

## SALAR DE TARA

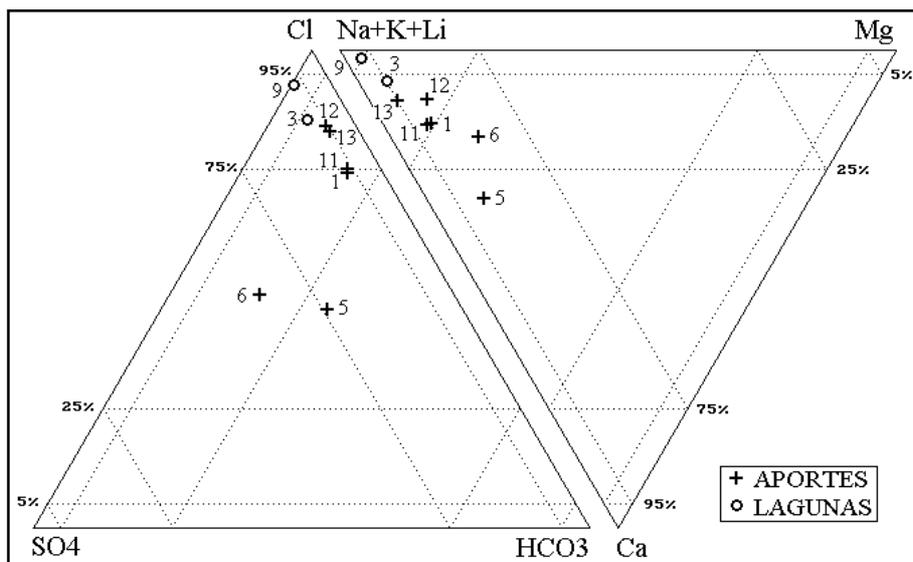
### Introducción

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 km<sup>2</sup>
- superficie del salar: 48 km<sup>2</sup>
- superficie de la laguna 3 -25 km<sup>2</sup>
- 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.

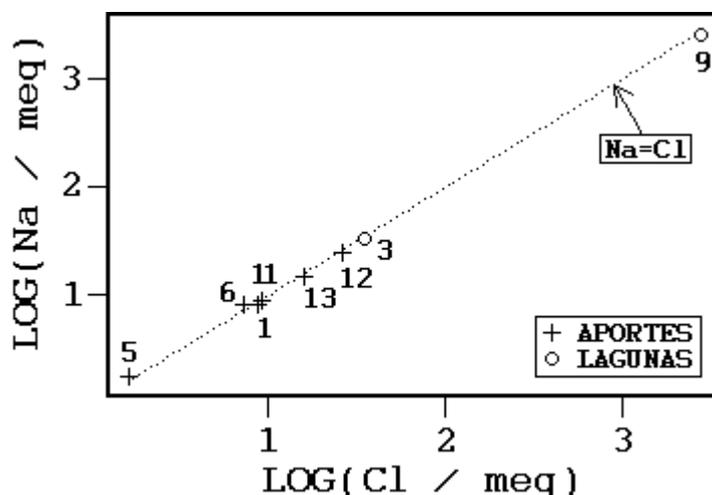
Se distingue en los diagramas triangulares de la figura 1 dos grupos de aguas de aporte :

- las aguas 5 (río Zapaleri) y 6 (vertiente difusa), al oeste de la cuenca, son de tipo Na-(Ca) / Cl-SO<sub>4</sub>-(HCO<sub>3</sub>).

- 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 HCO<sub>3</sub> (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 SO<sub>4</sub>, 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,  $\text{SO}_4$  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  $\text{H}_2\text{O}$  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.
<b>TAR-3.EQ</b>	<b>8,52</b>	<b>1,72</b>	<b>1210</b>	<b>154</b>	<b>9,95</b>	<b>24,1</b>	<b>774</b>	<b>35,8</b>	<b>5,26</b>	<b>30,3</b>	<b>25,5</b>	
<b>TAR-11E</b>	8,64	2,62	1190	132	21,6	33,7	748	27,2	6,69	21,1	44,0	0,122
<b>TAR-1E</b>	8,69	2,86	1180	135	20,5	33,8	749	26,7	6,22	17,4	47,1	0,137
<b>TAR-13E</b>	8,55	2,23	1190	98,9	34,3	33,5	742	33,8	6,97	31,9	24,5	0,160
<b>TAR-5E</b>	8,50	1,78	831	597	13,1	33,5	607	107	5,79	47,5	64,7	0,373
<b>TAR-12E</b>	8,53	1,88	1290	108	13,9	3,83	763	23,7	2,01	36,0	55,9	0,389
<b>TAR-6E</b>	8,49	1,78	729	706	17,3	17,1	543	139	4,00	51,6	81,4	0,526
<b>TAR-9</b>	<b>7,99</b>	<b>16,6</b>	<b>98000</b>	<b>9790</b>	<b>373</b>	<b>30,0</b>	<b>60700</b>	<b>3110</b>	<b>404</b>	<b>1020</b>	<b>1050</b>	
<b>TAR-1E</b>	7,44	4,90	94700	10800	996	16,1	59700	2150	501	380	2000	0,261
<b>TAR-11E</b>	7,38	4,70	94900	10600	1060	16,0	59300	2170	535	392	2140	0,276
<b>TAR-12E</b>	7,51	5,82	98500	8260	835	14,0	58200	1810	154	742	3860	0,364
<b>TAR-13E</b>	6,99	3,23	95800	7990	1490	14,3	58700	2730	563	287	1870	0,369
<b>TAR-5E</b>	7,65	8,42	73800	34700	969	17,9	45800	9510	514	671	5700	0,561
<b>TAR-6E</b>	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 :

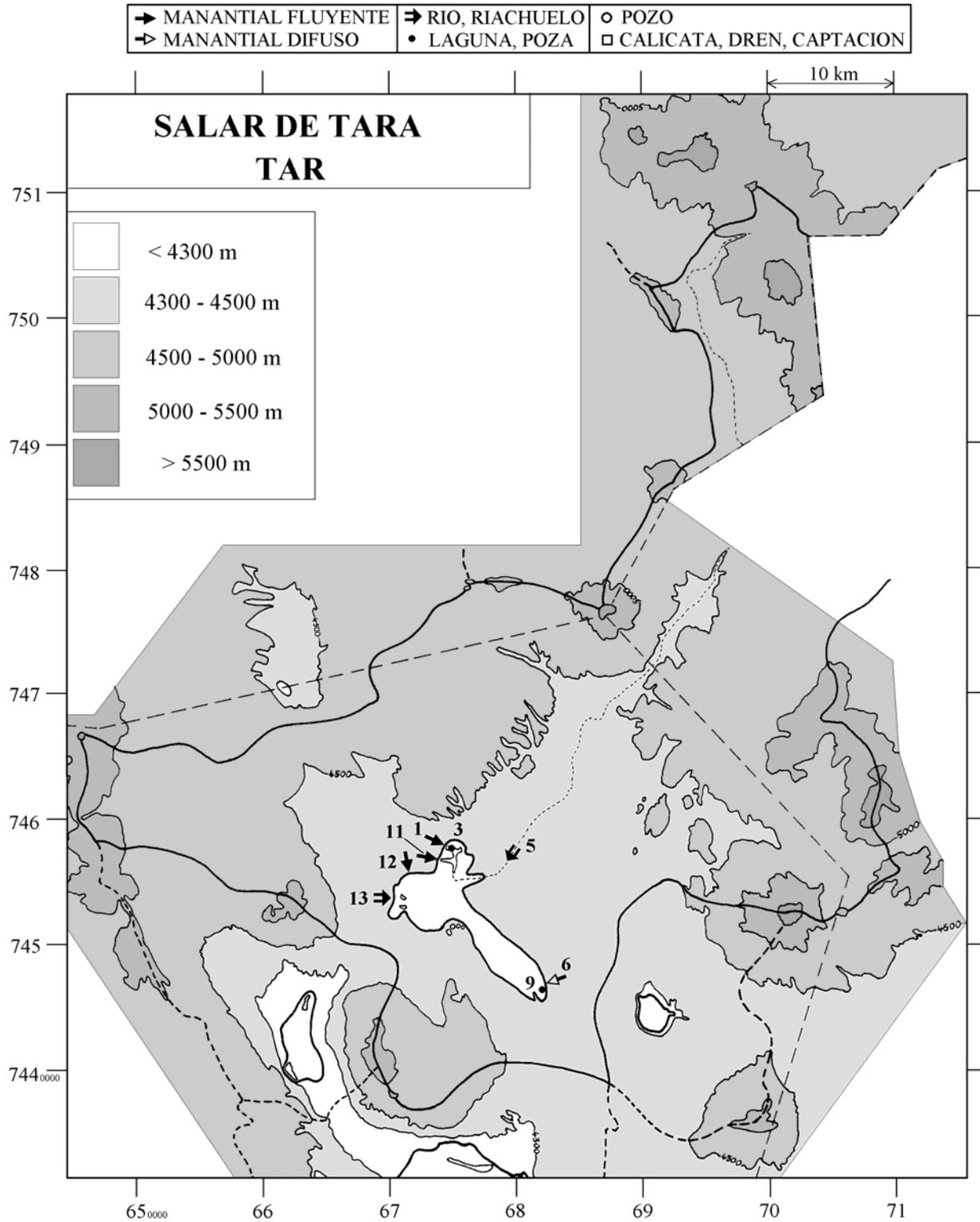
- el río Zapaleri de buen caudal (400 l/s) y de agua muy diluida (287 mg /l STD) de tipo Na-(Ca) / Cl-SO<sub>4</sub>-(HCO<sub>3</sub>). Los componentes disueltos provienen de la alteración de rocas, en su mayor parte volcánicas, de la cuenca de drenaje.

- 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 (H<sub>2</sub>O) 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**

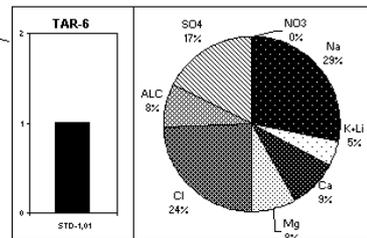
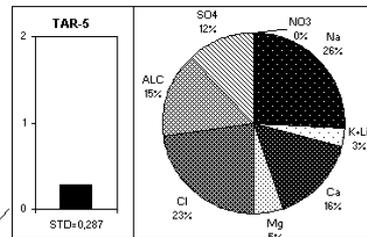
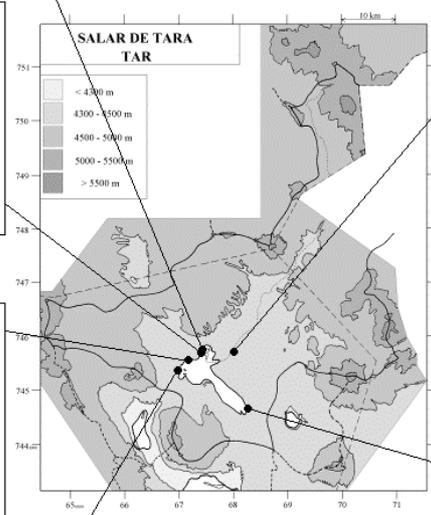
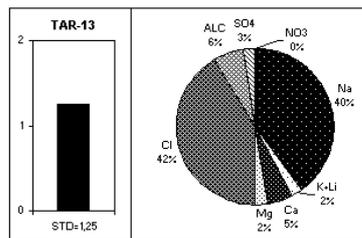
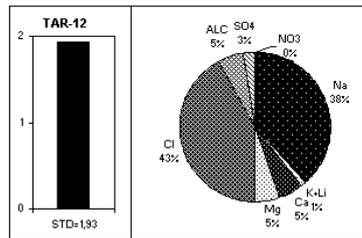
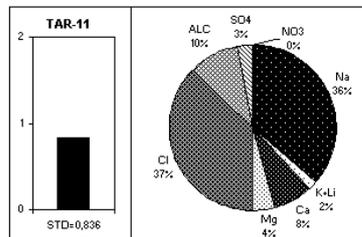
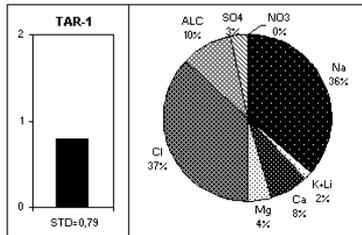
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
TAR-1	09/10/93	10 <sup>H</sup> 00	674325	7452500	4390	Manantial corriente
TAR-3	09/10/93	10 <sup>H</sup> 30	674725	7451900	4390	Laguna
TAR-5	09/10/93	11 <sup>H</sup> 15	679375	7451450	4395	Río Zapalери
TAR-6	09/10/93	12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

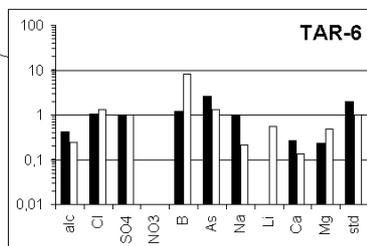
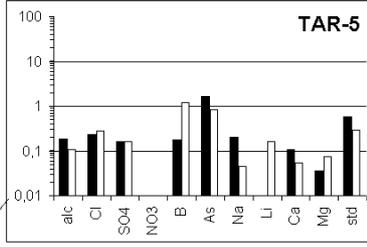
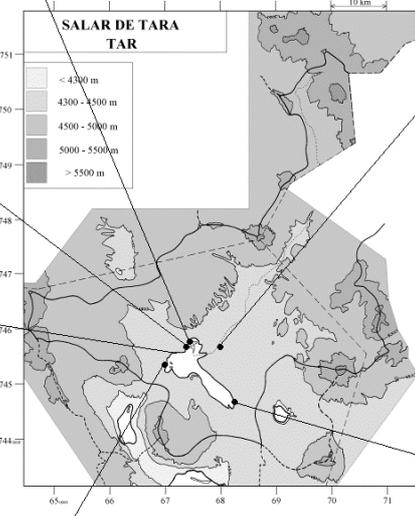
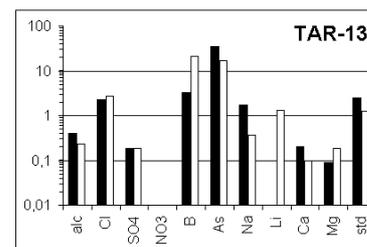
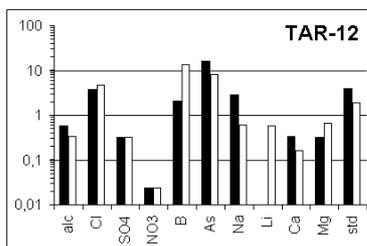
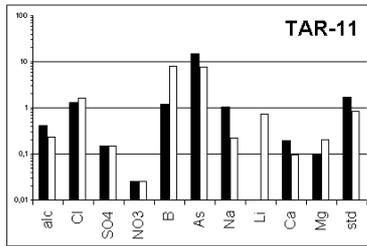
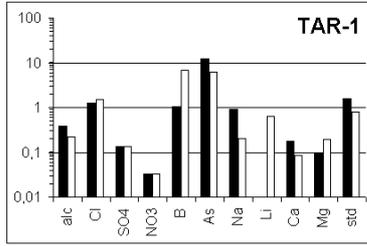
NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
TAR-1	1240	19	1,000	6,67	2,24	0,30	305	0,324	0,0171	34,1	1,43	nd	5,20	25,2	0,619	0,13	185	6,76	1,58	34,8	11,9
TAR-3	4170	13	1,002	8,15	2,69	0,36	1240	1,17	0,0260	154	nd	nd	9,95	24,1	0,981	0,27	757	35,8	5,26	49,7	25,5
TAR-5	367,0	6	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.

