
PUN-14	26/05/94	15 ^H 50	530300	7290000	3520	Manantial corriente (Zorras 2)
PUN-15	26/05/94	14 ^H 30	524275	7291170	3350	Napa (pozo ES-24)
PUN-16	26/05/94	17 ^H 55	508535	7281165	2952	Napa (pozo SF-2)
PUN-17	30/05/94	12 ^H 45	525740	7273255	3610	Vertedero Llullallaco
PUN-18	30/05/94	13 ^H 45	507445	7274950	2953	Napa (pozo SG2)
PUN-19	30/05/94	15 ^H 50	503175	7267270	2953	Napa (pozo UN-19)
PUN-20	30/05/94	16 ^H 30	502325	7265310	2955	Napa (pozo SH-1)
PUN-21	31/05/94	17 ^H 45	515000	7301000	3040	Napa (pozo producción 12)
PUN-22	31/05/94	12 ^H 20	532800	7259850	4080	Manantial corriente Tocomar
PUN-23	31/05/94	16 ^H 30	491250	7227000	3780	Río Frío
PUN-24	31/05/94	18 ^H 15	500585	7263120	2970	Napa (pozo ES-40)

**SALAR DE PUNTA NEGRA
PUN**

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
PUN-1	11800	5	11,8	1,016	8,17	2,50	11000	7,34	0,737	1490	7,63	52,6	30,5	0,43	5840	641	21,0	726	267
PUN-2	10500	14	7,4	1,010	8,11	1,66	6920	4,56	0,622	854	8,43	33,3	24,8	0,25	3800	391	13,0	413	158
PUN-3	14000	12	5,2	1,008	7,77	1,27	5750	3,75	0,789	624	14,9	27,9	29,7	0,19	3170	320	10,5	305	158
PUN-4	14000	11	6,5	1,008	7,56	1,01	6040	0,911	0,232	252	12,9	8,04	35,6	0,070	3290	252	7,50	315	116
PUN-5	22500	8,5	9,5	1,013	8,18	1,46	10400	1,65	0,274	499	5,84	15,9	35,3	0,13	5410	489	13,5	561	214
PUN-6	70000	5	2,7	1,157	6,94	4,30	142000	9,43	0,569	1600	11,4	135	18,2	0,70	79400	4140	117	3510	1830
PUN-7	11000	14	5,8	1,007	8,05	0,944	5500	0,302	0,119	115	9,80	1,65	13,9	0,075	3270	274	3,80	140	44,0
PUN-8	8750	7	5,6	1,005	8,17	1,19	3980	0,179	0,0591	101	16,8	1,72	20,2	0,050	2420	140	2,96	78,2	23,9
PUN-9	45000	12	6,6	1,030	7,61	0,714	25100	1,37	0,176	672	76,9	10,3	20,5	0,097	11900	680	14,5	3170	311
PUN-10	16800	12	6,0	1,011	7,88	0,352	8450	0,783	0,113	230	36,3	2,63	11,6	0,032	3540	190	3,88	1540	118
PUN-11	3700	6	8,3	1,000	8,01	9,50	1190	0,903	0,195	600	0,087	10,8	47,6	1,4	840	152	5,38	102	143
PUN-12	810	16,5	5,4	1,000	7,02	1,59	75,3	0,190	0,0929	336	4,47	1,86	37,0	0,16	95,2	12,5	0,375	83,4	25,5
PUN-13	1280	3	7,4	1,000	7,71	1,76	184	0,224	0,0476	470	0,047	4,13	33,9	0,056	202	18,8	0,694	107	31,6
PUN-14	5500	9	8,0	1,005	8,08	5,35	1260	2,48	0,339	2020	0,048	23,0	28,8	0,24	1110	104	5,42	305	175
PUN-15	3900	16	0,4	1,000	8,11	1,74	1350	2,52	0,954	427	0,043	17,1	2,49	0,15	819	52,0	2,54	108	61,0
PUN-16	4300	10	na	1,000	7,23	0,684	1560	2,89	0,514	420	8,56	20,0	31,6	0,090	653	89,1	2,64	409	53,0
PUN-17	na	0	10,0	1,002	8,30	1,68	1540	2,53	0,319	288	0,905	30,4	24,1	0,23	800	127	2,87	172	71,0
PUN-18	na	14	2,5	1,002	6,24	0,100	1440	1,65	0,236	240	2,28	9,72	17,2	0,0004	791	104	2,34	158	23,9
PUN-19	na	14	4,2	1,000	9,01	1,59	172	0,061	0,0392	30,0	9,61	0,562	35,6	0,028	127	15,0	0,132	19,2	2,50
PUN-20	na	13	5,7	1,000	9,70	3,62	132	0,074	0,0386	37,1	6,63	0,454	38,9	0,054	175	8,02	0,153	2,51	0,061
PUN-21	na	21	na	1,000	8,07	0,714	230	0,380	0,0320	67,2	6,82	0,919	27,9	0,082	92,0	14,9	0,208	82,2	5,39
PUN-22	na	14	5,5	1,000	7,45	0,887	6,53	0,023	0,0070	19,7	4,77	0,216	33,3	0,011	18,4	3,95	0,007	9,50	1,70
PUN-23	na	2	6,0	1,000	7,14	1,39	17,4	0,028	0,0121	61,2	4,30	0,238	14,5	0,0067	22,1	3,91	0,029	35,3	5,22
PUN-24	na	16	0,5	1,000	8,75	0,245	244	0,181	0,0594	37,2	1,41	0,313	0,616	0,0001	139	9,38	0,132	30,9	2,07

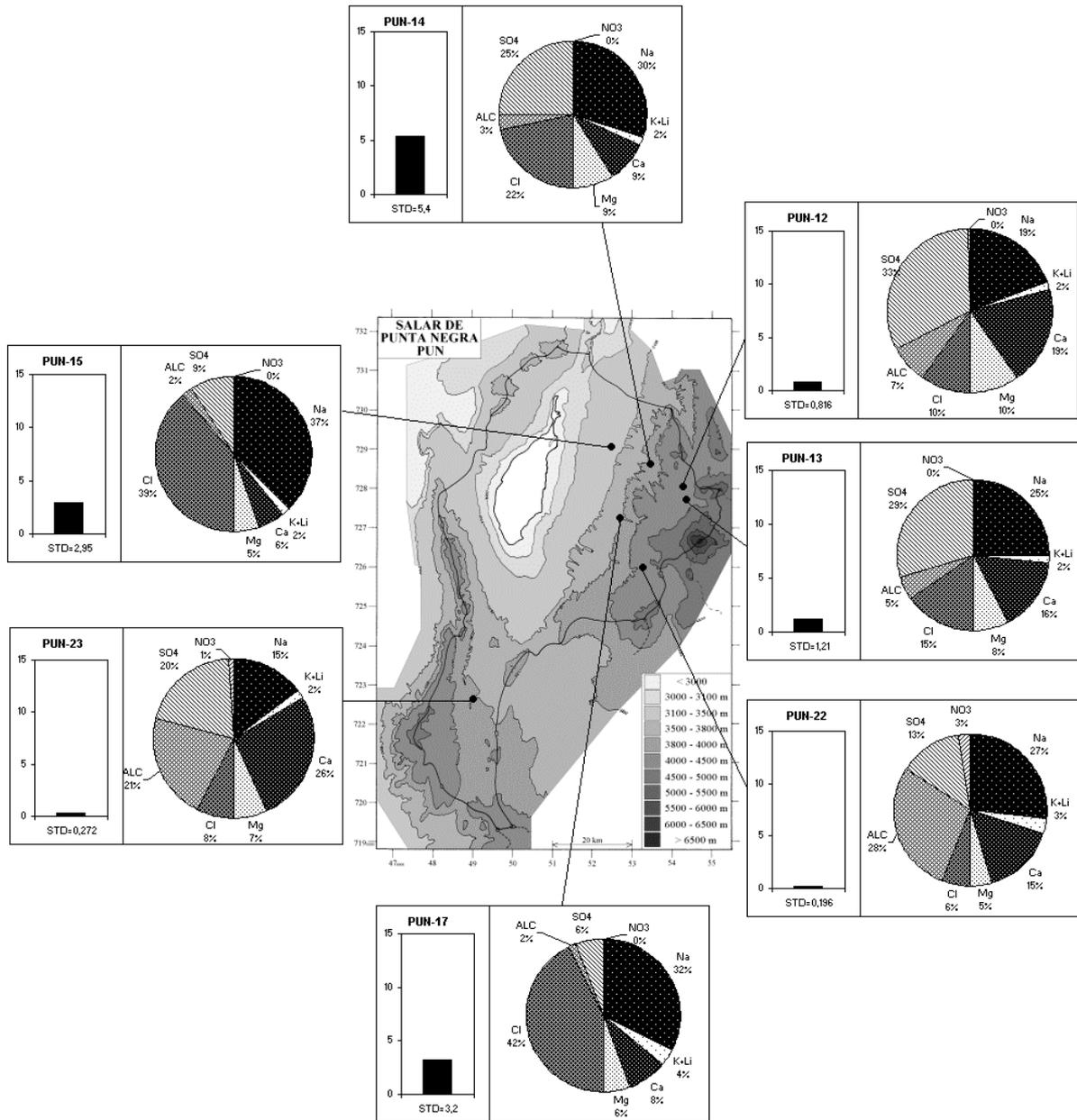
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
 CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

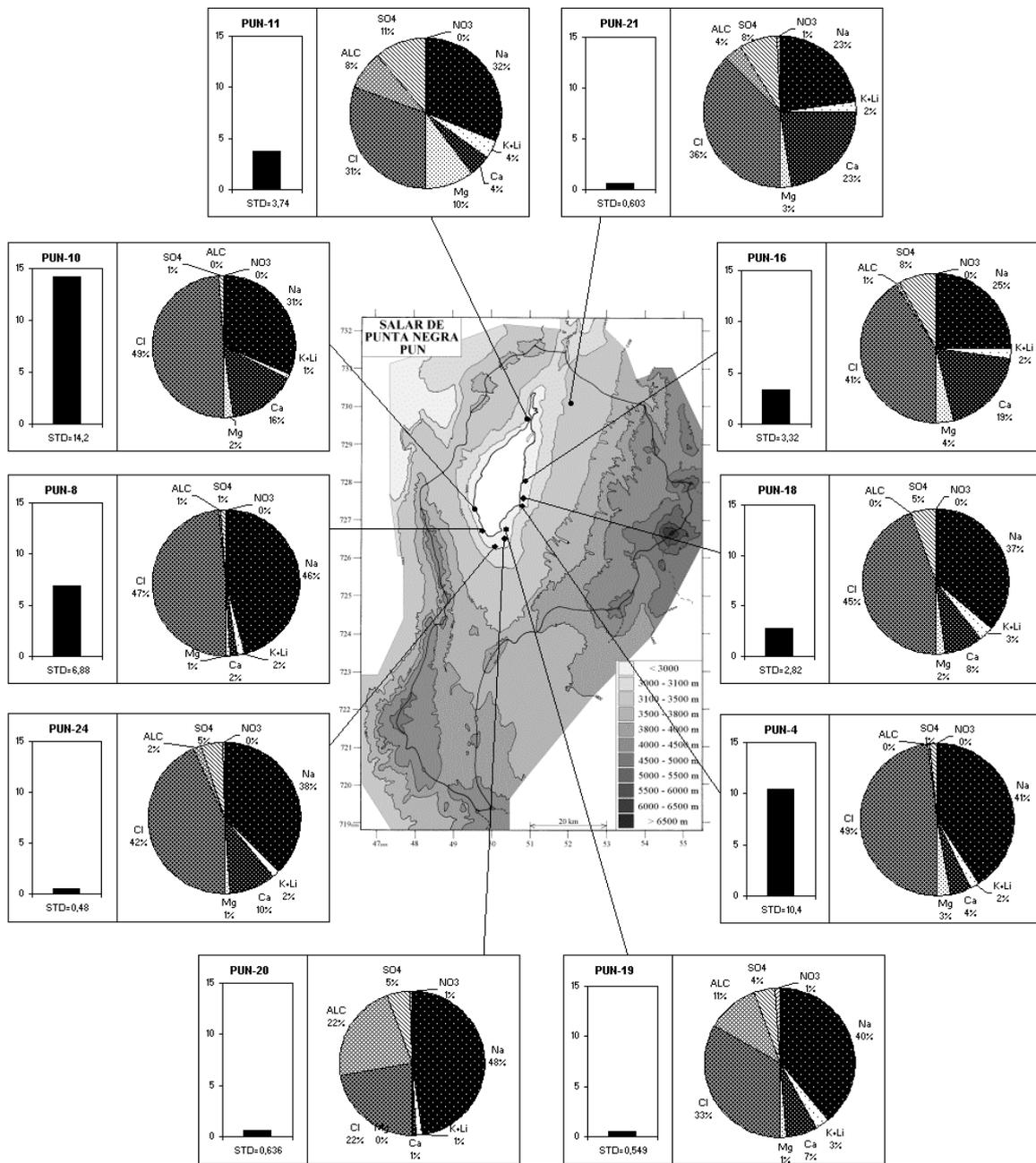
**SALAR DE PUNTA NEGRA
PUN**

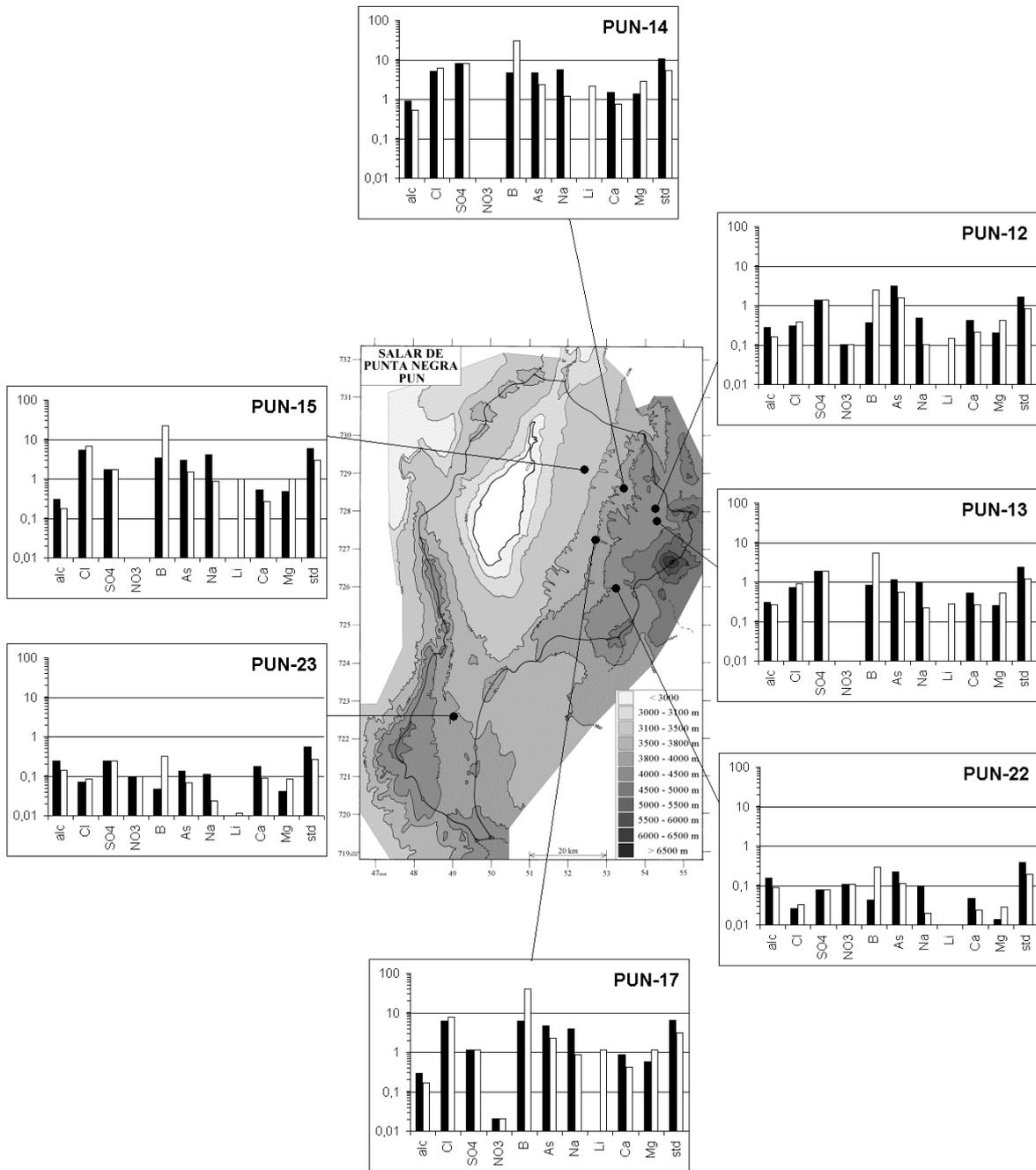
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
PUN-1	20245	113	3,96	1,2	331,6	342,6	3,3
PUN-2	12750	77,5	2,34	0,79	210,5	214,6	1,9
PUN-3	10532	68,9	0,78	1,6	175,9	176,5	0,4
PUN-4	10432	59,3	0,42	2,3	175,8	176,5	0,4
PUN-5	17815	72,6	2,64	0,70	295,1	306,0	3,6
PUN-6	233344	-	-	-	3899	4048	3,7
PUN-7	9451	54,7	0,84	0,66	160,2	158,5	1,1
PUN-8	6877	69,5	0,96	0,79	114,9	115,6	0,6
PUN-9	41958	37,5	1,14	1,3	719,1	722,0	0,4
PUN-10	14160	18,8	0,66	0,37	245,7	243,7	0,8
PUN-11	3735	561	7,08	9,7	58,07	55,60	4,3
PUN-12	816,4	96,4	0,12	15	10,77	10,78	0,1
PUN-13	1206	106	0,48	4,3	17,32	16,73	3,5
PUN-14	5400	304	6,30	4,0	81,44	82,95	1,8
PUN-15	2945	95,2	1,68	1,1	47,72	48,55	1,7
PUN-16	3325	40,1	0,12	3,9	55,82	53,49	4,3
PUN-17	3197	84,2	1,74	0,92	52,89	51,10	3,5
PUN-18	2818	6,10	0,0	5,3	47,25	45,74	3,2
PUN-19	548,5	78,7	4,80	0,13	7,067	7,211	2,0
PUN-20	636,0	129	30,2	0,04	7,977	8,209	2,9
PUN-21	602,9	40,9	0,60	0,53	8,954	8,704	2,8
PUN-22	195,7	53,7	0,06	3,4	1,516	1,558	2,7
PUN-23	271,5	84,8	0,06	15	3,254	3,224	0,9
PUN-24	480,3	13,2	0,54	0,04	8,009	7,904	1,3

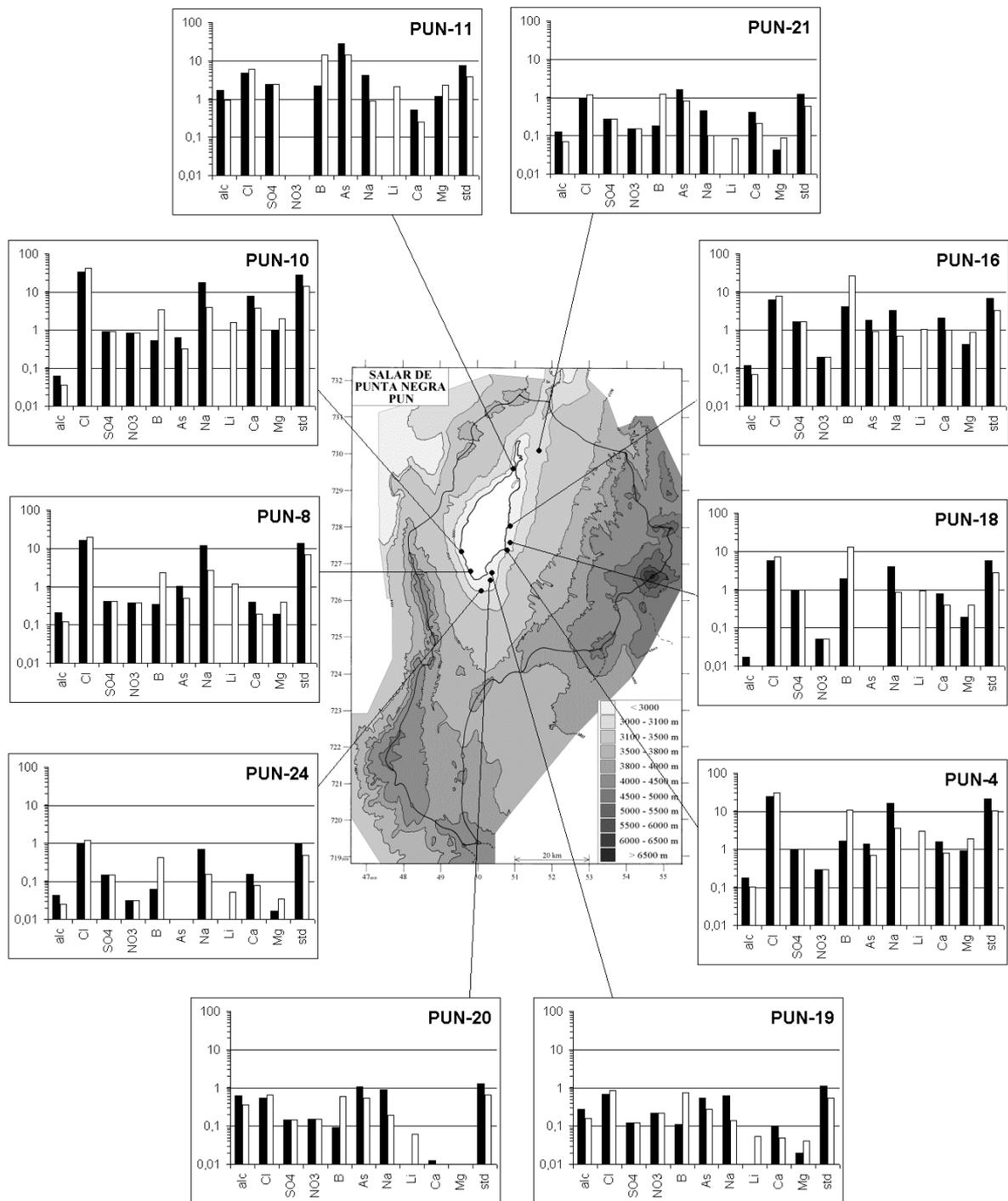
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %









MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

PUN

- Q** : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.
- TQ2** : *Plioceno - Pleistoceno*. Coladas, tobas y brechas andesíticas y basálticas con intercalaciones de sedimentitas detríticas.
- Cz** : *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.
- Tm3** : *Mioceno*. Gravas de Atacama. Gravas, arenas y limos subordinados, localmente con litificación incipiente e intercalaciones de ignimbritas.
- KT** : *Cretácico sup. - Terciario inf.* Coladas y brechas andesíticas y riolíticas, tobas e ignimbritas dacíticas y riolíticas, con intercalaciones de lutitas, calizas, areniscas y conglomerados continentales.
- KTg** : *Cretácico sup. - Terciario inf.* Rocas plutónicas e hipabisales.
- Jtg** : *Jurásico sup. - Terciario inf.* Rocas plutónicas e hipabisales.
- J1** : *Jurásico*. Areniscas, areniscas calcáreas, calizas, margas, lutitas, conglomerados y cherts. Desarrollo de facies evaporíticas en el Jurásico sup. de la Cordillera de los Andes.
- J2** : *Jurásico*. Fm. La Negra. Coladas y tobas andesíticas y, en forma subordinada, coladas riolíticas, dacíticas y traquíticas, tobas dacíticas e intercalaciones sedimentarias, algunas con fósiles marinos.
- TR2** : *Triásico medio - Triásico sup.* Rocas sedimentarias y/o volcánicas. Areniscas, conglomerados y lutitas, localmente con flora fósil. Coladas y brechas riolíticas y andesíticas.
- CTR** : *Carbonífero - Triásico (?)*. Tobas, brechas, coladas e ignimbritas principalmente riolíticas y dacíticas, con intercalaciones de sedimentitas clásticas. Cuerpos hipabisales dacíticos y riolíticos asociados.
- Pz** : *Paleozoico (?)*. Metareniscas, pizarras, filitas, esquistos, metabasitas, serpentinitas, gneisses y anfibolitas.
- D** : *Devónico*. Cuarzitas, filitas, pizarras, esquistos, lutitas y conglomerados. Facies marinos y transicionales.
- Pzg** : *Paleozoico*. Rocas plutónicas e hipabisales.

SALAR DE AGUAS CALIENTES 4

Introducción

El salar de Aguas Calientes 4 se encuentra en el sur de la Segunda Región. Su cuenca colinda con las del salar de Punta Negra y del salar de Pajonales. El imponente volcán Lulluillaco (6739 m) cierra su cuenca al norte. En el mapa topográfico se nota la existencia de una sub-cuenca de 150 km² al este, como una depresión cerrada ubicada 600 m más arriba que el salar. Se puede discutir la incorporación de esta importante sub-cuenca en la cuenca del salar. Sin embargo, la ausencia de una laguna o de un salar en el fondo de la depresión indica que las aguas que drenan la sub-cuenca no se acumulan en su fondo, sino que se infiltran en las formaciones superficiales probablemente hacia la vecina cuenca del salar 600 m más abajo. Las principales características morfométricas y climatológicas del salar son:

- altura: 3665 m
- superficie de la cuenca: 656 km² (incluida la sub-cuenca oriental de 150 km²)
- superficie del salar: 19,5 km²
- superficie de las lagunas: 1 - 3 km²
- precipitaciones: 180 mm/año
- evaporación potencial: 1630 mm/año
- temperatura media: 2°C

No hemos encontrado vertientes cuenca arriba; todas están pegadas a las orillas este y norte del salar donde alimentan varias lagunas someras conectadas entre si y de extensión muy variable. Durante nuestra campaña, en marzo de 1996, las lagunas tenían una superficie por lo menos tres veces superior a la figurada en el mapa topográfico del IGM. El salar es de tipo "playa" con una napa de salmuera subterránea a 1 - 2 m de profundidad. Es una boratera donde se ha explotado la ulexita (NaCaB₅O₉·8H₂O), cuyo campamento estaba desocupado a la fecha de nuestra visita.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas del salar de Aguas Calientes 4 están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Hemos encontrado 3 vertientes difusas y 2 fluyentes de tipo termal. El aporte más diluido tiene una salinidad de 0,85 g/l y el más concentrado de 2 g/l. Las vertientes (9) y (10) presentan una influencia termal que dio su nombre al salar. Se puede distinguir en los diagramas triangulares dos tipos de aporte:

- las vertientes al este del salar (1 y 9) son globalmente de tipo Na-Ca / SO₄-Cl con leves concentraciones en Mg y HCO₃. Tienen un alto contenido en SO₄ y Ca.
- las vertientes al norte del salar (4, 8, 10) contienen menos SO₄ y Ca; son globalmente de tipo Na-(Ca) / Cl-(SO₄) y un contenido en Mg un poco más elevado que en las aguas de las vertiente orientales.

Estos dos tipos, que se diferencian por sus porcentajes de SO₄ y Ca, aparecen también nitidamente en los diagramas circulares. Cabe recalcar que no aparece ninguna relación entre hidrotermalismo y tipo químico.

APORTES	SALINIDAD mg/l	TIPO QUÍMICO		VÍA EVOLUTIVA
		Cationes	Aniones	
AC4-9	851	Na-Ca-(Mg)	/ SO ₄ -Cl-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
AC4-10	1620	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-SO ₄ -(HCO ₃)	SO ₄ (N)
AC4-1	1808	Na-Ca-(Mg)	/ SO ₄ -Cl	SO ₄ (N)
AC4-4	2068	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	SO ₄ (N)
AC4-8	2074	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	SO ₄ (N)
LAGUNAS				
AC4-3	9350	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-SO ₄	SO ₄
AC4-5	21170	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	SO ₄
AC4-2	32789	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-SO ₄	SO ₄
AC4-6	68899	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-(SO ₄)	SO ₄
AC4-7	341759	Na-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	SO ₄

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Aguas Calientes 4. SO₄ (N) = vía neutra sulfatada.

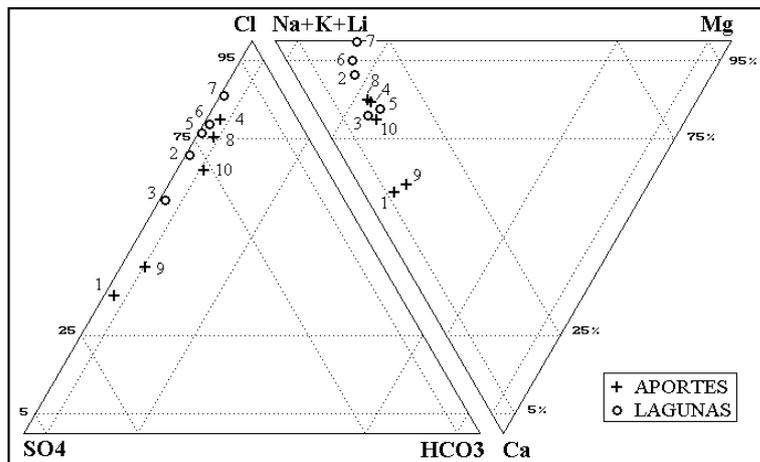


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Aguas Calientes 4.

Todas las aguas de lagunas tienen más sulfato que calcio. Pertenecen todas al mega-grupo Na / Cl-SO₄ con variaciones en los contenidos de Ca y Mg.

Origen de los componentes disueltos

La mejor relación de equimolaridad entre componentes mayores que se haya encontrado es entre Na+Mg y Cl (Fig.2). Las vertientes del norte del salar (4, 8 y 10) tienen sus puntos representativos muy cerca de la recta de equimolaridad Na+Mg = Cl, lo que sugiere una salinización de aguas diluidas por antiguas evaporitas o salmueras de cloruro de sodio y de magnesio. Las vertientes de la orilla este, al contrario, tienen sus puntos netamente por encima de

la recta. Para las dos aguas de aporte (1 y 9), de alto contenido en SO_4 y Ca, no se ha podido encontrar ninguna relación equimolar entre componentes que hubiera permitido sospechar una contribución de antiguas evaporitas. Su composición porcentual es más parecida a la de aguas de alteración de rocas volcánicas con azufre; pero su salinidad relativamente alta es difícil de explicar. Podría tratarse del producto de la lixiviación de rocas por aguas acidificadas por disolución de azufre, la acidez quedando neutralizada por la alteración de los silicatos.

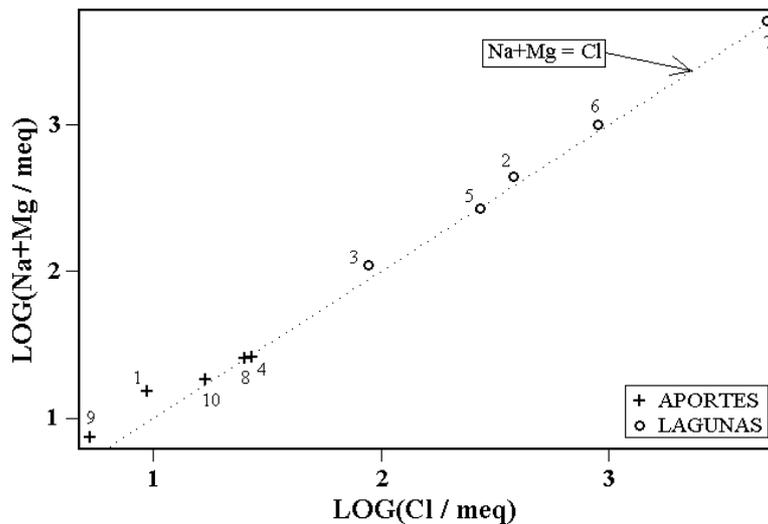


Fig.2 : Relación entre Na+Mg y Cl en aguas del salar de Aguas Calientes 4

Vías evolutivas y relación con la geología

Todas las aguas siguen la vía evolutiva neutra sulfatada. Esa vía es consistente con la geología de la cuenca constituida por formaciones volcánicas con azufre. Existen depósitos de azufre en el volcán Llullallaico y en las serranías del sur-este de la cuenca. Sin embargo, la salinidad elevada de los aportes del norte del salar no refleja la litología de la cuenca, sino la existencia de evaporitas o salmueras residuales de un antiguo salar recubierto por formaciones volcánicas más recientes.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las diversas lagunas. Los valores de la columna "desviación" son los coeficientes del chi-cuadrado adaptado que miden el grado de semejanza entre las soluciones de aporte evaporadas (AC4-xE) y las lagunas (AC4-x.EQ). Todas las composiciones de las lagunas fueron ajustadas al equilibrio con los minerales que las sobresaturan.

Se nota primero los muy bajos coeficientes de desviación (0,003 - 0,018) de los aportes evaporados que mejor se ajustan a las respectivas lagunas. Hay excelente adecuación entre las composiciones de las lagunas y de los aportes evaporados. La laguna oriental (2 y 3) proviene principalmente de la vertiente fluyente (9) en la orilla este. Contribuyen de manera secundaria las vertientes vecinas (1 y 10). La pequeña laguna (5) proviene de la evaporación de la vertiente

difusa (4) que la alimenta. La gran laguna central (6) y la napa subterránea (7) provienen de la vertiente fluyente (10) al norte del salar, con influencia secundaria de la vertiente difusa (8). En resumen, el sistema lagunar de Aguas Calientes 4 esta alimentado por las dos vertientes fluyentes y termales (9 y 10). Las vertientes difusas tienen un papel secundario. La vertiente fluyente (10), al norte del salar, parece tener más influencia, y por tanto más caudal, que la vertiente fluyente (9) que alimenta solamente la pequeña laguna pegada a la orilla este.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.0
<u>AC4-3.EQ</u>	8,11	0,986	3110	2800	36,6	29,8	2210	264	7,57	540	194	
AC4-9E	8,07	0,940	2710	3260	39,7	32,5	2040	269	6,70	608	236	0,013
AC4-1E	8,10	0,950	2350	3660	31,4	32,6	2190	287	5,14	550	158	0,037
AC4-10E	8,11	1,15	3720	2070	60,4	32,3	2260	278	10,4	466	231	0,053
AC4-4E	8,13	1,01	4490	1310	32,6	32,2	2450	282	8,33	392	251	0,087
AC4-8E	8,15	1,25	4160	1570	57,7	32,3	2400	304	9,86	360	241	0,091
<u>AC4-2.EQ</u>	8,12	2,38	13300	7030	167	27,4	8790	1140	32,5	750	836	
AC4-9E	8,15	2,66	11300	9130	165	30,0	8480	1120	27,9	640	981	0,018
AC4-10E	8,05	2,71	14100	5820	230	29,6	8610	1060	39,7	890	878	0,022
AC4-8E	8,02	2,37	14900	5050	207	29,5	8630	1090	35,4	1000	865	0,027
AC4-4E	7,97	1,51	16000	4250	116	29,3	8740	1000	29,6	1190	893	0,064
AC4-1E	8,19	2,44	9630	11000	129	30,4	8970	1170	21,0	562	647	0,070
<u>AC4-6.EQ</u>	8,08	6,15	31800	10700	468	23,3	19300	2370	79,2	950	2010	
AC4-10E	8,01	6,07	31600	10600	514	25,4	19300	2360	88,7	967	1960	0,003
AC4-8E	7,98	5,30	33500	8660	465	25,2	19400	2450	79,5	1140	1940	0,009
AC4-9E	8,15	5,86	24900	18400	365	26,4	18700	2480	61,6	667	2170	0,061
AC4-4E	7,94	3,16	36100	6650	262	24,8	19700	2270	66,9	1440	2020	0,076
AC4-1E	8,21	5,16	21100	22600	282	27,1	19700	2580	46,2	595	1420	0,155
<u>AC4-5.EQ</u>	8,01	1,13	9470	3420	71,1	27,0	5150	556	15,7	986	603	
AC4-4E	8,02	1,17	9880	2880	71,6	30,8	5400	621	18,3	841	552	0,012
AC4-8E	8,05	1,65	9160	3450	127	30,9	5290	669	21,7	769	530	0,055
AC4-10E	8,04	1,70	8460	4190	137	31,0	5150	633	23,7	828	525	0,071
AC4-9E	8,12	1,71	6820	6080	99,9	31,3	5130	678	16,9	624	593	0,080
AC4-1E	8,16	1,64	5850	7180	78,1	31,5	5450	713	12,8	551	393	0,136
<u>AC4-7.EQ</u>	5,91	7,51	181000	23000	2700	4,91	93600	16300	525	321	12100	
AC4-10E	6,35	4,18	176000	29800	2290	5,56	98200	13100	493	311	10900	0,018
AC4-8E	6,46	4,19	177000	29100	2000	5,54	99999	12900	420	316	10300	0,030
AC4-9E	6,58	5,51	172000	34800	1850	5,60	89300	17100	424	293	14900	0,044
AC4-1E	6,68	4,97	173000	32900	1670	5,91	92400	21100	377	321	11600	0,058
AC4-4E	6,91	5,70	190000	18100	1170	4,99	103000	11900	351	422	10600	0,107

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las lagunas del salar de Aguas Calientes 4. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Calidad de aguas

Ningún agua de aporte cumple con las normas chilenas de potabilidad o de riego. La menos mala es la vertiente fluyente (9) que contiene 4 veces más arsénico y 3 veces más boro que los máximos permitidos en las normas respectivas. Podría consumirse esta agua en caso de necesidad absoluta, pero no el agua de la principal vertiente (10) que contiene 10 veces más arsénico que la norma potable y una salinidad casi doble (1,6 g/l) que la vertiente (9): (0,85 g/l).

Balance hídrico

Podemos establecer un orden de magnitud del balance hídrico de la laguna principal del salar asumiendo que su alimentación proviene de la vertiente fluyente 10 y que su superficie promedio es de 2 km². Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 1,63$ m/año
- $H_p = 0,18$ m/año
- $S = 2$ km²
- $C_{ap} = 0,6$ g/l
- $C_L = 31,7$ g/l

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 2\,960\,000$ m³/año = 94 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 56\,000$ m³/año ~ 2 l/s

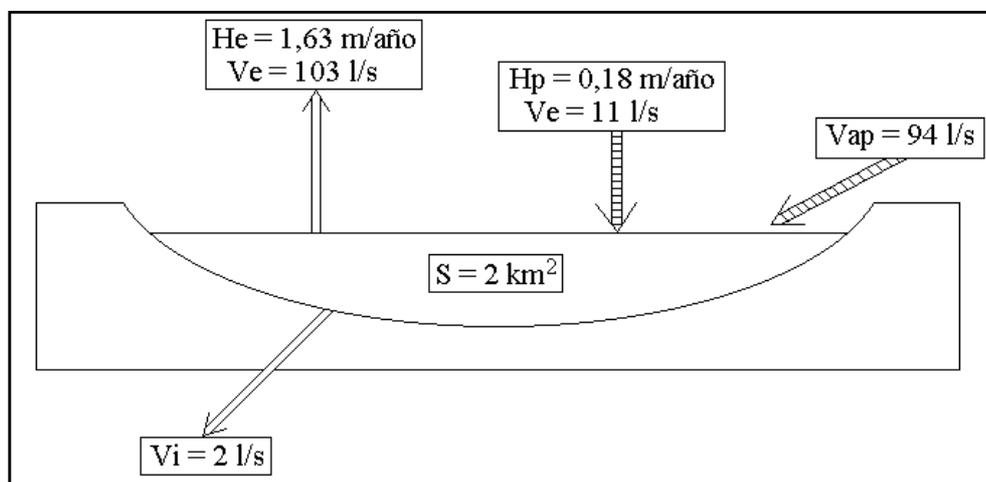
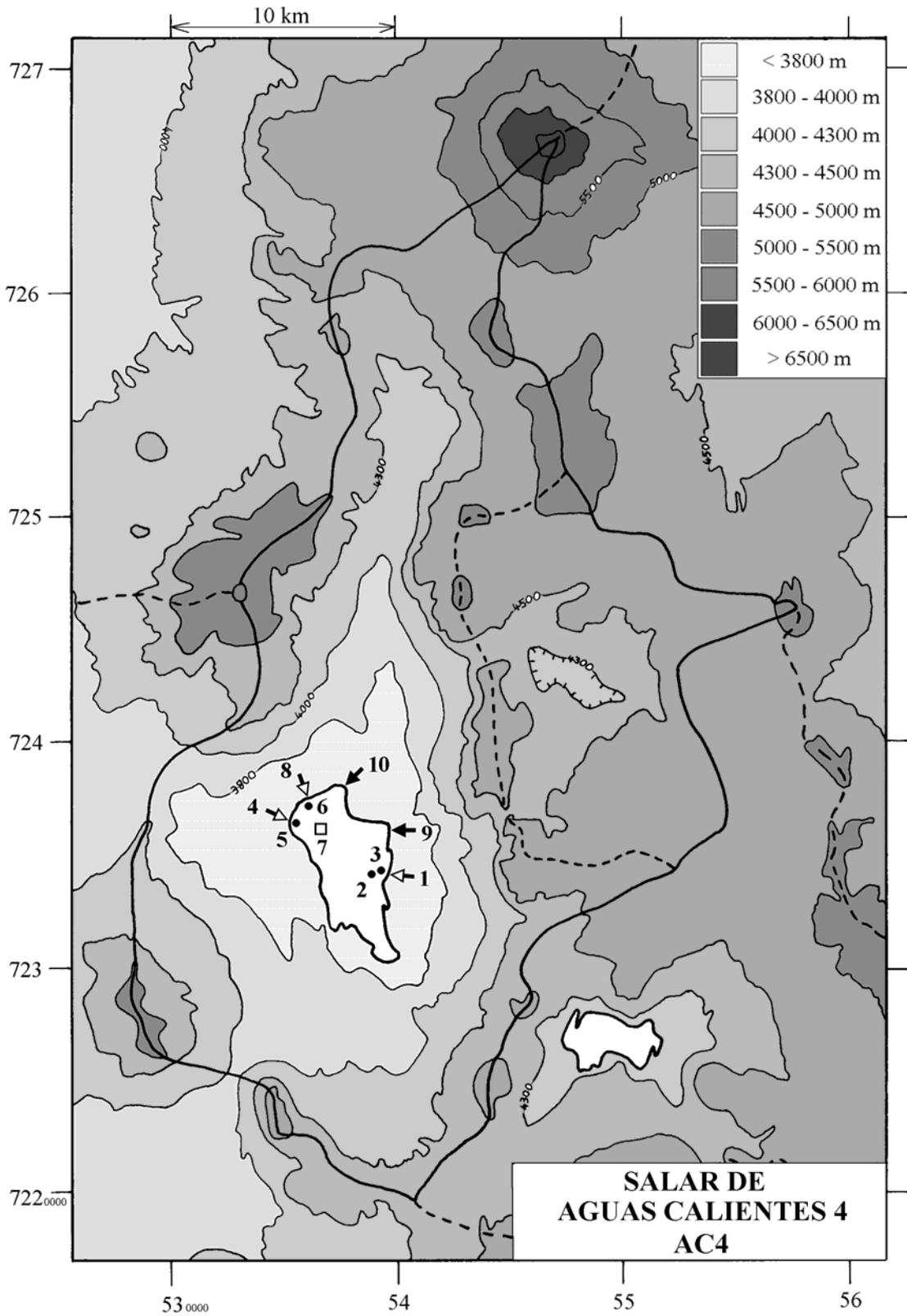


Fig.1 : Balance hídrico de la principal laguna del salar de Aguas Calientes 4.

El orden de magnitud de los aportes superficiales al salar es entonces de unos 90 - 100 l/s.

Conclusiones

El salar de Aguas Calientes 4 recibe dos tipos de aguas de aporte representado cada uno por una vertiente termal fluyente. Por el norte entran aguas salobres que han redissuelto antiguas evaporitas o salmueras de tipo Na-Mg / Cl. Las aguas de aporte del este de la cuenca, también salobres, podrían provenir de la lixiviación de rocas volcánicas por aguas ácidas, neutralizadas por la alteración de silicatos. Ningún agua cumple con las normas chilenas de potabilidad o de riego, aunque los aportes orientales no sobrepasan en mucho los límites permitidos. El caudal superficial entrante, relativamente elevado, de unos 90 - 100 l/s, sugiere la existencia de napas explotables al norte y al este de la cuenca. Sin embargo, es posible que estén también contaminadas por antiguas evaporitas.



**SALAR DE AGUAS CALIENTES 4
AC4**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
AC4-1	26/03/96	16 ^H 00	539616	7234884	3666	Manantial difuso
AC4-2	26/03/96	15 ^H 35	539429	7234865	3665	Poza de preconcentración
AC4-3	26/03/96	15 ^H 45	539566	7234884	3665	Poza de preconcentración
AC4-4	27/03/96	10 ^H 30	535398	7236784	3666	Manantial difuso
AC4-5	27/03/96	10 ^H 37	535419	7236763	3665	Laguna
AC4-6	27/03/96	11 ^H 00	536159	7237020	3665	Laguna
AC4-7	27/03/96	11 ^H 15	536212	7236611	3665	Napa del salar (calicata)
AC4-8	27/03/96	11 ^H 45	536305	7237498	3666	Manantial difuso (bofedal)
AC4-9	27/03/96	12 ^H 15	539761	7236148	3670	Manantial corriente
AC4-10	27/03/96	12 ^H 40	537930	7237990	3668	Manantial corriente termal

**SALAR DE AGUAS CALIENTES 4
AC4**

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
AC4-1	2490	9,8	5,6	1,002	8,38	0,655	333	0,403	0,083	812	3,19	4,45	32,5	0,340	306	40,7	0,729	207	22,4
AC4-2	40800	11,4	5,0	1,026	8,31	5,07	13500	15,4	0,558	7250	0,533	166	33,9	9,29	8630	1140	32,5	898	836
AC4-3	12760	11,1	na	1,008	8,85	2,06	3130	3,44	0,310	2800	0,099	36,6	33,3	2,25	2190	264	7,56	561	194
AC4-4	3370	3,9	4,0	1,002	7,63	1,14	962	0,967	0,140	274	5,88	6,81	33,0	0,095	499	59,0	1,74	101	52,5
AC4-5	28500	3,7	4,5	1,017	8,57	3,19	9620	10,3	0,579	3840	1,38	71,0	27,0	1,00	5040	555	15,7	1200	603
AC4-6	80200	5,4	4,0	1,050	8,16	15,7	31700	36,6	1,01	10800	0,415	468	55,2	14,5	19400	2370	79,1	1160	2010
AC4-7	199100	11,5	0,2	1,235	6,82	62,8	175000	192	4,19	36000	1,04	2590	23,9	54,5	95500	15700	504	308	12300
AC4-8	3290	9,5	4,2	1,002	7,34	1,36	895	1,25	0,203	329	3,48	12,1	44,0	0,230	490	63,7	2,07	97,4	50,5
AC4-9	1212	20,9	4,5	1,001	7,75	0,708	185	0,221	0,026	312	3,61	2,71	31,6	0,200	141	18,4	0,458	92,6	16,1
AC4-10	2460	24,3	4,7	1,001	6,83	1,53	600	0,815	0,157	328	3,41	9,60	42,6	0,459	354	44,2	1,66	101	36,7

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

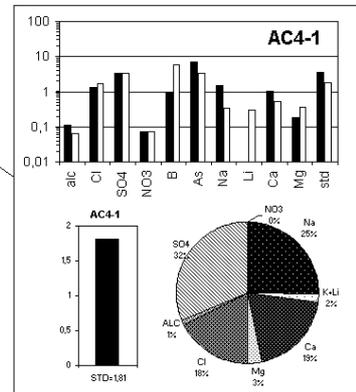
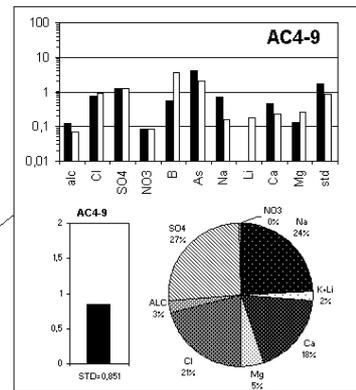
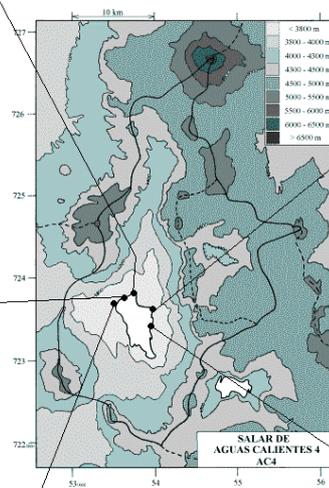
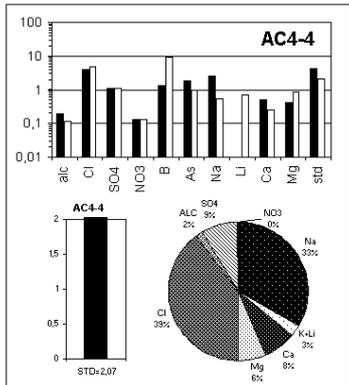
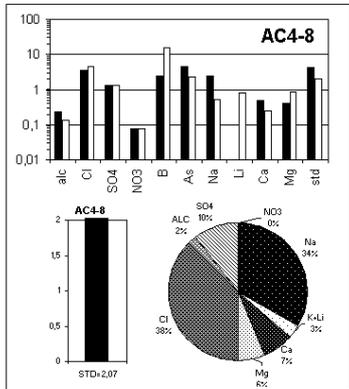
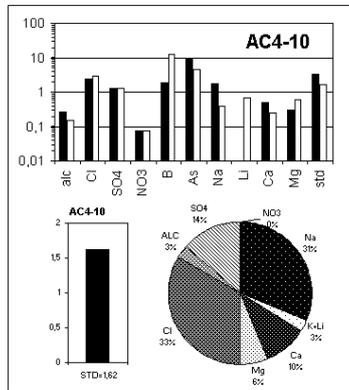
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%	NUMERO	$\delta^{18}O$	δ^2H
AC4-1	1808	33,4	1,02	0,24	26,61	27,02	1,5	AC4-9	-6,49	-59
AC4-2	32790	119	9,00	0,70	522,4	536,1	2,6	Análisis de oxígeno-18 y deuterio		
AC4-3	9350	35,9	5,76	0,08	147,1	148,8	1,1			
AC4-4	2068	68,3	0,24	3,1	32,80	34,04	3,7			
AC4-5	21171	77,5	9,18	0,34	345,1	354,2	2,6			
AC4-6	68899	457	34,7	4,2	1137	1132	0,5			
AC4-7	341759	-	-	-	5651	5743	1,6			
AC4-8	2074	81,7	0,18	6,2	32,25	33,48	3,7			
AC4-9	851,2	41,4	0,30	1,1	12,59	12,49	0,9			
AC4-10	1620	92,7	0,12	18	24,83	25,33	2,0			

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)

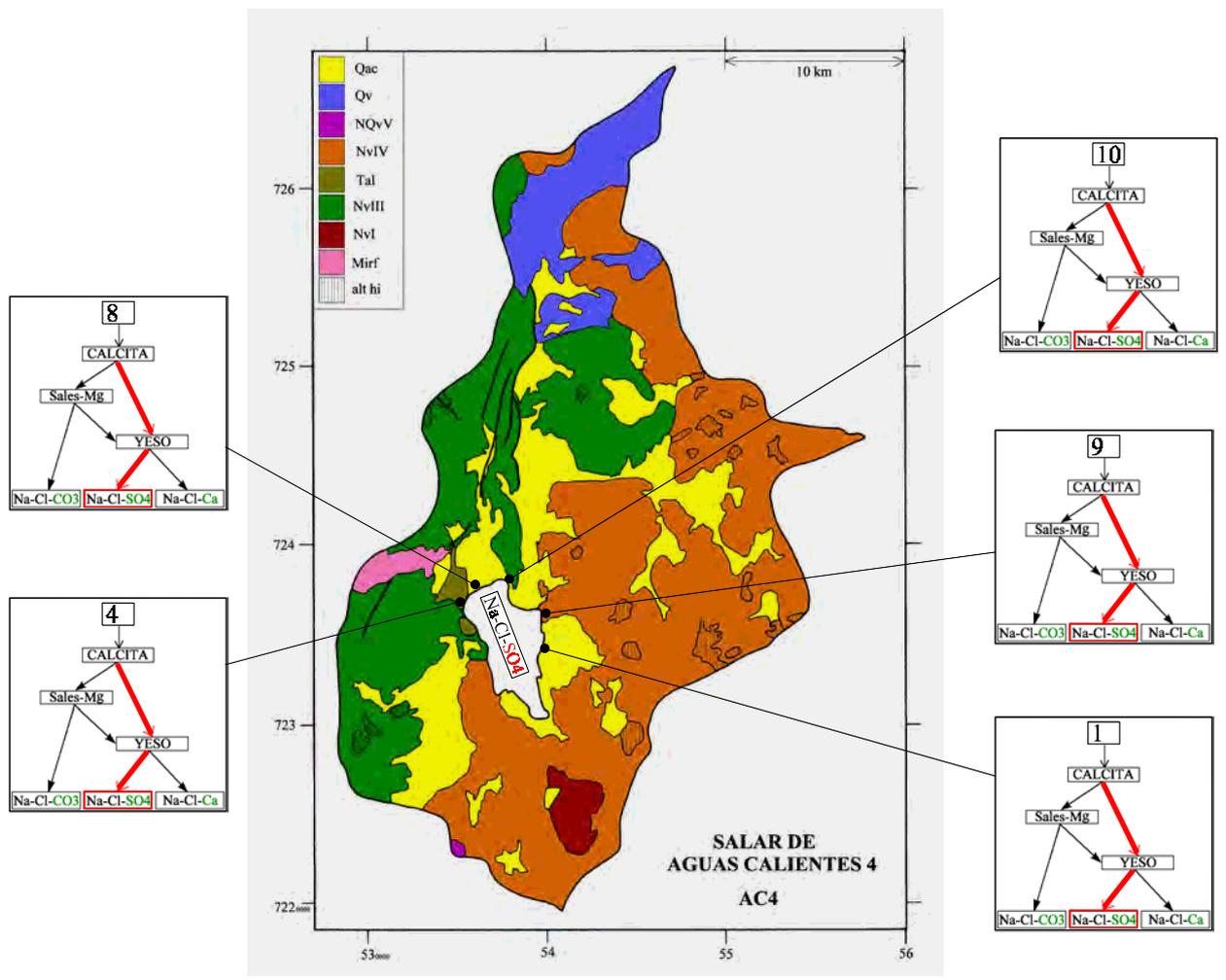
DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

AC4

- Qac** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales: bloques, gravas y arenas con cenizas, arcillas y sales.
- Qv** : *Cuaternario*. Estrato-volcán Llullaillaco. Dacitas de hornblenda (plg, hb, bi, opx, qz; SiO₂ = 63,4-66,8 %).
- NQvV** : *Plioceno sup. - Pleistoceno inf.* Conjunto volcánico V: Lavas bien preservadas de andesitas y dacitas de piroxeno y biotita, ocasionalmente hornblenda.
- NvIV** : *Mioceno sup. - Plioceno inf.* Conjunto volcánico IV: estrato-volcanes y conos de escoria debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos y dacitas de piroxeno y biotita. Ocasionalmente andesitas basálticas de olivino y piroxeno.
- Tal** : *Mioceno sup. - Plioceno*. Depósitos aluviales y coluviales antiguos. Gravas con lentes de arena y limo e intercalaciones de ceniza volcánica. En zona de fallas, localmente las gravas ocurren cementadas por carbonatos y con niveles de travertino.
- NvIII** : *Mioceno medio - Mioceno sup.* Conjunto volcánico III: estrato-volcanes mediana a debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos, andesitas basálticas de olivino y piroxeno. Escasas dacitas de hornblenda y biotita.
- NvI** : *Oligoceno - Mioceno inf.* Conjunto volcánico I: estrato-volcanes rofundamente erosionados. Andesitas de ortopiroxeno y clinopiroxeno con daciandesitas de hornblenda y/o biotita y piroxeno. Ocasionalmente andesitas basálticas de ortopiroxeno y olivino.
- Mirf** : *Mioceno inf.* Ignimbrita Río Frío. Tobas dacíticas ricas en cristales (plg, anf, px, bi).
- alt hi** : alteración hidrotermal.



LAGUNA DE LA AZUFRERA

Introducción

La laguna de la Azufrera (que no hay que confundir con *el salar* de la Azufrera en la Tercera Región) se encuentra en el sur de la Cordillera de los Andes en la Segunda Región, pegada a la frontera con Argentina donde se desarrolla una pequeña parte de su cuenca. Al oeste, es un salar de tipo "playa" con sedimentos salinos recubiertos por la laguna de poca profundidad en este sector. Al este, la laguna es más profunda: es casi un lago. El nombre de la laguna se debe a un importante yacimiento de azufre en el volcán Azufre o Lastarria al sur de la laguna, del cual emanan constantes fumarolas. Las principales características morfométricas y climatológicas de la laguna son:

- altura:	4250 m
- superficie de la cuenca:	393 km ²
- superficie de la playa y laguna:	7,7 km ²
- superficie de la laguna:	3 - 4 km ²
- precipitaciones:	180 mm/año
- evaporación potencial:	1630 mm/año
- temperatura media:	1°C

Hemos muestreado dos aportes, una vertiente fluyente, al sur-este, que entra directamente en la gran laguna y una difusa, al oeste, que alimenta un riachuelo en el sector playa. Hemos podido observar un gran bofedal a la orilla oriental de la laguna, indicando la existencia de una vertiente difusa, pero no hemos podido llegar allí por problemas en el camino.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas de la laguna de la Azufrera están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Los dos aportes son salobres (~ 4 g/l) y de composición muy distinta. El punto representativo de la vertiente difusa (4) se encuentra casi al centro del triángulo de cationes, siendo el magnesio el componente mayor. Es una de las aguas con mayor proporción de Mg de todos los salares chilenos que hemos estudiado. Su principal anión es el sulfato.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
LAZ-4	3965	Mg-Na-Ca	/ SO ₄ -Cl	SO ₄ (N)
LAZ-1	4257	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-SO ₄	SO ₄ (N)
<u>SALMUERAS</u>				
LAZ-3	16579	Mg-Na-(Ca)	/ Cl-SO ₄	SO ₄
LAZ-2	158853	Na-(Mg)	/ Cl-SO ₄	SO ₄

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas de la laguna de la Azufrera. SO₄ (N) = vía neutra sulfatada.

constituyen el 51% de la salinidad total (en mg/l). La alcalinidad, sin embargo, sigue baja (0,7 meq/l). Es posible que actúen dos procesos: la alteración de rocas volcánicas por soluciones sulfúricas y la redisolución de antigua halita (NaCl). Faltan más muestras de aguas de aporte para concluir.

Vías evolutivas y relación con la geología

Las dos aguas de aporte siguen la vía evolutiva neutra sulfatada, lo que refleja perfectamente la litología de la cuenca constituida de rocas volcánicas con abundante azufre. Sin embargo, no se detectan variaciones en la geología que puedan explicar la diferencia de composición de los dos aportes. Lo más probable es que, efectivamente, la vertiente fluyente (1) ha redissuelto cloruro de sodio de antiguas evaporitas recubiertas por formaciones volcánicas más recientes.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de las dos aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las diversas salmueras. Los valores de la columna "desviación" son los coeficientes del chi-cuadrado adaptado que miden el grado de semejanza entre las soluciones de aporte evaporadas (LAZ-xE) y las salmueras (LAZ-x.EQ). Todas las composiciones de las salmueras fueron ajustadas al equilibrio con los minerales que las sobresaturan.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>LAZ-2.EQ</u>	7,29	5,24	58500	27300	655	17,3	32100	5760	28,5	582	7840	
LAZ-1E	7,95	10,2	51000	34400	686	20,1	34200	5410	33,7	627	6090	0,021
LAZ-4E	7,79	7,56	49700	42100	479	18,7	20800	5200	33,0	539	14800	0,091
<u>LAZ-3.EQ</u>	8,13	1,42	5890	5300	57,3	28,0	2140	469	3,05	659	1690	
LAZ-4E	8,13	1,36	5340	5880	51,6	31,5	2240	559	3,54	628	1590	0,011
LAZ-1E	8,10	1,40	5500	5050	73,9	31,7	3690	582	3,63	633	658	0,122

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con aguas de la laguna de la Azufrera. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Se observa una excelente correlación entre las salmueras reales y la composición evaporada del aporte que las alimentan: la laguna (2) proviene de la evaporación de la vertiente fluyente (1) y el riachuelo, de la evaporación de la vertiente difusa (4).

Calidad de aguas

Ningún agua de aporte cumple con las normas chilenas de potabilidad o de riego. La vertiente difusa (LAZ-4) contiene 10 veces más boro y la vertiente fluyente (LAZ-1) 20 veces más arsénico que los máximos permitidos. Además, sus salinidades están 10 veces por encima de la norma de potabilidad.

Balance hídrico

Podemos establecer un orden de magnitud del balance hídrico de la laguna de la Azufrera asumiendo que su alimentación proviene de la vertiente 1. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. La evaporación de la laguna esta reducida en 15% en relación a la evaporación potencial para tomar en cuenta su salinidad elevada (159 g/l). Los parámetros considerados son :

- $H_e = (1,63 - 0,25) = 1,38$ m/año
- $H_p = 0,18$ m/año
- $S = 3,5$ km²
- $C_{ap} = 1330$ mg/l
- $C_L = 56100$ mg/l

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 4\,300\,000$ m³/año = 136 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 100\,000$ m³/año ~ 3 l/s

El caudal entrante en la laguna es del orden de 130 - 140 l/s

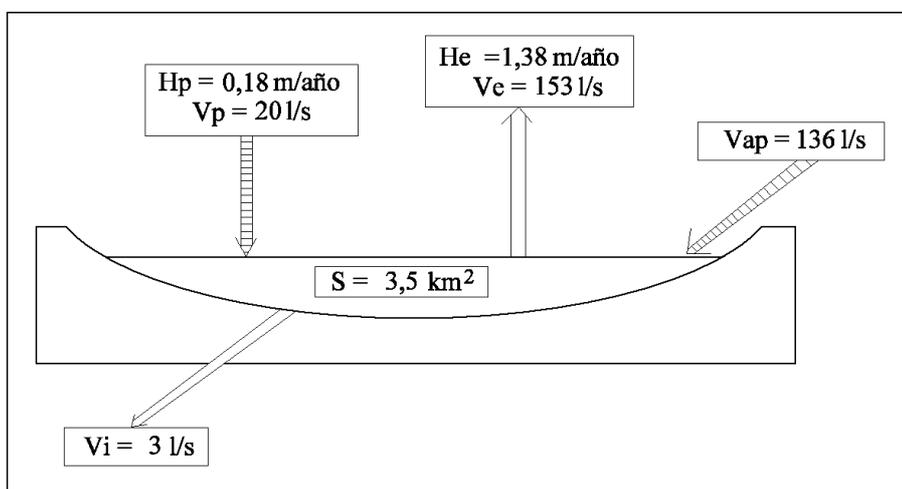
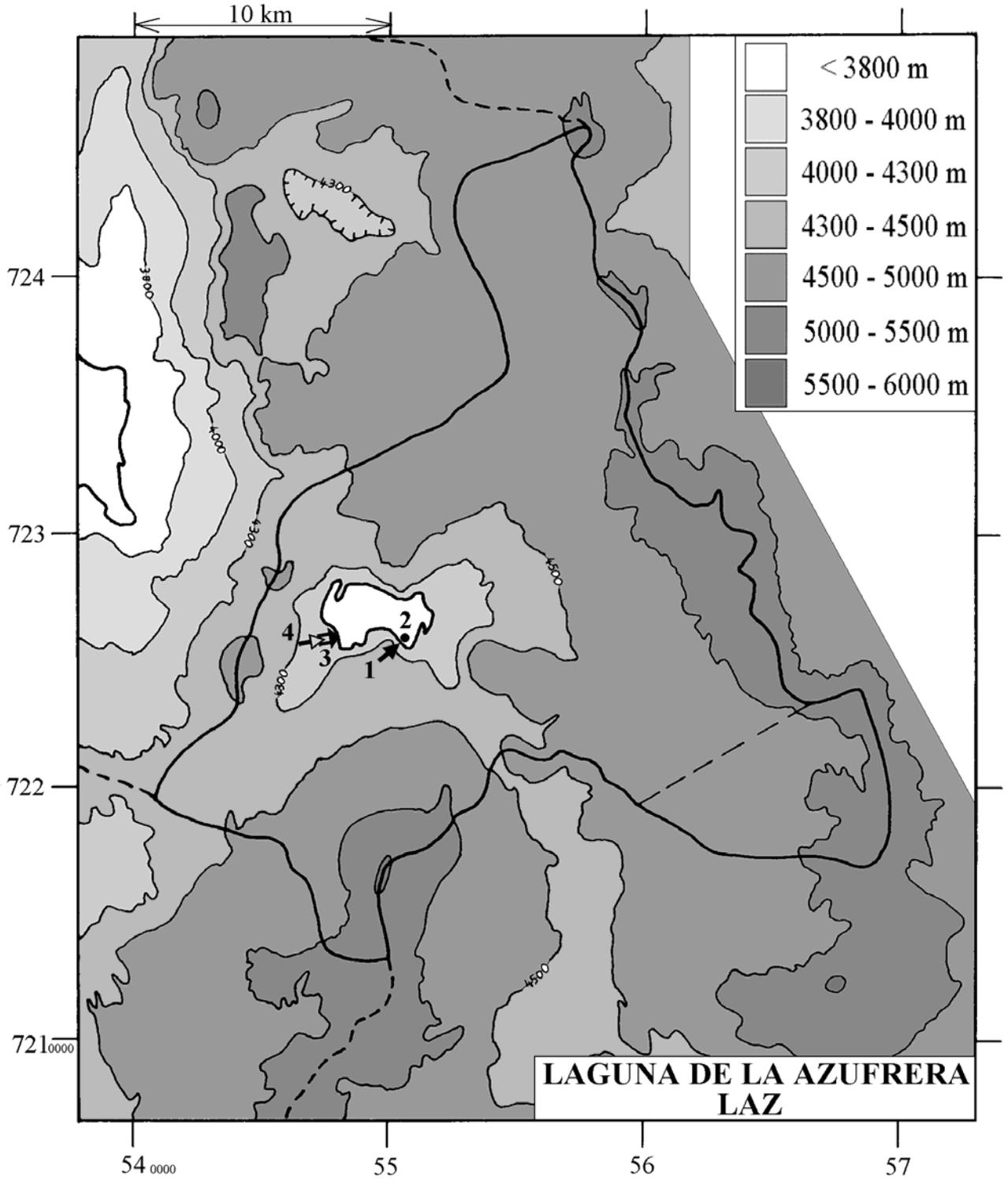


Fig.2 : Balance hídrico de la laguna de la Azufrera.

Conclusiones

La laguna de la Azufrera recibe aguas salobres muy sulfatadas cuya composición proviene de la alteración de rocas volcánicas por soluciones ácidas. Estas soluciones resultan de la formación de ácido sulfúrico a partir de la oxidación del azufre de un importante yacimiento al sur de la laguna. Existe también un indicio de redisolución de antiguas evaporitas para explicar el origen de una parte del cloruro de sodio. Hay una perfecta coherencia entre la litología volcánica con azufre de la cuenca de drenaje, la vía evolutiva neutra sulfatada que siguen los aportes al evaporarse y la composición de la salmuera de la laguna que pertenece al mega-grupo sulfatado: Na /Cl-SO₄. A pesar de un caudal entrante en la laguna relativamente elevado de 130-140 l/s, hay pocas posibilidades de encontrar napas diluidas, por lo menos en el sur de la cuenca. Deben estar salinizadas por aguas de alteración y antiguas sales. Quedaría por explorar el este y el norte de la cuenca.



**LAGUNA DE LA AZUFRERA
LAZ**

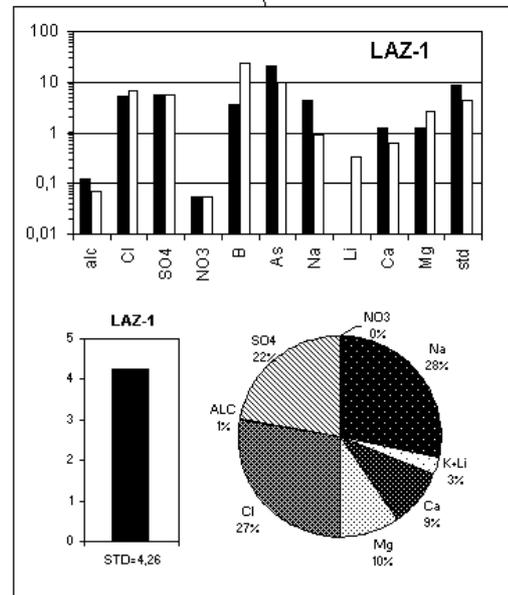
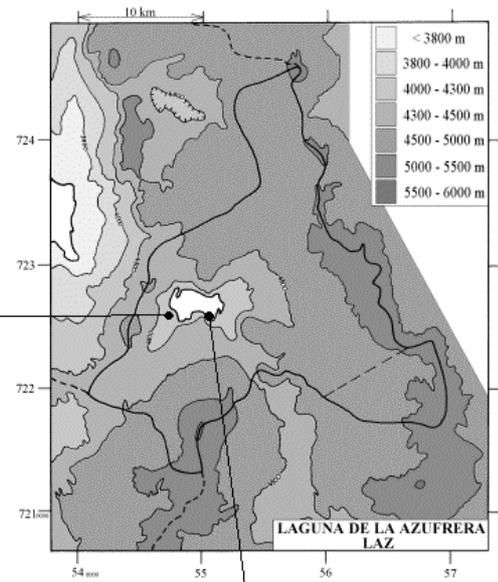
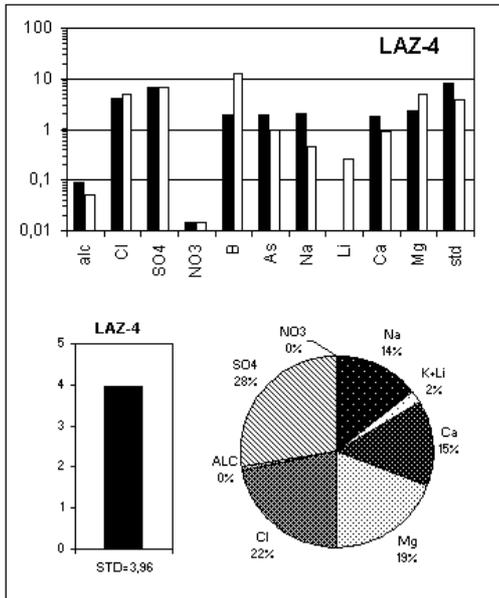
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE	METROS	
LAZ-1	26/03/96	12 ^H 53	550311	7225728	4251	Manantial corriente
LAZ-2	26/03/96	13 ^H 05	550309	7225730	4250	Laguna
LAZ-3	26/03/96	14 ^H 10	547240	7226031	4250	Riachuelo dentro del salar
LAZ-4	26/03/96	15 ^H 50	547006	7226032	4255	Manantial difuso

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
LAZ-1	6030	18,3	3,5	1,004	7,78	0,701	1330	2,21	0,105	1420	2,37	17,5	35,8	1,02	856	138	0,861	251	156
LAZ-2	130000	11,2	1,4	1,121	7,58	10,3	56100	79,5	0,505	48400	0,899	610	47,3	15,0	39800	5360	26,5	541	7360
LAZ-3	20400	11,2	5,5	1,014	8,36	2,11	5890	9,03	0,527	5430	0,060	57,3	29,1	0,148	2140	469	3,05	730	1690
LAZ-4	5060	12,6	7,0	1,004	8,65	0,520	994	1,21	0,129	1710	0,632	9,59	29,7	0,095	416	104	0,659	371	292

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
 CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%	NUMERO	δ ¹⁸ O	δ ² H
LAZ-1	4257	36,7	0,48	0,84	66,21	67,84	2,4	LAZ-1	-6,46	-64
LAZ-2	158853	-	-	-	2504	2598	3,7			
LAZ-3	16579	49,8	5,76	0,30	280,9	281,3	0,1			
LAZ-4	3965	12,2	1,38	0,04	63,38	64,13	1,2			
LGN-5	-5,26	-53								

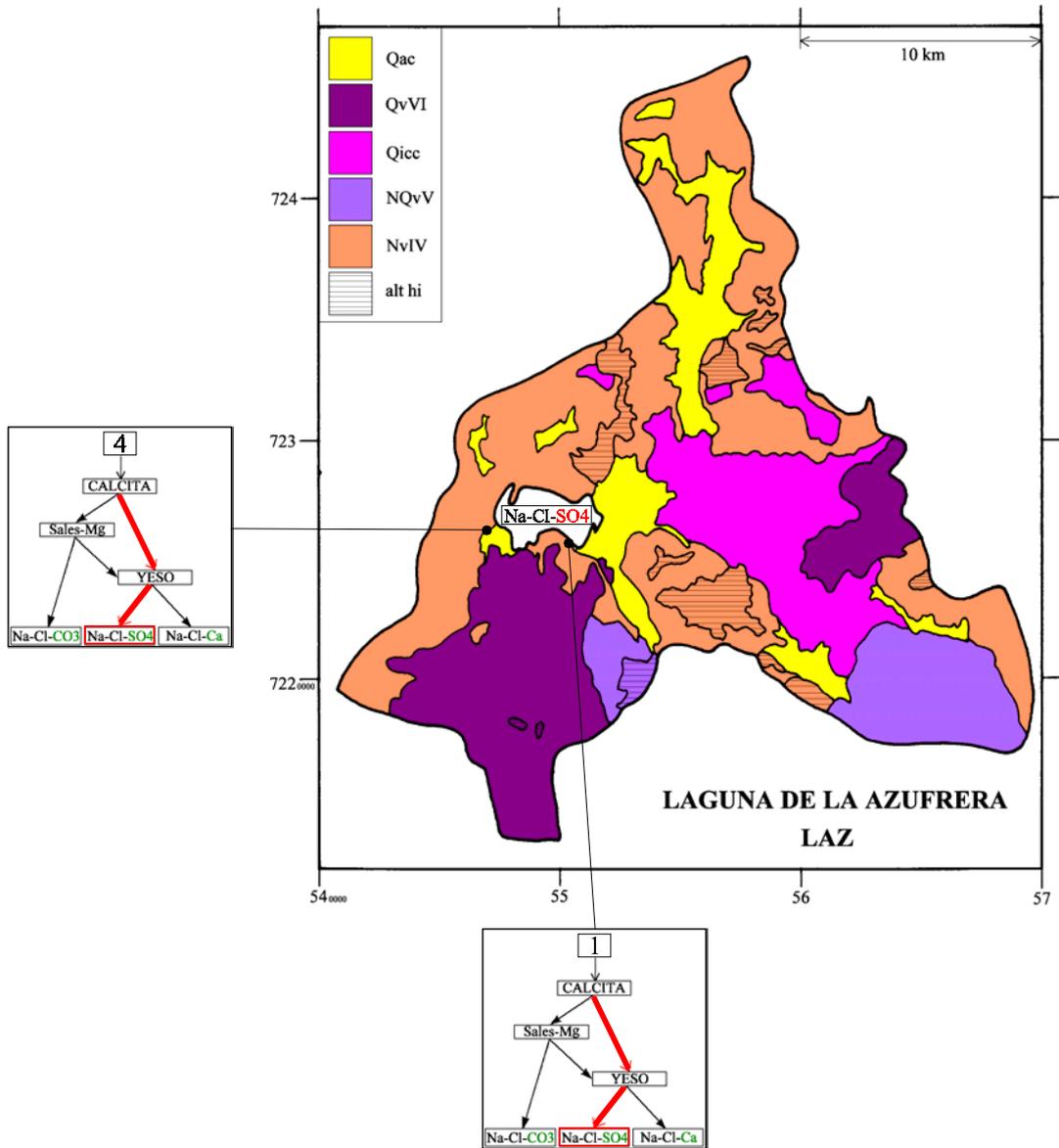
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
 S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
 DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

LAZ

- Qac** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales: bloques, gravas y arenas con cenizas, arcillas y sales.
- QvVI** : *Cuaternario*. Conjunto volcánico VI: estrato-volcanes no erosionados. Andesitas y dacitas de piroxeno y biotita; dacitas de hornblenda y biotita.
- Qicc** : *Pleistoceno inf.* Ignimbrita Caletones. Toba de cristales (plg, px, bi) y ceniza.
T : Terciario. Coladas, brechas y tobas andesíticas a riolíticas.
- NQvV** : *Plioceno sup.* - *Pleistoceno inf.* Conjunto volcánico V: Lavas bien preservadas de andesitas y dacitas de piroxeno y biotita, ocasionalmente hornblenda.
- NvIV** : *Mioceno sup.* - *Plioceno inf.* Conjunto volcánico IV: estrato-volcanes y conos de escoria debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos y dacitas de piroxeno y biotita. Ocasionalmente andesitas basálticas de olivino y piroxeno.
- alt hi** : alteración hidrotermal.



SALAR DE PAJONALES

Introducción

El salar de Pajonales se encuentra al sur de la II Región, siendo el más extenso en ella después de los salares de Atacama y Punta Negra. Tiene dos tipos de lagunas:

- en las orillas, los aportes forman lagunas someras.
- en su parte central, es una costra salina (NaCl) con numerosos “ojos” donde aparece la napa de salmuera del salar.

Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 3537 m
- superficie de la cuenca: 1984 km²
- superficie del salar: 104 km²
- superficie de las lagunas: 1,4 km²
- precipitaciones: 80 - 150 mm/año
- evaporación potencial: 1350 mm/año
- temperatura media: 5°C

No se encontró ningún agua de aporte en sectores altos de la cuenca de drenaje. Todos estaban ubicados en la orilla y en la mitad occidental del salar. Tampoco se encontró vertientes al este del salar, a pesar que la precipitaciones son dos veces más altas al este de la cuenca que al oeste.

Composición de las aguas y salmueras

La composición de las aguas de Pajonales están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
PAJ-8	11728	Na - (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
PAJ-1	15376	Na - (Mg) - (Ca)	/ Cl - (SO ₄)	Ca
PAJ-7	21777	Na - (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
PAJ-3	22395	Na - (Mg) - (Ca)	/ Cl	Ca
LAGUNAS				
PAJ-4	43510	Na - (Mg) - (Ca)	/ Cl	Ca
PAJ-2	56885	Na - (Mg) - (Ca)	/ Cl - (SO ₄)	Ca
PAJ-9	115273	Na - (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
PAJ-11	142631	Na - (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
PAJ-6	161466	Na - (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
PAJ-10	215247	Na - (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
paJ-5	246673	Na - (Mg)	/ Cl	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de las aguas del salar de Pajonales
Ca = vía cálcica.

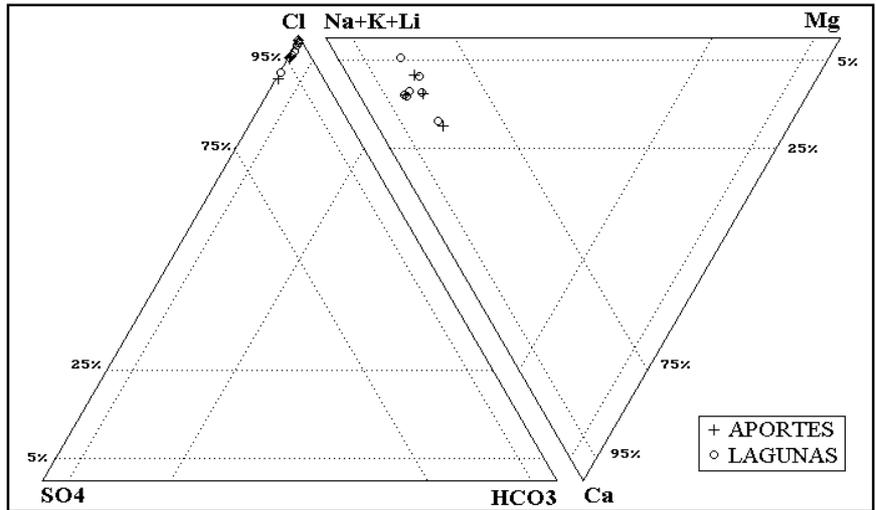


Fig.1: Composición de las aguas y salmueras del salar de Pajonales

Todas las aguas que hemos encontrado en Pajonales son saladas. El agua de aporte menos concentrada tiene una salinidad elevada de 11,7 g/l. La composición química de todas las aguas, aportes y lagunas, es homogénea: Na-(Ca)-(Mg) / Cl, con leves variaciones en las proporciones relativas de Ca y Mg. Aportes y lagunas tienen concentraciones porcentuales similares. Pajonales es un salar de tipo cálcico, es decir que sus salmueras contienen más calcio que sulfato.

Origen de los componentes disueltos

La única relación de equimolaridad entre componentes mayores que se ha encontrado es entre Na+Ca+Mg y Cl (Fig.2), y se aplica para todas las aguas. No se observa diferencias entre las aguas de aporte y de lagunas, como ocurre casi siempre en los demás salares.

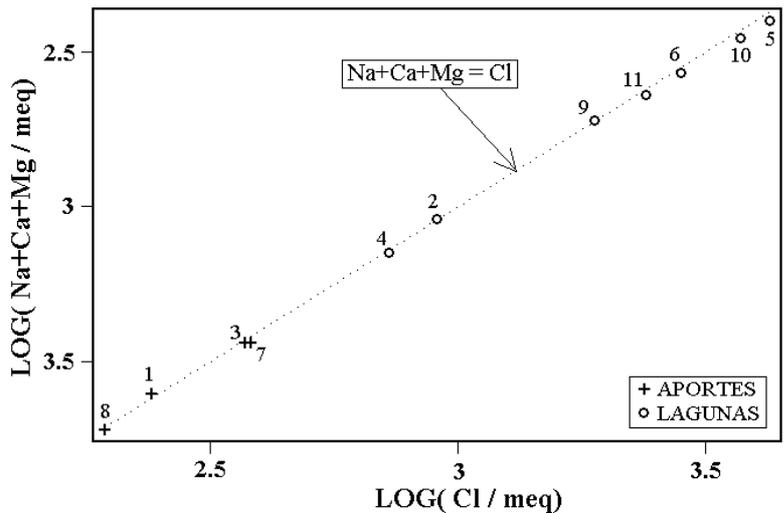


Fig. 2 : Relación entre Na+Ca+Mg y Cl en aguas del salar de Pajonales

La similitud de composición química entre aportes y lagunas, así que la alta salinidad de los aportes, hace pensar que las aguas que calificamos de aporte son en realidad cuñas salinas del propio salar. Sin embargo, hay dos vertientes fluyentes (PAJ-1 y 8), pero de bajo caudal. Esas vertientes podrían provenir de salmueras residuales de un antiguo salar recubierto por formaciones volcánicas de la cuenca de drenaje. Con los solos datos químicos, no se puede zanjar entre las dos hipótesis.

Vías evolutivas y relación con la geología

Todas las aguas pertenecen a la vía evolutiva cálcica. Esta vía se encuentra sobre todo en aguas asociadas a terrenos sedimentarios. Tales formaciones existen en la cuenca (Tal y Nga, ver mapa geológico), pero son de poca extensión, por lo menos superficialmente. La cuenca de drenaje del salar de Pajonales es principalmente volcánica. En cuencas de tal naturaleza, se debería encontrar salmueras y sales de tipo carbonatado o, más comúnmente en los Andes chilenos, de tipo sulfatado. El salar de Pajonales no es el producto del transporte y concentración de componentes que derivaron de la alteración de la actual cuenca de drenaje. Eso sugiere que Pajonales proviene de la remobilización de un antiguo salar que se originó en un ambiente geológico distinto, con formaciones sedimentarias dominantes.

Evolución cuantitativa de las aguas.

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad del agua de la laguna considerada. Los valores de la columna "desviación" son los coeficientes del chi-cuadrado adaptado que miden el grado de semejanza entre las soluciones de aporte evaporadas (PAJ-xE) y las aguas de laguna. Se nota que cada agua de laguna proviene de la evaporación de la vertiente o napa que la alimenta, con buena concordancia y sin anomalía. La salmuera central del salar (10) proviene sobre todo de la vertiente fluyente (8), es decir de aportes desde el sur de la cuenca de drenaje.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>PAJ-2</u>	8,05	3,67	32200	3560	136	47,3	15500	1330	21,2	2370	1440	
PAJ-1E	7,85	1,63	31300	3650	148	26,1	16000	1360	21,0	2170	1470	0,035
PAJ-3E	7,90	1,61	32900	1930	126	25,8	16700	1350	38,3	1600	1510	0,119
PAJ-8E	7,82	1,93	32600	1750	206	26,0	16500	1240	30,8	2400	1060	0,121
PAJ-7E	7,71	0,77	34900	249	64,7	25,8	14700	1120	18,3	3890	1530	0,418
<u>PAJ-5</u>	7,30	12,2	151000	2660	498	26,8	76100	5550	159	3830	6200	
PAJ-3E	7,36	5,13	148000	2510	551	8,92	75100	6060	172	4570	6780	0,107
PAJ-1E	7,25	4,65	147000	2770	647	8,93	75100	6400	99,1	4140	6900	0,132
PAJ-8E	6,93	3,42	147000	1470	842	9,28	74200	5610	139	8080	4770	0,213
PAJ-7E	7,16	2,78	152000	756	281	9,33	63900	4880	79,6	16700	6650	0,456
<u>PAJ-6</u>	7,44	4,76	100000	691	173	34,7	42300	3010	50,5	10500	4250	
PAJ-7E	7,42	1,82	99100	708	184	15,3	41700	3190	52,0	11000	4340	0,061
PAJ-8E	7,48	4,71	94900	2450	588	15,4	47800	3620	89,4	5870	3070	0,382
PAJ-1E	7,64	4,70	94500	3970	446	15,2	48100	4100	63,5	3590	4420	0,450
PAJ-3E	7,63	3,90	95100	3720	364	15,1	48200	3890	111	3820	4350	0,452

PAJ-9	7,58	8,73	67100	3340	458	42,0	34000	2450	64,5	5090	2120	
PAJ-8E	7,65	3,74	66800	2820	421	19,7	33700	2550	63,0	4590	2160	0,057
PAJ-3E	7,73	2,74	66800	3910	256	19,4	33900	2730	77,7	3230	3060	0,126
PAJ-1E	7,74	3,30	66300	4180	313	19,5	33800	2880	44,5	3100	3100	0,126
PAJ-7E	7,54	1,30	70800	505	131	19,5	29800	2280	37,1	7870	3100	0,458
PAJ-11	7,40	12,6	84800	3180	613	40,9	40500	3530	91,6	6340	2720	
PAJ-8E	7,58	4,65	83400	2630	525	17,1	42000	3180	78,6	5360	2700	0,080
PAJ-3E	7,68	3,42	83500	3870	320	16,8	42300	3410	97,1	3610	3820	0,155
PAJ-1E	7,68	4,12	82900	4110	391	16,8	42200	3600	55,7	3420	3880	0,168
PAJ-7E	7,47	1,60	87600	625	162	16,9	36900	2820	45,9	9740	3840	0,464
PAJ-10	6,88	11,4	132000	1390	718	35,6	62100	4730	113	8780	4590	
PAJ-8E	7,12	3,79	128000	1840	746	11,3	64500	4880	121	7270	4150	0,121
PAJ-3E	7,51	5,25	128000	3010	492	10,9	65100	5250	149	4320	5880	0,242
PAJ-1E	7,43	5,15	128000	3280	581	11,0	65100	5550	85,9	3970	5980	0,256
PAJ-7E	7,26	2,42	132000	944	245	11,3	55600	4250	69,3	14700	5790	0,275

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas (PAJ-xE) con las salmueras del salar de Pajonales. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Calidad de agua

Todas las aguas son de pésima calidad tanto para el consumo humano como para el riego. Además las posibilidades de encontrar grandes cantidades de agua de buena calidad en napas más arriba en la cuenca no son alentadoras. Si los aportes han sido salinizados por salmueras residuales, las napas cuenca arriba pueden haber sido también salinizadas.

Balance hídrico

Solamente podemos establecer el balance hídrico de lagunas superficiales y no de los ojos que son ventanas en la napa. Tenemos suficientes datos para estimar ordenes de magnitud del balance hídrico de las lagunas al norte del salar (PAJ-2 y 5). Hemos visto que estas lagunas están alimentadas por napas y vertientes en sus orillas. Se puede entonces aplicar las formulas del balance hídrico a esas lagunas.

	Laguna PAJ-2	Laguna PAJ-5
$H_e =$	1,28 m/año	1,22 m/año
$H_p =$	0,075 m/año	0,075 m/año
$S =$	0,45 km ²	0,25 km ²
$C_{ap} =$	8520 mg/l (PAJ-1)	13200 mg/l (PAJ-3)
$C_L =$	32200 mg/l (PAJ-2)	82100 mg/l (PAJ-4 + PAJ-5)/2

Se obtiene para la laguna PAJ-2 :

$$\text{Volumen de aporte : } V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 737\ 000\ \text{m}^3/\text{año} = 23\ \text{l/s}$$

$$\text{Volumen de infiltraciones : } V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 195\ 000\ \text{m}^3/\text{año} = 6\ \text{l/s}$$

Para la laguna PAJ-5 :

$$\text{Volumen de aporte : } V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 341\ 000\ \text{m}^3/\text{año} = 11\ \text{l/s}$$

$$\text{Volumen de infiltraciones : } V_i = S(H_e - H_p) / (1 - C_L / C_{ap}) = 55\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 1,7 \text{ l/s}$$

Los caudales de aporte son débiles : 23 l/s para la vertiente fluyente PAJ-1 y 11 l/s para la descarga de la napa PAJ-3. Queda pendiente la pregunta de si se trata de descargas de cuñas salinas o de aguas de aporte que han redissuelto antiguas evaporitas o salmueras. Las dimensiones (arbitrarias, como ejemplo) de un paralelepípedo de agua de aporte, con volumen anual igual al de la vertiente fluyente PAJ-1 es : 1000 m de ancho (paralelo a la orilla) por 100 m de profundidad (perpendicular a la orilla) y 15 m de espesor. Para determinar estas dimensiones, se consideró para el acuífero una porosidad elevada de 50% llena de agua. Así se percibe que el volumen de agua que se descarga cada año por la vertiente (1), aunque pequeño en valor absoluto, es demasiado importante para provenir de una antigua cuña salina. En pocos años esta se habría eliminado completamente.

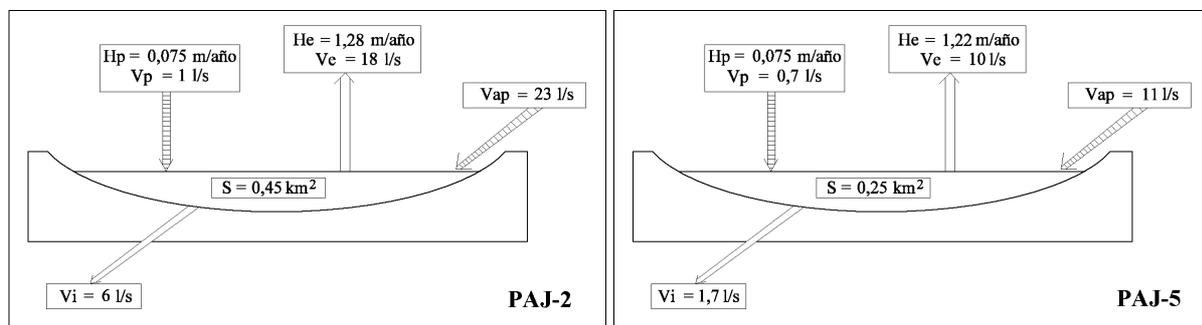
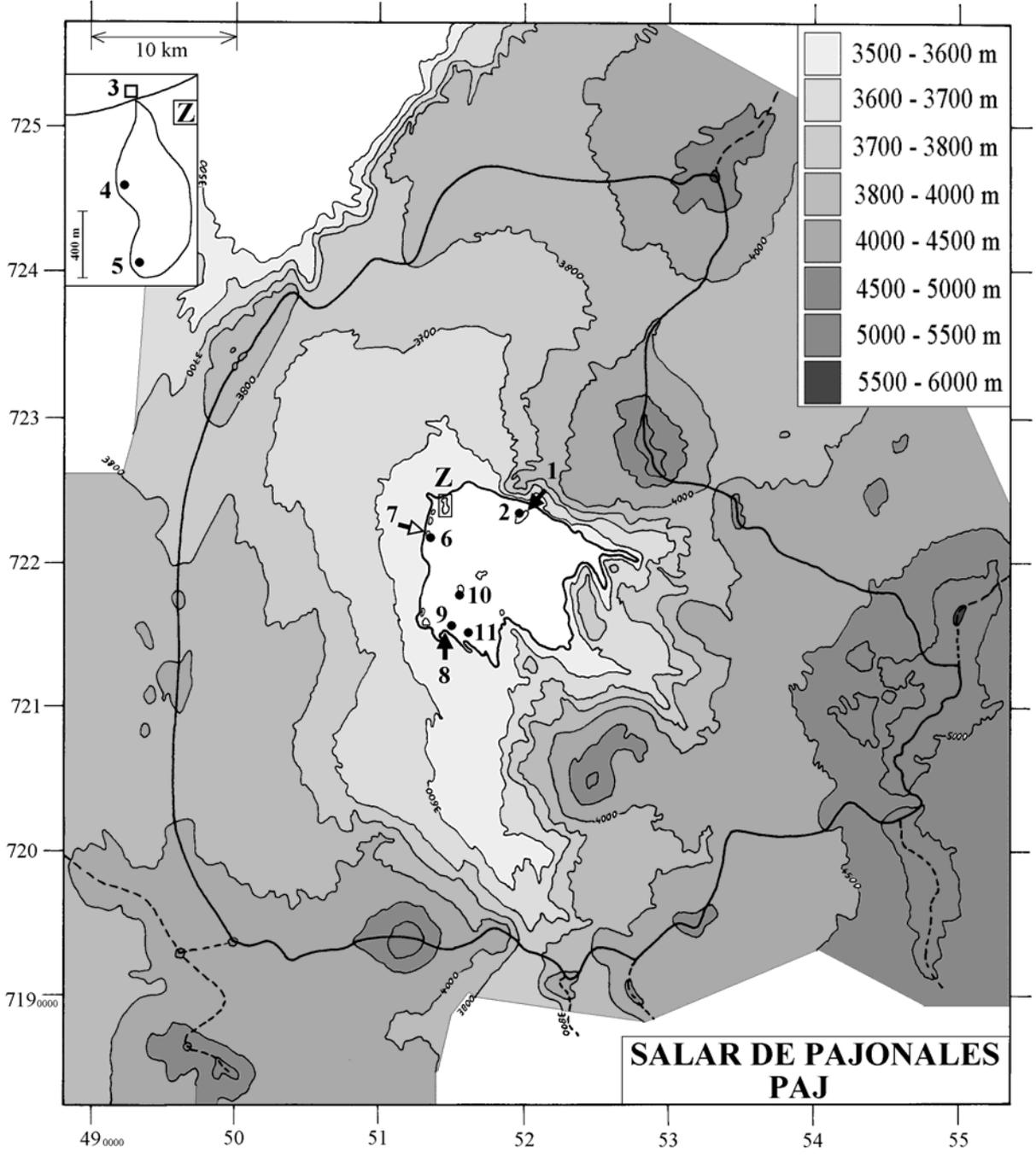
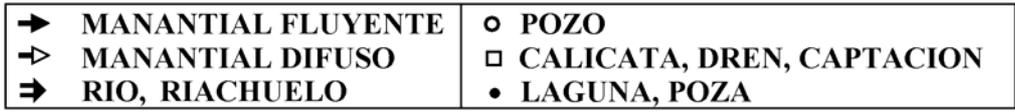


Fig.3 : Balance hídrico de dos lagunas del salar de Pajonales.

Es probable, entonces, que la alta salinidad de los aportes se deba a la contaminación de aguas diluidas por antiguas salmueras de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl. Es poco probable que se trate de sales redissueltas, puesto que las cloruros de calcio y de magnesio son extremadamente solubles.

Conclusiones

El salar de Pajonales no presenta mucho interés en cuanto a calidad de recursos de agua para usos potable y riego. Todos los aportes encontrados son salados y de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl. Esta alta salinidad proviene probablemente de la redissolución de salmueras residuales de un antiguo salar recubierto por formaciones volcánicas más recientes. La composición química y la vía evolutiva exclusivamente cálcica de los aportes y salmueras, no es consistente con la geología esencialmente volcánica de la actual cuenca. Se esperaría en tal ambiente soluciones carbonatadas o, sobre todo, sulfatadas sódicas. Todo eso sugiere que el salar de Pajonales proviene de la removilización de un antiguo salar que se formó en un ambiente geológico distinto, en un cuenca de drenaje en gran parte sedimentaria.



**SALAR DE PAJONALES
PAJ**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
PAJ-1	25/03/96	11 ^H 54	520224	7223622	3538	Manantial corriente
PAJ-2	25/03/96	12 ^H 15	519979	7223562	3537	Laguna
PAJ-3	25/03/96	14 ^H 30	514338	7224562	3537	Napa (calicata)
PAJ-4	25/03/96	14 ^H 40	514230	7224152	3537	Laguna
PAJ-5	25/03/96	14 ^H 54	514462	7223680	3537	Laguna
PAJ-6	25/03/96	15 ^H 20	513100	7221900	3537	Laguna
PAJ-7	25/03/96	15 ^H 40	513025	7222250	3537	Manantial difuso (muestra en calicata)
PAJ-8	25/03/96	17 ^H 02	514475	7215350	3539	Manantial corriente
PAJ-9	25/03/96	17 ^H 15	514490	7215350	3537	Laguna
PAJ-10	27/03/96	16 ^H 10	515535	7218266	3537	Napa salar (gran ojo formando laguna)
PAJ-11	27/03/96	17 ^H 00	515572	7214931	3537	Laguna

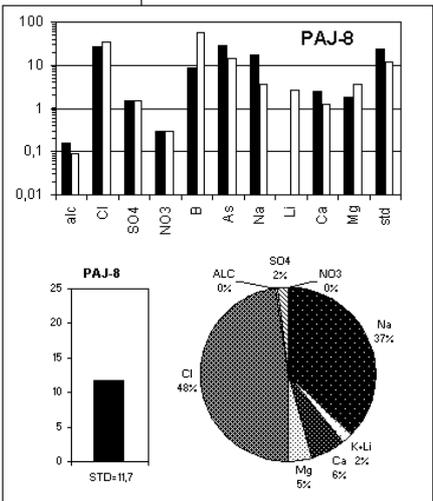
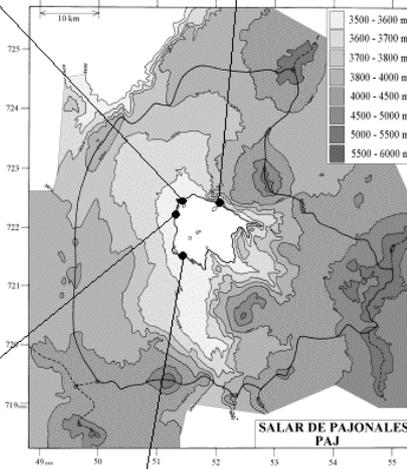
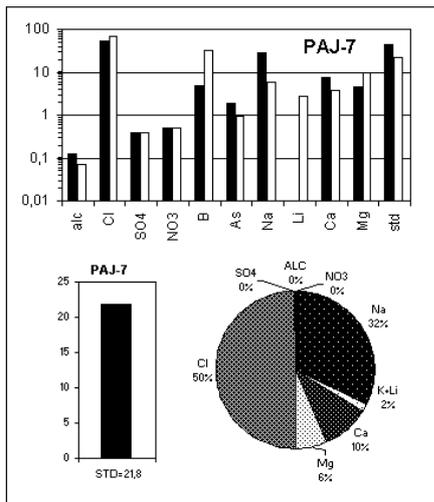
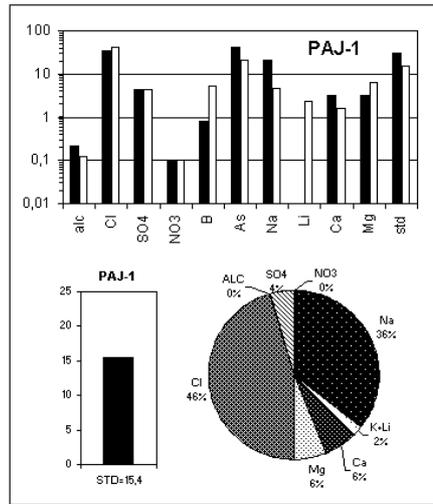
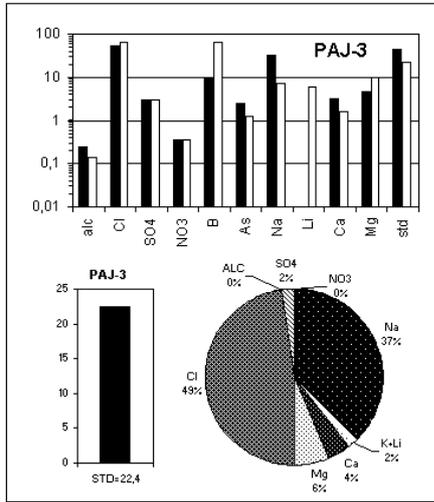
**SALAR DE PAJONALES
PAJ**

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
PAJ-1	23300	14	4,5	1,012	7,76	1,23	8520	3,02	0,660	1100	4,58	39,7	38,4	2,10	4210	365	5,65	650	394
PAJ-2	74200	13,8	4,0	1,042	8,05	3,67	32200	11,2	1,15	3560	1,04	136	47,3	7,00	15500	1330	21,2	2370	1440
PAJ-3	33500	10,5	5,0	1,016	7,97	1,37	13200	4,23	0,292	762	15,4	49,8	34,4	0,123	6490	532	15,1	646	595
PAJ-4	60800	16	4,5	1,031	8,14	2,66	25700	9,51	0,316	1490	3,24	93,4	27,9	0,204	12500	1040	28,9	1300	1240
PAJ-5	219000	17	1,0	1,166	7,30	12,2	151000	49,5	1,85	2660	2,80	498	26,8	0,876	76100	5550	159	3830	6200
PAJ-6	171400	15,1	2,0	1,114	7,44	4,76	100000	21,7	0,642	691	64,5	173	34,7	0,658	42300	3010	50,5	10500	4250
PAJ-7	33200	10	5,5	1,016	7,76	0,695	13500	2,76	0,141	95,4	21,7	24,8	23,4	0,097	5520	430	7,01	1500	586
PAJ-8	18590	7,8	6,5	1,009	7,90	0,884	6850	4,71	0,642	364	13,3	42,8	18,0	1,45	3380	259	6,40	509	220
PAJ-9	133100	8,6	2,5	1,081	7,58	8,73	67100	53,1	3,96	3340	13,4	458	42,0	16,6	34000	2450	64,5	5090	2120
PAJ-10	198300	11,7	1,4	1,147	6,88	11,4	132000	65,6	5,79	1390	1,90	718	35,6	18,5	62100	4730	113	8780	4590
PAJ-11	155300	10,8	2,0	1,100	7,40	12,6	84800	55,1	2,91	3180	1,77	613	40,9	20,0	40500	3530	91,6	6340	2720

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	$\delta^{18}O$	δ^2H
PAJ-1	15376	70,2	1,38	1,6	258,0	264,3	2,4	PAJ-1	-5,48	-56
PAJ-2	56885	79,3	7,44	0,88	949,8	984,9	3,6	Análisis de oxígeno-18 y deuterio		
PAJ-3	22395	55,8	1,80	0,79	379,0	388,5	2,5			
PAJ-4	43510	58,0	5,34	0,48	739,3	756,7	2,3			
PAJ-5	246673	-	-	-	4176	4318	3,3			
PAJ-6	161466	121	16,5	6,6	2796	2840	1,6			
PAJ-7	21777	31,7	0,90	0,79	374,8	384,0	2,4			
PAJ-8	11728	38,9	0,72	0,75	198,0	201,7	1,8			
PAJ-9	115273	262	15,1	9,7	1981	1969	0,6			
PAJ-10	215247	-	-	-	3653	3760	2,9			
PAJ-11	142631	431	24,4	24	2404	2469	2,7			

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

PAJ

- Q** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales: bloques, gravas y arenas con cenizas, arcillas y sales.
- QvVI** : *Cuaternario*. Conjunto volcánico VI: estrato-volcanes no erosionados. Andesitas y dacitas de piroxeno y biotita; dacitas de hornblenda y biotita.
- NQvV** : *Plioceno sup. - Pleistoceno inf.* Conjunto volcánico V: Lavas bien preservadas de andesitas y dacitas de piroxeno y biotita, ocasionalmente hornblenda.
- NvIV** : *Mioceno sup. - Plioceno inf.* Conjunto volcánico IV: estrato-volcanes y conos de escoria debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos y dacitas de piroxeno y biotita. Ocasionalmente andesitas basálticas de olivino y piroxeno.
- Tal** : *Mioceno sup. - Plioceno*. Depósitos aluviales y coluviales antiguos. Gravas con lentes de arena y limo e intercalaciones de ceniza volcánica. En zona de fallas, localmente las gravas ocurren cementadas por carbonatos y con niveles de travertino.
- NvIII** : *Mioceno medio - Mioceno sup.* Conjunto volcánico III: estrato-volcanes mediana a debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos, andesitas basálticas de olivino y piroxeno. Escasas dacitas de hornblenda y biotita.
- Nga** : *Mioceno medio*. Gravas de Atacama. Depósitos de gravas y bolones con matriz de arena, localmente consolidados en cemento de carbonatos y sulfatos.
- NvII** : *Mioceno inf. - Mioceno medio*. Conjunto volcánico II: estrato-volcanes medianamente erosionados. Andesitas de piroxenos y daciandesitas de hornblenda.
- Nip** : *Mioceno medio*. Ignimbrita Pajonales. Tobas dacíticas de cenizas y cristales (plg, anf, bi, px).
- NvI** : *Oligoceno - Mioceno inf.* Conjunto volcánico I: estrato-volcanes rofundamente erosionados. Andesitas de ortopiroxeno y clinopiroxeno con daciandesitas de hornblenda y/o biotita y piroxeno. Ocasionalmente andesitas basálticas de ortopiroxeno y olivino.
- Nirf** : *Mioceno inf.* Ignimbrita Río Frío. Tobas dacíticas ricas en cristales (plg, anf, px, bi).
- Pzlt** : *Carbonifero - Pérmico*. Fm. La Tabla. Tobas soldadas y porfidios riolíticos ricos en cristales (feldK, qz, plg, bi), allanita y circón como accesorios.
- alt hi** : alteración hidrotermal.

