

## CAPÍTULO 4

### INVESTIGACIÓN HIDROGEOQUIMICA

#### 4.1.- Introducción

Este capítulo presenta la caracterización química de la precipitación y de las aguas subterráneas reconocidas en el área de estudio. Esta caracterización se basa en los antecedentes obtenidos en el inventario de puntos de agua ya descrito en el capítulo anterior y los datos obtenidos por el autor en el marco de la presente investigación.

La caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas se estudia desde el punto de vista de las relaciones entre las distintas variables fisicoquímicas, su distribución espacial y la evolución hidrogeoquímica temporal.

En el estudio de las relaciones entre las variables fisicoquímicas se han utilizado procedimientos multivariantes de análisis Cluster (Enjambres) y Componentes Principales. Para el tratamiento de análisis multivariante se ha utilizado el soporte lógico SPSS 8.0.

En el estudio de la evolución hidrogeoquímica se ha utilizado el programa de especialización hidrogeoquímica WATEQ4F (Parkhurst *et al.*, 1976) y el programa PHREEQC (Parkhurst, 1995).

#### 4.2 Metodología

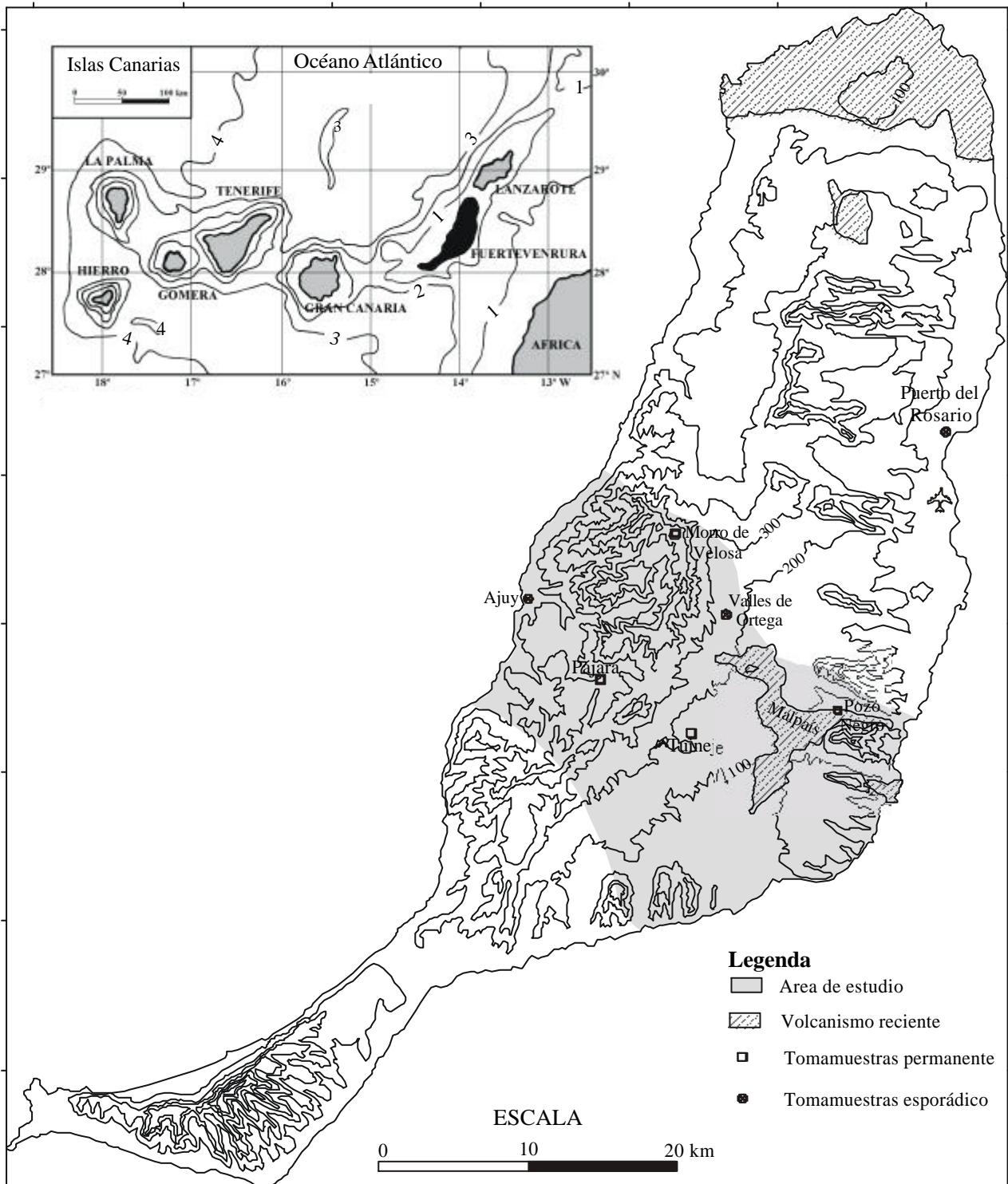
##### 4.2.1 Sistemática de muestreo del agua de lluvia

El clima árido que rige en la isla de Fuerteventura incide en que el número de muestras de agua de lluvia recuperadas sea reducido. En total se obtuvieron 31 muestras que corresponden a siete eventos de lluvia producidos en los años 1998 y 1999.

Las muestras de la precipitación fueron obtenidas en vasos debidamente preparados para impedir que en ellos entrasen elementos ajenos a la lluvia y bien sujetos al suelo para evitar que el viento los desplazase. En el fondo de estos recipientes se colocó una lámina de vaselina líquida para reducir los efectos de evaporación en las muestras.

En un comienzo se instalaron siete estaciones de muestreo de agua de lluvia, distribuidas ampliamente en la parte central de la isla, para evaluar de modo exploratorio las características químicas e isotópicas de las mismas. Estos fueron ubicados en las localidades de Puerto del Rosario, Pozo Negro, Tuineje, Pájara, Morro de Velosa, Valles de Ortega y Ajuy (Figura 4.1).

La red de muestreo definitiva quedó constituida por cuatro estaciones ubicadas en las localidades de Tuineje, Pozo Negro, Pájara y Morro de Velosa. Los criterios básicos para su localización fueron la cota de terreno, facilidad de acceso y la representatividad espacial de las muestras. La Tabla 4.1 presenta las características principales de cada uno de los puntos donde se obtuvieron muestras de precipitación.



**Figura 4.1.-** Situación de las tomas de muestras de agua de lluvia en la isla de Fuerteventura y límites del área de estudio. Los contornos muestran la elevación en metros.

Punto	x	Y	Cota (m)	Observaciones
Puerto del Rosario	611220	3152800	20	Muestras que no incluyen deposición seca
Morro de Velosa	593070	3145950	680	
Pozo Negro	603500	3133900	90	Tomamuestra situado en la Granja de Pozo Negro, perteneciente al Cabildo de Fuerteventura
Pájara	587650	3136250	190	Tomamuestra situado en la terraza del ayuntamiento
Tuineje	593400	3133700	200	
Valles de Ortega	596800	3140780	230	
Ajuy	582700	3141600	2	Tomamuestras situado a 50 m de la línea de costa

**Tabla 4.1.-** Situación y características más importantes de los puntos de muestreo de agua de lluvia.

#### 4.2.2 Sistemática de muestreo del agua subterránea

En el estudio hidroquímico del agua subterránea se definió una red de muestreo periódica de puntos de agua (pozos, sondeos y manantiales). Se tomaron muestras en 64 puntos, seleccionados de forma que estuvieran repartidos lo más homogéneamente posible por toda la superficie del acuífero. Para la selección se ha considerado la información previa existente de las distintas captaciones, las características de los pozos y sondeos (profundidad, diámetro, litología, etc.) y la facilidad de acceder regularmente a los mismos. Se obtuvieron un total de 154 muestras. Todas fueron analizadas en el Laboratorio de Aguas del Instituto Tecnológico Geominero de España en Tres Cantos (Madrid).

La mayoría de las muestras fueron obtenida directamente de las captaciones en funcionamiento, previo lavado de los recipientes con el agua de la misma captación.

En los sondeos del área que no estaban siendo explotados se realizaron registros longitudinales de temperatura y conductividad. En aquellos tramos donde las medidas de conductividad indicaban la existencia de aguas con distinta salinidad se realizó un muestreo selectivo del agua subterránea con tomamuestra.

Las muestras obtenidas se almacenaban en botellas de polietileno de doble tapón con capacidad de 500 y 1000 mL, sin burbujas de aire y al resguardo de la luz. Desde que las muestras eran obtenidas en campo hasta su llegada al laboratorio transcurría una media de dos semanas y hasta la realización del análisis aproximadamente un mes. En laboratorio las muestras eran conservadas en refrigeración para evitar modificaciones de sus características químicas.

#### 4.2.3 Determinaciones químicas de campo

Paralelamente al muestreo del agua subterránea se realizaron distintas determinaciones fisicoquímicas *in situ*, que incluyeron la medición del temperatura, pH y la conductividad eléctrica.

La temperatura del agua subterránea (°C) se midió con un termómetro de mercurio de 0.2 °C de precisión y con un sensor de temperatura que se acopla al conductivímetro (0.1 °C).

La medición del pH se realizó con un pH-metro marca HANNA, el cual realiza un ajuste automático de la temperatura. Estas mediciones se realizaron a partir de la segunda

campana de muestreo.

La conductividad eléctrica fue medida en campo con un conductivímetro portátil marca WTW. Las medidas de conductividad eléctrica eran realizadas a las muestras de agua corrigiendo automáticamente los datos a 25°C.

En algunos sondeos del área que no están siendo explotados se realizaron registros longitudinales de temperatura (°C) y conductividad eléctrica (S/cm). Para ello se utilizó la sonda marca SEBA, que permite medir la temperatura y conductividad hasta una profundidad de 300 m. Los registros de temperatura y conductividad se realizaron haciendo descender el conductivímetro hasta el nivel freático, lugar desde el cual se comenzaba a medir la temperatura y conductividad a intervalos de 1 m, hasta alcanzar el fondo de los pozos. En aquellos tramos donde las medidas de conductividad indicaban la existencia de aguas con marcadas diferencias de salinidad, se realizó un muestreo selectivo de aguas subterráneas. No se realizaron medidas de la temperatura del aire sobre la superficie del agua.

#### 4.2.4.- Determinaciones químicas de laboratorio

Los análisis químicos en laboratorio incluyen los iones mayoritarios, más sílice, amonio, fosfato, boro, fluoruro, estroncio y eventualmente análisis de bromuro. La totalidad de estas determinaciones fueron realizadas en el Laboratorio de Aguas del ITGE, a excepción de los análisis de bromuro, los cuales fueron realizados conjuntamente con determinaciones de cloruro en los laboratorios del CIEMAT (Madrid). Las técnicas analíticas utilizadas en los análisis del laboratorio del ITGE para ésta tesis han sido las siguientes:

Conductividad eléctrica: corresponde a la capacidad de un agua para conducir electricidad; se mide como la conductividad que existe entre dos electrodos paralelos de 1 cm<sup>2</sup> de superficie y separados 1 cm, y se expresa en unidades de Siemens/cm.

K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>: Espectrometría de emisión atómica y espectrometría de emisión plasma de acoplamiento inductivo.

Cl<sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, SiO<sub>2</sub>, PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>: Espectrofotometría de absorción. Autoanalizador de flujo continuo.

Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup> (según concentración): Espectrometría de absorción. Autoanalizador de flujo continuo. Complexometría

SO<sub>4</sub><sup>=</sup> (según concentración): Espectrometría de absorción. Autoanalizador de flujo continuo.

Gravimetría

CO<sub>3</sub><sup>=</sup>: Volumetría

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (según concentración): Volumetría. Autoanalizador de flujo continuo.

F<sup>-</sup>: Electrometría. Método de electrodos específicos.

Sr<sup>++</sup>: Espectrometría de absorción atómica

B: Espectrometría de emisión de plasma con acoplamiento inductivo

Br<sup>-</sup>: Cromatografía iónica líquida de alto rendimiento (HPLC). CIEMAT (Madrid)

#### 4.2.5.- Análisis multivariante

El objetivo principal del análisis multivariante es transformar una gran cantidad de observaciones en un número menor de puntuaciones compuestas de manera que reflejen la mayor cantidad de la información contenida en los datos originales.

Para estudiar las relaciones entre las distintas variables fisicoquímicas de las muestras analizadas se utilizó el análisis cluster (enjambres) y de componentes principales (ACP). Un paso previo para la aplicación de estos métodos es la realización de un estudio univariante y bivariante de las distintas variables a estudiar, ya que para la obtención de resultados fiables es necesaria una distribución normal de los datos para cada una de las variables.

##### - Análisis cluster

El análisis cluster tiene por objetivo la búsqueda de grupos similares de casos o variables, los que se van agrupando en conglomerados. Antes de iniciarse un análisis cluster se deben seleccionar las variables relevantes para identificar los grupos, definir la medida de proximidad entre los individuos y seleccionar el criterio para agrupar individuos en conglomerados. Siguiendo los criterios de Davis (1973) y Morales *et al.* (1984), el parámetro de distancia utilizado en el estudio de conglomerados de variables ha sido la correlación de Pearson, mientras que en el estudio de conglomerados de casos se utilizó el cuadrado de la distancia euclidiana.

Finalmente, los distintos grupos de variables o casos creados se representan en gráficos llamados dendogramas, que permiten visualizar qué grupos están más relacionados entre sí y cuales tienen muy poca o ninguna relación.

##### - Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (ACP) es un método esencialmente descriptivo que permite transformar las relaciones de un conjunto de variables en un número menor de componentes (variables) independientes entre sí, de manera que sólo algunas componentes expliquen la mayor parte de la varianza contenida en los datos originales (Camacho, 1995). El propósito del ACP es revelar subgrupos de variables que son relativamente independientes unos de otros.

El ACP ofrece como resultado una serie de índices numéricos, y de éstos los más importantes son los valores propios, las cumunalidades y los coeficientes de estructura (también llamados pesos). Los valores propios indican el porcentaje de la varianza de las variables originales que explica cada uno de los componentes; es usual desechar los componentes que no explican una cantidad suficiente de variación de las variables originales. Los coeficientes de estructura indican la correlación entre los componentes y las variables. Normalmente se desechan las variables que tienen coeficientes de estructura menor que 0,5. La cumunalidad indica el porcentaje de la varianza de cada variable que es explicado por los

componentes, de manera que se eliminan las variables que tienen una baja cumunalidad, porque no son explicadas por los componentes.

### **4.3.- Caracterización química de la precipitación**

#### **4.3.1 Metodología**

Los datos químicos utilizados en la caracterización química de la precipitación fueron obtenidos íntegramente en el marco de esta investigación, ya que no existían previamente.

Se obtuvieron 31 muestras de precipitación en vasos debidamente preparados, como se explica en el apartado 4.2.1. Dos muestras tomadas en la ciudad de Puerto del Rosario (27/01/98 y 12/03/99) fueron tomadas en los momentos de caída de la precipitación y no incorporan deposición seca en los vasos. De todas las muestras, una obtenida en Morro de Velosa (7/01/99) tuvo que ser descartada debido a que mostraba claros signos de contaminación antrópica. A las 30 muestras restantes se unen 7 muestras de charcos y escorrentía recuperadas por el autor en los momentos de caída de precipitaciones en marzo de 1999. Tanto los análisis químicos de las muestras de precipitación como los de muestras de escorrentía y charcos se presentan en el Anejo 4.1.

Para cada análisis de precipitación se ha calculado el porcentaje de error del balance iónico (Custodio y Llamas, 1983). Este en general no supera el 8%, a excepción de dos muestras que alcanzan 10,3% y 14,8%, pero que todavía resultan aceptables por su baja conductividad eléctrica, de 71 y 248  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente.

Los análisis de las cuatro estaciones de muestreo han sido representados mediante diagramas logarítmicos verticales (Schoeller-Berkaloff). Para facilitar la visualización e interpretación de los datos se han construido histogramas y se han calculado los valores de la media, la mediana y desviación típica, tanto de las concentraciones como de las relaciones iónicas más importantes.

Para estudiar las relaciones entre las distintas variables químicas de la precipitación y el grado de relación entre las distintas muestras se ha utilizado el análisis cluster y análisis de componentes principales (ACP).

Para determinar los aportes de cloruro, sodio, sulfato, calcio y bicarbonato de la lluvia (integrando el polvo atmosférico) se ha calculado para cada análisis los aportes diarios y anuales correspondientes al período 1998-1999. Este cálculo se ha realizado a partir de la cantidad de precipitación para el intervalo de tiempo entre precipitaciones (en días) para las distintas muestras. La principal limitación de esta determinación ha sido la escasa cantidad de precipitaciones, las cuales se concentran entre diciembre y marzo.

También se cuenta con datos de deposición seca obtenidos entre 1996 y 1997 por la Fundación Empresa Universidad de la Laguna (1999). Estos datos se obtuvieron mensualmente a partir del polvo acumulado en bandejas de 0.06  $\text{m}^2$  colocadas en el suelo. Posteriormente las muestras de polvo eran lavadas con agua destilada y al extracto se le media la concentración de los principales iones en solución. Sin embargo se desconoce el efecto que

puedan tener las precipitaciones sobre la acumulación de polvo de las bandejas, ya que estas no estaban protegidas de la lluvia.

#### 4.3.2.- Caracterización química general

Una primera aproximación a las características químicas del agua de lluvia se hace representando la composición química de todas las muestras de precipitación en un diagrama logarítmico vertical, donde se observan importantes diferencias de salinidad de las muestras (Figura 4.2). La mayoría de las muestras de lluvia presentan una composición clorurado-sódica con variaciones importantes en los contenidos de calcio, magnesio, sulfato y bicarbonato. Se diferencia de la tendencia general la muestra de Tuineje-3 (5/12/98) que presenta una composición muy distinta respecto a las muestras tomadas durante el mismo período de tiempo en las otras estaciones. Presenta una baja mineralización y en su composición iónica dominan los contenidos de calcio, magnesio, sulfato y bicarbonato sobre los contenidos en cloruro y sodio. Por el bajo grado de mineralización de esta muestra y a partir de las características químicas determinadas en muestras de lluvia que no incluyen la deposición seca, se deduce que esta muestra de lluvia incorporó poca deposición seca en el tomamuestras.

La Figura 4.3 presenta los diagramas logarítmicos verticales de las lluvias, separados por puntos de muestreo y con indicación del pH de las muestras. Se observa que las muestras de mayor mineralización corresponden a las de los eventos de lluvia registrados el 2/12/98 y el 15/03/99. Las muestras obtenidas el 2/12/98 corresponden a la primera lluvia del otoño, mientras que las muestras recuperadas el 15/03/99 corresponden a muestras obtenidas después de un prolongado período sin precipitaciones (68 días). Para ambos eventos de lluvia dominan en el agua los iones cloruro y sodio, por lo que se deduce una importante incorporación de aerosol marino como deposición seca. De la comparación de los diagramas logarítmicos de las distintas estaciones se destaca una menor concentración de calcio y bicarbonato en Pájara, respecto a las estaciones de Morro de Velosa, Tuineje y Pozo Negro. Sólo un análisis de Pájara correspondiente al 7/01/99 tiene un patrón semejante al de los otros puntos. Las muestras tomadas en la Granja de Rosa de Pozo Negro (5/12/98 y 7/1/99) presentan un ligero exceso de sulfato respecto al cloruro, lo que no sucede en el resto de estaciones para el mismo período. Debido a la importante actividad agrícola y ganadera desarrollada en esta granja y a la gran cantidad de motores de combustión utilizados para estos fines, no se descarta que el exceso de sulfato corresponda a la contaminación producida por la utilización de combustibles fósiles.

En el diagrama logarítmico vertical de Tuineje se destaca por su elevado pH (7,9) la muestra obtenida el 2/12/98, que presenta concentraciones de calcio y bicarbonato muy altas y en la que se igualan a las concentraciones de cloruro y sodio. No se descarta que el elevado pH este relacionado con la disolución de partículas de calcita en el propio tomamuestras, lo que incidiría en las altas concentraciones de calcio y bicarbonato de la muestra.

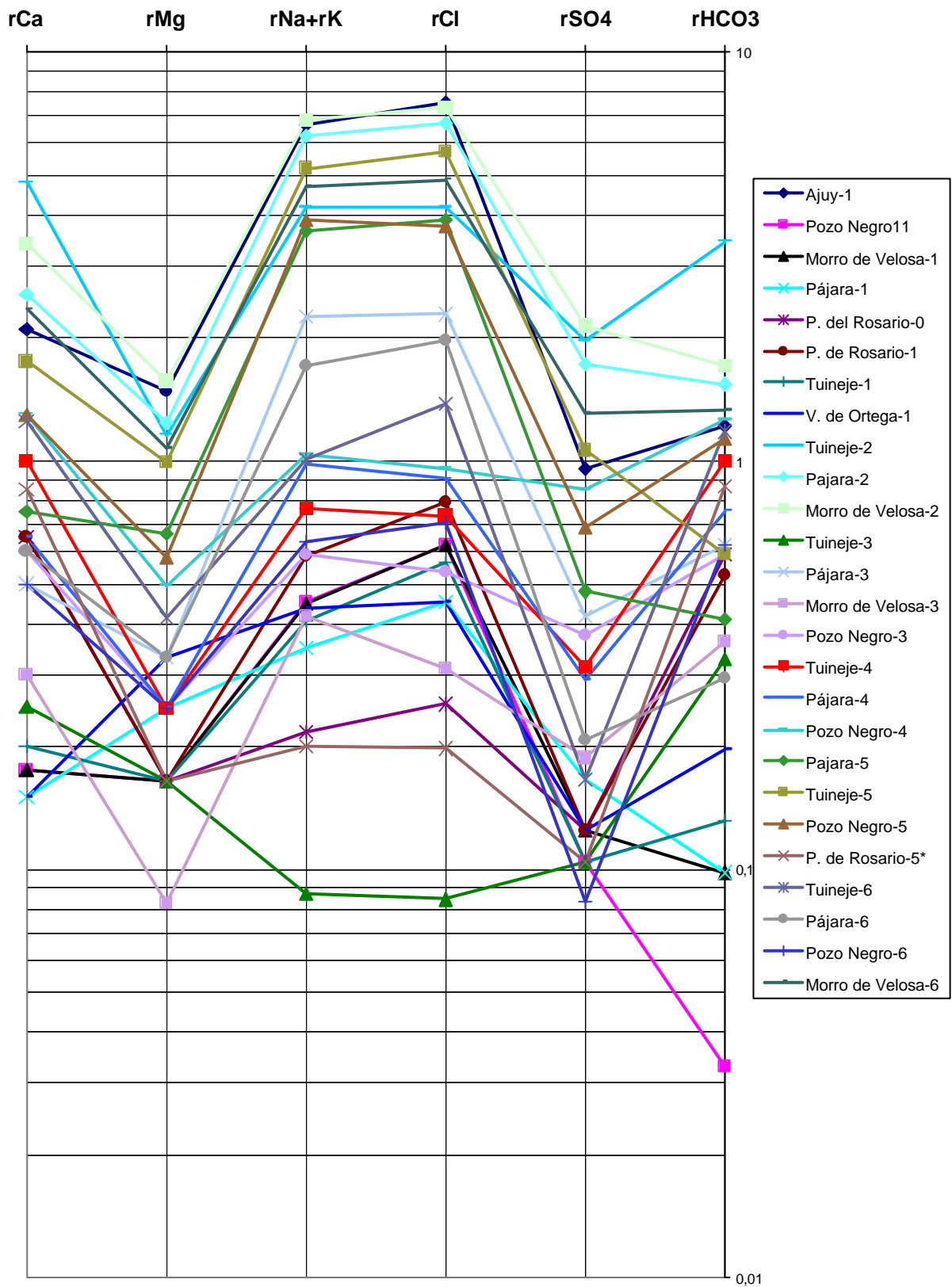


Figura 4.2.- Diagrama logarítmico vertical con todas las muestras de precipitación.



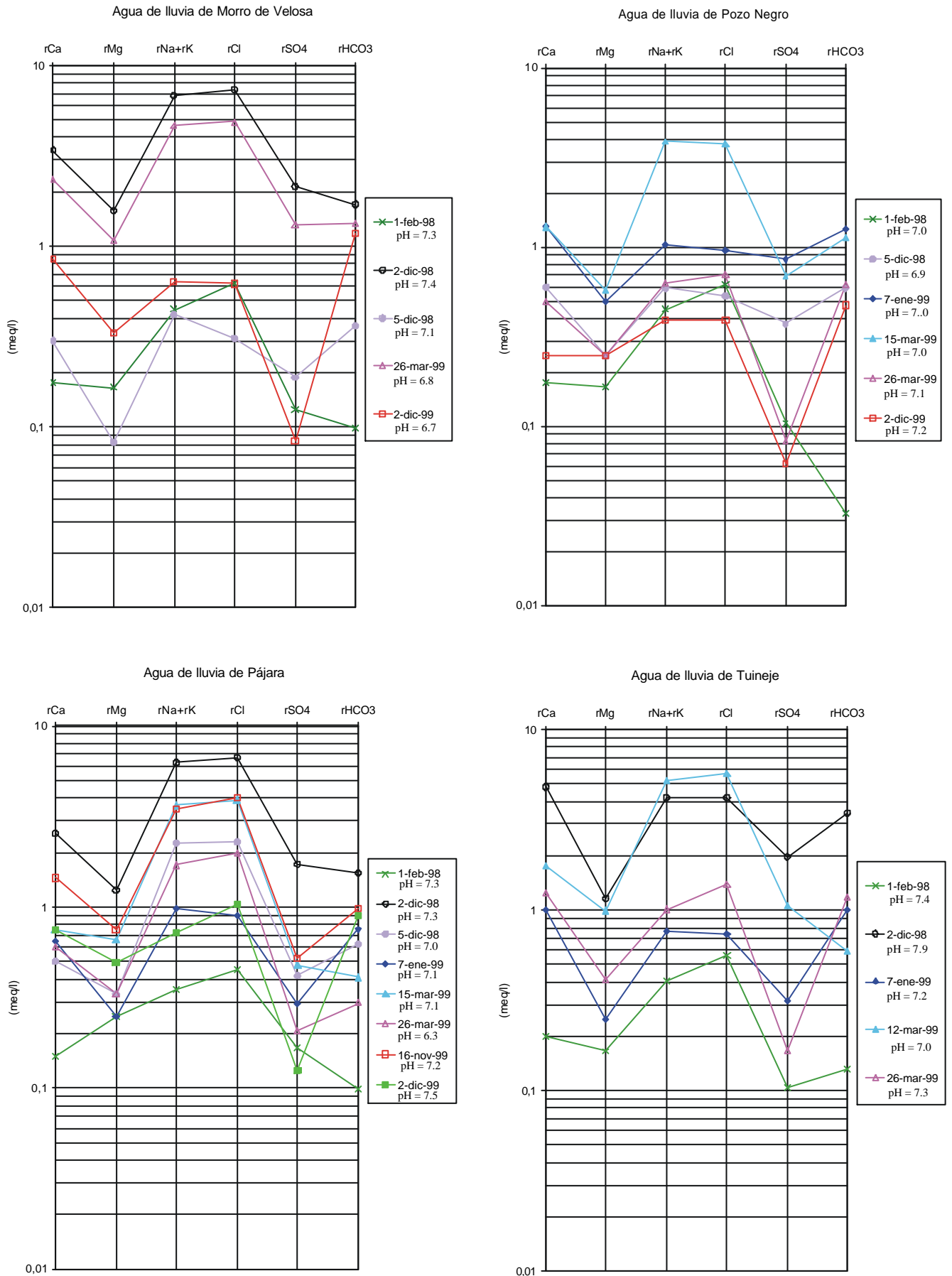
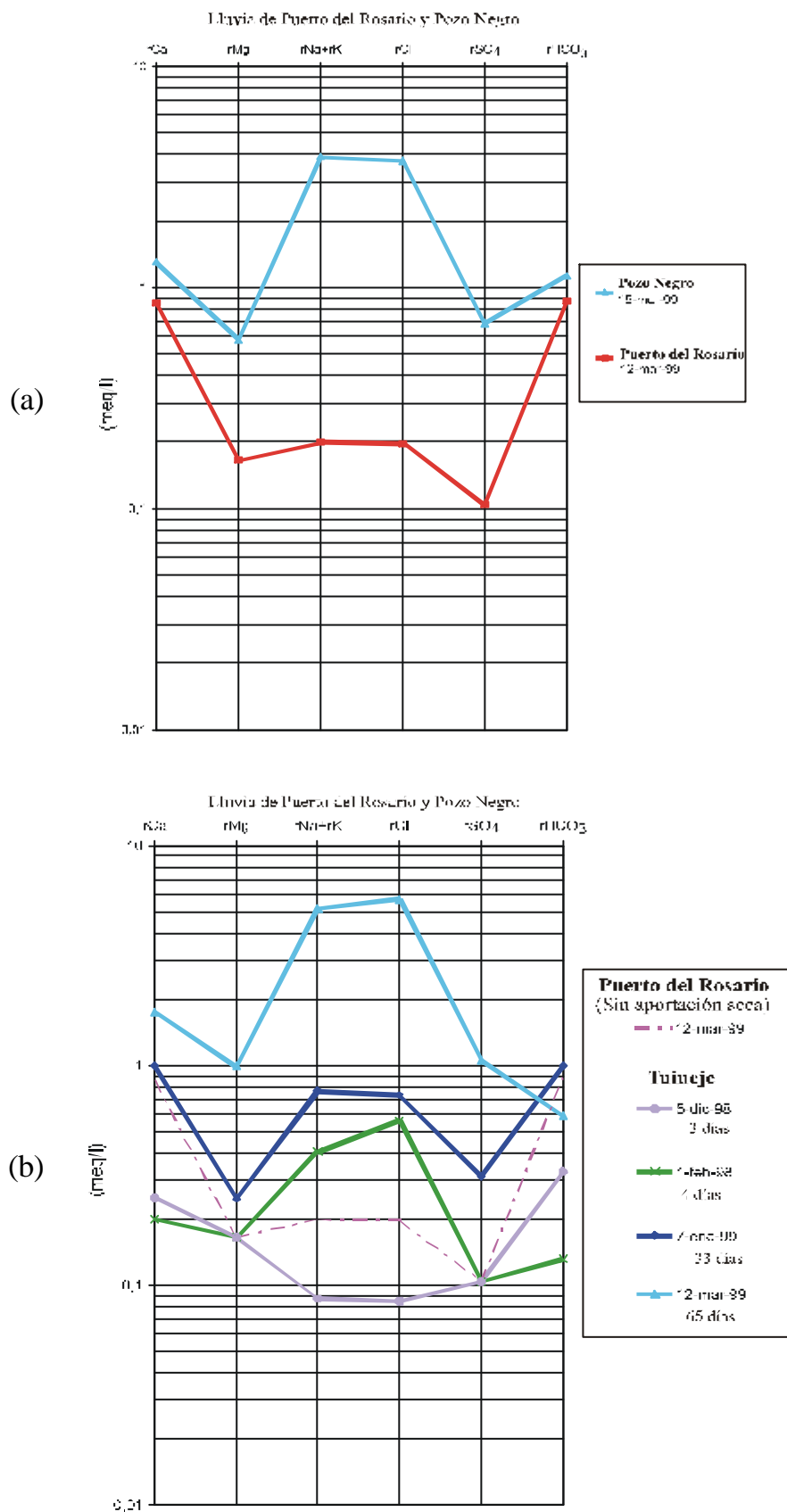


Figura 4.3.- Representación en columnas logarítmicas verticales de las muestras de agua de lluvia de los puntos de Morro de Velosa, Pozo Negro, Pájara y Tuineje.

La Figura 4.4(a) presenta el diagrama logarítmico vertical de dos muestras de lluvia tomadas en estaciones próximas para un mismo evento de lluvia, pero una incorpora deposición seca durante 68 días (Pozo Negro-5) y la otra es tomada en el momento de la caída de precipitaciones y solo incorpora deposición húmeda (Puerto del Rosario-5). Se destaca la elevada concentración de cloruro y sodio en la muestra de lluvia que incorpora la deposición seca. De esta observación se deduce que parte importante del aerosol marino que se incorpora en las muestras de lluvia lo hace principalmente por la acumulación seca del mismo en los vasos tomamuestras, y que es muy poco el aerosol marino que se incorpora en la lluvia durante la caída de las precipitaciones.

La Figura 4.4(b) muestra el diagrama logarítmico vertical de la misma muestra de Puerto del Rosario que solo incorporan deposición húmeda y de varias muestras de agua de lluvia de Tuineje que incorporan deposición seca durante distinto número de días. La gráfica indica que a medida que aumenta el número de días de deposición seca, la composición química del agua de lluvia pasa gradualmente de bicarbonatada-cálcica a un agua de composición clorurado-sódica. Se observa que la muestra de lluvia de Tuineje que incorpora deposición seca durante tres días (5/12/98) presenta una composición química muy similar a la muestra sin deposición seca de Puerto del Rosario, pero con una menor proporción de calcio y bicarbonato respecto al cloruro. En la muestra Tuineje que incorpora deposición seca de 33 días las concentraciones de cloruro y sodio son aproximadamente iguales a las de calcio y bicarbonato, mientras que la que acumula deposición seca de 65 días ya muestra un claro predominio del cloruro y sodio sobre el calcio y bicarbonato. En esta gráfica también se observa que las concentraciones de sulfato y magnesio aumentan progresivamente respecto al calcio y bicarbonato, por lo que se deduce su estrecha relación con la deposición del aerosol marino.

Para las muestras de lluvia utilizadas en esta caracterización se ha calculado la media, mediana, máximo, mínimo y desviación típica, tanto para las concentraciones como para las relaciones iónicas de mayor interés (Tabla 4.2). En este cálculo se han considerado todos los análisis químicos, independientemente de su ubicación y fecha de muestreo. A partir de estos datos se observa una importante dispersión de valores en las concentraciones de sodio, potasio, calcio, magnesio cloruro, sulfato, bicarbonato y de las relaciones iónicas  $rSO_4/rCl$  y  $rMg/rCa$ . Las relaciones  $rNa/rCl$  y  $rNa/rK$  presentan una distribución normal y una desviación típica menor, que se interpreta como un origen común de estos iones. A partir de estos resultados se puede deducir que el valor medio tiene escaso interés como valor representativo de las muestras.



**Figura 4.4.-** Representación de diagramas logarítmicos verticales de la composición química del agua de lluvia de: (a) Puerto del Rosario (incluye sólo deposición húmeda) y de Pozo Negro (incluye deposición húmeda y deposición seca durante 65 días en el vaso tomamuestras) y (b) Puerto del Rosario (incluye sólo deposición húmeda) y de Tuineje (deposición húmeda y deposición seca acumulada durante distintos números de días en el vasos tomamuestras).

	Conductividad eléctrica (µs/cm)	pH	rNa	rK	rCa	rMg	rCl	rSO <sub>4</sub>	rHCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> (mg/l)	rNa/rCl	rNa/rK	rSO <sub>4</sub> /rCl	rMg/rCa
Media	355,80	7,15	2,02	0,09	1,11	0,52	2,27	0,53	0,83	1,36	0,88	27,10	0,28	0,63
Mediana	177,50	7,15	0,85	0,05	0,70	0,33	0,93	0,25	0,62	0,80	0,89	27,75	0,19	0,49
Máximo	1128,00	7,90	6,61	0,26	4,80	1,57	7,50	2,14	3,44	7,00	1,26	46,45	0,89	2,20
Mínimo	67,00	6,30	0,22	0,01	0,15	0,08	0,25	0,06	0,03	0,10	0,69	12,46	0,11	0,24
Desv. Típica	331,80	0,32	2,10	0,08	1,09	0,43	2,30	0,60	0,69	1,50	0,14	8,65	0,20	0,44

**Tabla 4.2.-** Media, mediana, moda, máximo, mínimo y desviación típica de las concentraciones y relaciones iónicas, independiente del punto y fecha de muestreo (r=meq L<sup>-1</sup>).

En la Figura 4.5 se presentan los histogramas de concentraciones, donde se observa una distribución asimétrica de los datos, en la que el valor de la mediana se aproxima más al percentil 25% que al percentil 75%. Los casos aislados con mayores concentraciones corresponden a las primeras lluvias que caen después del verano y que incorporan la deposición seca acumulada durante todo el período estival (muestras tomadas el 15/03/99). La Tabla 4.3 presenta los percentiles 25%, 50% y 75% para las concentraciones y relaciones iónicas. La Figura 4.6 presentan los histogramas de los logaritmos de las concentraciones iónicas. Se observa una distribución más próxima a la distribución normal, aunque en el caso del cloruro ésta no se observa con claridad.

En el histograma del pH se observa una distribución aproximadamente normal de los datos, con una desviación típica relativamente baja, por lo que el valor medio de pH de 7,1 se considera representativo de las muestras, a pesar que corresponde a medidas de muestras alteradas.

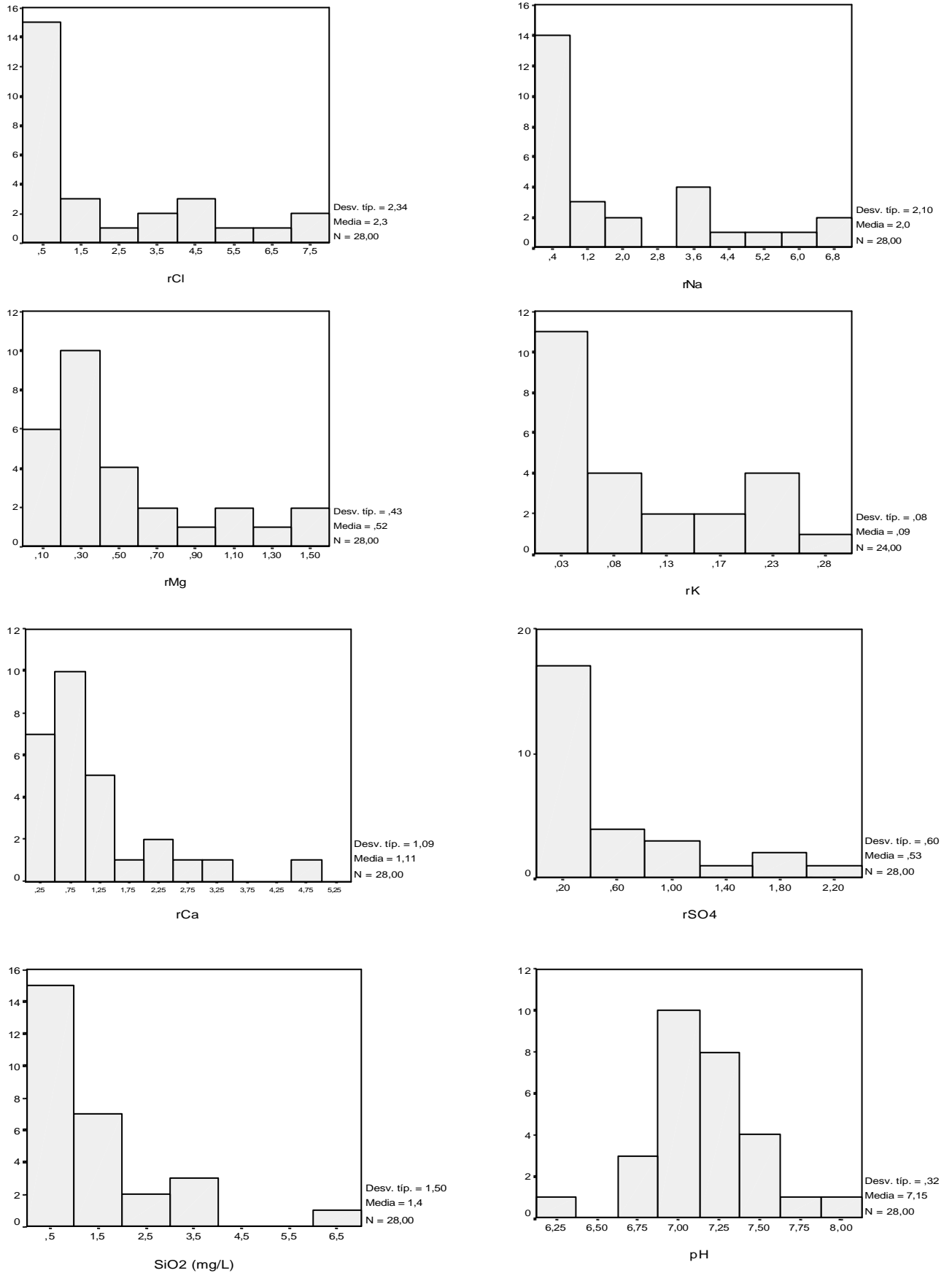
	Conductividad eléctrica (µS/cm)	pH	rNa	rK	rCa	rMg	rCl	rSO <sub>4</sub>	rHCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> (mg/l)	rNa/rCl	rNa/rK	rSO <sub>4</sub> /rCl	rMg/rCa
Percentil 25%	88,50	7,00	0,44	0,03	0,35	0,25	0,58	0,13	0,37	0,43	0,79	19,96	0,13	0,38
Percentil 50%	177,50	7,15	0,85	0,05	0,70	0,33	0,93	0,25	0,62	0,80	0,90	27,75	0,18	0,50
Percentil 75%	576,50	7,30	3,63	0,15	1,41	0,72	4,00	0,81	1,18	1,80	0,98	32,71	0,36	0,80

**Tabla 4.3.-** Percentil 25%, percentil 50% y percentil 75% de las concentraciones y relaciones iónicas, independiente del punto y fecha de muestreo (r=meq L<sup>-1</sup>).

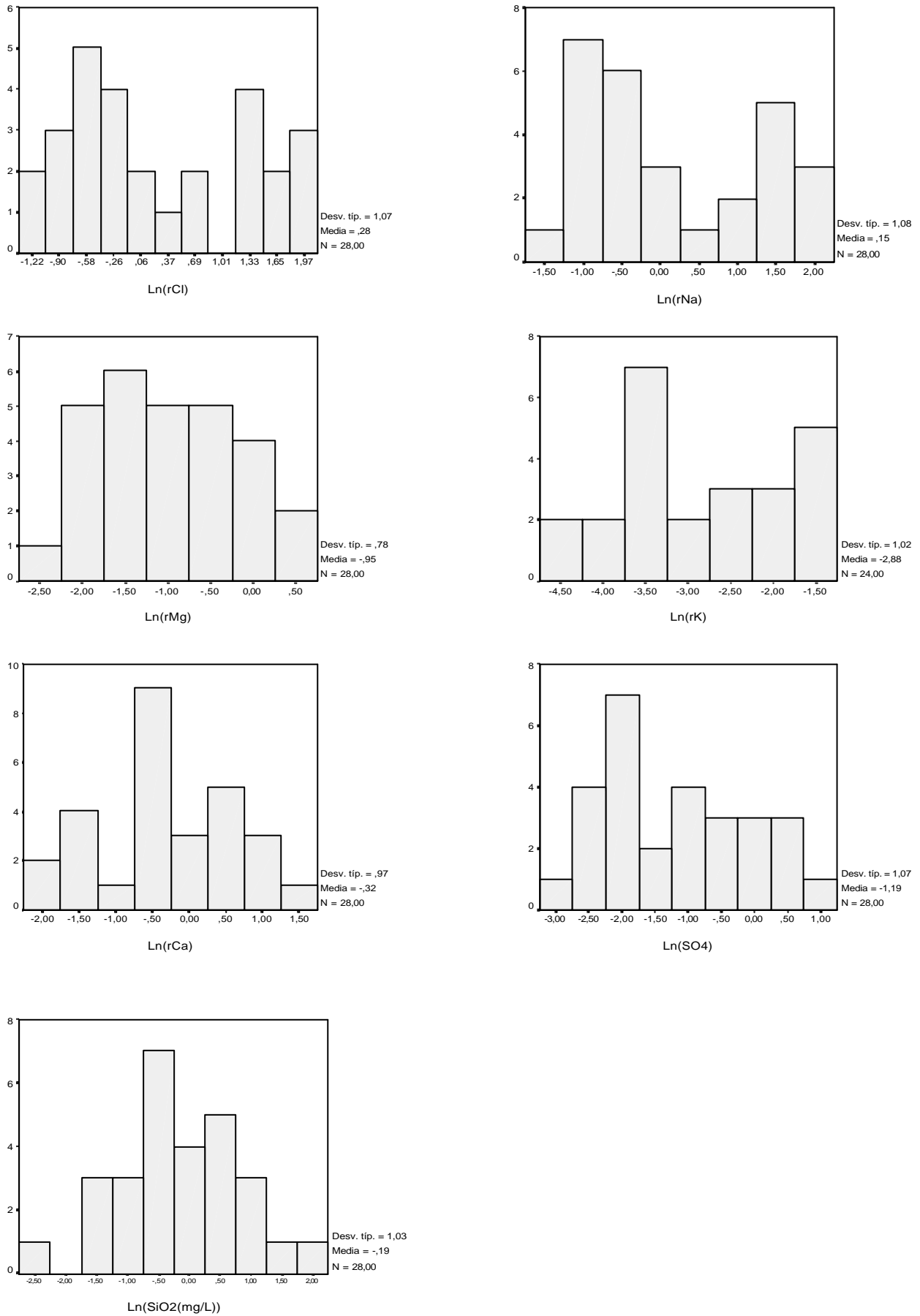
#### 4.3.3.- Estudio de la aportación marina

Para cuantificar la influencia del agua de mar en la composición química de la precipitación se ha calculado para cada muestra la concentración de los iones fundamentales (salvo el HCO<sub>3</sub>) que provendrían del agua de mar. Esta determinación se hace suponiendo que todo el cloruro presente en las muestras proviene del mar. A partir del conocimiento que se tiene de la geología y de las actividades antrópicas que se realizan en la isla, se descarta la existencia de posibles fuentes que liberen Cl a la atmósfera. La contribución del agua de mar a la concentración total del ion a determinar (i) en las muestras ha sido calculada de la forma:

$$C_{i(luvi)} = (C_{i(ma)} / Cl_{(ma)}) * Cl_{(luvi)}$$



**Figura 4.5.-** Histogramas de las concentraciones de cloruro, sodio, magnesio, potasio, calcio, sulfato, SiO<sub>2</sub> (mg L<sup>-1</sup>) y pH. r = meq L<sup>-1</sup>. N = número de datos



**Figura 4.6.-** Histogramas del logaritmo natural de las concentraciones de cloruro, sodio, magnesio, potasio, calcio, sulfato y SiO<sub>2</sub> (mg L<sup>-1</sup>). r = meq L<sup>-1</sup>. N = número de datos.

Punto	Fecha	rCa	rMg	rNa	rK	rSO4	rCl	marCa	MarMg	marNa	marK	MarSO4	%Ca	%Mg	%Na	%K	%SO4
Ajuy-1	01/02/98	2,10	1,49	6,48	0,15	0,96	7,50	0,24	1,44	6,14	0,13	0,75	11,46	97,14	94,80	84,13	78,21
Pozo Negro-1	01/02/98	0,18	0,17	0,44	0,02	0,10	0,62	0,02	0,12	0,51	0,01	0,06	11,37	72,27	>100	69,55	59,48
Morro de Velosa-1	01/02/98	0,18	0,17	0,44	0,01	0,12	0,62	0,02	0,12	0,51	0,01	0,06	11,37	72,27	>100	83,46	49,57
Pájara-1	01/02/98	0,15	0,25	0,35	<0,5	0,17	0,45	0,01	0,09	0,37	0,01	0,05	9,65	35,05	>100		27,04
P. Rosario-0 (*)	27/01/98	0,65	0,17	0,22	<0,5	0,12	0,25	0,01	0,05	0,21	0,00	0,03	1,25	29,61	95,67		20,31
P. Rosario-1	01/02/98	0,65	0,17	0,57	0,02	0,12	0,79	0,03	0,15	0,65	0,01	0,08	3,90	92,09	>100	75,96	63,16
Tuineje_1	01/02/98	0,20	0,17	0,39	0,01	0,10	0,56	0,02	0,11	0,46	0,01	0,06	9,05	65,74	>100	75,92	54,11
V. de Ortega-1	01/02/98	0,15	0,33	0,44	<0,5	0,12	0,45	0,01	0,09	0,37	0,01	0,05	9,65	26,29	84,94		36,06
Tuineje-2	02/12/98	4,80	1,16	3,96	0,20	1,98	4,17	0,13	0,80	3,42	0,07	0,42	2,79	69,51	86,39	35,12	21,08
Pajara-2	02/12/98	2,55	1,24	6,00	0,26	1,73	6,71	0,22	1,29	5,50	0,12	0,67	8,45	>100	91,57	45,16	38,78
Morro de Velosa-2	02/12/98	3,40	1,57	6,61	0,20	2,14	7,33	0,24	1,41	6,01	0,13	0,73	6,92	89,94	90,82	61,67	34,14
Tuineje-3	05/12/98	0,25	0,17	0,09	<0,5	0,10	0,09	0,00	0,02	0,07	0,00	0,01	1,09	9,91	80,04		8,16
Pájara-3	05/12/98	0,50	0,33	2,13	0,13	0,42	2,28	0,07	0,44	1,87	0,04	0,23	14,66	>100	87,79	30,74	54,78
Morro de Velosa-3	05/12/98	0,30	0,08	0,39	0,03	0,19	0,31	0,01	0,06	0,25	0,01	0,03	3,32	72,27	64,87	20,86	16,52
Pozo Negro-3	05/12/98	0,60	0,25	0,57	0,03	0,37	0,54	0,02	0,10	0,44	0,01	0,05	2,87	41,65	77,65	36,07	14,28
Tuineje-4	07/01/99	1,00	0,25	0,74	0,03	0,31	0,73	0,02	0,14	0,60	0,01	0,07	2,35	56,96	81,21	49,33	23,44
Pajara-4	07/01/99	0,65	0,25	0,96	0,03	0,29	0,90	0,03	0,17	0,74	0,02	0,09	4,45	70,10	77,22	60,71	30,91
Pozo Negro-4	07/01/99	1,30	0,50	0,96	0,08	0,85	0,96	0,03	0,18	0,79	0,02	0,10	2,37	37,26	82,10	21,51	11,22
Pájara-5	15/03/99	0,75	0,66	3,57	0,08	0,48	3,89	0,12	0,75	3,19	0,07	0,39	16,65	>100	89,39	87,32	81,18
Tuineje_5	12/03/99	1,75	0,99	5,05	0,15	1,06	5,73	0,18	1,10	4,69	0,10	0,57	10,50	>100	92,95	64,22	53,85
Pozo Negro-5	15/03/99	1,30	0,58	3,65	0,23	0,69	3,75	0,12	0,72	3,07	0,06	0,37	9,26	>100	84,10	28,05	54,53
P. Rosario-5 (*)	12/03/99	0,85	0,17	0,17	0,03	0,10	0,20	0,01	0,04	0,16	0,00	0,02	0,74	22,96	92,75	13,26	18,90
Tuineje-6	26/03/99	1,25	0,41	0,96	0,05	0,17	1,38	0,04	0,27	1,13	0,02	0,14	3,55	64,44	>100	46,51	82,87
Pájara-6	26/03/99	0,60	0,33	1,65	0,05	0,21	1,97	0,06	0,38	1,62	0,03	0,20	10,56	>100	97,84	66,43	94,70
Pozo Negro-6	26/03/99	0,50	0,25	0,61	0,03	0,08	0,71	0,02	0,14	0,58	0,01	0,07	4,53	54,79	94,84	47,45	84,55
Morro de Velosa-6	26/03/99	2,35	1,07	4,48	0,20	1,31	4,88	0,16	0,94	4,00	0,08	0,49	6,66	87,50	89,21	41,05	37,15
Pájara-8	16/11/99	1,45	0,74	3,39	0,10	0,52	4,033	0,13	0,78	3,30	0,07	0,40	8,93	>100	97,37	67,85	77,38
Pájara_9	02/12/99	0,75	0,50	0,70	0,03	0,12	1,043	0,03	0,20	0,85	0,02	0,10	4,47	40,54	>100	70,22	83,42
Morrovelosa_9	02/12/99	0,85	0,33	0,61	0,03	0,08	0,620	0,02	0,12	0,51	0,01	0,06	2,34	36,16	83,46	41,76	74,40
G. Pozo Negro 9	02/12/99	0,25	0,25	0,39		0,06	0,395	0,01	0,08	0,32	0,01	0,04	5,07	30,68	82,62		63,13
													%Ca	%Mg	%Na	%K	%SO4
Media													6,67	69,4	93,7	52,9	48,2
Mediana													5,86	69,8	91,19	49,3	51,7
Desv. típica													4,25	33,9	14,51	21,5	26

**Tabla 4.4.-** Concentración iónica de la lluvia (meq L<sup>-1</sup>), concentración teórica de la lluvia calculada para un origen marino (meq L<sup>-1</sup>) y % del ion en el agua de lluvia que puede ser explicado por un origen marino. (Mar = concentración en meq L<sup>-1</sup> calculada para un origen marino. Media, mediana y desviación típica del valor porcentual del ion en el agua de lluvia que puede ser explicado por un origen marino. (\*) = muestras de lluvia que no incluyen deposición seca.

Para este análisis sólo se han considerado las muestras de lluvia recogidas en los vasos colectores de agua de lluvia.

La Tabla 4.4 presenta para cada una de las muestras las concentraciones medidas de rCa, rMg, rNa, rK y rSO<sub>4</sub>, la concentración iónica teórica calculada en el caso de proveniencia marina y el porcentaje del ion en el agua de lluvia que puede ser explicado por un origen marino. Las características principales que se desprenden de estos resultados son:

a.- La concentración de sodio medida en las muestras de precipitación se ajustan bien con los valores calculados para un origen marino.

b.- Los contenidos de Mg, K y SO<sub>4</sub> en las muestras presentan una menor influencia del mar respecto al sodio, pero igualmente definida por un origen marino.

c.- El 90% del calcio presente en el agua de lluvia tiene un origen distinto al marino. Esta aportación estaría asociada partículas de calcita transportadas por el viento y que han sido depositadas en los colectores de agua de lluvia.

d.- Algunas muestras de lluvia presentan un exceso de sodio y magnesio que no puede ser explicado por la aportación marina. La mayoría de las muestras que presentan un exceso de sodio corresponden a las muestras tomadas el 1/02/98. No se descarta que el exceso de sodio este relacionado con una contaminación inicial de los vasos tomamuestras, al corresponder estos a envases de agua embotellada. En el caso de las muestras con un exceso de magnesio, en la mayoría de los casos corresponden a muestras tomadas en la estación de Pájara, por lo que no se supone una fuente de aportación local relacionada con los tipos litológicos de sector (rocas intrusivas de composición básica y ultrabásica).

e.- Al evaluar la influencia del mar en las distintas estaciones de monitoreo, en Pájara es donde mayor peso tiene el mar en la composición química del agua de lluvia. Al estar esta estación de monitoreo en la vertiente occidental de la isla, al resguardo de los vientos procedentes de África y que traen consigo partículas de calcita, la influencia marina en la composición química del agua de lluvia es mayor.

f.- Las muestras de lluvia que no incluyen en su composición química la deposición seca (Puerto del Rosario-0 y Puerto del Rosario-5) presentan una menor aportación iónica de origen marino respecto a las muestras que incorporan la deposición seca. En estas muestras sólo el ión sodio tiene una componente importante de origen marino.

#### **4.3.4.- Cuantificación de la aportación atmosférica**

Para el estudio de aportación iónica se han considerado los iones cloruro, sodio, sulfato, calcio, bicarbonato y magnesio. La Tabla 4.5 presenta el valor estimado de aportación diaria por metro cuadrado para cada uno de los eventos de lluvia, y la Tabla 4.6 presenta la media, mediana y desviación típica de la aportación de cada una de las estaciones de muestreo. No se ha realizado el cálculo de la media y mediana en la estación de Morro de Velosa debido al escaso número de muestras y a la gran variación en los valores de las aportaciones iónicas de cada muestra. El cálculo del valor medio de la aportación iónica de



cada estación se realizó de dos maneras: a) considerando todas las muestras de lluvia y b) descartando aquellos valores con elevadas concentraciones iónicas atribuidas a las primeras lluvias del otoño. En general se puede observar que los valores de la desviación típica son muy altos cuando en el cálculo de la media y la mediana de la aportación de cada ión se hace considerando todas las muestras de lluvia. Al comparar los valores medios y medianos de la aportación de cada ión en cada una de las estaciones de muestreo se observa una mayor correlación de los valores medianos respecto a los valores medios. Las aportaciones medianas de cloruro, sodio y magnesio en las tres estaciones de muestreo son muy parecidas cuando se consideran sólo las muestras más representativas de cada estación. La aportación de cloruro oscila entre 5,4 y 7,0 meq m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>, la de sodio entre 3,5 y 3,6 meq m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup> y la de magnesio entre 0,7 y 0,9 meq m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>. Las aportaciones de calcio, sulfato y bicarbonato presentan mayores variaciones en las aportaciones para cada estación de muestreo.

TOPONIMIA	Fecha	P (mm)	T(días)	Cl(d)	Na(d)	SO <sub>4</sub> (d)	Ca(d)	HCO <sub>3</sub> (d)	Mg(d)
Ajuy1	1-feb-98	4,8	4	0,3192	0,1788	0,0552	0,0504	0,0888	0,0020
Pozo Negro-1	1-feb-98	3,9	4	0,0215	0,0098	0,0049	0,0034	0,0020	0,0020
Morro de Velosa-1	1-feb-98	4	4	0,0220	0,0100	0,0060	0,0035	0,0060	0,0036
Pájara_1	1-feb-98	4,8	4	0,0192	0,0096	0,0096	0,0036	0,0072	0,0106
P. de Rosario-0 (*)	27-ene-98	5,3	1	0,0477	0,0265	0,0318	0,0689	0,1908	0,0015
P. de Rosario-1	1-feb-98	2,9	4	0,0203	0,0094	0,0044	0,0094	0,0232	0,0045
Tuineje-1	1-feb-98	9	4	0,0450	0,0203	0,0113	0,0090	0,0180	0,0090
V. de Ortega-1	1-feb-98	9	4	0,0360	0,0225	0,0135	0,0068	0,0270	0,0009
Tuineje-2	2-dic-98	3,4	52	0,0097	0,0060	0,0062	0,0063	0,0137	0,0005
Pájara-2	2-dic-98	1,8	52	0,0082	0,0048	0,0029	0,0018	0,0033	0,0018
Morro de Velosa-2	2-dic-98	4,8	52	0,0240	0,0140	0,0095	0,0063	0,0096	0,0100
Tuineje-3	5-dic-98	15	3	0,0150	0,0100	0,0250	0,0250	0,1000	0,0088
Pájara-3	5-dic-98	6,6	3	0,1782	0,1078	0,0440	0,0220	0,0836	0,0081
Morro de Velosa-3	5-dic-98	24,2	3	0,0887	0,0726	0,0726	0,0484	0,1775	0,0098
Pozo Negro-3	5-dic-98	9,8	3	0,0621	0,0425	0,0588	0,0392	0,1176	0,0016
Tuineje-4	7-ene-99	17,8	33	0,0140	0,0092	0,0081	0,0108	0,0329	0,0008
Pájara-4	7-ene-99	8,4	33	0,0081	0,0056	0,0036	0,0033	0,0117	0,0033
Pozo Negro-4	7-ene-99	17,9	33	0,0184	0,0119	0,0222	0,0141	0,0418	0,0032
Pájara-5	15-mar-99	27	68	0,0548	0,0326	0,0091	0,0060	0,0099	0,0056
Tuineje-5	12-mar-99	30,6	65	0,0956	0,0546	0,0240	0,0165	0,0169	0,0041
Pozo Negro-5	15-mar-99	39,7	68	0,0776	0,0490	0,0193	0,0152	0,0403	0,0148
P. de Rosario-5 (*)	12-mar-99	7,4	1	0,0518	0,0296	0,0370	0,1258	0,3922	0,0025
Tuineje-6	26-mar-99	7,1	14	0,0249	0,0112	0,0041	0,0127	0,0365	0,0026
Pájara-6	26-mar-99	7,1	11	0,0452	0,0245	0,0065	0,0077	0,0116	0,0014
Pozo Negro-6	26-mar-99	5,3	11	0,0120	0,0067	0,0019	0,0048	0,0183	0,0213
Morro de Velosa-6	26-mar-99	18	11	0,2831	0,1685	0,1031	0,0769	0,1325	0,0000

**Tabla 4.5.-** Aporte de cloruro, sodio, sulfato, calcio, bicarbonato y magnesio correspondiente a cada uno de los análisis de agua de lluvia muestreadas durante el período 1998-1999. Los aportes están en unidades de g m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> (d). P = precipitación acumulada e el período en mm.

Punto	Cl	Na	SO <sub>4</sub>	Ca	HCO <sub>3</sub>	Mg
<b>Pájara</b>						
Media (1)	19,1	11,2	4,6	2,7	7,7	1,2
Mediana (1)	11,75	6,22	2,8	1,7	3,9	1,1
Desv. Típica (1)	23,59	14,3	5,7	2,7	11,2	1,1
Media (2)	9,89	5,6	2,3	1,6	3,2	0,7
Mediana (2)	7	3,5	2,3	1,3	3,6	0,9
Desv. Típica (2)	7,8	4,5	1,1	0,9	1,3	0,5
<b>Pozo Negro</b>						
Media (1)	13,9	8,7	7,8	5,6	16	1,5
Mediana (1)	7,8	4,4	7	5,1	14	1,1
Desv. Típica (1)	10,7	7,3	8,2	5,2	14,7	1,1
Media (2)	6,3	3,4	3,5	2,7	7,5	0,8
Mediana (2)	6,7	3,5	1,7	1,7	6,6	0,7
Desv. Típica (2)	1,7	0,9	4	2,1	7,3	0,3
<b>Tuineje</b>						
Media (1)	12,4	6,7	4,7	4,8	13,2	1,5
Mediana (1)	7,2	3,8	3,5	4,2	9,2	1,2
Desv. Típica (1)	11,9	6,6	3,3	2,4	11,8	1,2
Media (2)	7,9	4,1	3,9	4,6	14,6	1,4
Mediana (2)	5,4	3,6	2,9	3,9	12	0,9
Desv. Típica (2)	5,1	1,9	3	2,6	16,6	0,3

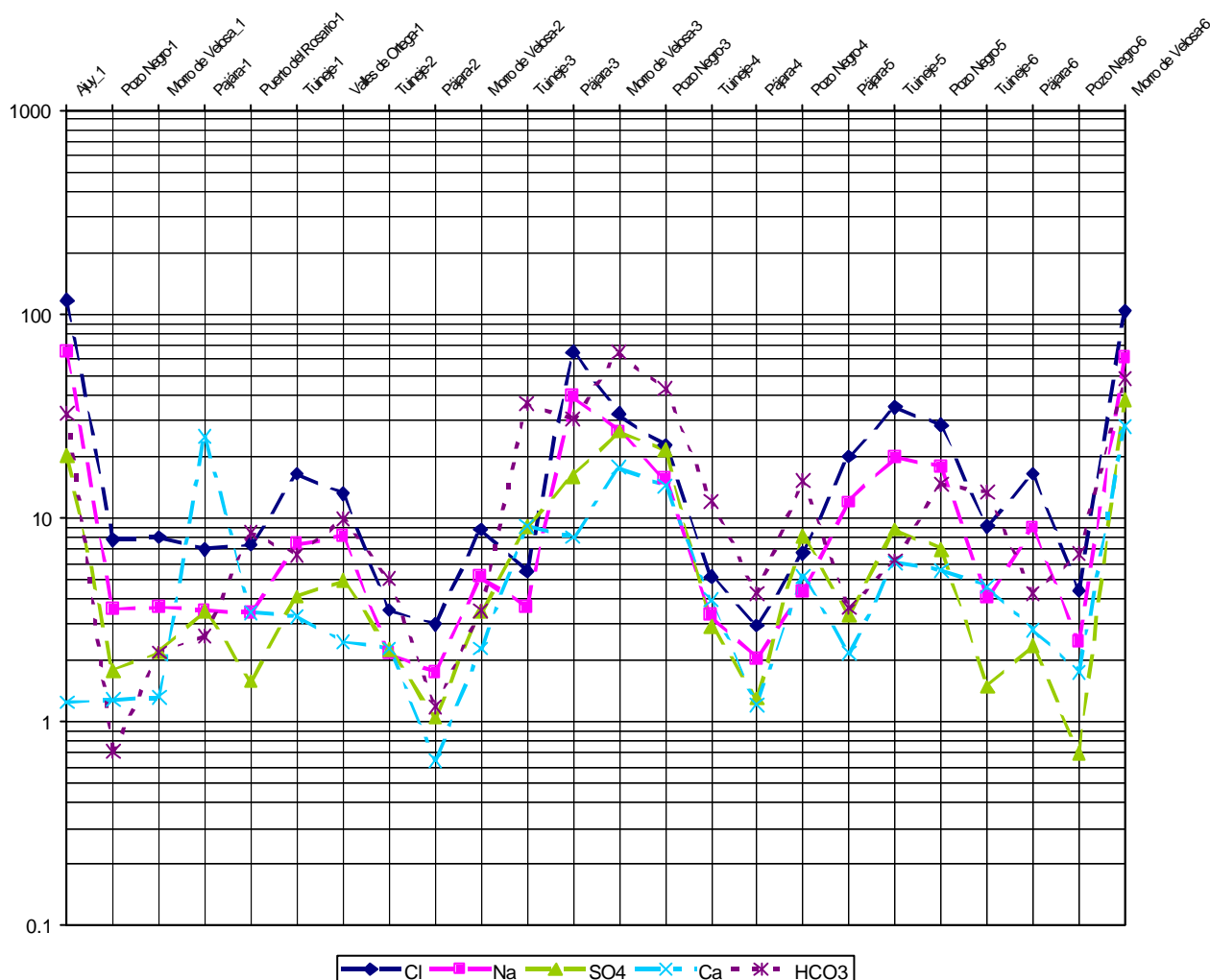
**Tabla 4.6.-** Aportación media de cloruro, sodio, sulfato, calcio, bicarbonato y magnesio correspondiente a cada una de las estaciones de muestreo. Los aportes están en  $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$  (a). (1) valor medio, mediano y desviación típica considerando todas las muestras de lluvia y (2) valor medio, mediano y desviación típica descartando las muestras más salinas (otoño).

La Figura 4.7 presenta la aportación anual por metro cuadrado de los iones indicados anteriormente para cada uno de los eventos de precipitación. Se excluyen de esta representación las muestras que no incluyen la deposición seca, así como las últimas muestras de lluvia de las cuales no se dispone del valor de la precipitación caída. Esta distribución pone de manifiesto una importante correspondencia entre los distintos eventos de lluvia y la cantidad de aportación iónica de cada ión.

Los valores más altos de aportación iónica corresponden a una muestra tomada en la localidad de Ajuy, la cual presenta una concentración elevada de cloruro, sodio y sulfato, pero una baja concentración de calcio. Las elevadas concentraciones de estos iones son atribuidas a la gran cantidad de deposición seca, en buena parte debida al aerosol marino, acumulado en el tomamuestra, al situarse el vaso en una zona de fuertes vientos y próxima a la costa (50 m). La baja concentración de calcio es atribuida al escaso polvo acumulado en el tomamuestras.

En dos muestras lluvia tomadas en Puerto del Rosario (27/01/98 y 12/03/99) y cuya composición iónica no integra el polvo atmosférico, las concentraciones de cloruro, sodio y sulfato son prácticamente iguales (Tabla 4.5). Sin embargo estos datos no son concluyentes al

ser muy pocos, y además no consideran la cantidad de precipitación caída, pues en ambos casos corresponden a una cantidad de precipitación aproximadamente igual (7 mm).

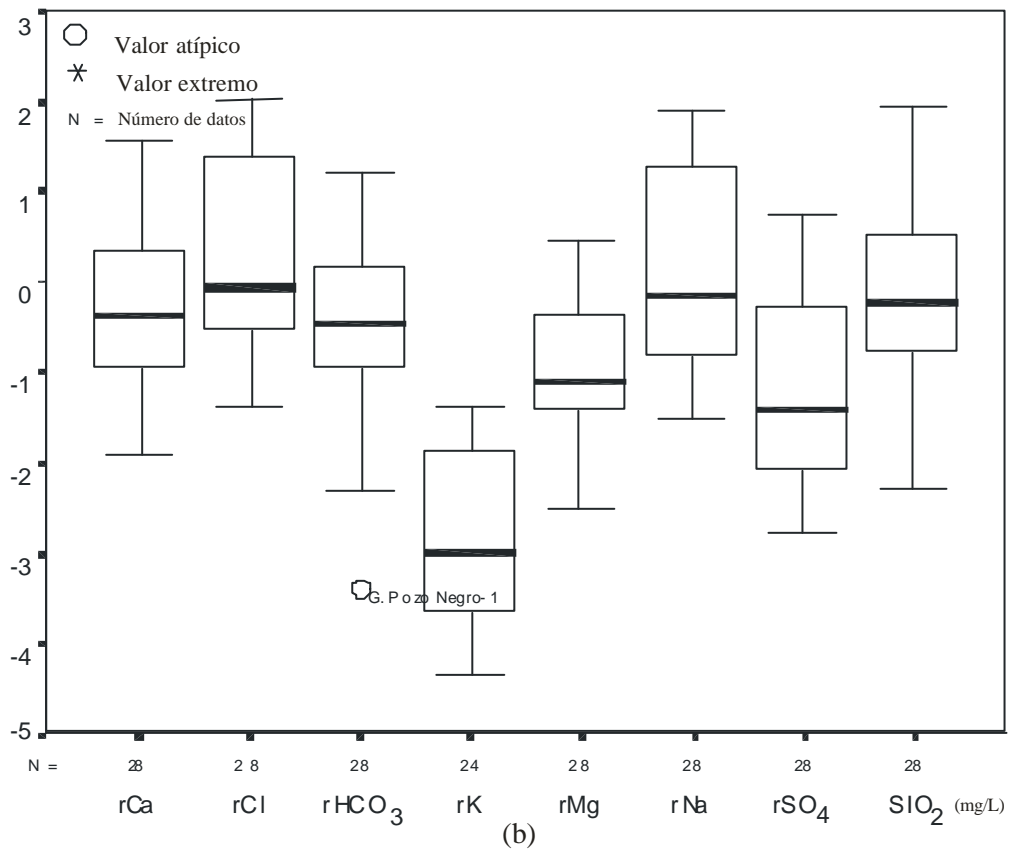
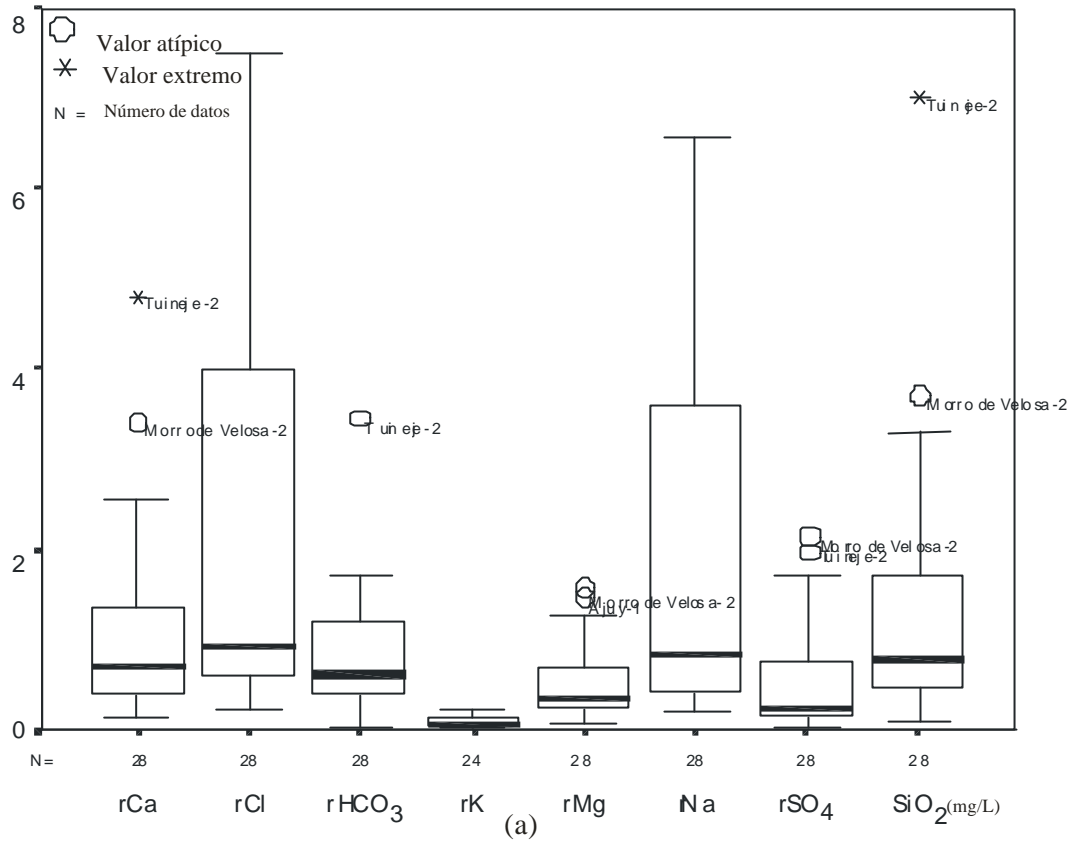


**Figura 4.7.-** Representación de la aportación anual de cloruro, sodio, sulfato, calcio y bicarbonato ( $\text{g año}^{-1} \text{m}^{-2}$ ) para cada una de las muestras de precipitación.

#### 4.3.5.- Análisis multivariante

Para el estudio de las relaciones entre las distintas variables químicas de la precipitación y el grado de relación entre las distintas muestras se ha utilizado el análisis cluster y el análisis de componentes principales. Para la aplicación de estas técnicas fue necesaria la normalización de los datos por medio de la transformación logarítmica.

Las Figura 4.8 muestra los diagramas “box-plot” (o de bigotes) de la distribución de las muestras para las distintas variables sin transformación y una vez aplicada la transformación logarítmica. Se observa que la transformación aproxima bastante las muestras a una distribución de tipo normal. La aplicación de la prueba estadística de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors para todas las variables, una vez aplicada la transformación, ratifica que es aceptable la hipótesis de su distribución normal.



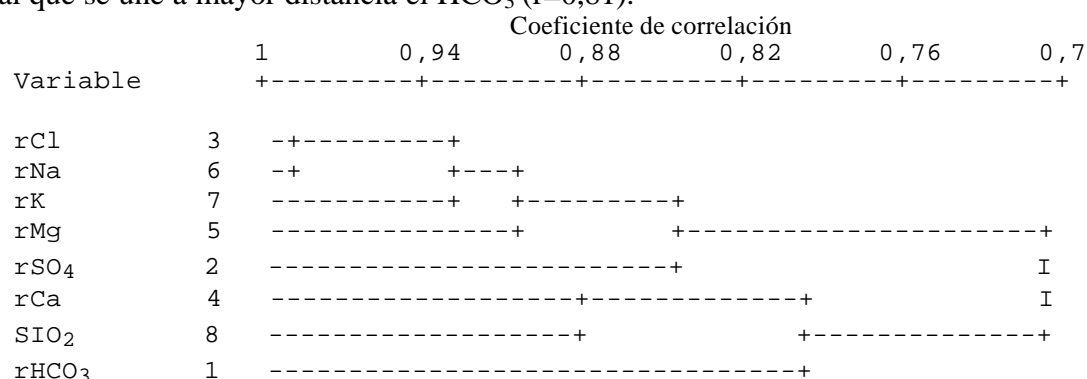
**Figura 4.8.** Diagramas de bigotes de: (a) concentraciones iónicas de la precipitación (meq/l) (b) logaritmo de la concentraciones iónicas de la precipitación.

Los parámetros seleccionados para el análisis multivariado han sido: rCl, rSO<sub>4</sub>, rHCO<sub>3</sub>, rCa, rMg, rNa, rK y SiO<sub>2</sub> (mg L<sup>-1</sup>). Se ha prescindido del ion NO<sub>3</sub> debido a que varios análisis presentan concentraciones inferiores a los límites de detección analíticos. El boro también ha sido descartado ya que sólo en los últimos 11 análisis se hizo esta determinación y, por lo tanto, el número de datos no es suficiente para obtener buenos resultados. El bromuro también ha sido descartado debido a la estrecha correlación que presenta con el cloruro.

### Análisis de variables

#### Cluster

La Figura 4.9 presenta el dendograma obtenido para el cluster jerárquico de variables. La Tabla 4.7 presenta la matriz de correlaciones de entrada para el análisis cluster o de enjambres. En el dendograma resultante se observan dos grupos principales con un bajo nivel de correlación (0,72). En el primer grupo esta el par Cl-Na con un coeficiente de correlación de r = 0,99, al que a una distancia algo mayor se unen el K(r=0,93), Mg (r=0,91) y SO<sub>4</sub> (r=0,85), constituyendo todos un gran conglomerado. El segundo conglomerado esta constituido por las variables Ca y SiO<sub>2</sub> que presentan un coeficiente de correlación de 0,89 y al que se une a mayor distancia el HCO<sub>3</sub> (r=0,81).



**Figura 4.9.-** Dendograma obtenido a partir del logaritmo de las concentraciones (meq L<sup>-1</sup>) de agua de lluvia.

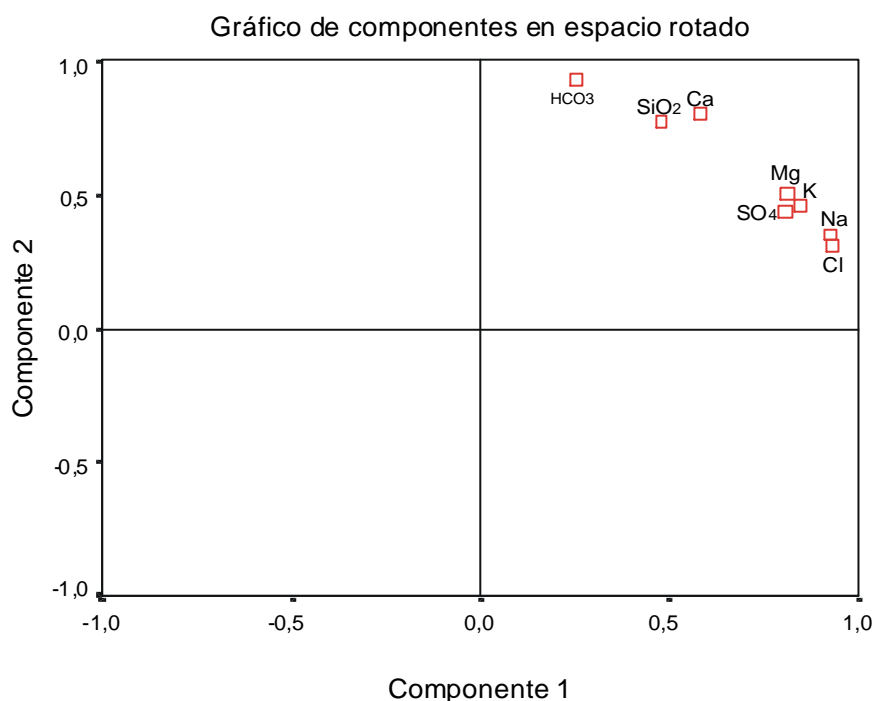
Variable	rHCO <sub>3</sub>	rSO <sub>4</sub>	rCl	rCa	rMg	rNa	rK	SiO <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> )
rHCO <sub>3</sub>	1	0,62	0,52	0,88	0,67	0,58	0,67	0,74
rSO <sub>4</sub>	0,62	1	0,82	0,83	0,83	0,87	0,9	0,67
RCl	0,52	0,82	1	0,79	0,93	0,99	0,91	0,7
RCa	0,88	0,83	0,79	1	0,89	0,81	0,84	0,89
RMg	0,67	0,83	0,93	0,89	1	0,92	0,88	0,79
RNa	0,58	0,87	0,99	0,81	0,92	1	0,95	0,71
RK	0,67	0,9	0,91	0,84	0,88	0,95	1	0,73
SiO <sub>2</sub>	0,74	0,67	0,7	0,89	0,79	0,71	0,73	1

**Tabla 4.7.-** Matriz de correlaciones de entrada para el análisis cluster de variables de la precipitación (r = meq L<sup>-1</sup>).

Una primera interpretación de estos resultados hace suponer que el primer grupo integra a los iones cuyo origen es esencialmente marino. Estos provendrían del aerosol marino que se acumula en los recipientes o que esta en el aire y es arrastrado por la lluvia. El mayor o menor grado de correlación de cada ión con el cloruro indica la mayor o menor influencia del ion de origen marino en las muestras de lluvia. No obstante es necesario destacar los altos coeficientes de correlación de cada una de las muestras que integran este grupo con el cloruro, los que indiscutiblemente definen un origen en común. El segundo grupo, compuesto por los iones Ca, SiO<sub>2</sub> y HCO<sub>3</sub> provendría de la disolución del polvo que se acumula en los recipientes (deposición seca). En este grupo el origen puede ser variado según los minerales o fragmentos líticos que se acumulan en los vasos tomamuestras.

### Análisis de componente principales

Semejante a los resultados obtenidos en el análisis cluster, en el análisis de componentes principales se han obtenido dos factores principales que explican el 92,1% de la varianza total (I: 55,01% y II: 37,07%). La Tabla 4.8 presenta los coeficientes de estructura con la correlación entre los componentes y las variables. Las variables con más peso sobre la primera componente corresponden a cloruro, sodio, magnesio, potasio y sulfato, mientras que a la segunda componente se encuentran más próximos las variables bicarbonato, sílice y calcio (Figura 4.10).



**Figura 4.10.-** Representación sobre dos factores en espacio factorial rotado del análisis de componentes principales de las variables de la precipitación.

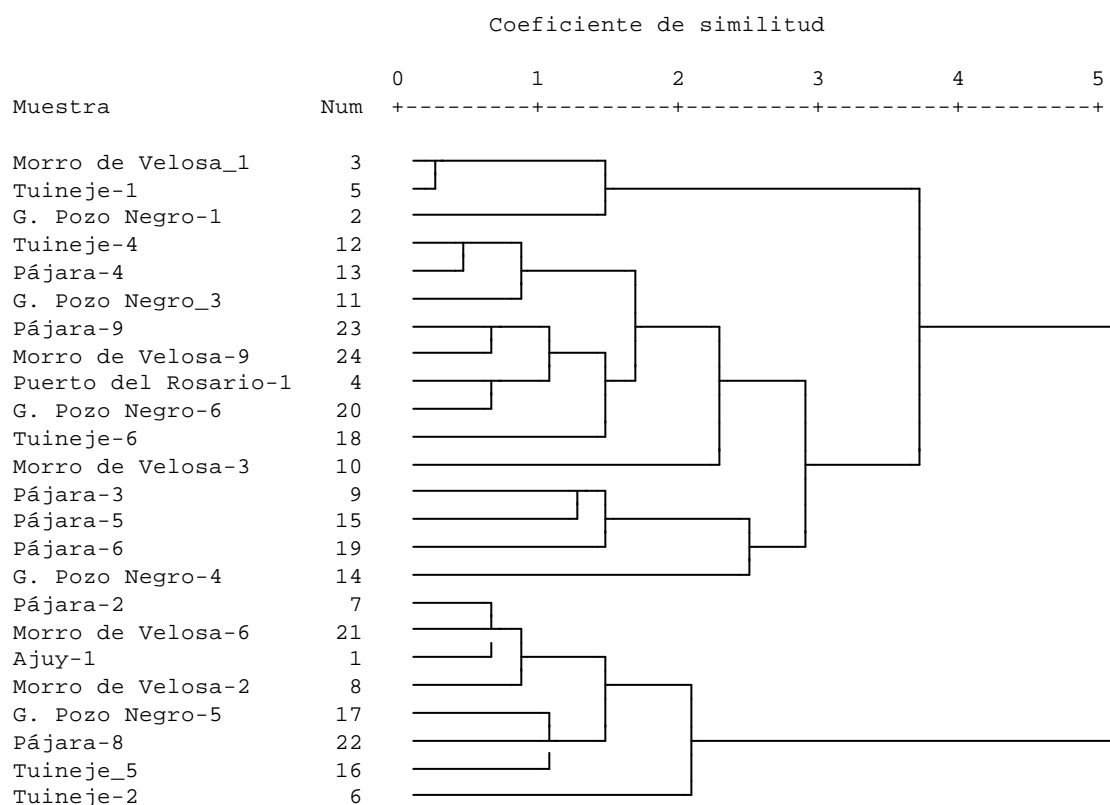
	Componente	
	1	2
HCO <sub>3</sub>	0,25	0,93
SO <sub>4</sub>	0,8	0,43
Cl	0,93	0,3
Ca	0,58	0,8
Mg	0,81	0,51
Na	0,93	0,35
K	0,85	0,45
SiO <sub>2</sub>	0,48	0,77

**Tabla 4.8.-** Coeficientes de estructura con la correlación entre los componentes rotados y cada una de las variables.

Análisis de casos

*Cluster*

Una primera aproximación al análisis cluster de casos se realizó utilizando como matriz de entrada la distancia euclidiana. Sin embargo, al tener las muestras de lluvia concentraciones de salinidad muy distintas para los distintos eventos de precipitación, el análisis queda fuertemente influenciado por esta tendencia. Así se obtuvieron conglomerados que siguen aproximadamente un patrón de eventos de lluvia, influenciado principalmente por la concentración salina de las muestras (Figura 4.11). Las muestras tomadas el 7/01/99 son las que presentan una mayor correspondencia, constituyendo un conglomerado independiente del



**Figura 4.11.-** Dendrograma de casos de la precipitación obtenido a partir de la matriz de la distancia euclidiana.

resto de muestras. No obstante, las muestras de Pájara-3 (5/12/98), Pájara-5 (11/03/99) y Pájara-6 (26/03/99) se desmarcan de esta tendencia, agrupándose en un conglomerado bien definido y que es interpretado como una mayor homogeneidad en la aportación salina en esta estación de monitoreo.

En un segundo intento se realizó el análisis cluster de casos utilizando como matriz de entrada la matriz de correlación de Pearson entre las distintas variables químicas. Con este método se intenta averiguar el grado de relación de las distintas estaciones de monitoreo a partir de la relación entre los iones disueltos. La Figura 4.12 presenta el dendograma resultante, donde se observan dos conglomerados principales con una baja correlación, en que un primer conglomerado está compuesto principalmente por muestras tomadas en Puerto del Rosario, Tuineje y Pozo Negro, y un segundo conglomerado por muestras de Pájara, Morro de Velosa y Ajuy. No obstante, algunas muestras aisladas de Tuineje y Pozo Negro se incluyen dentro del primer conglomerado, mientras que algunas muestras de Pájara y Morro de Velosa se incluyen dentro del segundo conglomerado. Estos resultados reflejan aproximadamente la distribución espacial de las estaciones de monitoreo, pues las estaciones de Ajuy, Pájara y Morro de Velosa se localizan en la vertiente occidental del macizo de Betancuria, mientras que Puerto del Rosario, Tuineje y Pozo Negro están en la vertiente oriental. A partir de estos resultados obtenidos de la caracterización hidroquímica se deduce que las muestras de lluvia de las estaciones localizadas en la vertiente occidental de la isla tienen en su composición iónica una mayor influencia marina respecto a las muestras de la vertiente oriental. Algunas muestras de lluvia obtenidas el 1/02/98 no se ajustan bien a esta tendencia, lo que puede ser consecuencia del reducido período en que se incorpora deposición seca (3 días).

#### **4.3.6.- Agua de charcos y escorrentía superficial**

En la Figura 4.13 están dibujados los diagramas logarítmicos de los análisis químicos de las muestras de charcos y de escorrentía superficial obtenidas en la precipitación del 13/03/1999. Estos fueron comparados con los datos químicos de escorrentía obtenidos por Custodio (1974) en la isla de Lanzarote y se observa que tienen características químicas similares, destacándose el exceso de Na sobre el Cl. Al compararlos con los diagramas logarítmicos de la precipitación se destaca el aumento significativo en la concentración de Na y K, siendo el Na el que presenta una mayor concentración. Las relaciones  $rNa/rCl$  y  $rCl/rK$  ponen de manifiesto que las muestras de los charcos presentan un exceso de Na y K respecto a las muestras de precipitación. Solo una muestra de escorrentía superficial recogida en Morro de Velosa (680 m) no presenta un exceso significativo de Na y K.



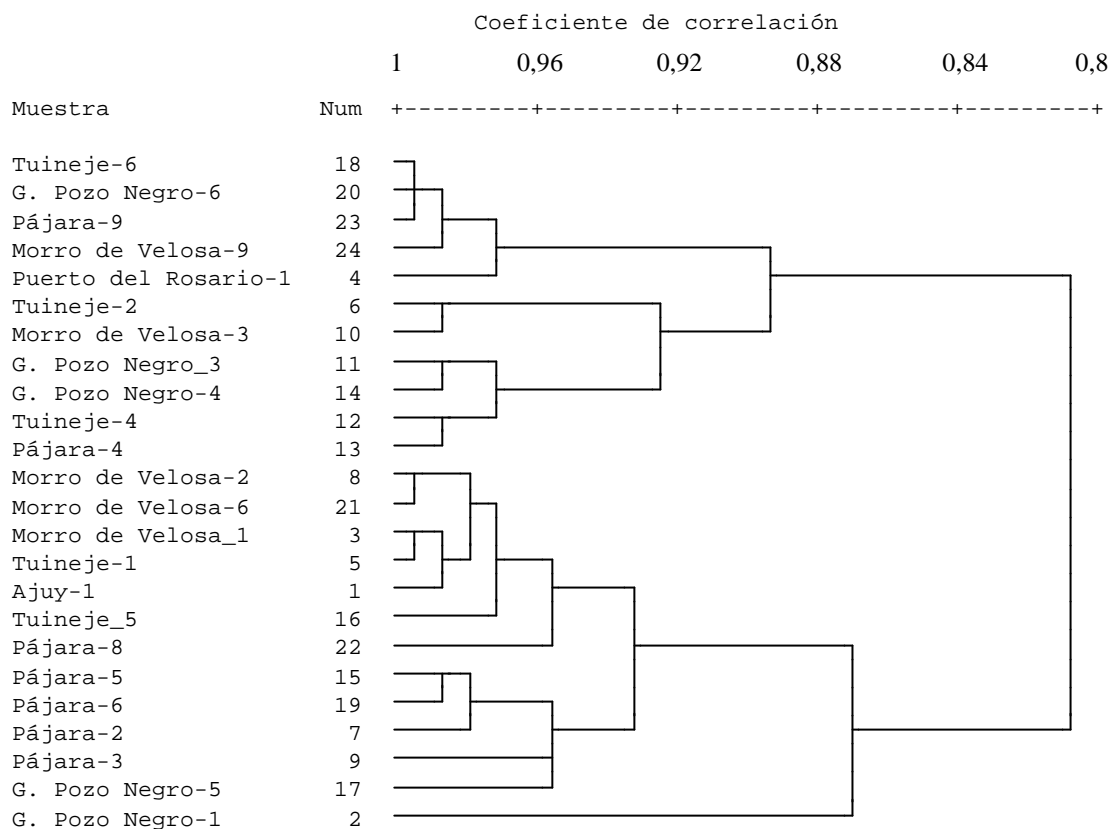
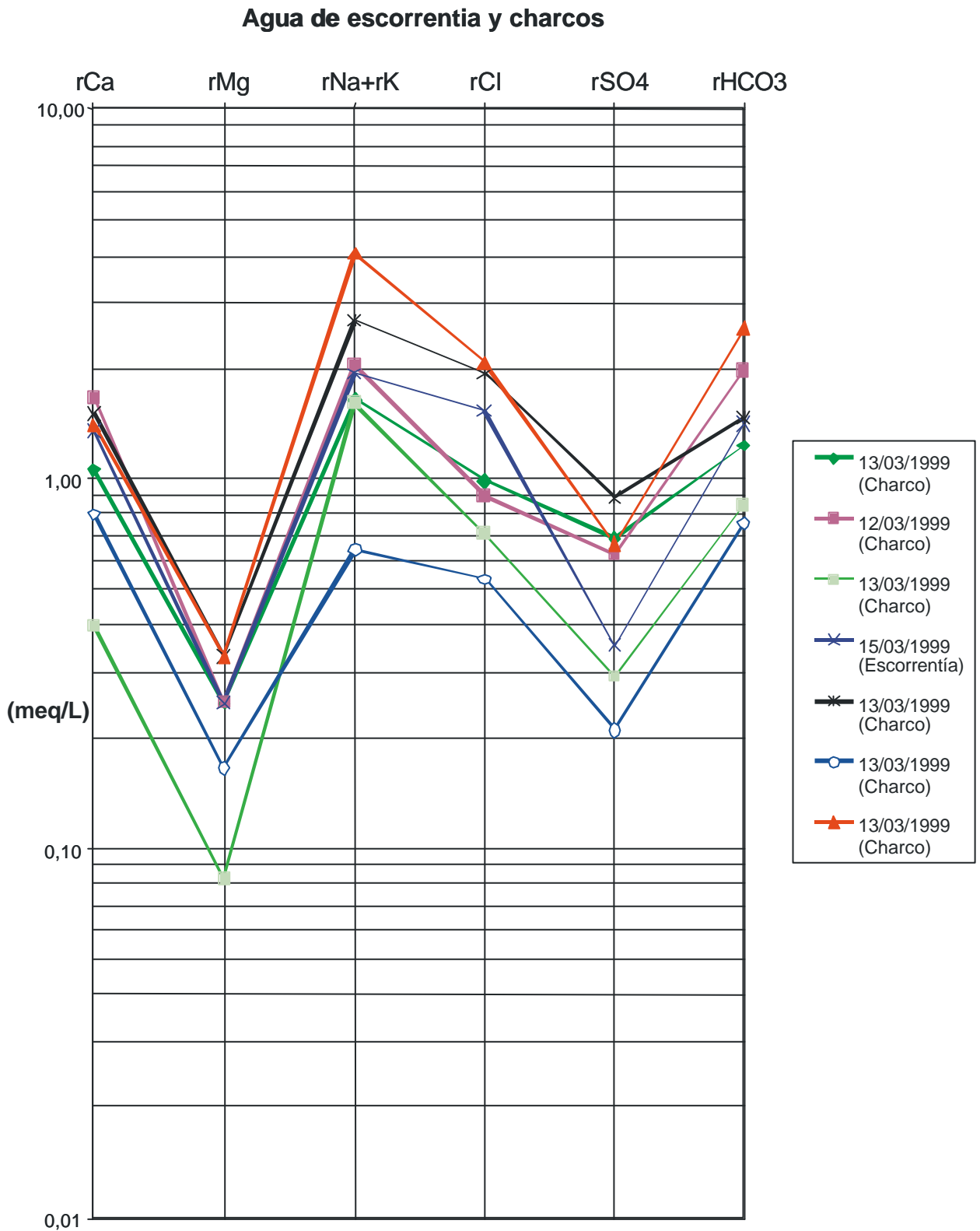


Figura 4.12.- Dendrograma de casos de la precipitación obtenido a partir de la matriz de correlaciones.

### 4.3.7.- Discusión

A partir de los resultados obtenidos por medio de técnicas hidroquímicas y estadísticas se pueden plantear dos orígenes distintos para los iones presentes en el agua de lluvia. El primero y de mayor importancia corresponde a la aportación del mar como aerosol marino que se acumula en los recipientes o que está en el aire y es arrastrado por la lluvia. El segundo corresponde a partículas de polvo (deposición seca) que se acumulan en los tomamuestras y que son disueltas por el agua de lluvia. Dentro de este último grupo se deduce la acumulación de partículas de carbonato de calcio que son depositadas en el tomamuestras y posteriormente disueltas por el agua de lluvia. Este fenómeno incidiría en algunos casos en un aumento del pH del agua de lluvia muestreada.

La composición química de las muestras de lluvia que solo incorporan deposición húmeda es de tipo bicarbonatada-cálcica, mientras que las muestras de lluvia que incorporan mayor cantidad de deposición seca tienen una composición clorurado-sódica. De la composición química de las muestras de lluvia que no incorporan deposición seca se deduce que es muy poco el aporte de aerosol marino durante la caída de las precipitaciones. La composición química de las muestras de agua de lluvia que incorporan deposición seca de



**Figura 4.13.**– Diagrama logarítmico vertical de las muestras de charcos y escorrentía recuperadas en la precipitación del 12/03/99.

unos pocos días es muy similar a la composición de las muestras que no incorporan deposición seca. En general se observa que la composición química del agua de lluvia pasa gradualmente de bicarbonatada-cálcica (cuando sólo hay deposición húmeda) a una composición clorurada-sódica a medida que aumenta el número de días de exposición de los tomamuestras a la aportación de deposición seca.

El estudio de la aportación iónica proveniente del mar pone de manifiesto que las concentraciones de Na y en menor proporción de Mg en las muestras de lluvia se ajustan bien con los valores calculados para un origen marino. Esto resulta lógico si se considera que estos iones son los más abundantes en el agua de mar después del Cl. Sí bien los datos indican un origen marino para el  $\text{SO}_4$ , no se descarta que parte del mismo proceda de la contaminación de combustibles fósiles.

La aportación iónica varía mucho según la duración de exposición de los tomamuestras. Las aportaciones alcanzan una mayor regularidad cuando el tomamuestras ha estado expuesto un mayor número de días. El cálculo de las aportaciones en las distintas estaciones de monitoreo indica que el aporte mediano anual de cloruro, sodio y magnesio en los distintos puntos de muestreo es muy regular, mientras que los aportes de calcio, sulfato y bicarbonato presentan mayores variaciones. Las mayores aportaciones corresponden a los iones cloruro y bicarbonato, aunque las aportaciones de bicarbonato presentan una desviación típica muy elevada.

Las muestras de lluvia con mayor salinidad fueron cogidas el 2/12/98 y corresponden a la primera lluvia del invierno. Estas muestras presentan una composición marcadamente clorurado-sódica que es atribuida a una mayor aportación de aerosol marino.

#### **4.4.- Características generales de la química del agua en terrenos volcánicos**

Las rocas volcánicas están constituidas casi exclusivamente por minerales silicatados, los cuales en la mayoría de los casos son insolubles. Sin embargo, estos son fácilmente alterables si existen hidrogeniones presentes y el medio es capaz de mantener (tamponar) el pH, lo cual es posible con la presencia de  $\text{CO}_2$  disuelto en cantidad suficiente (Custodio, 1978).

La aportación iónica de las rocas volcánicas al agua subterránea dependerá de los minerales con los que se pone en contacto el agua y, por lo tanto, del tipo litológico de la roca por la que circula. En general la composición catiónica del agua subterránea estará relacionada con la composición de la roca, aunque no siempre coincida con ella. Sin embargo se cumplen algunas relaciones características (suponiendo despreciables los efectos de la composición química del agua de lluvia), como que en rocas alcalinas las aguas son predominantemente sódicas y que en rocas basálticas dominan los alcalinotérreos, especialmente el magnesio (Custodio, 1978).

Es importante el papel que desempeña la temperatura del agua en los procesos de alteración de las rocas volcánicas. En ambientes volcánicos puede existir un gradiente

geotérmico anormalmente alto, el cual va a incidir en una mayor temperatura del agua en profundidad y, por lo tanto, una mayor velocidad de alteración de los minerales silicatados.

La alteración de lavas de composición basáltica no sólo dependerá de las características químicas del agua que ataca la roca, sino también del grado de cristalinidad de la roca. Los estudios de laboratorio realizados por Sigurdur & Eugster (1987a) para evaluar la interacción entre las aguas meteóricas y basaltos muestran que la disolución sigue una ley lineal, en la que el vidrio basáltico se disuelve 10 veces más deprisa que el basalto cristalino.

#### **4.5.- Caracterización química del agua subterránea**

##### **4.5.1.- Datos disponibles**

En la caracterización química del agua subterránea se han estudiado, junto con los datos obtenidos en esta investigación, los análisis químicos de dos proyectos de reconocimiento previo, realizados en los períodos de 1980-82 y 1989-90. Además se dispone de una caracterización hidroquímica general de las aguas subterráneas de la isla realizada en el proyecto SPA-15 (1973), aunque no se dispone de los análisis químicos utilizados.

**Serie de 1980-1982:** Los datos de este período forman parte de un inventario de captaciones de aguas subterráneas realizado en toda la isla en el marco del proyecto MAC-21 (1982) y los análisis fueron realizados en el Servicio Hidráulico de las Palmas. La mayoría de las muestras fueron obtenida en pozos, aunque también se realizaron análisis en algunos manantiales y sondeos. Dentro de este inventario se realizaron 500 análisis químicos en el área de estudio y corresponden a análisis químicos de iones mayoritarios completos de laboratorio y determinaciones en campo de pH, conductividad eléctrica, alcalinidad y temperatura, aunque las determinaciones del pH de algunas muestras parecen ser erróneas. De todos estos análisis fueron descartados aquellos pozos ubicados en el fondo de los barrancos, donde existe una actividad agrícola importante y se sospecha que pueden recibir retornos de riego. También fueron descartados los pozos abandonados que no presentan tapa de protección y que cobijan en su interior a gran cantidad de palomas que contaminan las aguas. El criterio utilizado en esta selección fue la ubicación del pozo, el contenido de  $\text{NO}_3$  y el contenido de  $\text{NH}_4$ . Para estos análisis se desconoce la profundidad y método de toma de las muestras. El error de balance iónico es inferior al 4% en el 95% de los análisis, y al ser comparados con la conductividad eléctrica ninguno es superior al límite admisible según Custodio y Llamas (1983).

**Serie de 1989-1990:** Los datos obtenidos en este período forman parte del “proyecto de actualización de la infraestructura hidrológica, vigilancia y catálogo de acuíferos” (ITGE, 1991), y los análisis fueron realizados en los laboratorios del ITGE/IGME en Madrid. A diferencia de la campaña de 1980-1982, la gran mayoría de las muestras fue tomada en sondeos profundos. En este reconocimiento se realizaron numerosos análisis químicos en el

área de estudio y en algunas captaciones se realizó en un periodo de 1 año tres campañas de muestreo en las que se hizo un análisis químico completo de las muestras y la determinación en campo de pH, temperatura y conductividad eléctrica. Los valores de pH de campo medidos en la campaña de junio de 1990 son muy altos en comparación a las tres campañas anteriores, por lo que se presume errores sistemáticos de medidas de pH debido a una mala calibración del pH-metro. El 96% de los análisis presentan un error inferior al 4%, y al comparar el porcentaje de error del balance iónico con la conductividad eléctrica se reconocen 4 muestras que superan ligeramente el error admisible, por lo que han sido desestimadas.

**Serie de 1998-1999:** Los datos de este periodo son los obtenidos en esta investigación y corresponden a muestras obtenidas en cuatro campañas en pozos, sondeos y manantiales. En total se tomaron 154 muestras de agua en 64 puntos distintos. El error del balance iónico es inferior al 4% en el 87% de los casos y sólo una muestra presentaba un error del 12%, por lo que fue descartada.

#### **4.5.2.- Determinación de algunas características hidroquímicas del Macizo de Betancuria a partir de los datos del proyecto MAC-21**

El objetivo principal de este proyecto fue la realización de un inventario de todas las captaciones de agua subterránea en la isla de Fuerteventura y la determinación de las características químicas más importantes del agua. En total se contabilizaron más de 1700 pozos excavados en toda la isla y sólo en algunos se realizó un análisis químico completo de las muestras (ITGE, 1990). Sin embargo, los datos químicos obtenidos en este reconocimiento no fueron interpretados y sólo fueron publicadas las fichas con las características físicas de la captación y en su caso el análisis químico respectivo. La validez de estos datos queda limitada por el desconocimiento del método con que fueron tomadas las muestras y por la carencia de medidas de pH y temperatura de campo fiables.

Para el estudio de los datos del proyecto MAC-21 se han considerado todos los datos de pozos ubicados en el Macizo de Betancuria, independientemente de las características químicas de las muestras. Sólo han sido descartados aquellos puntos que se sitúan en zonas donde existe una importante actividad agrícola y el agua presenta contenidos elevados de nitratos.

En una primera aproximación a la caracterización hidroquímica se ha calculado la media, mediana, percentiles y desviación típica a partir de 115 muestras. La Tabla 4.9 resume los resultados de los estadísticos más importantes. En general, las distribuciones son asimétricas con la mediana más próxima al percentil 25% que al 75%, y en algunos casos se reconoce la existencia de una segunda familia de datos con concentraciones más altas.

Estadísticos	rNa	rK	rMg	rCa	rCl	rSO <sub>4</sub>	rHCO <sub>3</sub> +rCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> (mg/L)
Media	33,06	0,60	7,53	5,81	32,18	8,21	6,76	14,55
Mediana	29,15	0,54	5,31	4,00	23,38	4,72	6,31	14,40
Media-Mediana	3,91	0,06	2,22	1,81	8,80	3,49	0,45	0,15
Máximo	82,65	1,41	40,56	39,23	98,00	55,96	27,33	36,70
Mínimo	4,35	0,16	0,39	0,48	2,36	0,17	1,52	0,40
Desv. Típica	19,93	0,30	7,00	6,22	22,35	10,19	3,52	6,71
Percentil 25%	18,49	0,36	2,81	2,30	16,98	2,56	4,97	10,80
Percentil 50%	29,15	0,54	5,31	4,00	23,38	4,72	6,31	14,40
Percentil 75%	44,81	0,82	0,82	6,35	45,99	9,55	8,00	18,00

**Tabla 4.9.-** Valores representativos de la concentración de los iones mayoritarios (meq L<sup>-1</sup>) y SiO<sub>2</sub> (mg L<sup>-1</sup>) de pozos muestreados en el proyecto MAC-21 en el Macizo de Betancuria (r = meq L<sup>-1</sup>).

En la Figura 4.14(a) se dibuja el histograma de la concentración de cloruros, en el cual se distinguen dos familias de datos bien definidas. La más numerosa corresponde a las aguas de menor mineralización y presentan un valor de máxima frecuencia en torno a 20 meq L<sup>-1</sup>, mientras que el segundo grupo presenta un valor de máxima frecuencia de 60 meq L<sup>-1</sup>. Espacialmente, las muestras de pozos con mayor concentración de cloruros se sitúan en las localidades de Tuineje, Las Casitas y Vega de Río Palmas.

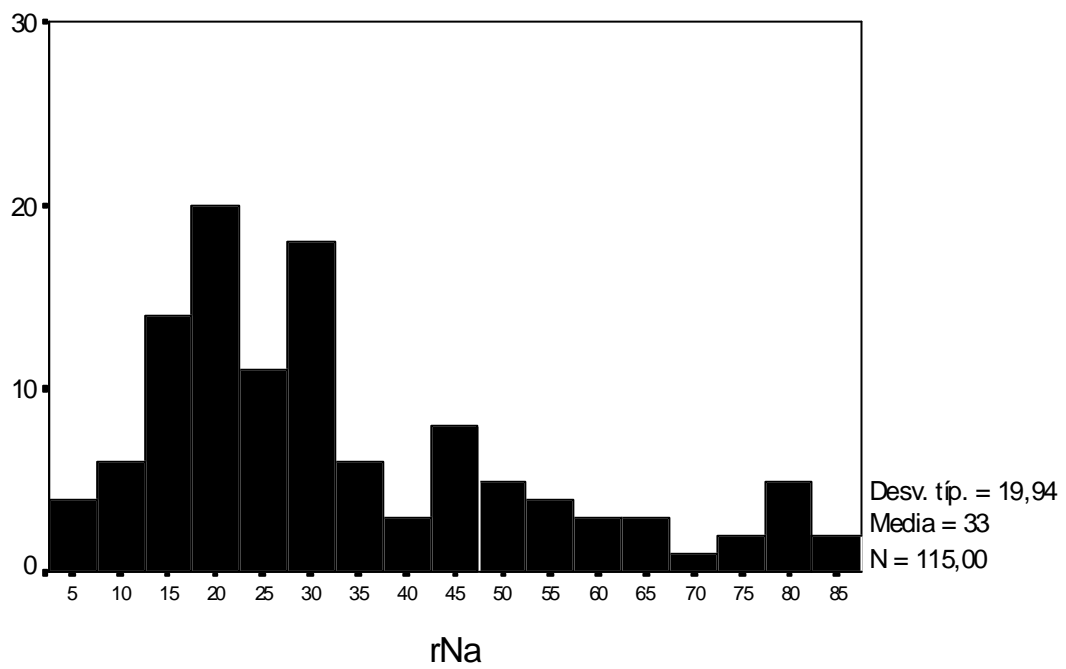
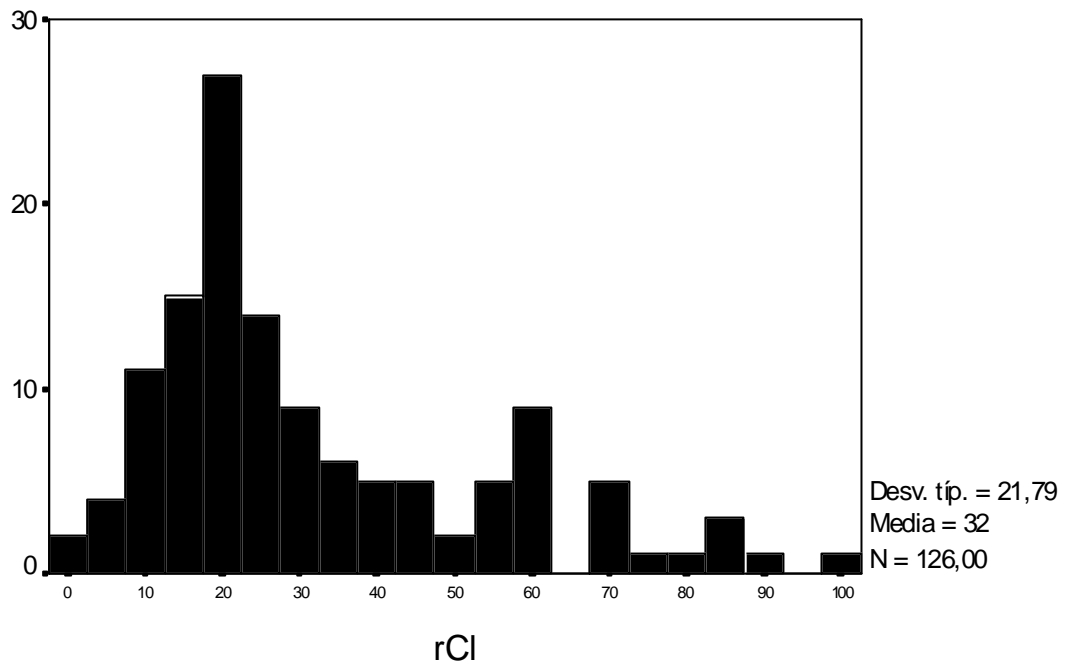
El histograma de concentración de sodio sigue una pauta similar a la del cloruro, en el se pueden separar hasta tres familias de datos distintas (Figura 4.14(b)). La más importante corresponde a las aguas de menor mineralización relativa y, al igual que el cloruro, presenta un valor de máxima frecuencia en torno a 20 meq L<sup>-1</sup>. Un segundo grupo presenta un valor de máxima frecuencia de 45 meq L<sup>-1</sup> y un tercer grupo más difuso y con sólo cuatro datos tiene un valor de máxima frecuencia de 80 meq L<sup>-1</sup>.

En el histograma de concentración de sulfatos se distingue una única familia de datos con un importante sesgo a la izquierda (Figura 4.15(a)). Si bien el rango de variación es bastante grande, puede apreciarse en el histograma que las observaciones tienden a concentrarse entre 0,1 y 10 meq L<sup>-1</sup>. Para valores de más de 10 meq L<sup>-1</sup> no existe una tendencia clara de distribución de los datos. La Figura 4.15(b) presenta la relación rCa vs. rSO<sub>4</sub>, donde se distingue una distribución irregular de puntos para concentraciones de sulfato menores a 10 meq L<sup>-1</sup>, mientras que para valores de más de 10 meq L<sup>-1</sup> de sulfato, la relación rCa vs. SO<sub>4</sub> muestran una relación mas estrecha.

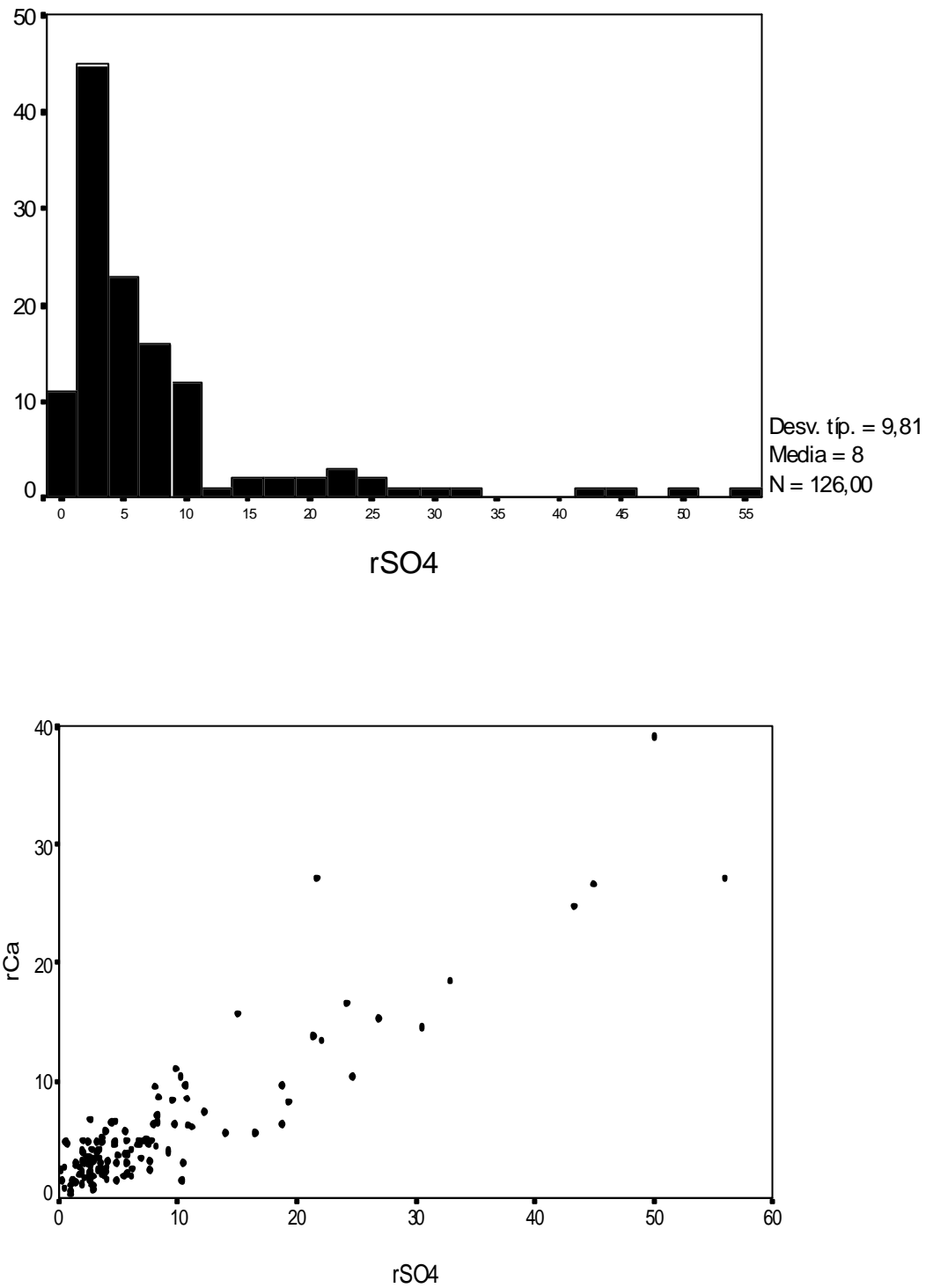
Los contenidos de SiO<sub>2</sub> (mg L<sup>-1</sup>) en el agua son bajos; alcanzan un valor medio de 14,5 mg L<sup>-1</sup>.

Las características principales que se deducen de los resultados obtenidos a partir de los datos del proyecto MAC-21 son:

a) A partir de la distribución de los contenidos de cloruro del agua subterránea se pueden interpretar dos orígenes distintos para este ión en el agua. En el caso de la familia de datos más numerosa y que presenta una menor concentración de cloruro es factible atribuirle un origen meteórico. Por otro lado, los datos con concentraciones de cloruro más altas se sitúan



**Figura 4.14.-** Histogramas de concentración de cloruro (a) y sodio (b) de las muestras de manantiales y pozos del Macizo de Betancuria obtenidos en el proyecto MAC-21. N = número de datos.



**Figura 4.15.-** Histograma de concentración de sulfato (a) y relación  $rCa/rSO_4$  (b) de las muestras de manantiales y pozos del Macizo de Betancuria obtenidos en el proyecto MAC-21 ( $r=meq/l$ ).  $N$  = número de datos.



en zonas geográficamente bien definidas, lo que hace suponer un aporte de este ion desde el medio en que circulan las aguas. En el caso del sector de Las Casitas y de Vega de Río Palmas se han identificado pequeños afloramientos de rocas intrusivas en superficie, lo que hace suponer un aporte de cloruro de esta unidad al agua.

b) La distribución de los contenidos de sodio en el agua subterránea permiten inferir hasta tres orígenes distintos de este ion en el agua. Al igual que el cloruro, la familia con más datos y menor concentración de cloruros puede tener un origen meteórico. Otro posible origen de sodio en el agua puede estar ligado a la lixiviación de plagioclasas con una componente sódica. Al igual que el cloruro, las mayores concentraciones de sodio se asocian a zonas donde afloran en superficie rocas intrusivas.

c) El histograma de concentración de sulfato posiblemente diferencia dos orígenes distintos para este ion en el agua. La relación más clara de  $rCa$  y  $rSO_4$  para concentraciones de sulfato mayor a  $8 \text{ meq L}^{-1}$ , permite inferir un origen litológico de estos iones, asociado a la disolución de yeso. Las zonas con mayores concentraciones de sulfato se sitúan espacialmente con sectores donde se reconocen rocas intrusivas

Una interpretación más completa y detallada de los datos de aguas subterráneas de pozos tomados en el proyecto MAC-21 se hace en los siguientes apartados, donde se discute la relación de estos datos en el contexto hidrogeológico regional.

#### **4.5.3.- Registros de conductividad eléctrica y temperatura en sondeos**

En algunos sondeos del área que no están siendo explotados se han realizado registros longitudinales de temperatura y conductividad eléctrica. Se realizaron dos campañas de registros de temperatura y conductividad eléctrica. En el caso de dos sondeos se puede hacer una comparación de estos parámetros físicos de una campaña a otra. La representación de los parámetros medidos en los perfiles y la descripción detallada de los mismos se presenta en el Anejo 4.4.

Los registros de temperatura y conductividad eléctrica se realizaron haciendo descender el conductímetro hasta el nivel freático, lugar desde el cual se comenzaba a medir la temperatura y conductividad eléctrica a intervalos de 1 ó 2 m, hasta alcanzar el fondo de los sondeos. Para ello se utilizó una sonda marca SEBA, que permite medir la temperatura y conductividad eléctrica del agua hasta una profundidad de 300 m. En aquellos tramos donde las medidas de conductividad eléctrica indicaban la existencia de aguas con marcadas diferencias de salinidad se realizó un muestreo selectivo de aguas subterráneas para el posterior análisis químico y eventualmente isotópico.

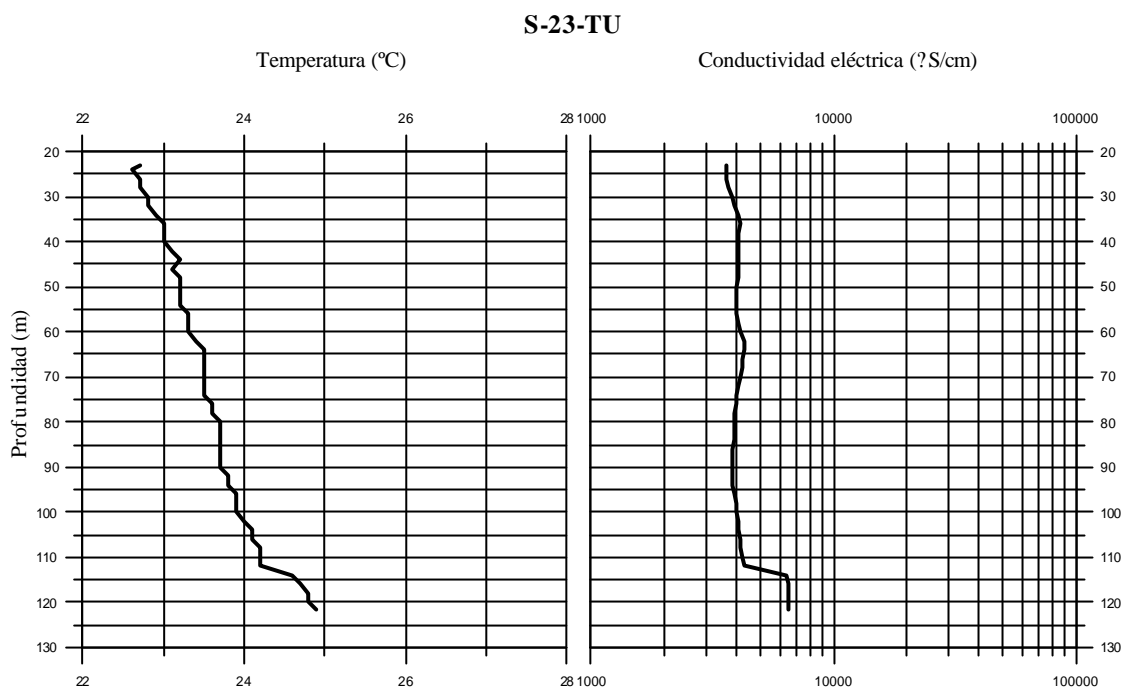
En ausencia de flujos verticales significativos de agua en el sondeo, la temperatura del terreno y la del agua debe crecer con la profundidad de forma lineal, con un gradiente vertical

medio aproximado de  $0,03 \text{ }^\circ\text{C m}^{-1}$ , aunque el valor real varía según la conductividad térmica de las rocas y el flujo térmico terrestre endógeno. El estudio de la variación de la temperatura a lo largo de una columna de agua en un sondeo permite establecer hipótesis bastante razonables acerca de la existencia de flujos verticales de agua dentro de la perforación. La existencia de flujo vertical tiene su origen en las diferencias de potencial hidráulico entre las distintas formaciones, fisuras o profundidades penetradas por una perforación, aun siendo pequeñas (Custodio, 1999). El estudio de la variación de la temperatura complementado con los datos de conductividad eléctrica ayuda a confirmar en algunos casos las hipótesis de existencia de flujos verticales en los sondeos.

A partir de los datos de los perfiles de conductividad eléctrica realizados en toda el área de estudio se observa la existencia de una estratificación importante del agua subterránea. Las mayores diferencias se registran en los sondeos ubicados en la localidad de Tesejague, donde las aguas menos mineralizadas en la parte superior de la columna de agua tiene una conductividad eléctrica  $2500 \text{ } \mu\text{S/cm}$ , mientras que las más profundas pueden alcanzar los  $24000 \text{ } \mu\text{S/cm}$ .

La interpretación simultánea de los registros de temperatura y conductividad eléctrica de la columna de agua de los sondeos permite distinguir que las aguas con marcadas diferencias de salinidad también presentan temperaturas distintas. Así, en los perfiles de temperatura el paso desde las aguas menos salinas a las aguas de mayor salinidad está caracterizado por quiebras en las temperaturas, que puede variar entre  $0,2$  y  $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$  en unos pocos metros de columna de agua.

La Figura 4.16 presenta el perfil de conductividad eléctrica y temperatura realizado en el sondeo S-23-TU, localizado en el curso superior del Barranco del Garabato y a una altitud aproximada de 345 m. El sondeo no presenta entubación en el tramo saturado y desde los 22 hasta los 110 m de profundidad el agua mantiene una conductividad eléctrica de  $4000 \text{ } \mu\text{S/cm}$  y una tendencia general del gradiente térmico ( $0,015 \text{ }^\circ\text{C m}^{-1}$ ) inferior al gradiente normal. En este tramo la excepción la constituye un ligero aumento de la conductividad eléctrica entre los 60 y 70 m de profundidad, lo cual puede ser explicado por la entrada de agua en el sondeo desde una estructura distinta, posiblemente un dique que drena agua de mayor mineralización desde otros niveles. Por otro lado entre los 114 y 115 m el agua aumenta bruscamente su temperatura de  $24,1$  a  $24,7 \text{ }^\circ\text{C}$ , lo mismo que la conductividad eléctrica, la cual pasa de los  $4000$  a los  $6500 \text{ } \mu\text{S/cm}$ . Desde los 116 a los 121 cambia el gradiente térmico, pasando a tener  $0,033 \text{ }^\circ\text{C m}^{-1}$ . El bajo gradiente térmico vertical del agua en el tramo superior de la columna de agua hace suponer un flujo vertical descendente del agua en el sondeo, capaz de mantener temperaturas de menos de  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  a más de 100 m de profundidad. El cambio brusco de la temperatura a los 114 m de profundidad es interpretado como el cese de la circulación vertical descendente por salida de agua a través de una fractura. El aumento del gradiente térmico en la parte inferior del perfil es una manifestación de la inexistencia de flujo vertical importante en esta parte del sondeo.



**Figura 4.16.-** Perfil de temperatura (°C) y conductividad eléctrica (S cm<sup>-1</sup>) del sondeo S-23-TU localizado en el Macizo de Betancuria.

De acuerdo a las temperaturas y conductividades eléctricas medidas en la mayoría de sondeos en el Macizo de Betancuria se pueden diferenciar dos familias principales de aguas subterráneas: a) aguas de menor conductividad eléctrica (2500-5500  $\mu$ S/cm) con temperaturas que oscilan entre los 18 y los 25 °C y b) aguas de mayor conductividad eléctrica (5500-24000  $\mu$ S/cm) y temperaturas variables entre los 25 y 30 °C.

### Temperatura

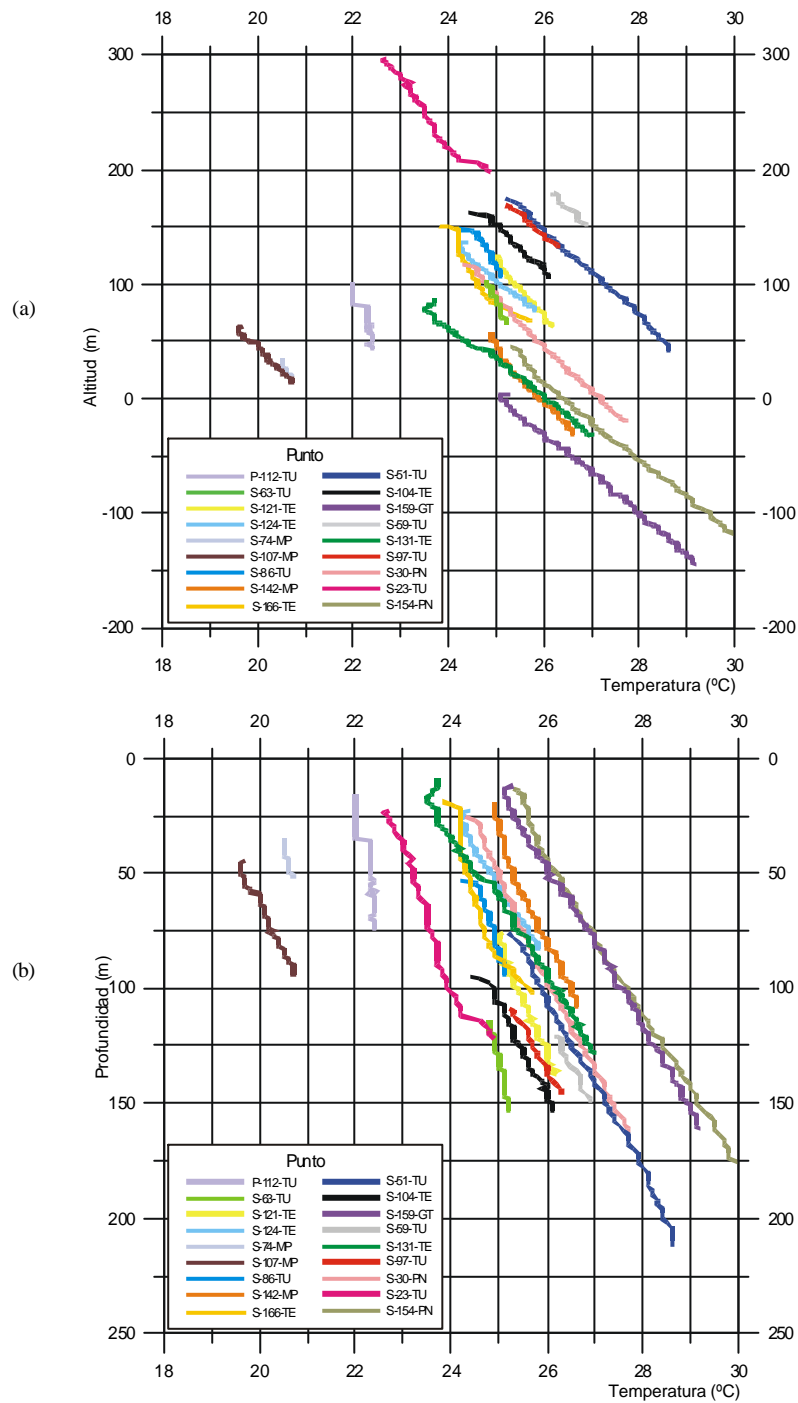
Las aguas de menor mineralización, localizadas en la parte superior de la columna de agua de los sondeos presentan temperaturas y gradientes de temperatura muy variables de un lugar a otro. Estos quedan definidos principalmente por la temperatura del agua en el momento de producirse la recarga, así como por la mayor o menor influencia de flujos verticales de agua en los sondeos. En las aguas más profundas y de mayor mineralización, en la mayoría de los casos se observa un gradiente térmico próximo al normal, lo que indica que los flujos verticales tienen menor importancia y que existe una mayor influencia de la roca en la temperatura de la columna de agua del sondeo. En el sector del Malpaís las variaciones de temperatura y conductividad eléctrica son variables de un punto a otro y en general los gradientes de temperatura a mayor profundidad son ligeramente menores al normal.

En aquellos sondeos profundos en los que sólo se reconoce agua de mayor salinidad, los gradientes de temperatura se mantienen prácticamente constantes y no se observan cambios bruscos de la temperatura a lo largo de toda la columna de agua, a excepción de los primeros metros de agua que parecen estar influenciados por la temperatura ambiente (S-51-TU, S-97-TU, S-142-MP y S-159-GT).

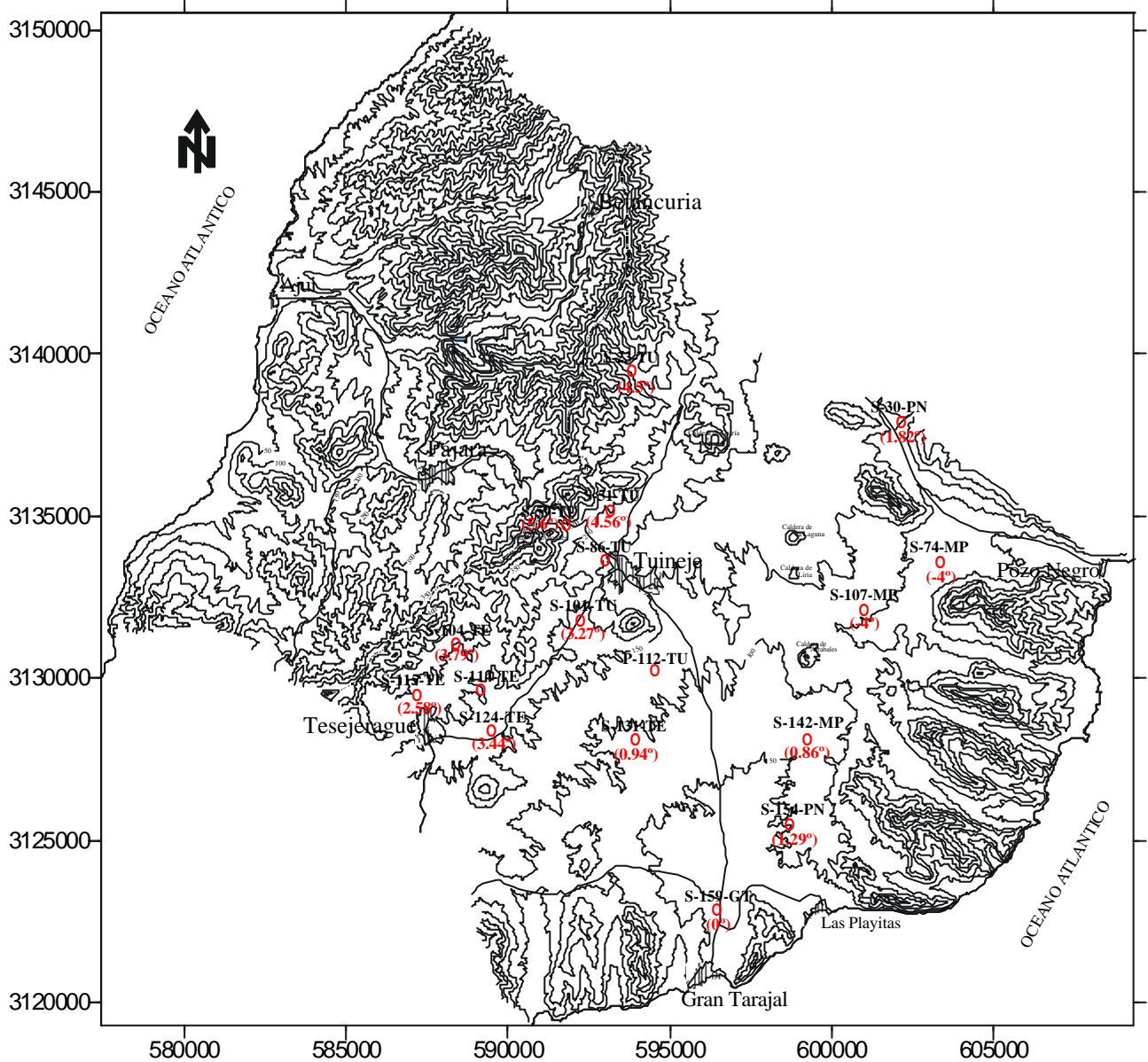
La Figura 4.17 presenta los registros de temperatura de agua de todos los sondeos del área de estudio versus la altitud respecto al nivel del mar. Se observa que la mayoría de los perfiles de temperatura presentan un gradiente térmico próximo al normal a mayor profundidad. Los gradientes más bajos corresponden a los perfiles realizados en los sondeos S-63-TU y S-85-TU, y se asocian con flujos verticales descendentes de agua en los sondeos. Ambos sondeos se sitúan en la localidad de Tuineje y por lo extendido de la explotación de aguas profundas en este sector, no se descarta que estos flujos verticales estén influenciados por el descenso piezométrico producido por las captaciones en explotación. También se observa que en la mayoría de los sondeos el gradiente térmico se aproxima al gradiente normal a mayor profundidad a partir aproximadamente de los 25 °C. Este cambio del gradiente térmico de la temperatura a partir de los 25 °C coincide con la presencia de agua de mayor salinidad correspondiente a la Unidad Inferior. La inexistencia de quiebres significativos del gradiente térmico a mayor profundidad indicaría la ausencia de flujos verticales significativos de agua en los sondeos a mayor profundidad.

A partir de las representaciones de los perfiles de temperatura de la Figura 4.17 se ha medido la variación horizontal de la temperatura de los perfiles considerando como referencia el perfil S-159-GT, que es el más próximo respecto al nivel del mar. La distribución espacial de las variaciones de temperatura obtenidas se presenta en la Figura 4.18. Se observa una correspondencia de la variación horizontal de las temperaturas con respecto a su situación espacial, localizándose los valores más altos en las partes más altas de la isla y las variaciones más bajas en sectores próximos a la costa. Se escapan a la tendencia general de distribución de las temperaturas en el agua dos registros localizados en el área de Pozo Negro y que corresponden a perfiles realizados inmediatamente encima del campo de lavas del Malpaís (S-107-MP y S-74-MP). Si bien ambos perfiles presentan un gradiente térmico próximo al normal, la temperatura del agua desde la superficie freática hasta el fondo de las captaciones es mucho menor, oscilando entre 19.5 y 20.7 °C. Además hay que destacar que los sondeos se encuentran muy próximos, situándose ambos en las lavas del Malpaís que fluyeron a través del Barranco de Pozo Negro. No se tiene una explicación precisa respecto a este fenómeno, pudiendo destacarse dos hipótesis probables:

- a) Una recarga preferencial producida por el agua de escorrentía que procede de las partes más altas del Macizo de Betancuría y que al topar con las lavas del Malpaís se encharca formando extensas lagunas en este sector.
- b) Entrada de aire a través del sistema de fisuras de estas lavas que permitiría enfriar la temperatura de las rocas, de modo similar al descrito en el campo de lavas recientes de Lanzarote (Custodio, 1989).



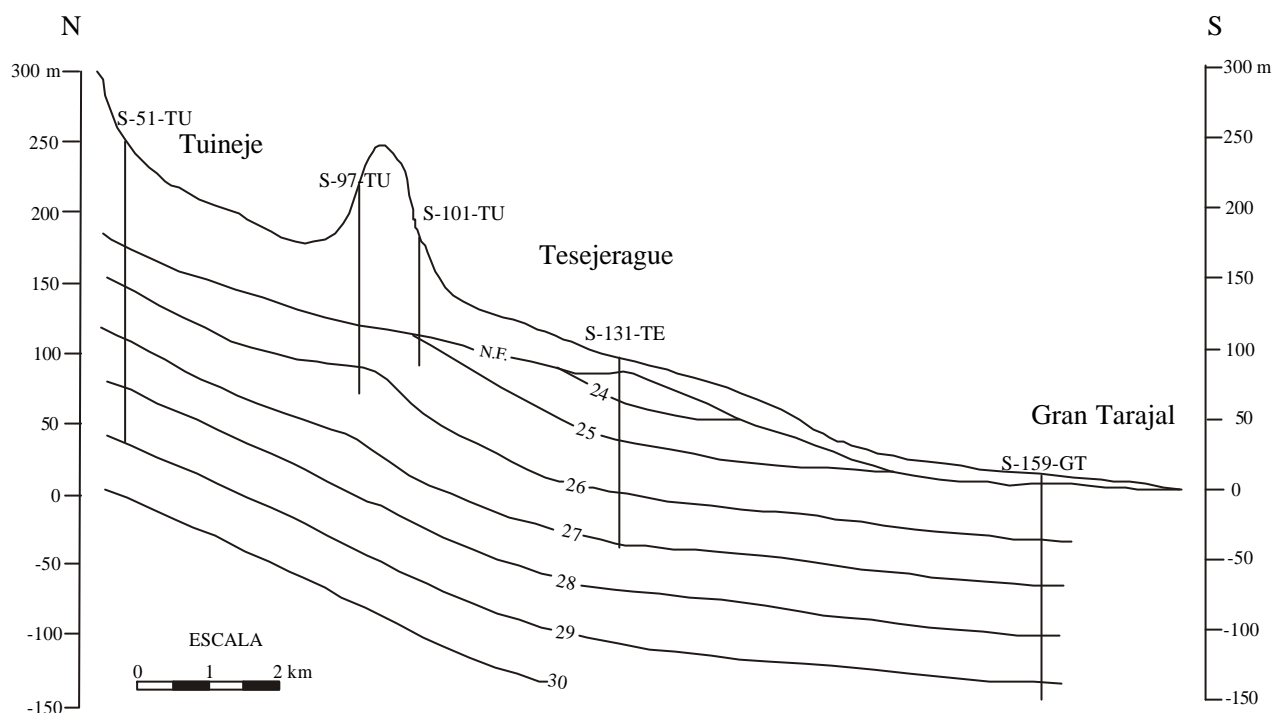
**Figura 4.17.-** Representación de todos los perfiles de temperatura (°C) del área de estudio respecto a: (a) altitud (m) respecto al nivel del mar y (b) la profundidad (m) bajo el terreno. TU= Tuineje, TE=Tesejerague, MP=Malpaís, GT=Gran Tarajal, PN=Pozo Negro.



**Figura 4.18.-** Variación horizontal de los perfiles de temperatura considerando como referencia el perfil P-5-F-J (S-159-GT). TU= Tuineje, TE= Tesejerague, MP= Malpaís, GT= Gran Tarajal y PN=Pozo Negro.

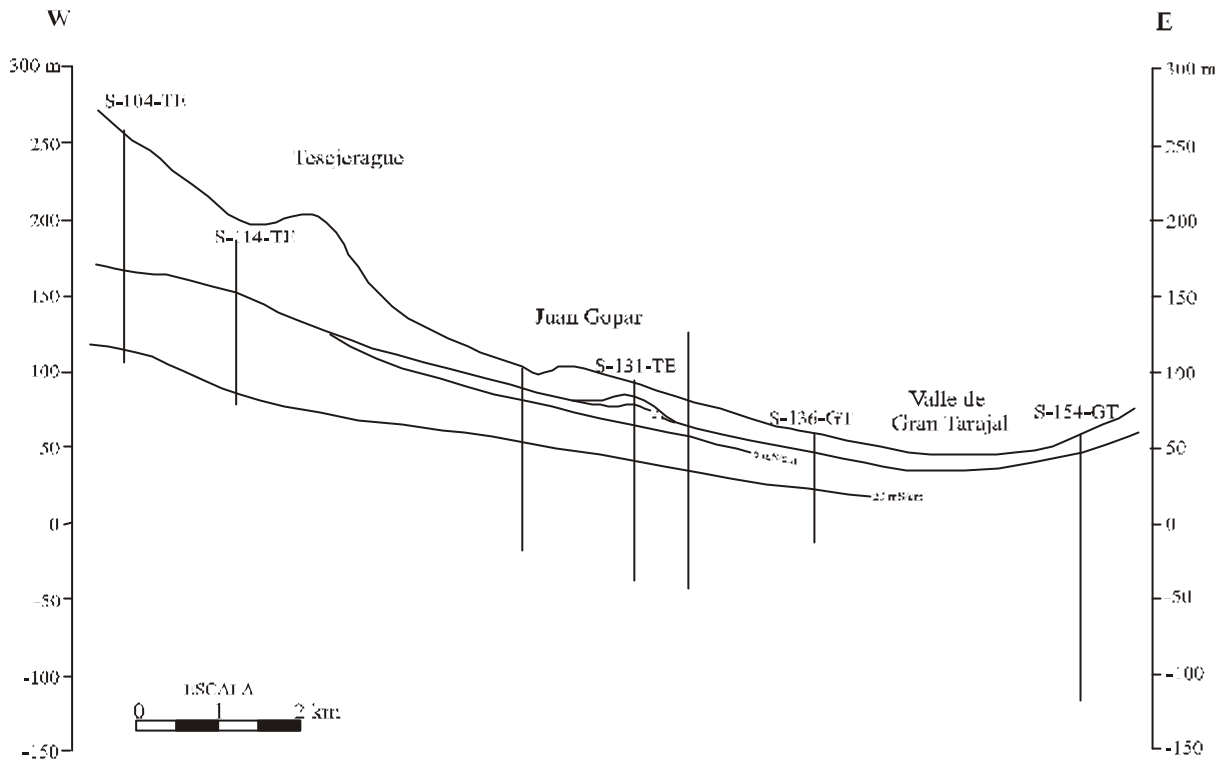
La Figura 4.19 presenta un corte de orientación aproximada N-S con la distribución de las curvas isotermas del agua subterránea construidas a partir de la unión de puntos de igual temperatura de los registros de los sondeos. En esta figura se ha inferido la temperatura del terreno en la zona no saturada a partir de la continuidad de las isotermas medidas en el agua. Esta representación pone de manifiesto una cierta influencia del relieve en la distribución térmica en la parte superior del acuífero, mientras que a mayor profundidad estas diferencias son menores. En el caso del registro de temperatura realizado en el sondeo S-131-TE se

observa una alteración importante en el gradiente térmico local el cual es atribuido a la recarga preferencial producida a partir de las numerosas presas próximas a este punto de registro y que también queda corroborada por una pequeña elevación del nivel piezométrico.

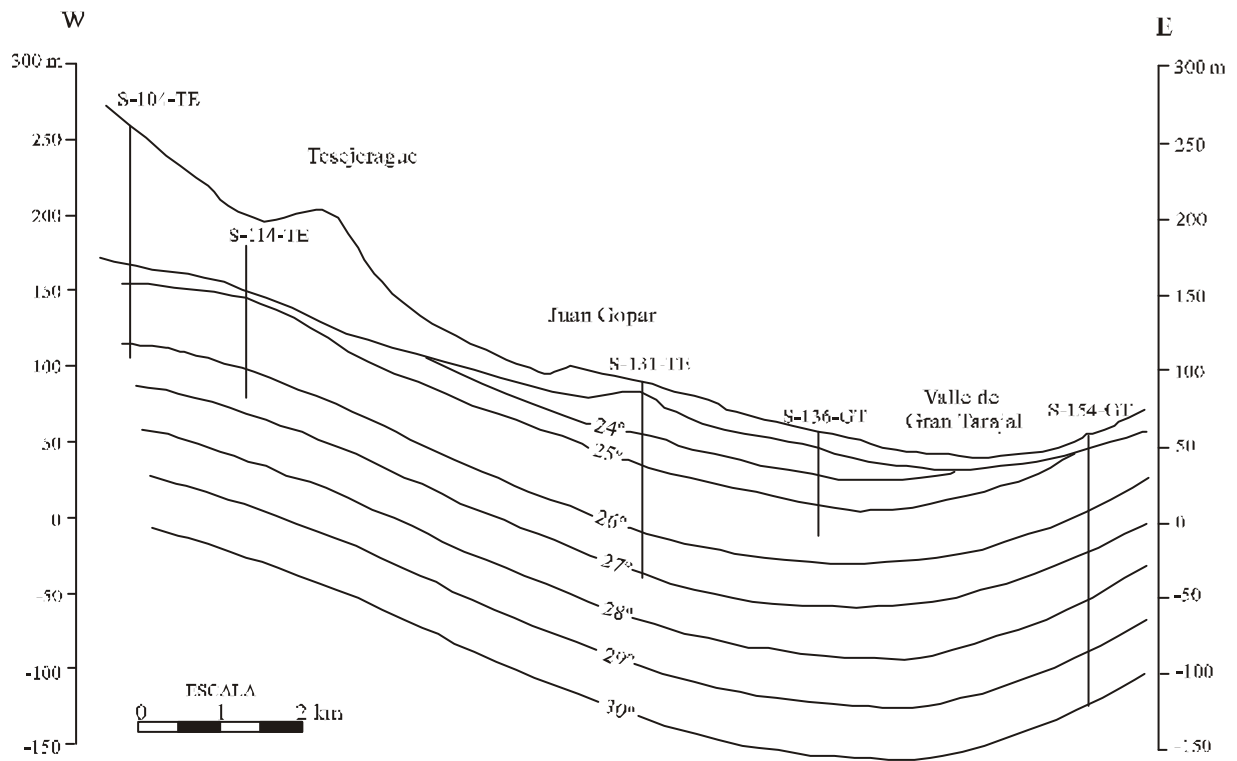


**Figura 4.19.-** Corte con representación a escala de la temperatura (°C) del agua en el área de Tuineje-Tesejerague-Gran Tarajal

Las Figuras 4.20 y 4.21 presentan dos cortes de orientación aproximada E-W realizados en el área de Tesejerague y en las cuales se representan curvas de igual conductividad eléctrica y curvas de igual temperatura en el agua respectivamente. En las cotas altas del sector se observa una clara correspondencia entre las temperaturas del agua y la salinidad de la misma, mientras que en las zonas más bajas esta correlación se altera debido a la recarga preferencial que producen las presas. En el sector de Tesejerague se observa un ascenso de las isotermas que coincide con las cotas más altas del sector e indicaría la influencia del relieve en la distribución de las temperaturas en el agua. Hacia el oeste también se observa un ascenso de las isotermas que coincide con una elevación topográfica (hacia el sector de los “cuchillos”) lo que confirmaría la influencia del relieve en la distribución de la temperatura en el terreno.



**Figura 4.20.-** Corte con representación a escala de la conductividad eléctrica (mS/cm) del agua en el área de Tesejerague - Valle de Gran Tarajal.



**Figura 4.21.-** Corte con representación a escala de la temperatura (°C) del agua en el área de Tesejerague - Valle de Gran Tarajal.



#### **4.5.4.- Caracterización de la composición iónica**

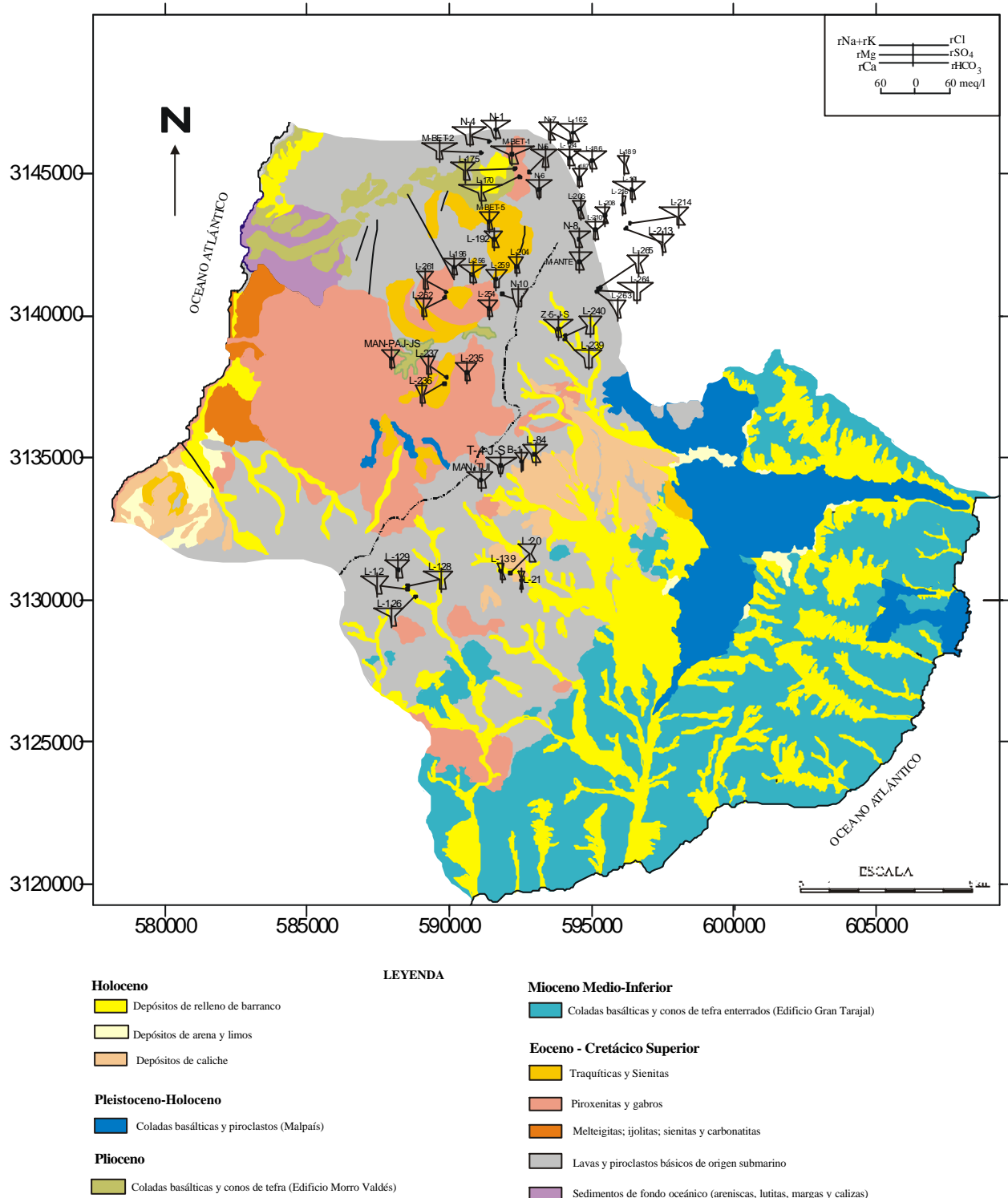
En el estudio hidroquímico de las aguas subterráneas del área de estudio se han considerado todos los análisis químicos existentes en cada punto de muestreo. Para su interpretación se han representado en columnas verticales logarítmicas todos los análisis existentes de cada punto (Anejo 4.5). También se han representado las muestras en el diagrama triangular de Piper (1953) para evaluar posibles mezclas de agua subterránea.

Para la caracterización hidroquímica se han separado las aguas subterráneas más someras, que corresponden generalmente a aguas con menor mineralización, de las aguas subterráneas más profundas y con mayor mineralización. En el caso de las aguas de menor mineralización del Macizo de Betancuria, definidas en este trabajo como Unidad Superior, se han considerado principalmente las muestras obtenidas de pozos y manantiales. Para las aguas más profundas y de mayor mineralización, definidas como Unidad Inferior, se han considerado muestras de agua de sondeos profundos.

Con el objetivo de tener una visión general de la composición química de las aguas subterráneas del área de estudio en el tiempo y el espacio se han representado los análisis químicos en diagramas de Stiff (modificados), donde se representan los análisis más representativos de la Unidad Superior (Figura 4.22) y la Unidad Inferior (Figura 4.23).

#### **Unidad Superior**

En el estudio de la composición química de las aguas de la Unidad Superior se han considerado todas las muestras obtenidas en manantiales, pozos y sondeos poco profundos localizados en el Macizo de Betancuria. La mayor parte de los datos utilizados en esta caracterización proceden del proyecto MAC-21 (1982) y los obtenidos en la presente investigación. Dentro de la Unidad Superior se agrupan aquellas muestras de agua representativas de la recarga, localizadas en rocas volcánicas e intrusivas correspondientes al Complejo Basal y que presentan una mínima interacción con el terreno por el que circulan. Corresponden a aguas de tipo clorurado sódico, que en general presentan una alcalinidad moderada, y bajos contenidos de sulfato y sílice. La concentración de nitrato en estas aguas es variable de un punto a otro, pero en la mayoría de los casos se sospecha una componente antrópica asociada a actividades agropecuarias.



**Figura 4.22.-** Representación de los diagramas de Stiff modificados de las muestras más representativas de la Unidad Superior.

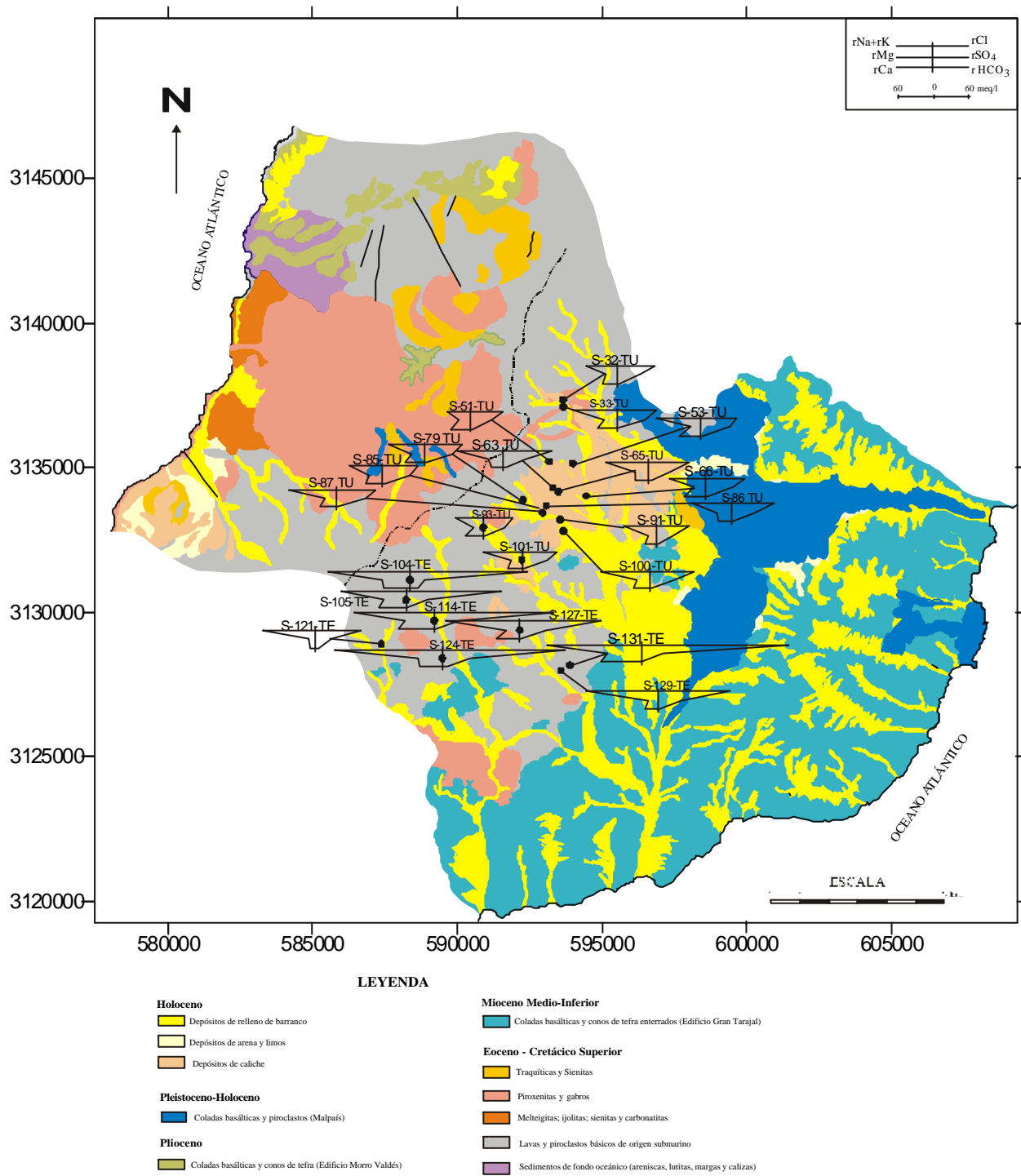
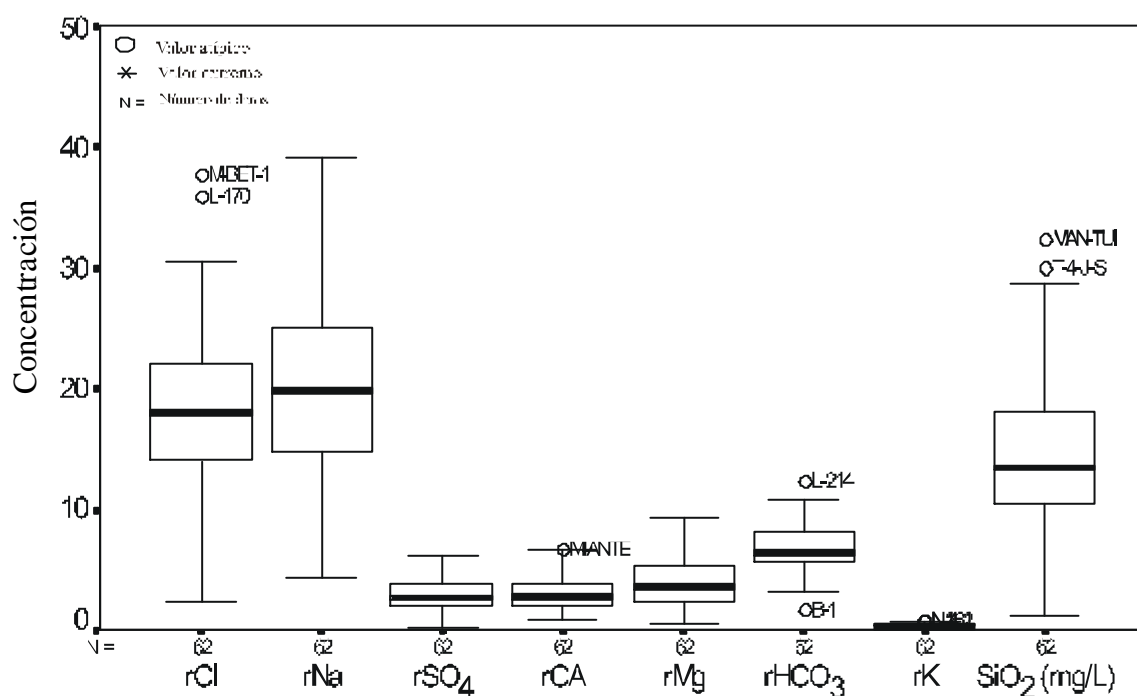


Figura 4.23.- Representación de los diagramas de Stiff modificados de las muestras más representativas de la Unidad Inferior.

En la Tabla 4.10 se presentan los resultados estadísticos de las concentraciones y relaciones iónicas más importantes de la Unidad Superior. La Figura 4.24 muestra la representación en diagramas de bigotes de los iones.

Estadísticos	pH	rNa	rK	rMg	rCa	rCl	rSO <sub>4</sub>	rHCO <sub>3</sub> +rCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> (mg/l)	rNa/rCl	rNa/rK	rSO <sub>4</sub> /rCl	rCl/rHCO <sub>3</sub> +rCO <sub>3</sub>	rMg/rCa
Media	8,10	20,60	0,40	3,90	3,00	18,62	2,86	6,66	14,69	1,15	53,68	0,15	2,98	1,38
Mediana	8,20	19,80	0,35	3,59	2,98	17,99	2,70	6,32	13,55	1,09	53,68	0,13	2,64	1,22
Media-Mediana	-0,10	0,80	0,05	0,31	0,02	0,63	0,16	0,34	1,14	0,06	0,00	0,02	0,34	0,16
Máximo	9,20	39,15	0,84	10,20	6,75	37,99	6,12	12,45	32,40	2,01	107,05	0,34	8,65	6,57
Mínimo	7,00	4,35	0,18	0,58	0,78	2,36	0,17	1,69	1,20	0,73	14,40	0,01	0,46	0,25
Desv. Típica	0,58	7,49	0,14	2,11	1,35	7,36	1,42	1,94	6,80	0,25	17,60	0,07	4,46	0,84
Percentil 25%	7,60	14,90	0,31	2,25	1,96	13,99	1,92	5,60	10,47	1,00	44,45	0,11	2,10	0,95
Percentil 50%	8,20	19,90	0,35	3,59	2,98	17,99	2,71	6,32	13,55	1,09	53,68	0,13	2,64	1,22
Percentil 75%	8,70	25,60	0,47	5,43	3,97	22,00	3,69	8,17	18,00	1,26	61,69	0,19	3,58	1,77

**Tabla 4.10.-** Valores representativos de pH, concentraciones de los iones mayoritarios (meq L<sup>-1</sup>), SiO<sub>2</sub> (mg L<sup>-1</sup>) y relaciones iónicas de interés de las muestras de manantiales y pozos representativos de la Unidad Superior (r = meq L<sup>-1</sup>; pH medido en campo y laboratorio).



**Figura 4.24.-** Diagrama de bigotes de las muestras de la Unidad Superior (r = meq L<sup>-1</sup>)

La mayor concentración de manantiales y pozos se localizan en las partes más altas del Macizo de Betancuria y representan el agua propia de la recarga. También se reconocen aguas con una composición semejante en zonas más bajas de algunos barrancos, pero su origen posiblemente esté asociado en parte con aguas que se infiltran desde los numerosos embalses existentes.

Dentro de la Unidad Superior se incluyen algunas muestras de sondeos ubicados en el Macizo de Betancuria y que presentan una estratificación en la composición química del agua. Estas muestras fueron tomadas en la parte superior de la columna de agua en los sondeos, que es donde se localizan las aguas de menor mineralización.

La Figura 4.22 presenta los diagramas de Stiff modificados de las muestras más representativas de la Unidad Superior, donde se destacan algunos puntos de agua en las proximidades de la localidad de Betancuria con una mineralización ligeramente superior al resto de puntos. También se observa que los puntos con mayores concentraciones de cloruro y sodio se relacionan con zonas de rocas intrusivas (piroxenitas y gabros) del Complejo Basal.

### Sector del Malpaís

En el sector del Malpaís se reconoce una estratificación en la composición química del agua subterránea. En la parte superior del acuífero el agua subterránea presenta conductividades eléctricas bajas, que varían entre 1500 y 5000  $\mu\text{S/cm}$ , mientras que a mayor profundidad ésta varía entre 5000 y 9000  $\mu\text{S/cm}$ . La composición química característica del agua subterránea somera reconocida en el Malpaís es interpretada como agua recargada a partir de lagunas que se forman en los márgenes del Malpaís como consecuencia de la escorrentía procedente de las partes más altas del Macizo de Betancuria y que se encharca al topar con coladas de lava recientes del Malpaís. Esta presenta una composición clorurado-sódica que de cierta manera se aproxima a la composición química del agua de lluvia: en su camino hacia la zona saturada circula a través de un medio poco meteorizado que no permite una incorporación iónica importante al agua.

El agua subterránea más profunda y de mayor salinidad presenta una composición clorurado sódica con una variación importante en la concentración de sulfato. En general las muestras tomadas en la parte occidental del Malpaís, en sondeos situados próximos al Complejo Basal son las que presentan mayores concentraciones de sulfato. Por el sentido del flujo regional del agua subterránea, desde las partes más altas del Macizo de Betancuria hacia la Depresión Central, no se descarta que esta composición química obedezca a aguas profundas provenientes del Complejo Basal y que pasan a circular por el sector del Malpaís.

### **Unidad Inferior**

Para la caracterización química de las aguas subterráneas de la Unidad Inferior se han considerado principalmente las muestras obtenidas de sondeos profundos. Los datos utilizados para esta caracterización corresponden a los del ITGE (1989-1990) y los obtenidos por el autor en la presente investigación.

Las aguas de la Unidad Inferior son aguas profundas, con un grado de mineralización más alto que la Unidad Superior. Corresponden a aguas de tipo clorurado sódico, con altos contenidos de sulfato y sílice. A diferencia de las aguas de la Unidad Superior, la

concentración de nitratos en estas aguas es muy baja y en la mayoría de los casos queda bajo los límites de detección del laboratorio.

Las gráficas de columnas logarítmicas verticales ponen de manifiesto en algunos casos marcadas diferencias en la composición química de las aguas subterráneas tomadas en un mismo punto para las distintas campañas. Estas diferencias son atribuidas a: (a) la carencia de entubación en la mayoría de los sondeos, lo que permite que se mezclen dentro de la perforación aguas poco mineralizadas de la Unidad Superior con aguas subterráneas profundas de mayor mineralización, (b) método de muestreo del agua subterránea en el sondeo y (c) tiempo de espera de bombeo en el sondeo antes de tomar la muestra de agua. En general, cuando las muestras fueron tomadas con tomamuestras presentaban una composición menos salina que las tomadas por bombeo, hecho que se interpreta por la mayor influencia de las aguas de la Unidad Superior dentro de la perforación.

Las muestras de agua subterránea tomadas de sondeos en las cuatro campañas del ITGE entre los años 1989-1990 son las que presentan mayores variaciones en la composición química del agua para un mismo punto. En los primeros análisis realizados por el ITGE las aguas son menos salinas y presentan una composición química muy similar a la observada en la Unidad Superior, para pasar en el período de un 1 año a una composición de mayor mineralización, semejante a la observada en la actualidad. Aparentemente, la influencia de la Unidad Superior en este período fue decreciendo con el tiempo. Una posible explicación de este fenómeno es que al no tener los sondeos entubación, las aguas de la Unidad Superior fueron lentamente drenadas, a través del sondeo, para mezclarse con aguas más profundas y de mayor mineralización. Esto resulta lógico si se considera que la mayoría de los sondeos, fueron construidos entre 1 y 2 años antes de la fecha del seguimiento de la composición química de las aguas. Sin embargo, no se descarta que en muchos casos estas variaciones tengan su origen en el método de muestreo. Para la caracterización de la composición química de las aguas de la Unidad Inferior a partir de los datos del ITGE han sido descartadas todas aquellas muestras de las que se sospecha una mezcla importante con aguas de la Unidad Superior. El criterio utilizado para esta selección ha sido la profundidad y método de toma de la muestra, el pH, y la concentración de cloruro, sulfato, sílice y nitrato.

Las diferencias en la composición química del agua subterránea en las cuatro campañas de muestreo de la presente investigación son pequeñas, lo que posiblemente indica que la influencia de los sondeos como drenes del agua de la Unidad Superior ha disminuido en el tiempo. Sólo se aprecian diferencias importantes en los sondeos C-4, X-2 y S-2, ubicados cerca de embalses, lo que hace suponer que en períodos de precipitaciones importantes llega agua poco mineralizada desde los embalses al sondeo. Un ejemplo claro de esta situación se aprecia en el sondeo X-2, ubicado 5 metros aguas abajo de un embalse (con agua después de las precipitaciones de marzo de 1999) y donde se realizó un registro longitudinal de temperatura y conductividad eléctrica, cuyos resultados se discutieron en el apartado 4.5.3.

Existe una importante disimilitud en la composición química de las aguas muestreadas en los sondeos profundos de Tuineje y los que se encuentran próximos a la localidad de Tesejerague. Estas diferencias quedan definidas por un aumento en la concentración de sodio y cloruro en las aguas subterráneas en Tesejerague, mientras que los contenidos de sulfato se mantienen prácticamente iguales en ambas localidades (Figura 4.23). Debido a estas diferencias en la composición química de las aguas de los sondeos profundos en Tuineje y Tesejerague, la caracterización estadística de la concentración y de las relaciones iónicas más importantes de la Unidad Inferior ha sido estudiada de modo independiente para cada zona.

### Tuineje

Dentro de este grupo se encuentran las muestras tomadas en sondeos profundos en la localidad del mismo nombre, así como muestras tomadas en sondeos profundos en la localidad de Tiscamanita. Para caracterizar la composición química de la Unidad Inferior en Tuineje se han calculado los valores de la media, mediana y desviación típica, tanto de las concentraciones como para las relaciones iónicas más importantes, correspondientes a las campañas de muestreo mencionadas anteriormente.

La Tabla 4.11 presenta los resultados de los estadísticos más importantes de la Unidad Inferior en Tuineje, considerando por separado los datos de la campaña del ITGE (1989/90) y los obtenidos por el autor en la presente investigación (1998/99). La Figura 4.25(a) presenta los diagramas de bigotes de las muestras de los sondeos profundos de Tuineje. Esta separación de datos según la campaña de muestreo se hace debido a diferencias significativas en la composición química del agua subterránea, la cual posiblemente está perturbada por la mezcla con aguas de la Unidad Superior. Al comparar los resultados de ambas campañas se observa un aumento en las concentraciones de cloruro, sodio y calcio, mientras que los contenidos de potasio, magnesio, sulfato, bicarbonato y sílice se mantienen aproximadamente iguales. En ambas campañas las medidas del pH de campo se mantienen prácticamente igual, con un valor medio de 7,1 y una desviación típica de 0,19. Los valores máximos medidos de las concentraciones de los principales iones corresponden a los obtenidos en la última campaña.

En la Figura 4.26 (a) se presenta el diagrama logarítmico vertical de cinco muestras de agua tomadas por medio de bombeo en el sondeo S-94-TU, ubicado en la localidad de Tuineje. Una muestra corresponde a la campaña de 1989/90 y las otras cuatro a la campaña de 1998/99. Se destacan las marcadas diferencias de la concentración de cloruro y calcio de ambas campañas, así como una mayor homogeneidad de la composición química de las aguas muestreadas entre 1998/99.

DATOS TESIS																
Estadísticos	pH (*)	Conductividad eléctrica (*)	Temperatura (°C) (*)	rNa	rK	rMg	rCa	rCl	rSO4	rHCO3	SiO <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	rNa/rCl	rNa/rK	rSO4/rCl	rCl/rHCO3+rCO3	rMg/rCa
Media	7,09	8210	24,61	61,83	0,75	19,69	27,39	64,08	41,59	3,66	44,5	0,96	84,14	0,66	18,98	0,77
Mediana	7,09	8100	25,2	61,11	0,77	19,9	28,55	62,32	41,39	3,24	44,75	0,97	81,35	0,69	19,29	0,69
Media-Mediana	0	110	-0,59	0,72	-0,02	-0,21	-1,16	1,76	0,2	0,42	-0,25	-0,01	2,79	-0,03	-0,31	0,08
Máximo	7,4	10000	28	83,52	1,13	26,84	39	83,47	58,66	7,87	66,4	1,2	127,88	0,96	29,1	1,33
Mínimo	6,9	6660	20,3	38,37	0,38	14,45	13	48,22	23,92	1,89	21,6	0,67	60,7	0,39	9,31	0,41
Desv. Típica	0,16	953,49	2,14	13,48	0,18	3,38	6,9	9	7,96	1,31	13,62	0,13	17,95	0,14	5	0,25
Percentil 25%	6,94	7430	22,65	53,61	0,61	16,79	21,75	57,17	37,13	2,84	28,6	0,92	70,66	0,54	15,36	0,58
Percentil 50%	7,09	8100	25,2	61,11	0,77	19,91	28,55	62,32	41,39	3,24	44,75	0,97	81,35	0,69	19,29	0,69
Percentil 75%	7,24	9300	25,9	73,28	0,84	21,68	33,66	68,8	47,06	4,29	57,54	1,04	93,93	0,77	21,75	0,87
DATOS I.T.G.E.																
Estadísticos	pH (*)	Conductividad eléctrica (*)	Temperatura (°C) (*)	rNa	rK	rMg	rCa	rCl	rSO4	rHCO3	SiO <sub>2</sub> (mg/L)	rNa/rCl	rNa/rK	rSO4/rCl	rCl/rHCO3+rCO3	rMg/rCa
Media	7,08	7688,00	25,70	41,90	0,81	13,78	15,87	34,71	32,92	4,08	51,22	1,41	55,21	1,22	9,07	1,17
Mediana	7,10	7362,00	26,00	39,26	0,69	13,46	17,85	33,03	32,42	4,10	51,00	1,21	50,90	1,00	8,92	0,99
Media-Mediana	-0,02	326,00	-0,30	2,64	0,12	0,32	-1,98	1,68	0,50	-0,02	0,22	0,20	4,31	0,22	0,15	0,18
Máximo	7,50	12090,00	29,00	81,54	1,67	23,20	30,24	81,49	42,20	6,40	75,00	4,00	100,92	4,28	19,74	3,35
Mínimo	6,70	5460,00	23,00	31,03	0,31	6,74	3,20	9,40	20,85	2,32	23,00	0,84	33,47	0,36	1,62	0,33
Desv. Típica	0,19	1559,00	1,40	11,49	0,31	3,42	7,40	16,37	6,44	0,96	13,88	0,70	14,10	0,82	4,63	0,76
Percentil 25%	6,92	6460,00	25,00	34,73	0,59	11,81	8,90	23,12	29,63	3,30	43,00	1,01	48,63	0,77	5,40	0,57
Percentil 50%	7,10	7360,00	26,00	39,26	0,69	13,46	17,85	33,03	32,42	4,10	51,00	1,21	50,90	1,00	8,92	0,99
Percentil 75%	7,17	8030,00	27,00	42,63	0,90	15,05	21,64	40,58	38,29	4,40	62,00	1,50	59,81	1,43	11,40	1,56

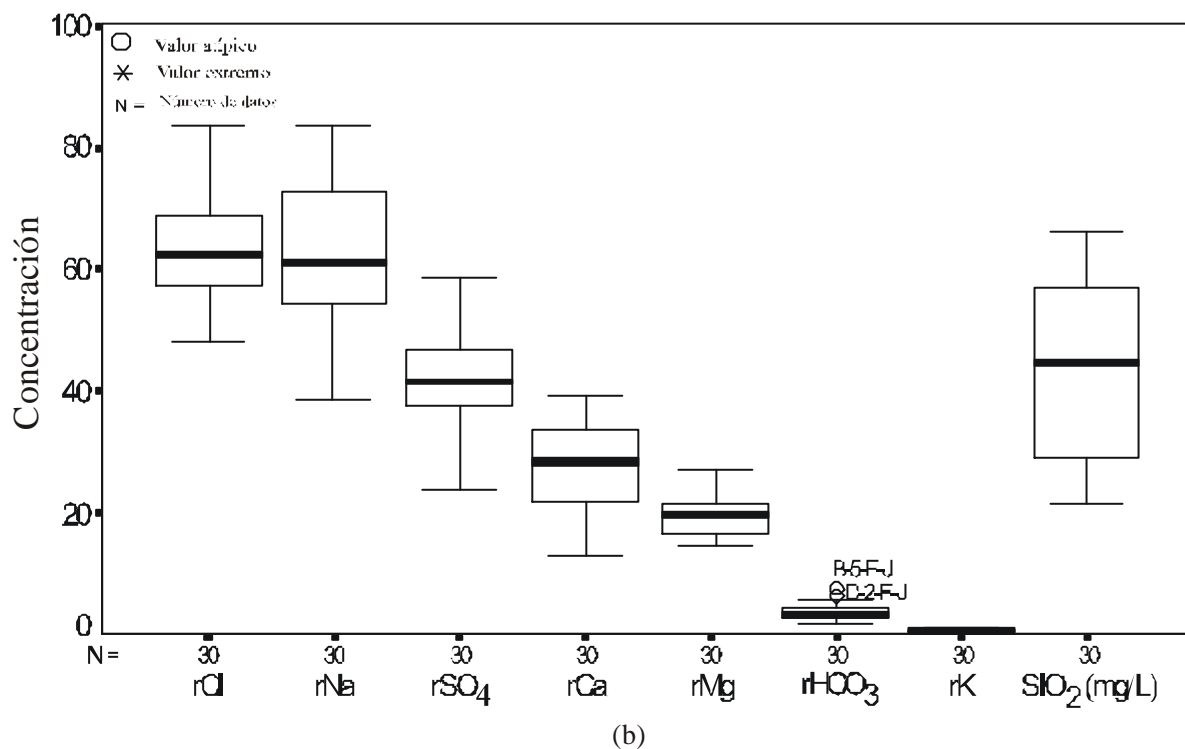
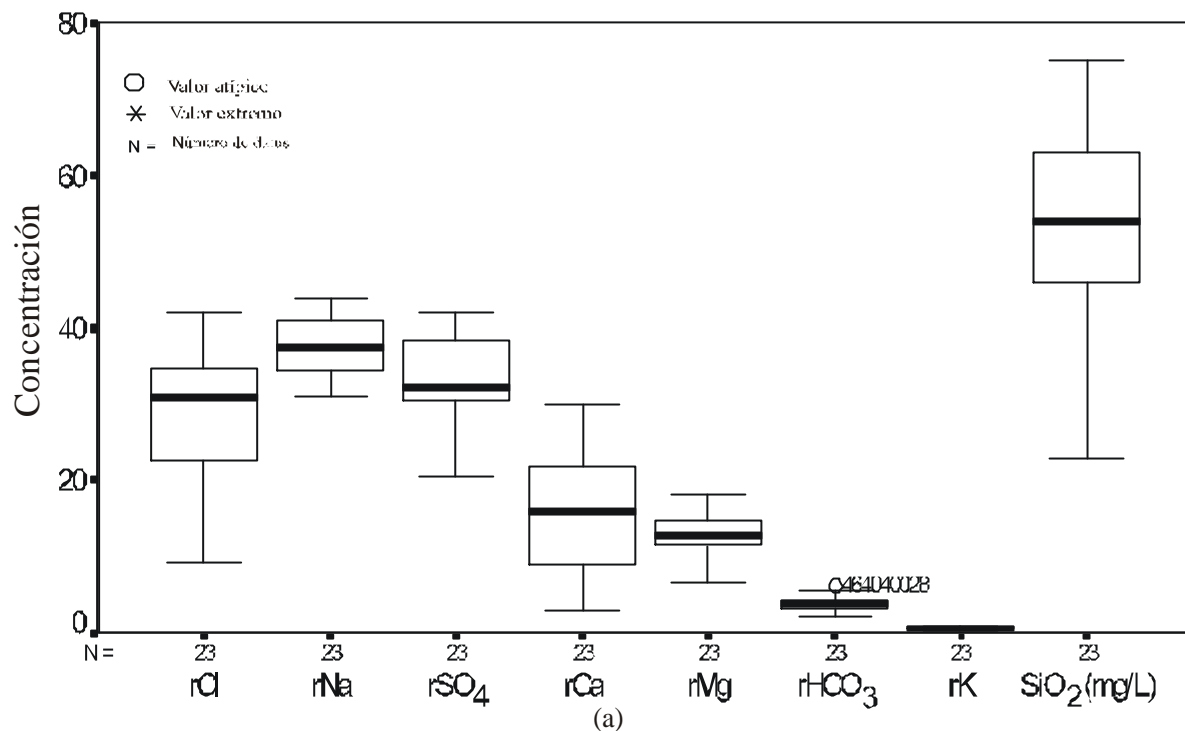
**Tabla 4.11.-** Valores representativos del pH, conductividad eléctrica (? S/cm), temperatura (°C), concentraciones de los iones mayoritarios (meq L<sup>-1</sup>), SiO<sub>2</sub> (mg L<sup>-1</sup>) y relaciones iónicas de interés para las muestras de los sondeos profundos de Tuineje. r = meq L<sup>-1</sup>; (\*) datos tomados en campo.

### Tesejerague

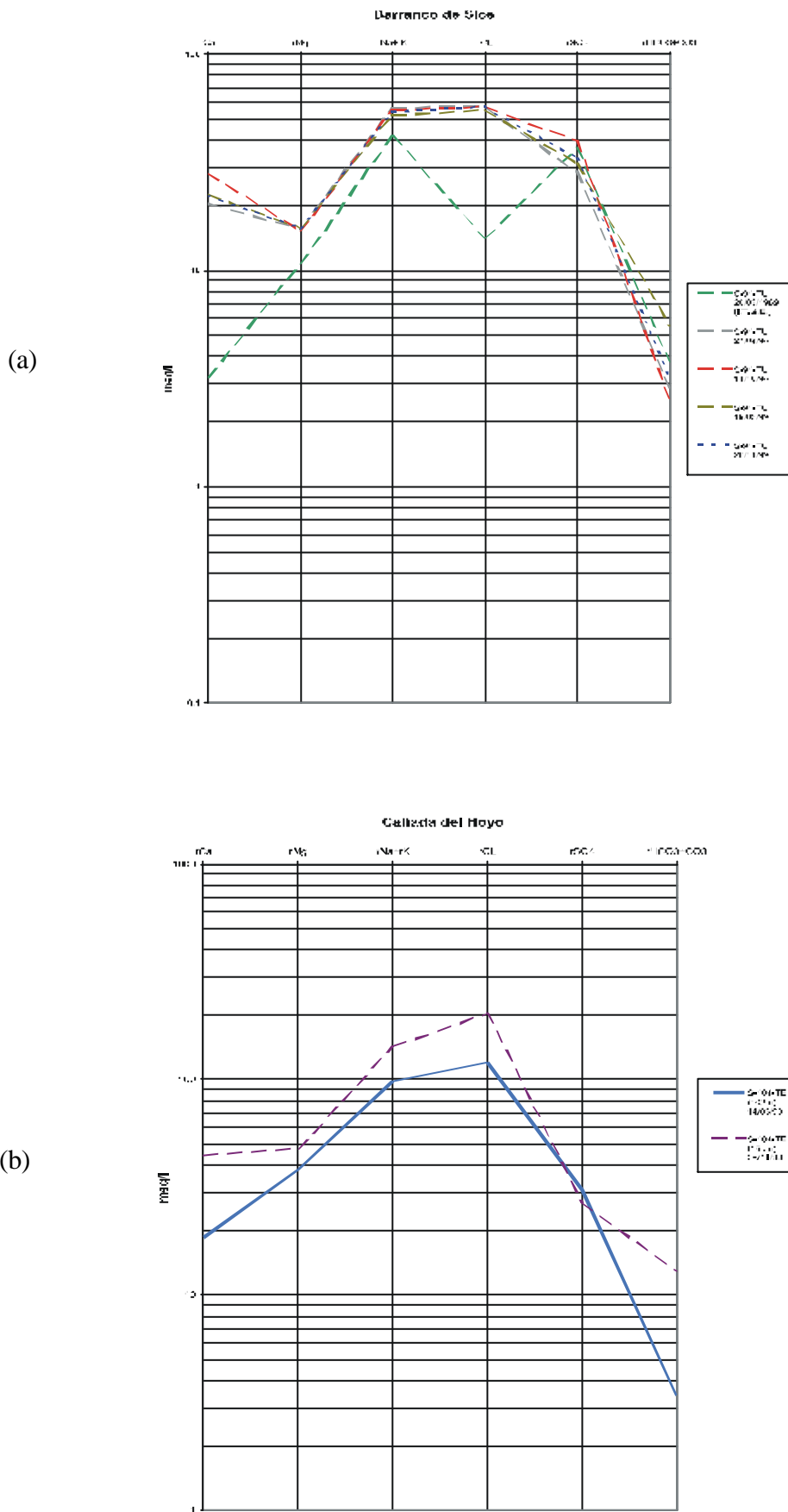
En la localidad de Tesejerague las aguas de la Unidad Inferior son las que presentan la mayor mineralización de todas las aguas reconocidas en el área de estudio. La Tabla 4.12 presenta los resultados de los estadísticos más importantes para las aguas del acuífero profundo en Tesejerague, considerando todos los análisis independientemente de la campaña de muestreo, debido a que no se detectan diferencias importantes entre los datos tomados en la campaña de 1989/90 y los de la presente investigación. La Figura 4.25(b) presenta los diagramas de bigotes de las muestras de los sondeos profundos de Tuineje. Al comparar estos resultados con los obtenidos en las dos campañas de Tuineje se destaca una mayor concentración en los contenidos de cloruro y sodio. Por otro lado aumentan ligeramente su concentración el magnesio y el potasio, y se mantienen prácticamente iguales las concentraciones de sulfato, calcio, bicarbonato y sílice.

En la Figura 4.26(b) se señalan los diagramas logarítmicos verticales de dos muestras de agua recuperadas a 102 y 150 m de profundidad en el sondeo S-104-TE. En el caso de la muestra más profunda y de mayor mineralización se detecta una ligera disminución en la concentración de SO<sub>4</sub> respecto a la muestra más somera y menos salina Este hecho está acompañado por una disminución de la relación rSO4/rCl y del pH en profundidad, por lo que no se descartan posibles fenómenos de reducción de sulfatos en profundidad en este sector.





**Figura 4.25.**-Diagramas de bigotes de:(a) muestras de la Unidad Inferior en Tuinje obtenidas por el ITGE y (b) muestras de la Unidad Inferior en Tuinje obtenidas en esta investigación. r = meq L<sup>-1</sup>.



**Figura 4.26.-** Diagramas logarítmicos verticales de los sondeo profundo de Tuineje S-91-TU (a) y del sondeo profundo de Tesejerague S-104-TE (b).

Estadísticos	pH (*)	Conductividad eléctrica (*)	Temperatura (*)	rNa	rK	rMg	rCa	rCl	rSO4	rHCO3	SiO2 (mg/l)	rNa/rCl	rNa/rK	rSO4/rCl	rCl/(HCO3+rCO3)	rMg/rCa
Media	7,33	15622,00	24,21	115,35	1,17	30,16	32,10	133,71	40,69	4,02	39,94	0,94	105,89	0,35	54,34	1,31
Mediana	7,32	15625,00	24,90	117,45	1,31	37,99	39,50	141,00	44,72	3,28	42,00	0,88	91,82	0,27	35,35	0,99
Media-Mediana	0,01	-3,00	-0,69	-2,10	-0,14	-7,83	-7,40	-7,29	-4,03	0,74	-2,06	0,06	14,07	0,08	18,99	0,32
Máximo	8,70	24500,00	26,00	131,08	1,67	64,26	74,00	260,85	73,69	8,53	60,00	1,38	208,10	0,83	154,42	4,61
Mínimo	6,70	8390,00	22,50	36,19	0,46	3,47	2,20	27,63	6,78	1,08	18,00	0,64	42,73	0,11	3,62	0,56
Desv. Típica	0,48	4897,00	1,09	41,82	0,38	15,45	20,40	61,73	17,05	2,24	11,67	0,21	43,21	0,19	49,38	0,92
Percentil 25%	7,13	11030,00	23,00	91,10	0,79	15,57	9,75	90,83	26,73	2,11	31,90	0,76	79,41	0,23	16,81	0,83
Percentil 50%	7,32	15625,00	24,90	117,45	1,31	37,99	39,50	141,00	44,72	3,28	42,00	0,88	91,82	0,27	35,35	0,99
Percentil 75%	7,38	19497,00	25,00	131,08	1,50	40,01	48,10	172,50	50,02	5,84	47,90	1,03	131,90	0,37	75,49	1,56

**Tabla 4.12.-** Valores representativos de pH, conductividad eléctrica (? S/cm), temperatura (°C), concentraciones de los iones mayoritarios (meq L<sup>-1</sup>), SiO<sub>2</sub> (mg L<sup>-1</sup>) y relaciones iónicas de interés para las muestras de los sondeos profundos de Tesejerague. (r = meq L<sup>-1</sup>; \*) = datos tomados en campo)

#### 4.5.5.- Características generales de las aguas deducidas del diagrama de Piper

Tratando los valores analíticos de las aguas de la precipitación, manantiales, pozos y sondeos profundos del área según el procedimiento de Piper (1953) y representándolo en su diagrama (Figura 4.27), se pueden establecer las siguientes características:

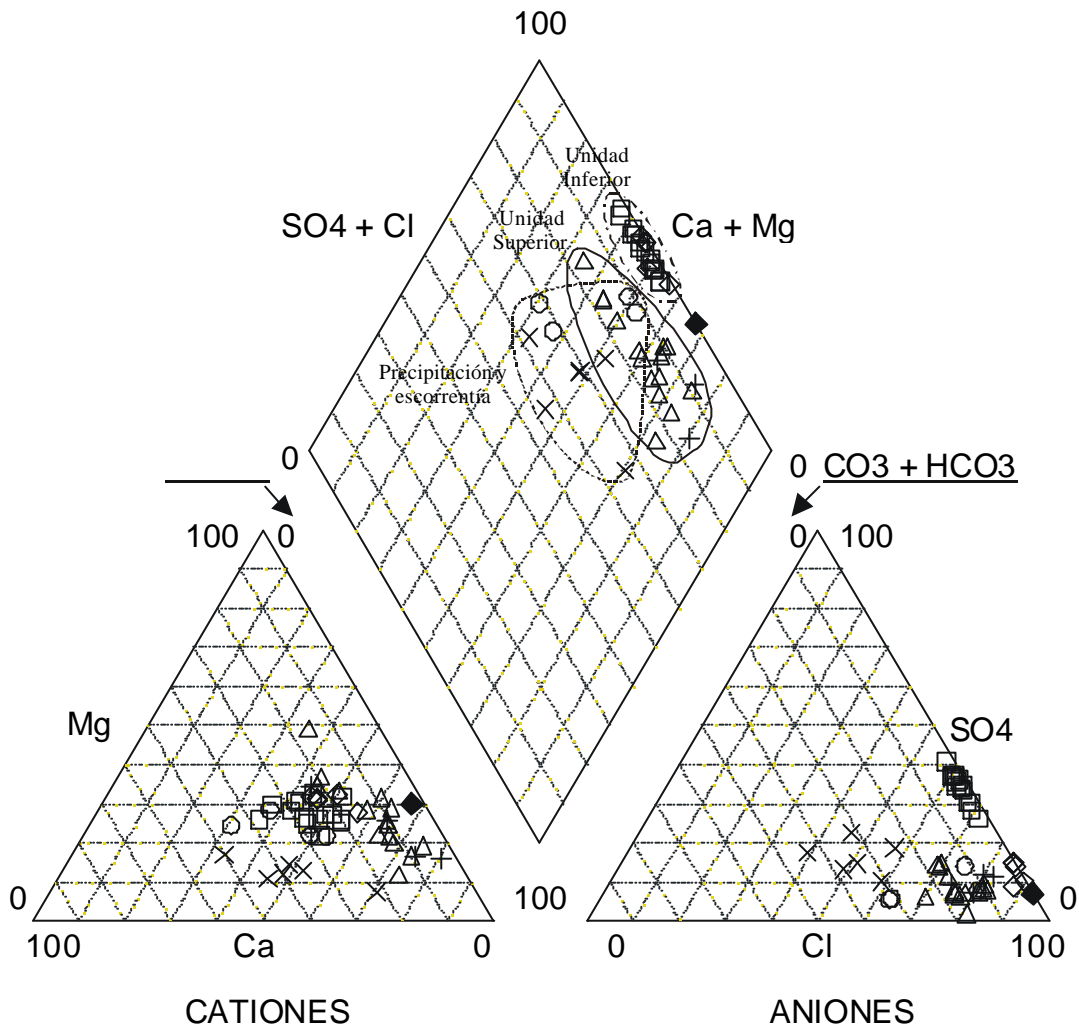
- Se observan diferencias significativas en la composición química de las aguas subterráneas de la Unidad Superior y la Unidad Inferior. Por un lado esta el grupo de muestras de la Unidad Superior, cuya composición química muestra una mayor proximidad a la composición química de las muestras de precipitación y escorrentía. Por otro lado están las muestras de la Unidad Inferior cuya distancia de las muestras de la Unidad Superior queda definidas principalmente por una mayor concentración relativa de cloruro, sodio, sulfato y magnesio.

- Las aguas de escorrentía y charcos muestran una mayor proporción de sodio respecto al agua de lluvia. Esta mayor proporción de sodio en las muestras de escorrentía se puede atribuir al sodio liberado como consecuencia de la meteorización de feldespatos y que es tomado por el agua de escorrentía. Por otro lado el agua de la Unidad Superior muestra una mayor concentración de sodio respecto a las muestras de escorrentía y precipitación. Esta mayor concentración de sodio en el agua de la Unidad Superior es atribuida a la interacción agua-roca y que tiene como resultado la alteración de los feldespatos y liberación de sodio.

- La composición del agua del agua de lluvia, manantiales y pozos muestra una composición aniónica bien definida, caracterizada por elevados contenidos de cloruro respecto al sulfato y bicarbonato.

- La composición aniónica de las aguas de los sondeos profundos en Tuineje y Tesejerague queda marcada por una elevada concentración de sulfato y cloruro. Las aguas profundas en Tuineje muestran una mayor concentración relativa de sulfato respecto a las de Tesejerague, estando estas últimas más próximas a la composición aniónica del agua de mar.

## DIAGRAMA DE PIPER



### Simbología

- Precipitación
- × Escorrentía
- Sondeos profundos Tuineje (Unidad Inferior)
- ◇ Sondeos profundos Tesejerague (Unidad Inferior)
- + Pozos y sondeos someros (Unidad Superior)
- △ Manantiales (Unidad Superior)
- ◆ Mar

**Figura 4.27.-** Representación en el diagrama de Piper de las muestras de agua de precipitación, escorrentía, manantiales, pozos y sondeos profundos del Macizo de Betancuria.

#### 4.5.6.- Estudio de algunos parámetros químicos de interés

En este apartado se discuten algunos parámetros químicos que interesan para la caracterización e interpretación de fenómenos que se observan en el agua subterránea. Se incluyen tanto parámetros determinados en campo como en laboratorio.

##### **pH:**

Las muestras de agua de los sondeos profundos de Tuineje se caracterizan por presentar un pH muy uniforme con un valor medio de 7,1 y una desviación típica de 0,2. En las muestras de los sondeos profundos de Tesejerague los valores medidos de pH muestran mayores variaciones, con un valor medio de 7,3 y una desviación típica de 0,5.

Al comparar las medidas de pH de campo de las muestras de sondeos profundos de Tuineje para las campañas de 1989/90 y 1998/99 se observa que éste se mantiene prácticamente igual en el tiempo, a pesar de que existen diferencias importantes en la composición química de las muestras de agua de ambas campañas.

Por otro lado los valores de pH medidos en muestras de la Unidad Superior muestran importantes diferencias, con variaciones entre 7,4 y 8,5. Los valores de pH más altos corresponden principalmente a los medidos en manantiales, mientras que las determinaciones realizadas en pozos y sondeos someros en general son menores a 8. Es importante destacar que los pH medidos en el proyecto MAC-21 son en general muy altos y superiores a 8. Estos valores más altos son atribuidos a pérdidas de CO<sub>2</sub> como consecuencia del largo período de tiempo transcurrido entre la toma de las muestras y la realización de los análisis.

##### **Nitratos**

En la caracterización de los contenidos de nitratos del agua subterránea se han considerado todos los análisis químicos disponibles, incluyendo aquellos análisis desechados para la caracterización química general de las aguas subterráneas por los elevados contenidos de NO<sub>3</sub>.

Las mayores concentraciones de nitratos se aprecian en los pozos ubicados en los barrancos, en zonas que tienen y tuvieron una actividad agrícola de importancia.

En el área de Tuineje la mayoría de los sondeos profundos presentan concentraciones de NO<sub>3</sub> inferiores a 1 mg L<sup>-1</sup> y en algunos casos las concentraciones son inferiores a los límites analíticos de detección (< 0,5 mg L<sup>-1</sup>). No obstante, en algunos sondeos profundos se observan variaciones importantes en los contenidos de NO<sub>3</sub>. Este hecho es atribuido a la mayor o menor influencia del agua de la Unidad Superior que drena por el sondeo hacia el acuífero profundo. En general en aquellos sondeos en los que las muestras de agua se obtuvieron por medio de un bombeo prolongado las concentraciones de NO<sub>3</sub> son despreciables, mientras que cuando estos eran de corta duración se reconoce algún contenido en nitrato.

### **Sílice**

Los contenidos de SiO<sub>2</sub> en el agua subterránea varían de modo significativo entre las aguas de la Unidad Superior y la Unidad Inferior.

En la Unidad Superior el valor medio de la concentración de SiO<sub>2</sub> considerando todas las muestras (incluidas las del MAC-21) alcanza un valor medio de 15 mg L<sup>-1</sup>, mientras que si se consideran sólo las muestras obtenidas en esta investigación alcanza un valor medio de 28 mg L<sup>-1</sup>. Las bajas concentraciones de SiO<sub>2</sub> medidas en las muestras del proyecto MAC-21 no se ajustan con las concentraciones obtenidas en esta investigación. Estas diferencias posiblemente están relacionadas con la alteración de las muestras debido a que las muestras del proyecto MAC-21 estuvieron almacenadas durante mucho tiempo.

En los sondeos profundos de Tuineje la concentración media de SiO<sub>2</sub> es de 44,5 mg L<sup>-1</sup> y en los sondeos profundos de Tesejerague de 40 mg L<sup>-1</sup>. No se descarta que los mayores contenidos de SiO<sub>2</sub> en las muestras de la Unidad Inferior estén relacionados con los tipos litológicos por los que circulan las aguas subterráneas. Como se discutió en el Capítulo 2, algunas descripciones litológicas de sondeos profundos de Tuineje apuntan a la existencia a mayor profundidad de rocas intrusivas de composición gabroide.

### **Amonio**

La concentración de amonio en el agua subterránea ha sido medida en algunas muestras del proyecto MAC-21 (1982), ITGE (1991) y en esta investigación.

Las concentraciones de amonio en aguas correspondientes a la Unidad Superior en algunos casos son muy altas y corresponden en la mayoría de los casos a aguas obtenidas en pozos. Las muestras con mayores concentraciones de amonio se registran en los análisis realizados a muestras de pozos del proyecto MAC-21 (1982). Esta es atribuida a la posible contaminación que producen las palomas que viven en las cavidades que se forman en estas captaciones como consecuencia del derrumbamiento de las paredes. En las muestras de manantiales los valores de amonio son inferiores a los límites de detección analíticos.

Muchas de las muestras del proyecto MAC-21 (1982) que presentaban concentraciones de amonio demasiado elevadas han sido descartadas del análisis hidrogeoquímico. No obstante, estas determinaciones no fueron realizadas a todas las muestras.

Las muestras obtenidas en los sondeos profundos de Tuineje y Tesejerague presentan concentraciones de amonio inferiores a los límites de detección de laboratorio.

### **Fosfato**

Las muestras de la Unidad Superior y la Unidad Inferior obtenidas en esta investigación no presentan concentraciones medibles de PO<sub>4</sub> (<0,05 mg L<sup>-1</sup>). En las muestras obtenidas en el Malpaís se han medido ciertas concentraciones de PO<sub>4</sub> que varía entre 0,1 y 0,7 mg L<sup>-1</sup>.

La mayoría de las muestras de pozos de la Unidad Superior obtenidas en el proyecto MAC-21 (1982) presentan concentraciones altas de fosfato. En los manantiales la concentración de  $\text{PO}_4$  varía entre 0,07 y 0,9  $\text{mg L}^{-1}$ , mientras que en los pozos varía entre 0,1 y 5,1  $\text{mg L}^{-1}$ . Algunas muestras que fueron descartadas de este análisis por presentar concentraciones altas de amonio, presentan concentraciones de  $\text{PO}_4$  muy elevadas, que pueden llegar hasta 30  $\text{mg L}^{-1}$ . No se descarta que la mayor parte del fosfato reconocido en estas muestras tenga su origen en la contaminación que producen las palomas que se alojan en la mayoría de estas captaciones. Tampoco se descartan errores asociados a la toma de muestras y almacenamiento de las mismas.

#### 4.5.7.- Relaciones iónicas

Las relaciones iónicas en muchos casos permiten comprender las reacciones fisicoquímicas que afectan a las aguas subterráneas en su camino desde las áreas de recarga hacia los puntos de descarga, y tienen directa relación con los materiales a través de los cuales circula el agua y/o fenómenos modificadores que cambian su composición. Es importante destacar que pequeños errores analíticos pueden hacer variar de modo significativo el valor de las relaciones iónicas, especialmente en muestras que presentan una baja mineralización.

Para evaluar la tendencia de algunas relaciones a medida que aumenta la salinidad del agua se ha graficado el valor de la relación versus la concentración de cloruros. Las relaciones calculadas son las siguientes:  $r_{\text{Na}/r_{\text{Cl}}}$ ,  $r_{\text{Na}/r_{\text{K}}}$ ,  $r_{\text{SO}_4}/r_{\text{Cl}}$ ,  $r_{\text{Mg}/r_{\text{Cl}}}$ ,  $r_{\text{Mg}/r_{\text{Ca}}}$ ,  $r_{\text{SO}_4}/r_{\text{Ca}}$ ,  $r_{\text{Cl}}/r_{(\text{HCO}_3+\text{CO}_3)}$ ,  $\text{Cl}/\text{B}$  (molar),  $\text{Cl}/\text{F}$  (molar) y  $r_{\text{Cl}}/r_{\text{Br}}$  ( $r=\text{meq L}^{-1}$ ).

**$r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}}$ :** El valor de esta relación está asociado a la existencia de procesos de cambio de bases, debido a que el ión cloruro no es afectado por la retención con el terreno y el ión sodio sí. También el valor de esta relación puede verse alterado por la meteorización que afecta a algunos silicatos, los cuales podrían liberar sodio al agua. En el agua de mar esta relación tiene un valor aproximado de 0,82, mientras que en el agua de lluvia alcanza un valor medio de 0,86. En el agua subterránea el valor de esta relación es más alto, alcanzando un valor medio de 1,1 en la Unidad Superior, 0,94 en sondeos profundos en Tesejerague y 0,96 en los sondeos profundos en Tuineje. Los valores más altos de la relación en la Unidad Superior pueden ser explicados por un aporte de sodio por la alteración de las plagioclasas. En esta figura también se presenta la relación  $r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}}$  versus  $r_{\text{Cl}}$ , donde se observa que en general al aumentar la concentración de cloruro en el agua el valor de la relación es menos disperso y se sitúa en torno al valor calculado para la relación marina. Así, los valores de la relación  $r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}}$  en muestras de manantiales y pozos de la Unidad Superior presentan una gran dispersión, con los muy altos asociados a la alteración de plagioclasas. En las muestras de la Unidad Inferior estos valores son más bajos y en general se aproximan al valor marino a medida que aumenta la concentración de cloruro. En las muestras del Malpaís el valor de la

relación es variable, presentando valores mayores en las muestras más diluidas y situándose en torno al valor de la relación marina para las muestras de mayor mineralización.

**rNa/rK:** En agua dulce los valores más frecuentes de esta relación suelen estar comprendidos entre 3 y 250, mientras que en el agua marina varía entre 40 y 50 (Custodio y Llamas, 1983). En el agua de lluvia de la zona alcanza un valor medio de 27. En el agua subterránea en general se observa que el valor de esta relación tiende a crecer a medida que aumenta la salinidad. Así, en aguas de manantiales y pozos de la Unidad Superior alcanza un valor medio de 53, mientras que en los sondeos profundos de Tuineje es de 84 y en los sondeos profundos de Tesejague aumenta hasta alcanzar un valor medio de 106. Los valores más altos de esta relación obtenidos para las muestras de la Unidad Inferior pueden ser explicados por la interacción agua-roca, donde tras la alteración de los silicatos existe una sorción preferente del K en los minerales de alteración. En los trabajos realizados en la vecina isla de Lanzarote (Custodio, 1974) también se observa una tendencia a crecer de la relación a medida que aumenta la salinidad del agua.

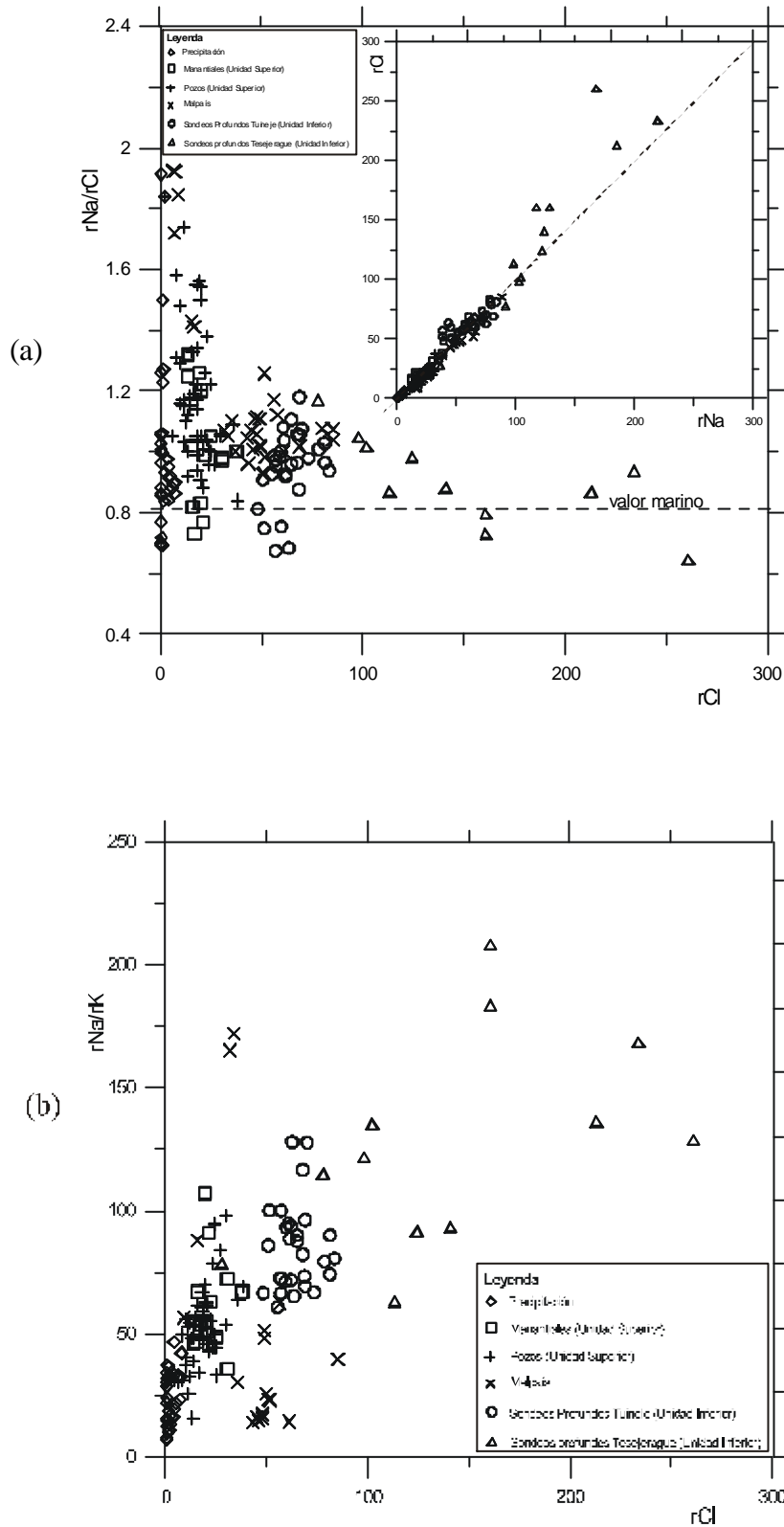
Por otro lado en las muestras tomadas en el Malpaís se observa una ligera disminución de esta relación a medida que aumenta la salinidad del agua de tal manera que en las aguas menos salinas el valor de la relación varía entre 65 y 165, y en las aguas más salinas por lo general el valor de la relación es menor a 50 (Figura 4.28(b)).

**rSO<sub>4</sub>/rCl:** El valor de esta relación en el agua de mar es de 0,11 y en las precipitaciones locales tiene un valor medio de 0,34, que es ligeramente superior al valor medio obtenido en la Unidad Superior (0,16) y muy inferior respecto a la medio observado en los sondeos profundos en Tuineje (0,66).

La Figura 4.29(a) muestra la relación rSO<sub>4</sub> versus rCl, donde se observa que los valores de las muestras de la precipitación y de la Unidad Superior se sitúan en torno al valor de la relación marina. A partir de esta relación se deduce que el sulfato y cloruro del agua de lluvia responden principalmente a la aportación iónica proveniente del aerosol marino y que esta última relación es traspasada a las aguas de la Unidad Superior. En esta figura también se observa que la distribución de puntos en la Unidad Inferior muestra una tendencia muy distinta a la lluvia y a la Unidad Superior, con un valor de la relación rSO<sub>4</sub>/rCl muy elevado para un origen solamente meteórico. Por otro lado se observa que las aguas de la Unidad Inferior de los sondeos profundos de Tuineje muestran un aumento de los contenidos de sulfato independientemente de la concentración de cloruro.

La Figura 4.29(b) muestra la relación rSO<sub>4</sub>/rCl vs. rCl en el agua de lluvia, en la Unidad Superior (manantiales y pozos) y en la Unidad Inferior. Las aguas de la Unidad Superior presentan valores de la relación rSO<sub>4</sub>/rCl que responden a los valores de la precipitación. Se destacan 4 muestras que presentan un valor de la relación muy inferior al marino y corresponden a muestras tomadas en pozos situados en las cercanías de la localidad



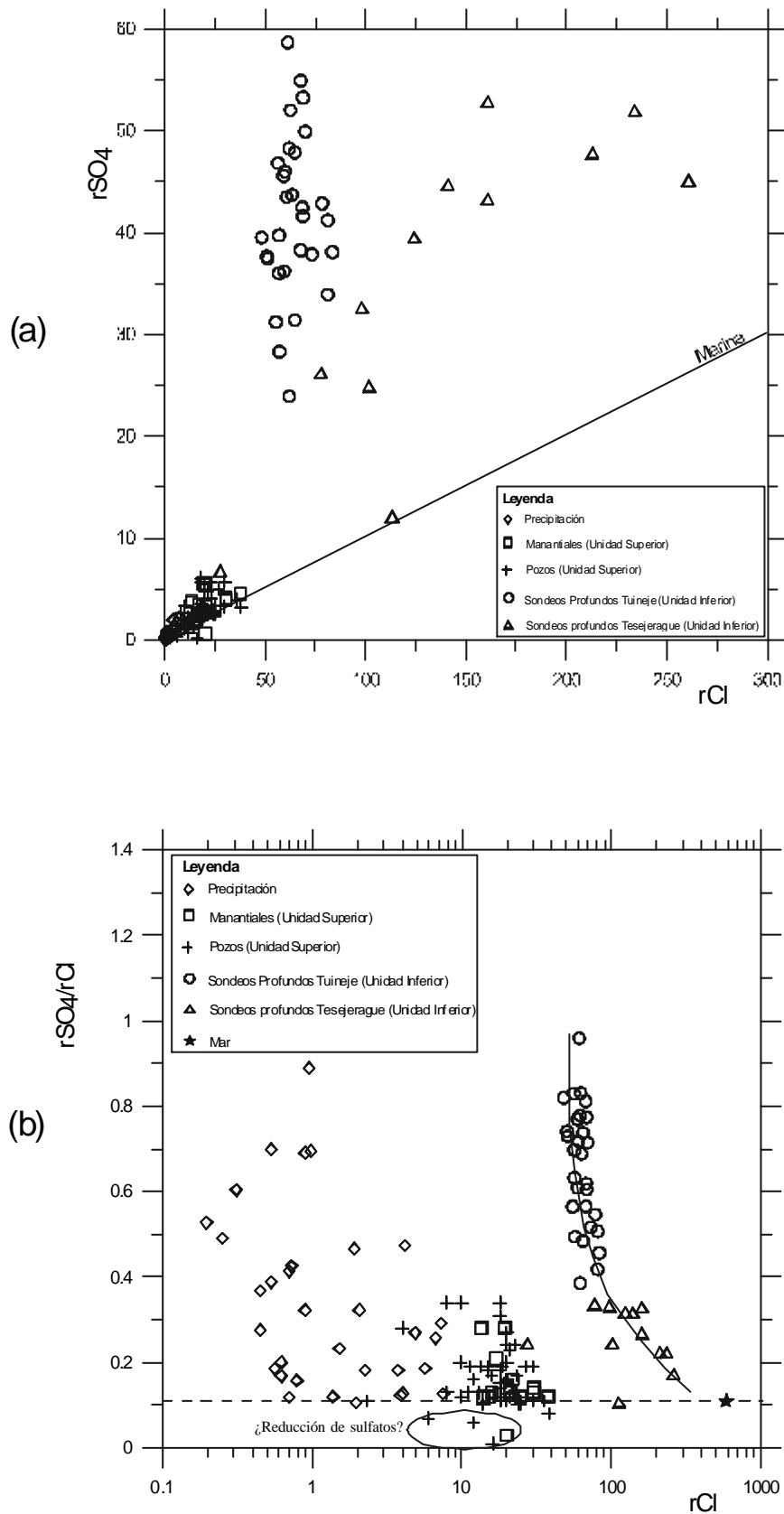


**Figura 4.28.-** Representación de las relaciones: (a)  $rCl$  versus  $rNa$  y  $rNa/rCl$  versus  $rCl$  y (b)  $rNa/rK$  versus  $rCl$  para las muestras de la precipitación, manantiales y pozos de la Unidad Superior, sondeos profundos de la Unidad Inferior y pozos y sondeos poco profundos del Malpaís.

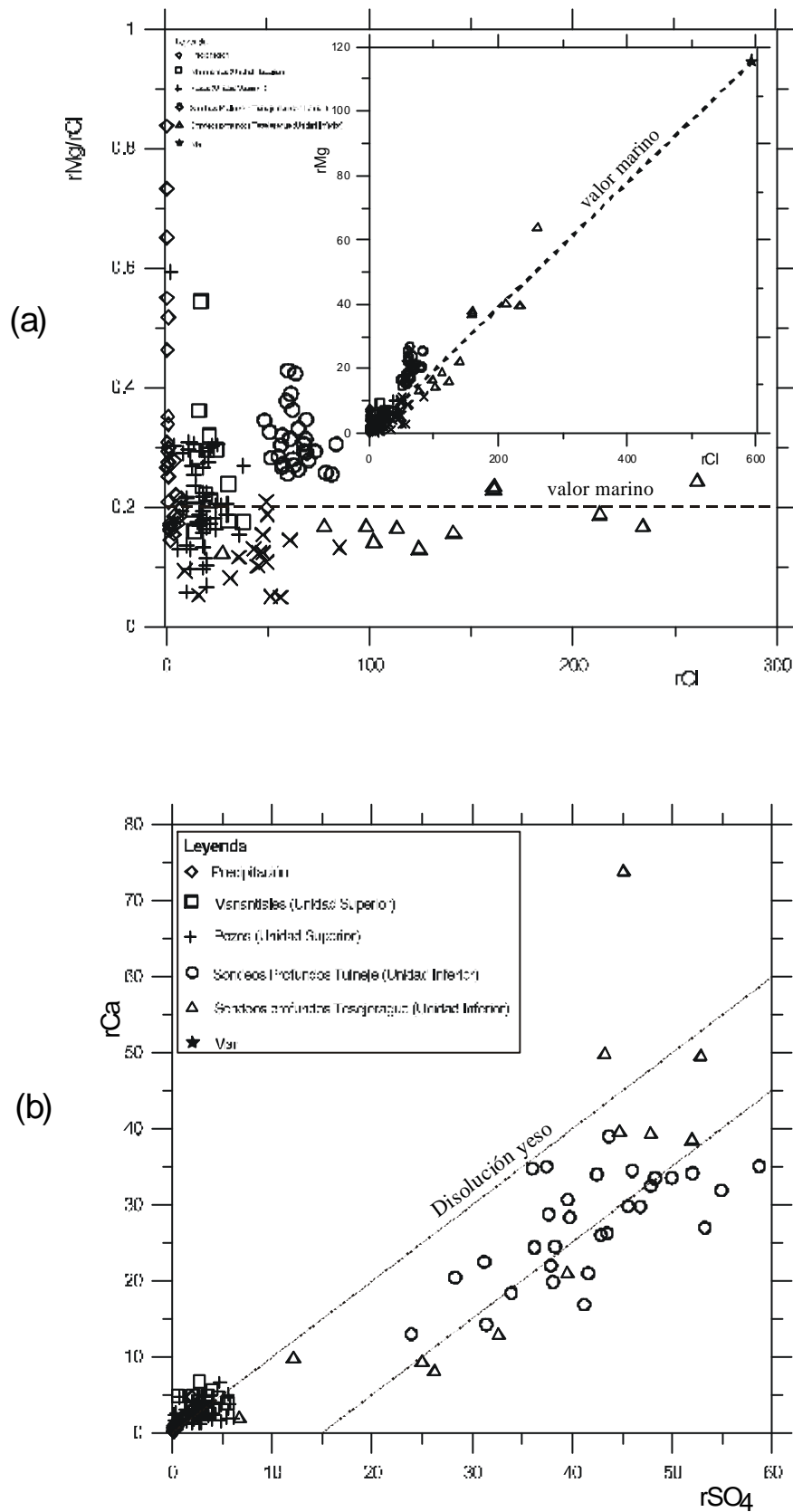
de Betancuria (proyecto MAC-21, 1982). No se dispone de la determinación de amonio de estas muestras, pero las concentraciones de fosfato son mayores a  $1 \text{ mg L}^{-1}$ . En algunas muestras que fueron descartadas del estudio por presentar altas concentraciones de amonio también se observan bajos valores para la relación  $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ , por lo que no se descarta fenómenos de reducción de sulfatos limitados a las captaciones como consecuencia de contaminación orgánica. A medida que aumenta la concentración de cloruros en el agua de la Unidad Superior y la Unidad Inferior, el valor de la relación  $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$  se aproxima a la recta de la relación  $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$  para el agua de mar. A partir de estos resultados se deduce que los sulfatos de la Unidad Inferior tienen un origen distinto al meteórico, pero con una componente de origen marino importante. Se descarta que los elevados contenidos de  $\text{SO}_4$  en la Unidad Inferior estén relacionados con contaminación agrícola, pues no se detectan contenidos importantes de  $\text{NO}_3$  en estas aguas.

**$r\text{Mg}/r\text{Cl}$ :** dada la alta concentración de magnesio en el agua de mar el estudio de esta relación tiene cierto interés para evaluar la posible mezcla de agua de origen meteórico con agua marina. Sin embargo el estudio de esta relación debe ser tomado con precaución debido a posibles aportes de magnesio al agua como consecuencia de la alteración de silicatos magnésicos (Custodio y Llamas, 1983). En la Figura 4.30(a) se presenta la relación  $r\text{Mg}/r\text{Cl}$ , donde se observa que las muestras de manantiales y pozos de la Unidad Superior se sitúan en torno al valor de la relación marina. Esta aproximación con el valor de la relación marina puede ser atribuida a la aportación del aerosol marino del agua de lluvia, la cual traspasaría esta marca al agua de la recarga. Por otro lado se observa que las muestras de la Unidad Inferior también se sitúan en torno al valor de la relación del agua de mar, aunque en este caso no se puede atribuir un origen meteórico de la relación a estas muestras. A partir del estudio de la relación  $r\text{Mg}/r\text{Cl}$  vs.  $r\text{Cl}$  se observa que las muestras de la Unidad Inferior tienden a aproximarse al valor de la relación  $r\text{Mg}/r\text{Cl}$  para el agua marina a medida que aumenta la concentración de cloruro en el agua. La mayor dispersión de esta relación en las muestras de los sondeos profundos de Tuineje puede ser atribuida a la menor mineralización de estas muestras, lo que hace resaltar el efecto de la interacción agua-roca, que incide en una mayor aportación de magnesio al agua como consecuencia de la alteración de silicatos magnésicos.

**$r\text{SO}_4/r\text{Ca}$ :** El estudio de la relación  $\text{SO}_4/\text{Ca}$  tiene como objetivo establecer posibles orígenes del sulfato en el agua subterránea. La Figura 4.30(b) presenta la relación  $r\text{SO}_4/r\text{Ca}$ , donde se observa la estrecha relación de ambos iones en las muestras de la Unidad Inferior. En las aguas de la Unidad Superior no se distingue una relación clara de ambos. En las muestras de los sondeos profundos de Tuineje la concentración de sulfato aumenta de forma lineal a la concentración de calcio, mientras que en los sondeos profundos de Tesejerague se observa un aumento en la concentración de calcio respecto al cloruro. La Figura 4.31(a) presenta la relación  $r\text{SO}_4/r\text{Ca}$  versus  $r\text{Cl}$  donde se observa que en las muestras de los sondeos profundos



**Figura 4.29.-** Representación de las relaciones: (a)  $rSO_4$  versus  $rCl$  y (b)  $rSO_4/Cl$  versus  $rCl$  para las muestras de la precipitación, manantiales y pozos de la Unidad Superior y sondeos profundos de la Unidad Inferior.



**Figura 4.30.-** Representación de las relaciones: (a)  $rMg$  versus  $rCl$  y  $rMg/Cl$  versus  $rCl$  y (b)  $rCa$  versus  $rSO_4$  para las muestras de la precipitación, manantiales y pozos de la Unidad Superior, sondeos profundos de la Unidad Inferior y pozos y sondeos poco profundos del Malpaís.

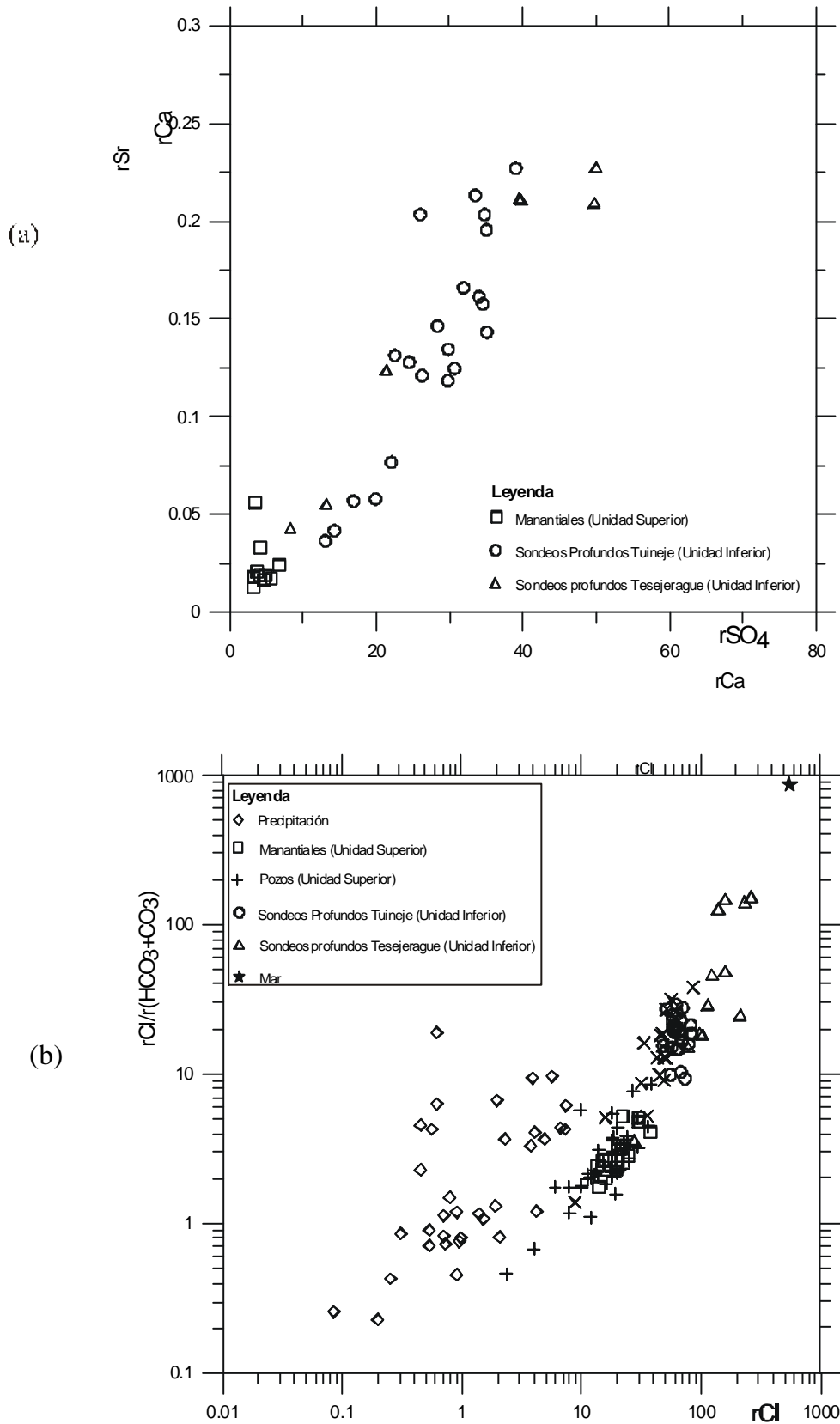
de Tuineje y algunas muestras de los sondeos profundos de Tesejerague muestran un aumento de la relación  $rSO_4/rCa$  a medida que aumenta la concentración de cloruro. Sin embargo para concentraciones de cloruro mayores a  $100 \text{ meq L}^{-1}$  el valor de la relación disminuye progresivamente hasta estabilizarse en torno a 1.

**rSr/rCa:** Las concentraciones de estroncio en todas las muestras de agua de lluvia son inferiores a los límites de detección de laboratorio ( $<0,5 \text{ mg L}^{-1}$ ). El valor de la relación  $rSr/rCa$  para el agua marina es de  $14 \cdot 10^{-3}$  (Custodio y Llamas, 1983).

El valor de la relación en manantiales y pozos de la Unidad Superior alcanza un valor medio de  $25 \cdot 10^{-3}$  y es menor al valor medio calculado para las muestras de la Unidad Inferior ( $3 \cdot 10^{-3}$ ). Sin embargo, algunas muestras de sondeos profundos que presentan concentraciones de calcio inferiores a  $20 \text{ meq L}^{-1}$  también presentan valores para esta relación que se ajustan mejor al valor medio de la relación de la Unidad Superior. La Figura 4.31(a) presenta la relación  $rSr/rCa$ , donde se observa que el valor de la relación aumenta para valores de calcio mayores a  $20 \text{ meq L}^{-1}$ . El aumento de la relación  $rSr/rCa$  en las muestras de los sondeos profundos, unido a un aumento continuo de los contenidos de estroncio en el agua, indicarían la saturación en calcio en la mayoría de las muestras de la Unidad Inferior.

**rCl/r(HCO<sub>3</sub>+CO<sub>3</sub>):** En aguas continentales con pH mayores a 7 tiene normalmente un valor entre 0,1 y 5. En el agua de mar varía entre 20 y 50 (Custodio y Llamas, 1983). Un continuo crecimiento de esta relación indicaría un posible proceso de incorporación selectiva de cloruro y cambios bruscos pueden señalar los límites entre aguas de distintos orígenes (Custodio, 1978). En el área de estudio el valor de esta relación debe tomarse con precaución debido a la sospecha de aportaciones de CO<sub>2</sub> de origen profundo que modificaría su valor, aunque no produciría una variación inmediata. En la Unidad Superior el valor medio de esta relación es de 2,9, muy próximo al valor medio obtenido en el agua de lluvia (3,7) y dentro de lo esperado para aguas de origen continental. En la Unidad Inferior, el valor de esta relación puede variar entre 9,3 y 29,1 en Tuineje, y 3,6 y 154 en Tesejerague. La Figura 4.31(b) muestra la relación  $rCl/r(HCO_3+CO_3)$  vs.  $rCl$ , donde se observa que a medida que aumenta la concentración de cloruros en el agua, el valor de la relación  $rCl/r(HCO_3+CO_3)$  aumenta rápidamente. La distribución de todos los puntos tiende a aproximarse a la composición del agua de mar y en ningún caso se supera el valor de esta relación.

**Cl/F (molar):** La concentración de flúor en las aguas subterráneas puede variar entre 0,1 y 10 mg/l, mientras que en el agua de mar varía entre 0,6 y 0,7 mg/L (Custodio y Llamas, 1983). La Figura 4.32(a) presenta la relación Cl/F versus Cl para las muestras de la Unidad Superior y Unidad Inferior. Las concentraciones de flúor en todas las muestras de agua de lluvia de la zona son inferiores a los límites de detección de laboratorio ( $<0,5 \text{ mg/l}$ ). No obstante, a partir de la distribución de puntos de la Unidad Superior se puede asumir que la aportación de flúor



**Figura4.31.-** Representación de las relaciones: (a)  $rCl/r(HCO_3+CO_3)$  y (b)  $rSr$  versus  $rCa$  para las muestras de la precipitación, manantiales y pozos de la Unidad Superior, sondeos profundos de la Unidad Inferior y pozos y sondeos poco profundos del Malpaís.

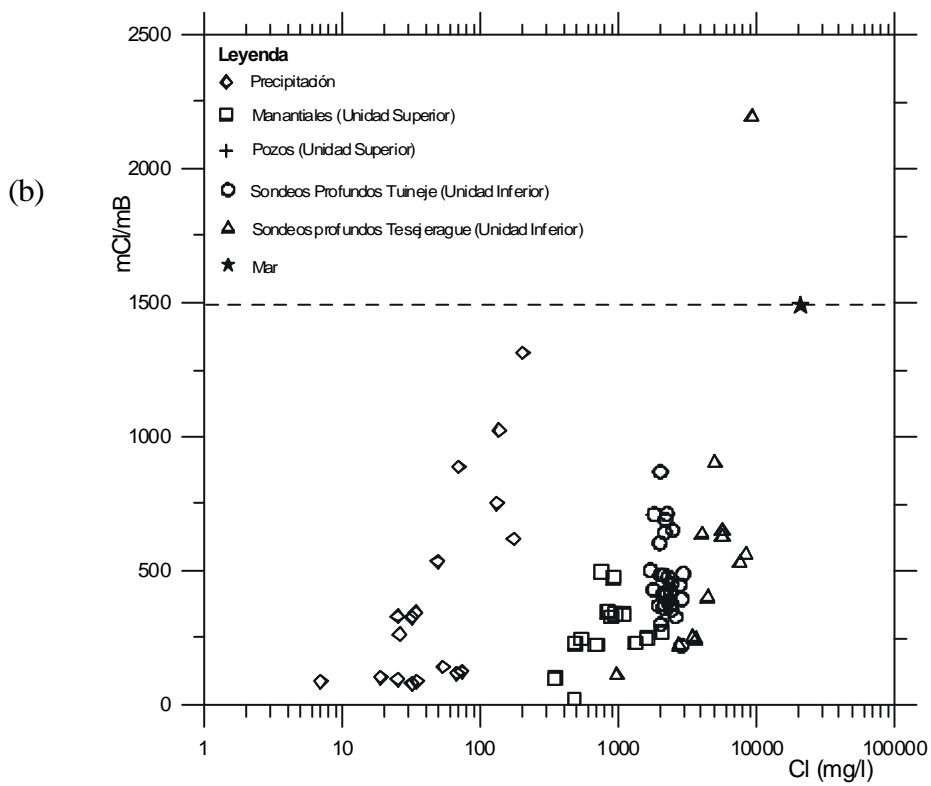
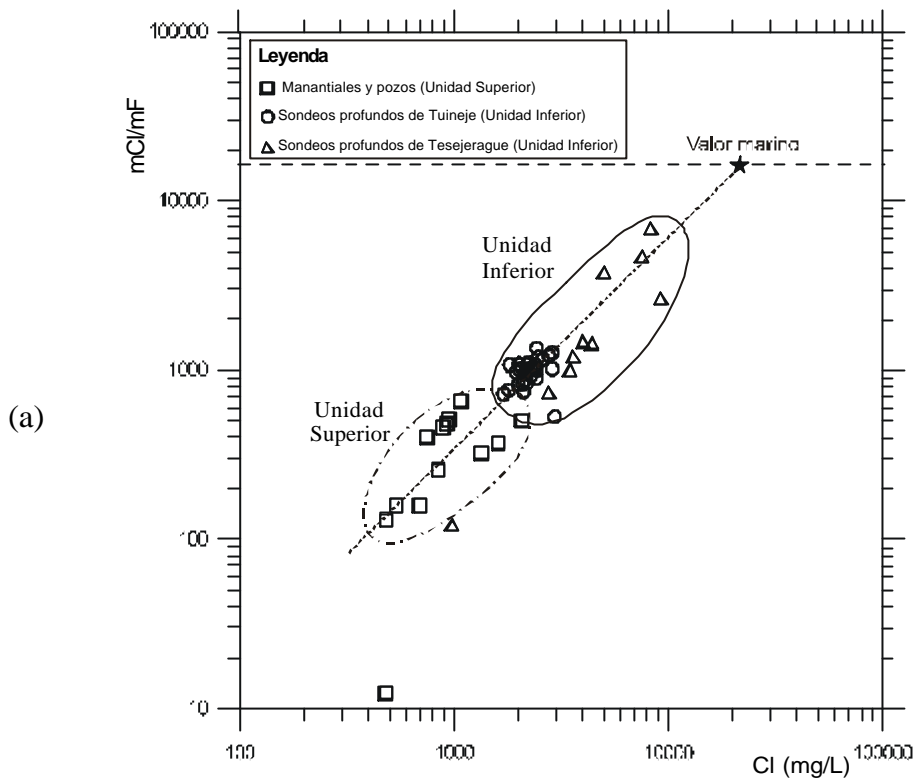
de origen meteórico una vez concentradas las muestras de lluvia por evaporación se correspondería con la distribución de estos puntos. Por otro lado las mayores concentraciones de flúor presentes en las aguas de la Unidad Inferior obedecerían a un origen distinto al meteórico. Del estudio de la relación Cl/F versus Cl se puede deducir que la mayor concentración de flúor en las muestras de la Unidad Inferior tendría su origen en una posible mezcla entre agua de origen meteórico con agua de mar, ya que los puntos de esta unidad se sitúan equidistantes entre la agrupación de puntos de las aguas de la Unidad Superior y del valor de esta relación para el agua de mar.

**Cl/B (molar):** La relación Cl/B en aguas de baja temperatura en rocas basálticas esta controlada por una mezcla conservativa de ambos miembros (Arnórsson y Andrésdóttir, 1995; Aggarwal *et al.*, 2000). Según estos autores el origen natural del B y Cl en el agua subterránea estaría relacionado a: (a) agua meteórica, (b) lixiviación de rocas basálticas (sólo importante en campos geotermales) y (c) agua de mar (como aerosol o por mezcla directa con agua de mar). En el área de estudio la concentración de boro en el agua de lluvia varía entre 0,023 y 0,182 mg L<sup>-1</sup>. En la lluvia y el agua subterránea la relación Cl/B es similar o inferior a la del agua de mar, a excepción de una muestra tomada en un sondeo profundo en las proximidades de Tesejerague y que presentan una relación Cl/B mayor a la del agua de mar (S-131-TE).

La Figura 4.32(b) presenta la relación Cl/B (razón molar) versus Cl (mg L<sup>-1</sup>) para las muestras de agua de lluvia, manantiales, pozos y sondeos profundos. En algunas muestras de precipitación se observa que al aumentar la concentración de cloruros el valor de la relación tiende a aumentar hasta situarse en torno al valor de la relación para el agua marina. La tendencia a crecer de la relación Cl/B a medida que aumenta la concentración de cloruro posiblemente estaría relacionada con un aumento en el contenido de aerosol marino que incorpora la muestra de lluvia. El valor de la relación de las muestras de manantiales y pozos de la Unidad Superior se corresponde con los valores de la relación obtenidos en las muestras de precipitación más diluidas. A medida que aumenta la concentración de cloruro en el agua subterránea el valor de la relación Cl/B crece y la concentración de puntos tiende hacia el valor de la relación del agua de mar (1450). A partir de esta distribución de puntos se deduce que las muestras de agua de la Unidad Inferior tienden a aproximarse más a los valores de Cl/B y Cl del agua de mar respecto a las muestras de la Unidad Superior. Estos resultados indican que el Cl y B presente en las aguas subterráneas proceden de la mezcla de aguas de origen meteórico con agua de mar, aunque no se descartan pequeños aportes de Cl y B procedentes de la lixiviación de basaltos.

**rCl/rBr:** La determinación de Br en este estudio fue realizada con el objetivo de establecer el origen de la salinidad de las aguas subterráneas. Para ello se realizaron 65 determinaciones de Br en los laboratorios de Aguas de Barcelona y en el CIEMAT (Madrid).

El comportamiento del ión Br es igual al del Cl, con contenidos en general menores



**Figura 4.32.-** Representación de las relaciones: (a) Cl/F (razón molar) versus rCl y (b) rCl/B (razón molar) versus rCl para las muestras de la precipitación, manantiales y pozos de la Unidad Superior y sondeos profundos de la Unidad Inferior.



que  $0,01 \text{ mg L}^{-1}$  en aguas dulces y de  $65 \text{ mg L}^{-1}$  en el agua de mar. Para su estudio generalmente se utiliza la relación  $r\text{Cl}/r\text{Br}$ , la cual toma un valor de 655 para el agua de mar (Custodio y Herrera, 2000). En una muestra de agua de mar tomada en la parte norte de la isla de Fuerteventura (Corralejo) se analizó la concentración de bromuro y se obtuvo un valor para la relación  $r\text{Cl}/r\text{Br}$  de 746. Un valor tan alto para la relación marina  $r\text{Cl}/r\text{Br}$  plantea dudas en la determinación de cloruro de la muestra, por lo que se ha considerado para la relación marina el valor de 655. Estas desviaciones suceden cuando las determinaciones de Cl y Br se han realizado por separado y se explican por errores en la dilución de la muestra cuando ésta es muy salina. Los valores mejores y más estables de la relación son los que se obtienen a partir de medidas cromatográficas de Cl y Br en la misma muestra.

Se realizaron siete determinaciones de bromuro en muestras de lluvia (integrando el polvo atmosférico) correspondientes a dos eventos distintos, y una en un pozo próximo a una “gavia” que recoge agua de escorrentía superficial. Los valores obtenidos para la relación son muy altos y varían entre 1000 y 5520. El elevado valor de la relación  $r\text{Cl}/r\text{Br}$  y la relativa alta clorinidad de las aguas podrían ser explicados por la incorporación de halita, quizás transportada eólicamente. Es posible que la halita se forme como consecuencia de la evaporación parcial del rocío del agua marina donde el mar bate fuertemente y el viento es intenso.

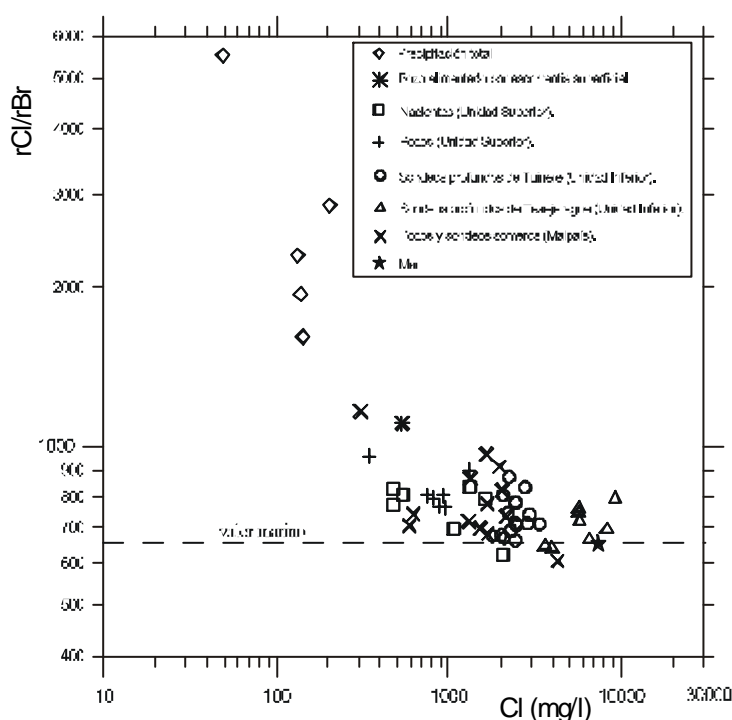


Figura 4.33.- Representación de las relación  $r\text{Cl}/r\text{Br}$  versus  $r\text{Cl}$  para las muestras de la precipitación, manantiales y pozos de la Unidad Superior y sondeos profundos de la Unidad Inferior.

Para evaluar el valor de la relación  $r_{Cl}/r_{Br}$  respecto al aumento de la salinidad del agua se ha graficado la relación  $r_{Cl}/r_{Br}$  vs. Cl (Figura 4.33). Se observa que en las aguas de la Unidad Superior los valores de la relación  $r_{Cl}/r_{Br}$  son ligeramente superiores al valor de la relación para el agua de mar, pero a medida que aumenta la concentración de cloruro esta muestra una tendencia a disminuir. Por otro lado, en la Unidad Inferior el valor de la relación varía entre 800 y el valor marino, pero en general el conjunto tiende a situarse en torno al valor marino a medida que aumenta la concentración de cloruro.

Las muestras tomadas en los pozos situados en el campo de lavas recientes del Malpaís presentan, para clorinidades diferentes, valores que varían entre cerca del valor marino y valores muy altos, de cerca de 1200. Los valores más altos obtenidos en este sector se ajustan con los valores más bajos obtenidos para el agua de lluvia.

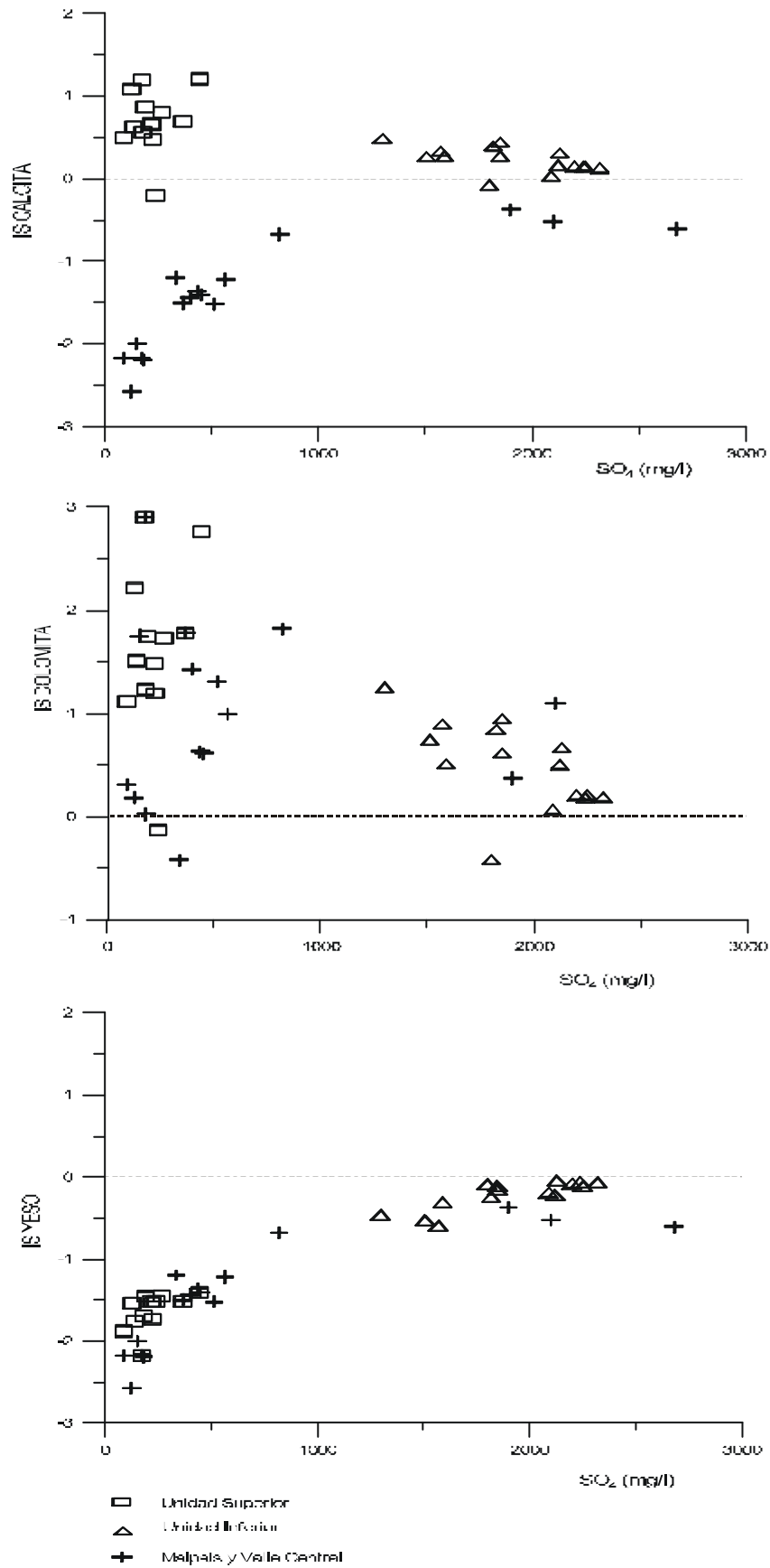
#### 4.5.8.- Estados de saturación

Un agua está en equilibrio con un determinado mineral cuando su índice de saturación (logarítmico) es igual a 0. Considerando las incertidumbres de los valores analíticos medidos en campo y laboratorio, en esta investigación se ha calificado el estado de equilibrio cuando el índice de saturación varía entre  $-0,5$  y  $+0,5$ . Para valores mayores a  $+0,5$  se considera sobresaturación y para valores inferiores a  $-0,5$  subsaturación.

En el estudio de los estados de saturación se han utilizado los análisis químicos más representativos de las distintas unidades y de los que se tiene mayor fiabilidad en las determinaciones del pH y la temperatura. El cálculo del índice de saturación se ha realizado con el programa WATEQ4F (Parkhurst *et al.*, 1976) y los análisis corresponden a los datos tomados en la campaña de 1998/99. Los minerales seleccionados para la determinación de su índice de saturación corresponden a la calcita, dolomita, yeso, magnesita, calcedonia, sílice amorfa y cuarzo.

Todas las muestras de agua con una composición química representativa de la Unidad Superior se encuentran subsaturadas en yeso, ligeramente saturadas en calcita y saturadas en dolomita, mientras que las aguas de la Unidad Inferior se encuentran en equilibrio con el yeso y la calcita, y ligeramente sobresaturadas en dolomita (Tabla 4.13). Las muestras tomadas en el Malpaís y en lavas correspondientes a la Serie Basáltica I se encuentran subsaturadas en calcita y yeso, y en equilibrio o ligeramente sobresaturadas en dolomita (ver Figura 4.34).

Las aguas de la Unidad Superior se encuentran en equilibrio o ligeramente sobresaturadas en magnesita, siempre con signo positivo, mientras las aguas de la Unidad Inferior se encuentran en equilibrio o ligeramente subsaturadas en este mineral. No es claro el origen de la saturación en magnesita en las aguas de la Unidad Superior, pero posiblemente esté relacionado con la alteración de serpentina, mineral muy abundante en las lavas del Complejo Basal (IGME, en prensa).

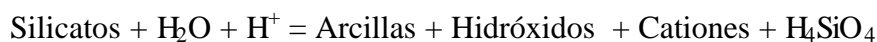


**Figura 4.34.-** Relación entre los índices de saturación en calcita, dolomita, yeso y la concentración de sulfato ( $\text{mg L}^{-1}$ ) para los puntos más representativos de la Unidad Superior, Unidad Inferior y Malpaís.

Todas las muestras están sobresaturadas en cuarzo, en equilibrio con la calcedonia y subsaturadas en sílice amorfa, sin existir diferencias significativas entre las aguas de la Unidad Superior y Unidad Inferior.

#### 4.5.9.- Diagramas de equilibrio

La disolución e hidrólisis de los minerales silicatados cumplen reacciones del tipo:



Este fenómeno depende de la disponibilidad de hidrogeniones, la temperatura del agua y el tiempo de contacto de la solución.

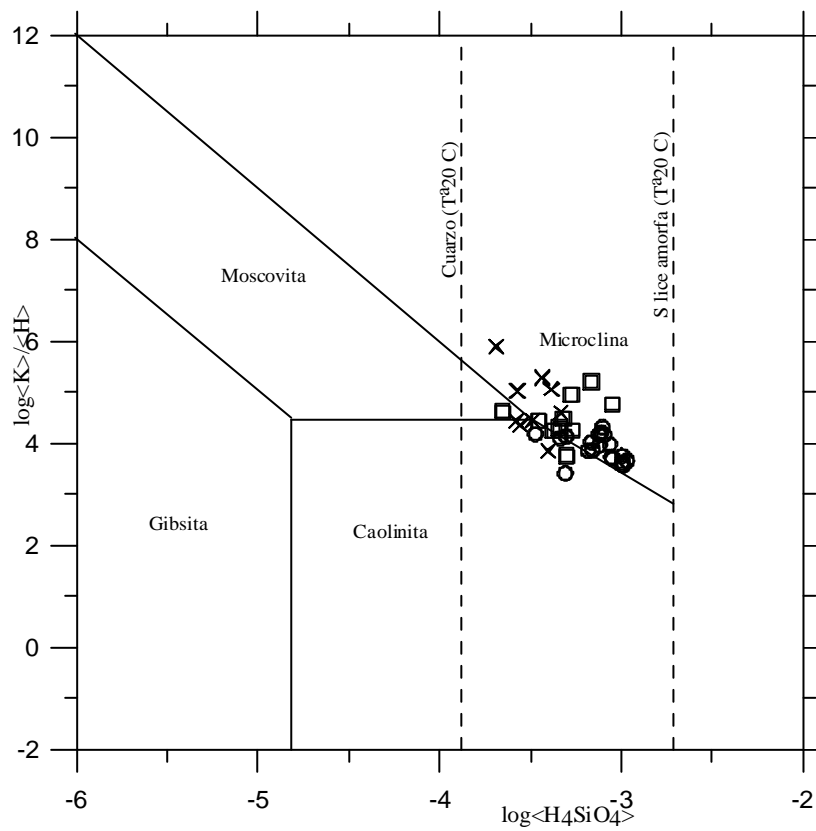
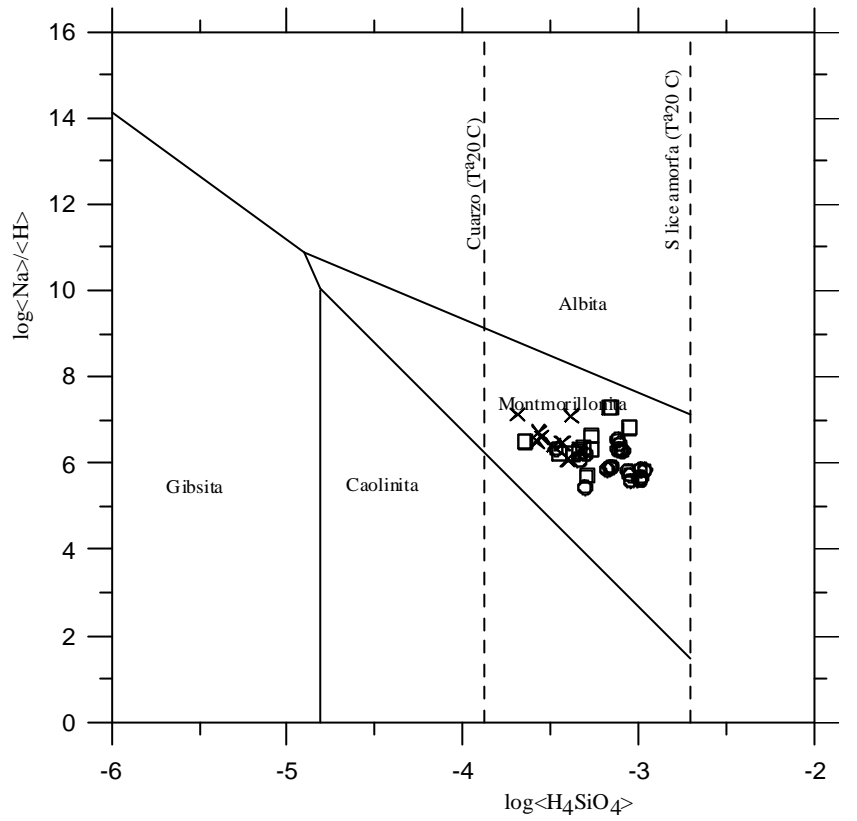
Las Figuras 4.35 y 4.36 presentan los diagramas de estabilidad de las aguas subterráneas con los silicatos a 25°C, tomados de Tardy (1971). También se representan las líneas de solubilidad para el cuarzo y la sílice amorfa a 20°C. Estos diagramas han sido confeccionados a partir de los valores de  $\log[\text{SiO}_4\text{H}_4]$ ,  $\log\langle\text{Na}\rangle+\text{pH}$ ,  $\log\langle\text{K}\rangle+\text{pH}$ ,  $\log\langle\text{Ca}\rangle+2\text{pH}$  y  $\log\langle\text{Mg}\rangle+2\text{pH}$ , calculados por medio del programa WATEQ4F (Parkhurst *et al.*, 1976).

En todas las representaciones se observa que los puntos se sitúan entre los campos de estabilidad del cuarzo y la sílice amorfa, lo que confirma los resultados obtenidos a partir de los índices de saturación y que indican que las aguas se encuentran sobresaturadas en cuarzo y subsaturadas en sílice amorfa. No obstante, las muestras de agua representativas de la Unidad Inferior se aproximan más a la línea de saturación de la sílice amorfa respecto a las aguas de la Unidad Superior y del Malpaís.

En el diagrama de estabilidad del feldespato potásico los puntos quedan agrupados en el campo de estabilidad de la microclina, pasando ligeramente algunos puntos al campo de la caolinita. Por lo tanto las aguas se encuentran sobresaturadas respecto a la microclina.

En el diagrama de estabilidad del feldespato sódico los puntos representativos de las aguas de la Unidad Superior y Unidad Inferior se encuentran de lleno en el campo de estabilidad de la montmorillonita, siendo el mineral que posiblemente se haya formado por la alteración del feldespato sódico. No se observan diferencias significativas respecto a ambos grupos de muestras.

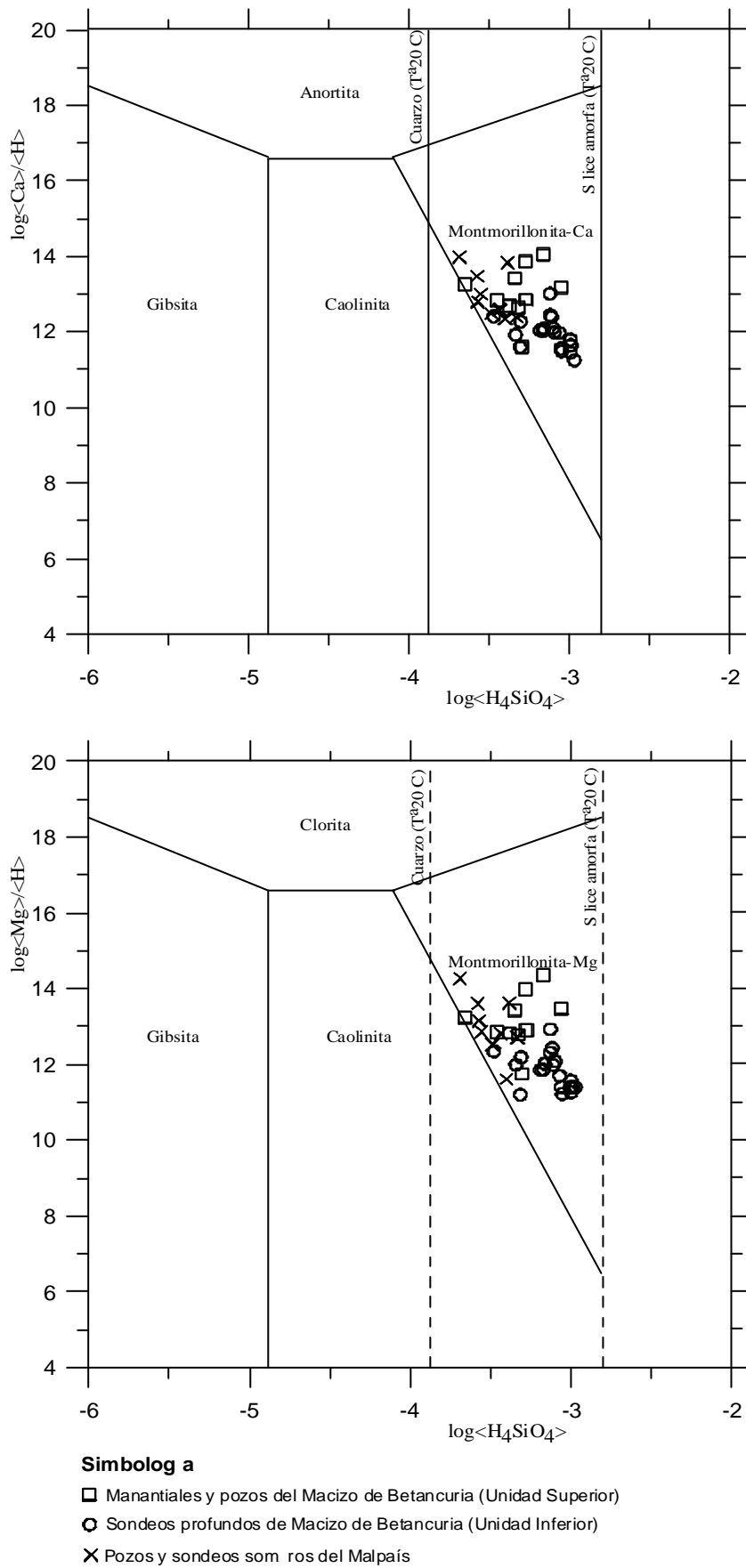
En el diagrama de estabilidad de los silicatos magnésicos los puntos se encuentran en el campo de estabilidad de la montmorillonita magnésica; no obstante, los puntos representativos de la Unidad Inferior y del Malpaís se encuentran más próximos al campo de estabilidad de la caolinita respecto a los puntos representativos de la Unidad Superior. Una situación similar se observa en el diagrama de estabilidad del feldespato cálcico, donde los puntos se encuentran agrupados en el campo de estabilidad de la montmorillonita cálcica, pero los puntos representativos de la Unidad Inferior se encuentran más próximos al límite del campo de estabilidad de la caolinita respecto a los puntos de la Unidad Superior



**Simbolog a**

- Manantiales y pozos del Macizo de Betancuria (Unidad Superior)
- Sondeos profundos de Macizo de Betancuria (Unidad Inferior)
- × Pozos y sondeos someros del Malpa s

**Figura 4.35.-** Diagrama de estabilidad del feldespato sódico (a) y del feldespato potásico (b) para las muestras de la Unidad Superior, Unidad Inferior y del Malpaís.

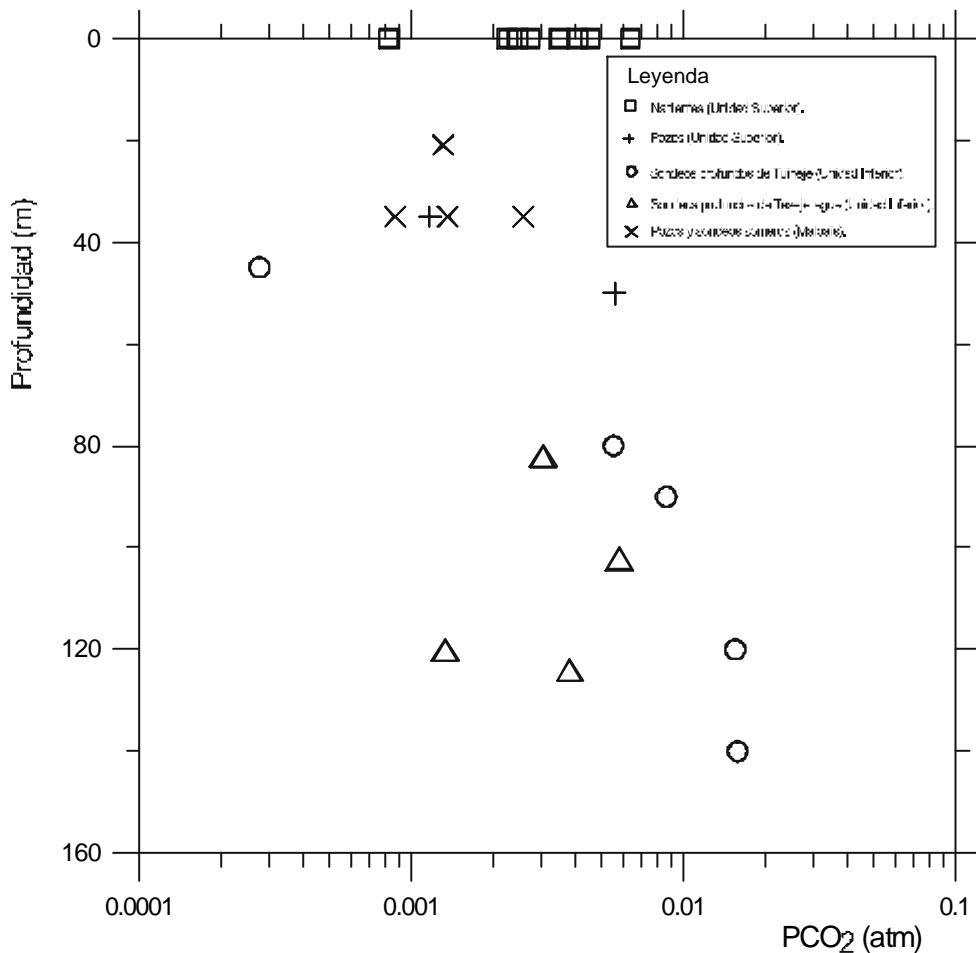


**Figura 4.36.-** Diagrama de estabilidad del feldespato cálcico (a) y de la clorita (b) para las muestras de la Unidad Superior, Unidad Inferior y del Malpaís.

### Presión parcial de CO<sub>2</sub>

A partir de las muestras en que se dispone de valores fiables de pH y temperatura de campo y con las medidas de alcalinidad de laboratorio, con el programa WATEQ4F se ha calculado la presión parcial de CO<sub>2</sub> y el total de componentes del sistema carbonatado presentes en el sistema. Es importante mencionar que el valor de PCO<sub>2</sub> calculado es muy sensible a los valores del pH.

La Tabla 4.13 presenta los valores de la presión parcial de CO<sub>2</sub>, donde se observa que las presiones parciales de CO<sub>2</sub> calculadas varían de bajas a moderadas, con valores entre 10<sup>-3.56</sup> y 10<sup>-1.05</sup> atm. En general los valores de presión parcial de CO<sub>2</sub> menores corresponden a muestras tomadas en manantiales, pozos y sondeos poco profundos ubicados en el Malpaís, mientras que los valores más altos corresponden a muestras tomadas en sondeos profundos en Tuineje y Tesejerague. La Figura 4.37 presenta las presiones parciales de CO<sub>2</sub> vs. la profundidad de la toma de muestra, donde se observa que al aumentar la profundidad de las muestras aumenta ligeramente la presión parcial de CO<sub>2</sub>.



**Figura 4.37.-** Representación de las presiones parciales de CO<sub>2</sub> calculadas con WATEQ4F frente a la profundidad de la toma de la muestra en las aguas de la Unidad Superior, Unidad Inferior y el Malpaís.





El pH guarda relación directa con los aportes de CO<sub>2</sub> profundo, de tal manera que disminuye bruscamente desde valores de alrededor de 8 hasta valores inferiores a 6 (Custodio, 1978). No obstante en las aguas del área de estudio, tanto las muestras de la Unidad Superior como la Unidad Inferior muestran pH en torno a 7, aunque en general se observa una ligera tendencia a disminuir el pH con la profundidad. Por otro lado, al comparar las concentraciones de bicarbonato de las muestras de la Unidad Superior con la Unidad Inferior se observa que las muestras más profundas muestran cantidades significativamente menores de bicarbonato respecto a las muestras de la Unidad Superior. De esta última observación se puede deducir que este aumento de la presión parcial de CO<sub>2</sub> de las muestras de la Unidad Inferior no necesariamente tiene su origen en una aportación de CO<sub>2</sub> de origen profundo. Como se demostrará más adelante a partir de los resultados de la modelación hidrogeoquímica, los pH más bajos en las muestras profundas pueden deberse en parte a la precipitación de calcita por incorporación de Ca<sup>2+</sup>. Por otro lado, a partir de la interpretación de los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  que se discute en el capítulo 6 se indicarán algunas observaciones que apuntan a que el sistema es cerrado al CO<sub>2</sub> y, por lo tanto que no existe una aportación significativa de CO<sub>2</sub> de origen profundo al sistema.

#### 4.5.10.- Modelación de las reacciones

Para el estudio de la evolución hidrogeoquímica de las aguas subterráneas se ha aplicado el programa PHREEQC (Parkhurst, 1995). Este permite la modelación hidrogeoquímica de un determinado sistema para la determinación del tipo y evolución de las reacciones químicas principales, así como las proporciones relativas de las fases que intervienen en dichas reacciones.

En la modelación de las reacciones se realizan numerosas interacciones entre las fases sólida, líquida y gas, las cuales se presentan en figuras en que se compara la concentración iónica de las muestras que se pretende reproducir y la concentración obtenida por modelación. En su representación se adjunta una leyenda que explica las interacciones aplicadas y que se resumen de la siguiente manera: CO<sub>2</sub>-1.8 (agua equilibrada con el CO<sub>2</sub> del suelo a una presión parcial de 10<sup>-1.8</sup> atm), Evp50% (evaporación del 50% del volumen de agua original), Mar 29,9 - Man 70,1 (mezcla de un 29,9% de agua de mar con un 70,1% de agua de manantial o muestra específica), +1,5-Pg (disolución de 1.5 mmol/L de plagioclasa), -2,2 Cc (precipitación de 2,2 mmol/L de calcita). Las abreviaciones de las distintas fases minerales utilizadas corresponden a: Gs (yeso), Ft (forsterita), Dp (dióxido), Pg (plagioclasa), Cc (calcita), CO<sub>2</sub>(g) (CO<sub>2</sub> gas), It (illita), Mt-Ca (montmorillonita cálcica), Kl (caolinita) y Qz (cuarzo).

#### Simulación de reacciones de la escorrentía

Las importantes diferencias entre la composición química del agua de las precipitaciones y la escorrentía han planteado el estudio de posibles reacciones ocurridas en el

suelo a partir de las precipitaciones. La recuperación de seis muestras de escorrentía y charcos durante las precipitaciones del 15/03/99 ha permitido hacer una simulación de las reacciones ocurridas desde la precipitación a la escorrentía. Para la reproducción del agua de escorrentía se ha puesto en contacto el agua de lluvia con algunas fases minerales y se han reproducido procesos de evaporación. Si bien la alteración de los minerales no se produce en el momento en que el agua escurre por el suelo, la interacción de los minerales con el agua de precipitaciones anteriores liberaría ciertos iones que serían tomados por escurrimientos de agua en lluvias posteriores. Así, para la reproducción del agua de escorrentía se ha considerado la lixiviación de plagioclasas y la formación de nuevos minerales como la montmorillonita, caolinita e illita. También se considera la precipitación de calcita y cuarzo.

La simulación de la evaporación del agua de lluvia se realiza quitando agua desde el sistema químico. Para conseguir este efecto el código PHREEQC cuenta con la opción REACTION que puede considerar el agua como un reactivo irreversible, con coeficiente de reacción negativo, lo cual permite concentrar el agua un cierto número de veces. Siendo el cloruro un elemento conservativo en el agua, la concentración del agua de lluvia se hizo hasta alcanzar la concentración del cloruro de la escorrentía.

La Figura 4.38 presenta la muestra de charco Pájara-CH, obtenida aguas arriba del Barranco del Carbón y a una altitud aproximada de 350 m. Para su reproducción se ha utilizado una muestra de precipitación recuperada en Pájara (Pájara-4) el 7/01/99. En la simulación de la evaporación se extrajo el 54% del volumen de agua para obtener un contenido de cloruro similar al de la muestra del charco. Posteriormente se añade 0,85 mmol/L de plagioclasa para alcanzar los contenidos de sodio de la muestra del charco. También se considera la formación de 0,25 mmol/L de montmorillonita, 0,18 mmol/L de caolinita, 0,04 mmol/L de illita, 0,47 mmol/L de calcita y 0,6 mmol/L de cuarzo.

La Figura 4.39 presenta una muestra de escorrentía recuperada en el mirador de Morro de Velosa (680 m) en el momento en que se producían fuertes precipitaciones. Para su reproducción se ha utilizado la muestra de precipitación Tuineje-6 recuperada el 26/03/99. Para repetir la muestra de escorrentía es necesario evaporar un 10% del agua de lluvia, con lo que se obtiene una buena correspondencia para todos los iones a excepción del sodio (déficit) y CIDT (exceso). Para alcanzar la concentración de sodio es necesario añadir 1,91 mmol/L de plagioclasa. También se precipita 1,15 mmol/L de calcita, 1,1 mmol/L de cuarzo y 1,05 mmol/L de montmorillonita. Los contenidos calculados de sodio, calcio, magnesio, potasio y sulfato se ajustan bien, mientras que el CIDT presenta un ligero exceso respecto al valor medido.

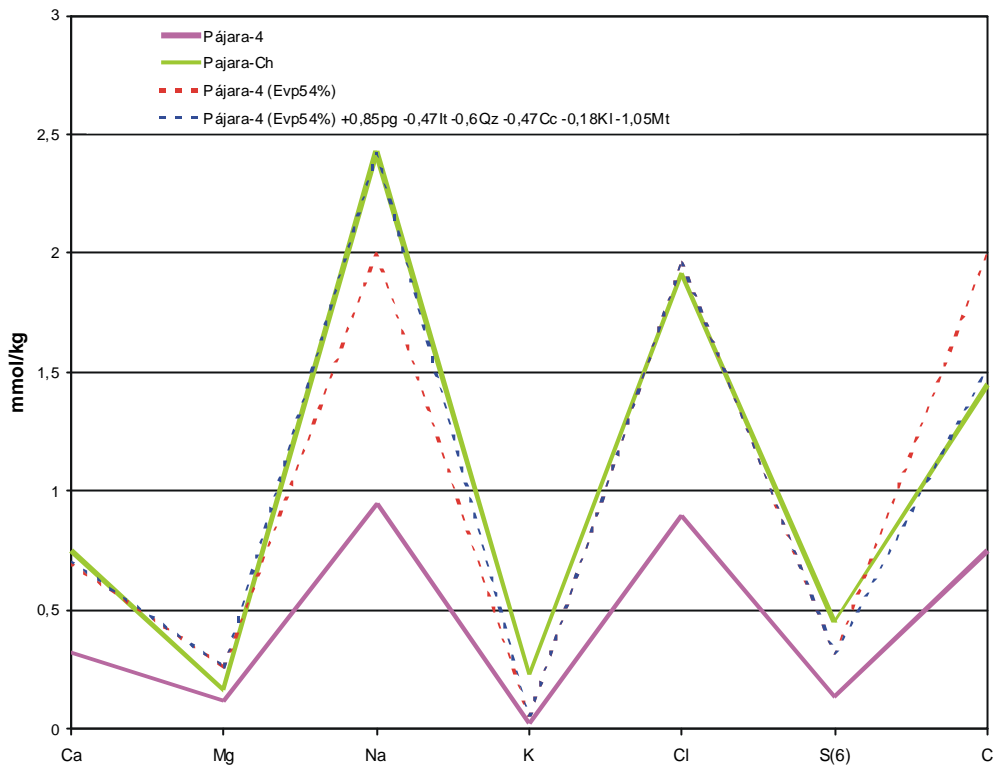


Figura 4.38.- Representación de las muestras de precipitación Pájara-4 (7/01/99) y de la muestra de escorrentía Pájara-CH.

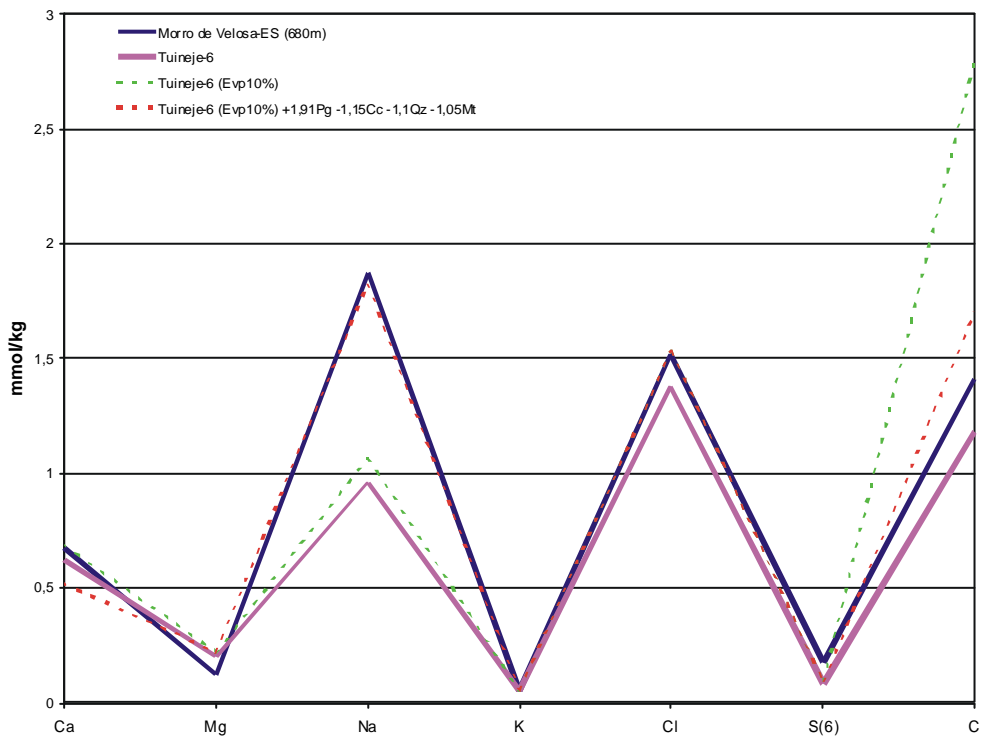


Figura 4.39.- Representación de las muestras de precipitación Tuineje-6 (26/03/99) y de la muestra de escorrentía Morro de Velosa - ES.

### Simulación de reacciones durante la recarga

Las características químicas de la recarga quedan definidas por procesos que ocurren simultáneamente en el suelo, los cuales corresponden a evapotranspiración, equilibrio con el CO<sub>2</sub> del suelo generado por la actividad edáfica, reacciones entre los minerales del medio y el agua, y la formación de nuevos minerales.

Para la simulación de estas reacciones primero se establece el equilibrio entre el agua de lluvia con el CO<sub>2</sub> del suelo. Este último valor se ha obtenido a partir de la fórmula propuesta por Brook *et al.* (1983) y que considera para el cálculo la evapotranspiración potencial anual (mm) de la zona. Para la comparación de este resultado también se utilizó la fórmula de Harmon *et al.* (1975) que considera la temperatura media anual. A partir de estos métodos, se obtuvo un valor orientativo para la presión parcial de CO<sub>2</sub> del suelo en la zona de 10<sup>-1.8</sup> atm.

En un primer intento la simulación se realizó considerando la composición química del agua de lluvia recuperada de los tomamuestras. Sin embargo, las elevadas concentraciones de sodio en el agua freática generaron importantes diferencias entre los valores medidos y calculados. Suponiendo aportes de sodio en el suelo se utilizaron las muestras de agua tomadas de la escorrentía y charcos recuperadas durante la tormenta del 12/03/99 como representativa de la lluvia y deposición seca. La Tabla 4.14 presenta los valores medidos y calculados en estas simulaciones.

#### Zona de Pájara

En esta zona se reproduce la composición de las aguas freáticas muestreadas en el proyecto MAC-21 y que corresponden a los pozos L-236 y L-237. Para la reproducción se utilizó agua de un charco recuperada en las cercanías de la localidad de Toto (Pájara-CH), a una altitud aproximada de 350 m. Para el cálculo primero se equilibró el agua del charco con el CO<sub>2</sub> del suelo a una presión parcial de 10<sup>-1.8</sup> atm y luego fue concentrada extrayendo entre el 75% y 80% del volumen de agua, para obtener valores de cloruros próximos a la composición del agua de los pozos (Figura 4.40). Se observa una buena correspondencia entre los valores medidos y calculados para el sodio. El potasio presenta un ligero déficit en el agua freática respecto a los valores calculados, que puede ser debido a la retención por arcillas en su trayecto hacia la zona saturada o simplemente al efecto de la incertidumbre analítica. El sulfato también presenta un ligero déficit en el agua respecto a su valor estimado y no se descarta que este exceso provenga de la muestra del charco utilizada para la simulación, por efecto de contaminación. Sin embargo, las concentraciones de calcio y CITD son muy inferiores en el agua freática respecto a sus valores calculados por evaporación. Por lo tanto, la existencia en la zona de potentes caliches hace factible la hipótesis de precipitación de carbonato de calcio proveniente de la lluvia en los niveles superiores del suelo y con ello su baja concentración en el agua freática.

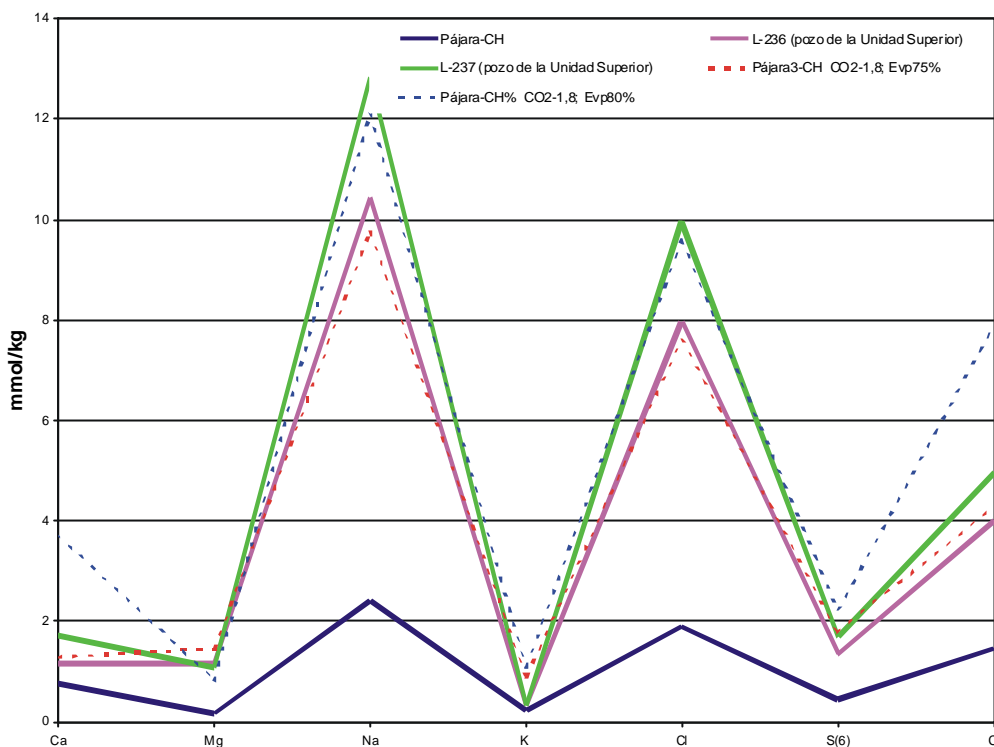


Figura 4.40.- Representación de las muestras de escorrentía Pájara-CH y de los pozos de la Unidad Superior L-236 y L-237 medidos y calculados por equilibrio con el CO<sub>2</sub> del suelo y evaporación.

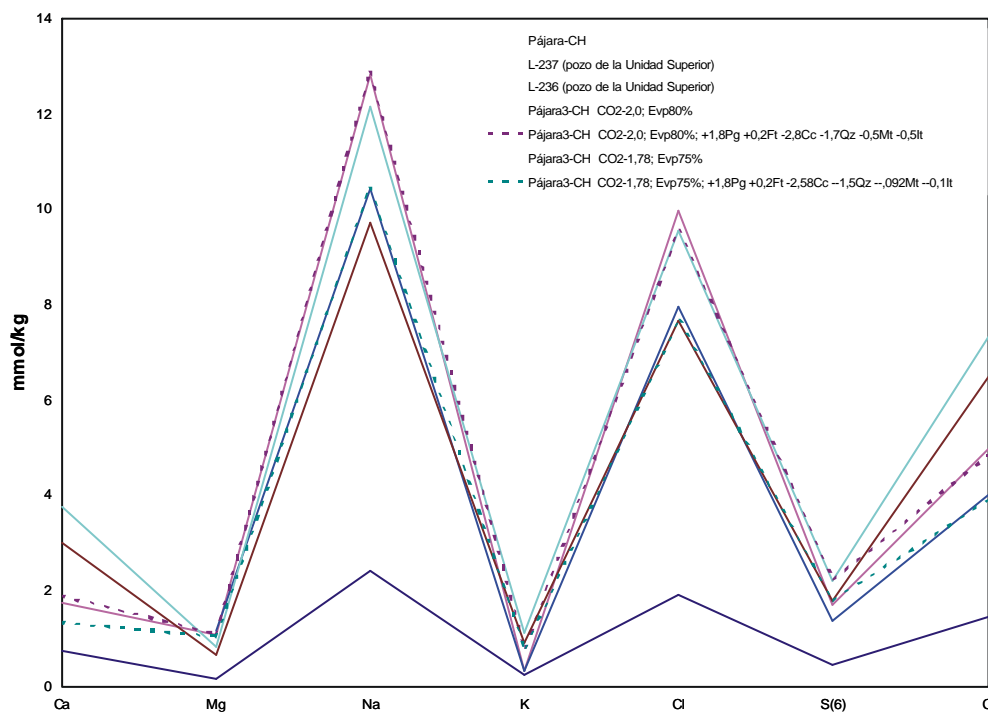


Figura 4.41.- Representación de las muestras de escorrentía Pájara-CH y de los pozos de la Unidad Superior L-236 y L-237 medidos y calculados por medio de equilibrio con el CO<sub>2</sub> del suelo, evaporación y reacción con fases minerales del medio.

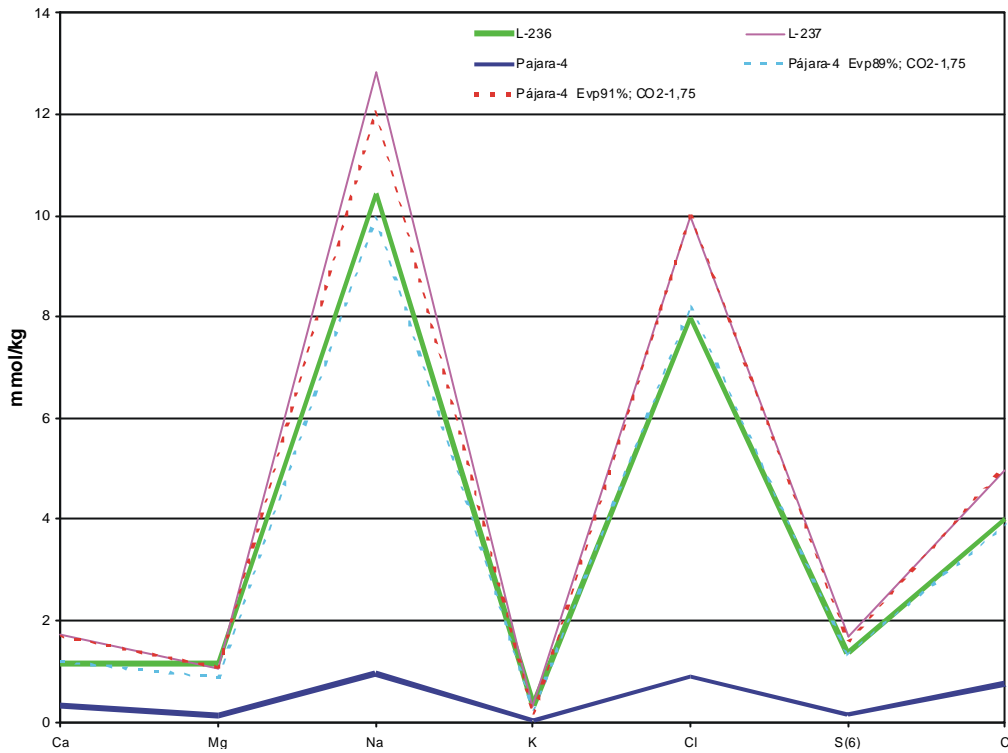
Una nueva simulación considerando la misma concentración por evaporación del agua de escorrentía, pero variando la presión parcial de CO<sub>2</sub> del suelo, disolviendo plagioclasa y forsterita, y precipitando calcita, cuarzo y arcillas, permite obtener una mejor reproducción de las concentraciones de todos los iones (ver Figura 4.41). Para la reproducción del pozo L-236 primero se evapora el 75% del agua y luego se equilibra con el CO<sub>2</sub> del suelo a una presión parcial de 10<sup>-1.78</sup> atm. Posteriormente se añade 1,8 mmol/L de plagioclasa, 0,2 mmol/L de forsterita y se precipita 2,58 mmol/L de calcita, 1,5 mmol/L de cuarzo, 0,92 mmol/L de montmorillonita cálcica y 0,1 mmol/L de illita. Algo muy similar se reproduce el pozo L-237 al evaporar el 80% de agua y equilibrar con el CO<sub>2</sub> del suelo a una presión parcial de 10<sup>-2.0</sup> atm. A continuación se añade 1,8 mmol/L de plagioclasa, 0,2 mmol/L de forsterita y se precipita 2,8 mmol/L de calcita, 1,7 mmol/L de cuarzo, 0,5 mmol/L de montmorillonita cálcica y 0,5 mmol/L de illita.

La Figura 4.42 presenta la reproducción de las muestras de los pozos L-236 y L-237 a partir de una muestra de lluvia recuperada en Pájara (Pájara-4). Para la reproducción del pozo L-236 primero se extrajo el 89% de agua de lluvia y luego se equilibró con el CO<sub>2</sub> del suelo a una presión parcial de 10<sup>-1.75</sup> atm. Posteriormente se añadió 3,2 mmol/L de plagioclasa y se precipitó 3,6 mmol/L de calcita, 0,4 mmol/L de montmorillonita cálcica, 0,25 mmol/L de montmorillonita magnésica, 1,5 mmol/L de caolinita y 3,5 mmol/L de cuarzo. En el caso del pozo L-237 primero se extrajo el 91% del agua de lluvia y se equilibró con el CO<sub>2</sub> del suelo a una presión parcial de 10<sup>-1.75</sup> atm, para seguidamente añadir 4,0 mmol/L de plagioclasa y precipitar 4,0 mmol/L de calcita, 0,4 mmol/L de montmorillonita cálcica, 0,25 mmol/L de montmorillonita magnésica, 1,56 mmol/L de caolinita, 0,2 mmol/L de illita y 4,0 mmol/L de cuarzo.

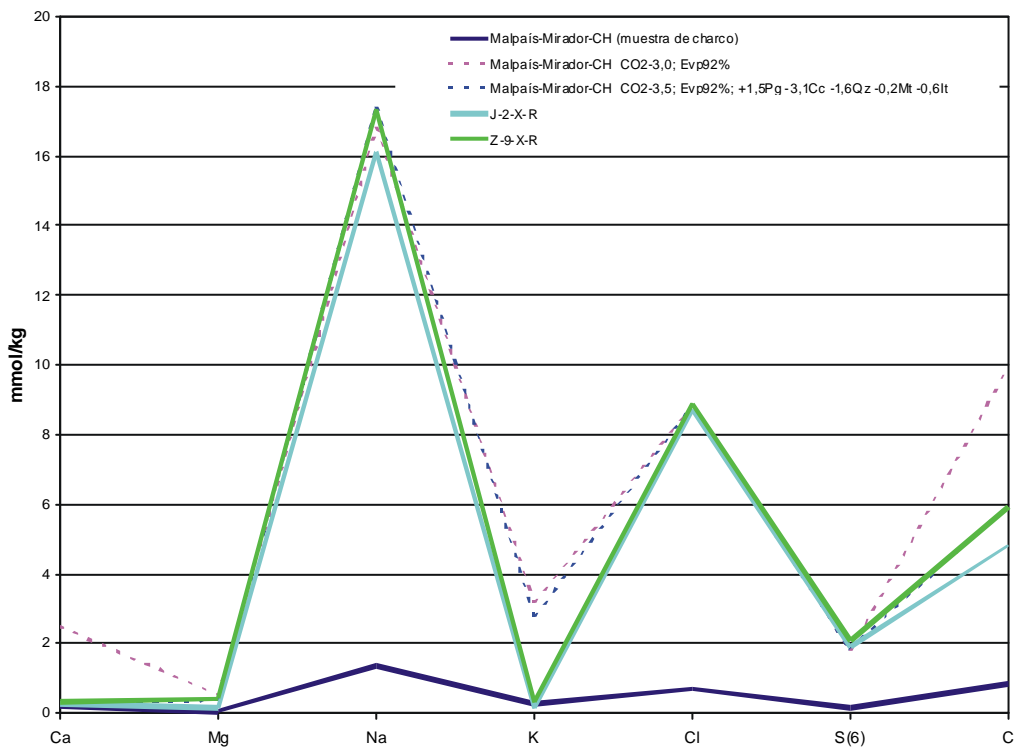
### Zona del Malpaís

En esta zona se reproduce la composición química de las aguas freáticas de los sondeos someros J-2 y Z-9 ubicados en el Malpaís. El agua inicial utilizada corresponde al agua de un charco situado en el Malpaís, sobre depósitos limo-arcillosos cubren las coladas basálticas. En el sector del Malpaís es común encontrar depósitos de limos y arcillas de escaso espesor que cubren las coladas de lava recientes y que en períodos de precipitación se encuentran encharcados. Debido a que en el Malpaís casi no existe una cubierta vegetal, se deduce que los valores de la presión parcial de CO<sub>2</sub> son bajos y están próximos al valor atmosférico. Los valores de presión parcial de CO<sub>2</sub> del suelo utilizados en la simulación para el equilibrio con el agua de lluvia varían entre 10<sup>-3.0</sup> y 10<sup>-3.5</sup> atm (Figura 4.43).

Una primera simulación se realiza equilibrando el agua del charco con el CO<sub>2</sub> del suelo a una presión parcial de 10<sup>-3.0</sup> atm y extrayendo el 92 % del agua. Los contenidos de sodio, magnesio y sulfato obtenidos por la simulación se ajustan razonablemente bien a las concentraciones medidas en el agua de los sondeos. La concentración de potasio en el agua subterránea es muy inferior al valor esperado por la simulación. También el calcio y CITD



**Figura 4.42.-** Representación de las muestras de precipitación Pájara-4 y de los pozos de la Unidad Superior L-236 y L-237 medidos y calculados por equilibrio con el CO<sub>2</sub> del suelo, evaporación y reacción con fases minerales del medio.



**Figura 4.43.-** Representación de las muestras de escorrentía Malpaís-mirador-CH y de las J-2-X-R y Z-9-X-R correspondientes a los sondeos someros S-133-MP y S-165-MP respectivamente.





presentan concentraciones muy inferiores en el agua freática respecto a los valores obtenidos por la simulación.

En una segunda pasada, primero se equilibra con el CO<sub>2</sub> del suelo a una presión parcial de 10<sup>-3.5</sup> atm y luego se evapora el 92% del agua. Posteriormente se añade 1,5 mmol/L de plagioclasa y se precipita 3,1 mmol/L de calcita, 1,6 mmol/L de cuarzo, 0,2 mmol/L de montmorillonita cálcica y 0,6 mmol/L de illita. Los contenidos de sodio, sulfato, calcio, magnesio y CIDT del agua freática se ajustan bien a los valores obtenidos a partir de la simulación. El potasio baja ligeramente su concentración en el agua, al ser utilizado parte del mismo en la formación de illita, pero sigue manteniendo una concentración elevada en el agua respecto a los valores medidos.

### **Simulación de reacciones a lo largo de una línea de flujo**

A partir del modelo conceptual de funcionamiento hidrológico del sistema y del conocimiento de los tipos litológicos presentes en el área de estudio se ha reproducido la composición química de las aguas subterráneas de la Unidad Inferior en Tuineje, Tesejerague y Tiscamanita. En la simulación de la composición química de las aguas subterráneas primero se ha mezclado agua de un manantial o pozo con una composición química representativa de la Unidad Superior y el agua de mar, a fin de alcanzar las mayores concentraciones de cloruros de la Unidad Inferior. Posteriormente se ha puesto en contacto el agua resultante de esta mezcla con una serie de fases minerales. Es importante destacar que en la reproducción de las aguas de la Unidad Inferior existen importantes diferencias según el grado de mineralización de las muestras. Para evaluar los resultados de la solución resultante se ha controlado el pH, PCO<sub>2</sub> y los índices de saturación de la calcita, dolomita, yeso, magnesita, cuarzo, forsterita y dióxido.

Dada la gran variabilidad en los contenidos de CIDT en las muestras de la Unidad Superior, se han realizado dos modelos que reproducen satisfactoriamente la composición química de las aguas de la Unidad Superior. Un modelo se basa considerando una aportación importante de CO<sub>2</sub> de origen profundo al sistema y el otro considerando un sistema cerrado al CO<sub>2</sub>. Si bien a partir de ambos modelos se reproducen bien las muestras de la Unidad Inferior, sólo considerando un sistema cerrado al CO<sub>2</sub> se logra reproducir las muestras más salinas del área de estudio. Sólo la muestra E-3-X-R correspondiente al sondeo S-121-TE requiere necesariamente para su reproducción una aportación de CO<sub>2</sub>(g).

La plagioclasa, con una composición característica para lavas de composición basáltica (60An y 40Ab), se utiliza para reproducir los valores de sodio que no se obtienen sólo con la mezcla con el agua de mar. Si bien no se dispone de datos de concentración de aluminio en el agua subterránea, cabe esperar para un pH en torno a 7,0 una concentración muy reducida de este elemento en las aguas subterráneas (Appelo y Postma, 1993). A partir de los diagramas de equilibrio presentados en el apartado 4.5.9 se espera que la mayor parte

del aluminio liberado por la plagioclasa sea utilizado junto a la sílice en la formación de montmorillonita, illita y algo de caolinita.

A pesar de que en las rocas del Complejo Basal se reconoce la existencia de abundante pirita diseminada, es difícil que la gran cantidad de sulfato presente en el agua provenga de la oxidación de este mineral debido a: a) lo improbable de un aporte importante de oxígeno a profundidades de más de 150 m y b) en el caso de producirse oxidación de pirita, se registraría un aumento notable de la acidez del agua subterránea, hecho que no se obtiene a partir de la modelación hidrogeoquímica.

Para la reproducción del agua subterránea con concentraciones de cloruros inferiores a los 190 mmol/Kg se ha tomado como solución inicial el agua correspondiente al manantial M-BET-1. Para la elección de este manantial se ha considerado su carácter permanente, su elevada altitud y su mayor grado de mineralización. Por un lado, si se considera la muestra del manantial M-BET-1 como representativa de la Unidad Superior el ajuste del modelo implica necesariamente la precipitación de calcita y la disolución de CO<sub>2</sub> gaseoso en el agua, mientras que si se toma como característica la muestra T-4-J-S el modelo se ajusta bien sin incorporar disolución de CO<sub>2</sub> gaseoso en el agua y en algunos casos la disolución de calcita. La Tabla 4.15 presenta los valores medidos y los calculados para cada una de las muestras.

La Figura 4.44 presenta la muestra G-3-X-R tomada en el sondeo profundo S-85-Tu en los límites urbanos de Tuineje. Esta se obtiene al mezclar un 96,82% del agua del manantial M-BET-1 con un 3,18% de agua de mar. A partir de la mezcla con el agua de mar sólo se logra reproducir aproximadamente bien la composición del sodio y el potasio, mientras que el resto de iones, a excepción del CIDT, presentan un déficit importante en sus concentraciones. En una etapa posterior se añaden 6,45 mmol/L de CO<sub>2</sub>(g), 20,0 mmol/L de yeso, 7,0 mmol/L de plagioclasa, 1,96 mmol/L de forsterita y se precipita 11,4 mmol/L de calcita, 5,7 mmol/L de cuarzo, 3,44 mmol/L de montmorillonita y 0,45 mmol/L de illita.

También en la Figura 4.44 se presenta el resultado de una segunda reproducción de la muestra G-3-X-R obtenida de mezclar un 95,0% de agua del sondeo T-4-J-S y un 5% de agua de mar. A continuación se añade a la mezcla 18,5 mmol/L de yeso, 13,4 mmol/L de plagioclasa, 1,4 mmol/L de forsterita y 0,2 mmol/L de calcita y se precipita 18,8 mmol/L de cuarzo, 13,4 mmol/L de montmorillonita, 8,0 mmol/L de caolinita y 0,4 mmol/L de illita. Como se observa en esta figura, para la segunda reproducción se obtiene un mejor ajuste respecto a la reproducción que incorpora aportación de CO<sub>2</sub>(g) en el cálculo. Nótese que en este segundo cálculo se puede considerar una mayor disolución de plagioclasa respecto al primer modelo.

La Figura 4.45 presenta la muestra E-3-X-R tomada en el sondeo profundo S-121-TE en Tesejerague. Esta se obtiene al mezclar el agua del manantial M-BET-1 con agua de mar en una proporción de 89,6% y 10,4% respectivamente. A partir de la mezcla se reproducen razonablemente bien todos los iones a excepción del sodio y sulfato. Posteriormente se

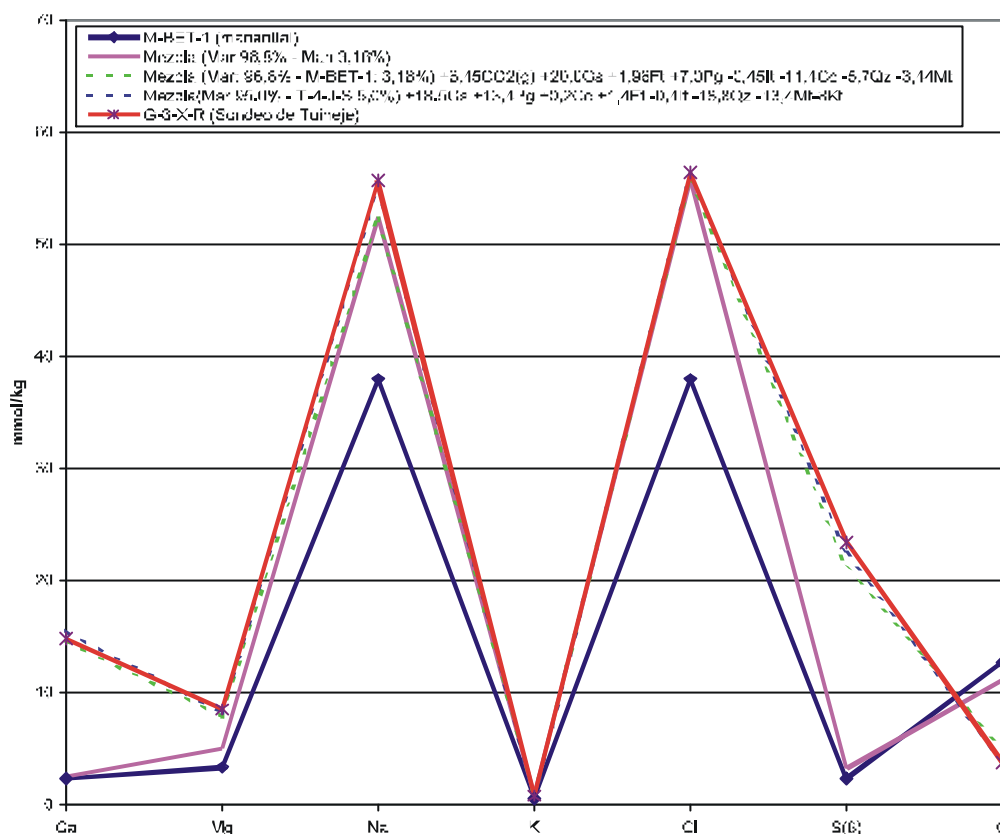


Figura 4.44.- Representación de las muestras de manantial M-BET-1, T-4-J-S y de la muestra G-3-X-R del sondeo profundo de Tuineje S-85-TU.

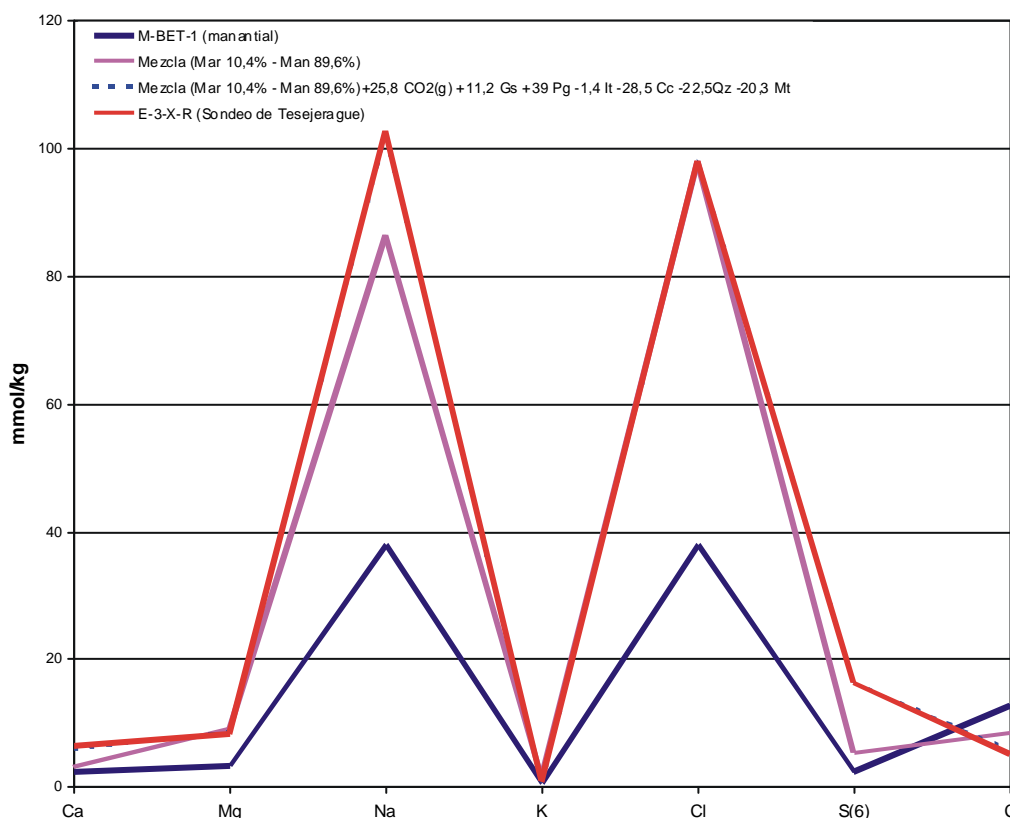


Figura 4.45.- Representación de las muestras de manantial M-BET-1 y de la muestra E-3-X-R del sondeo profundo de Tesejergue S-121 -TU.

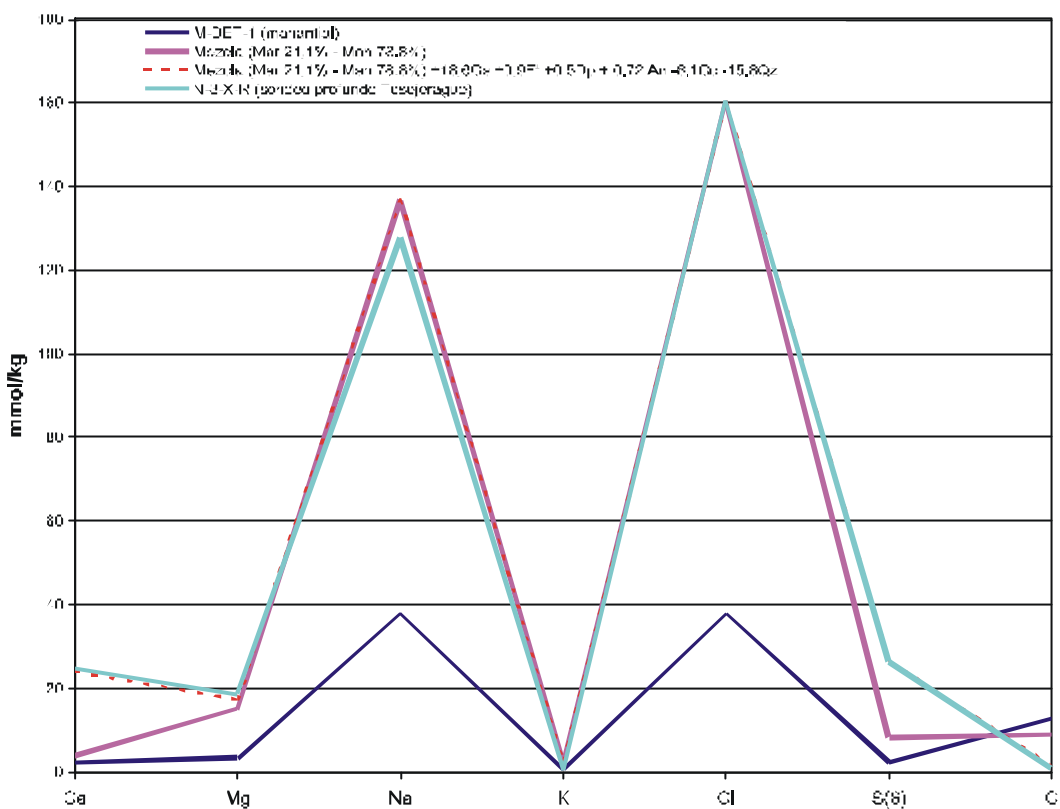


Figura 4.46.- Representación de las muestras de manantial M-BET-1 y de la muestra N-3-X-R del sondeo profundo de Tesejerague S-105-TE.

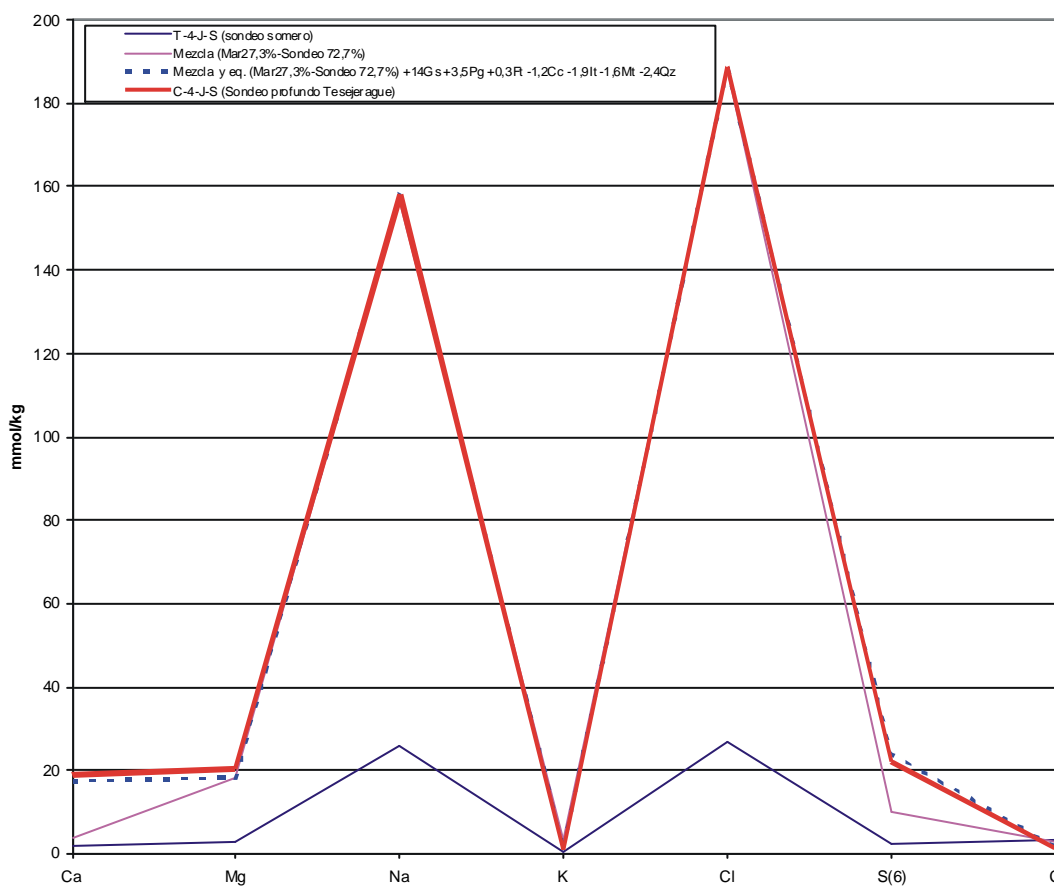


Figura 4.47.- Representación de las muestras T-4-J-S y de la muestra C-4-J-S del sondeo profundo de Tesejerague S-105-TE.



añaden 25,8 mmol/L de  $\text{CO}_2(\text{g})$ , 11,2 mmol/L de yeso, 39 mmol/L de plagioclasa y se precipitan 28,5 mmol/L de calcita, 22,5 mmol/L de cuarzo, 20,3 mmol/L de montmorillonita y 1,4 mmol/L de illita. A partir de estas reacciones se reproducen bien las concentraciones de todos los iones.

La Figura 4.46 presenta la muestra N-3-X-R tomada en el sondeo profundo en la localidad de Tesejerague. Esta muestra se reproduce al mezclar un 21,1% de agua del manantial M-BET-1 con el 78,8% de agua de mar. A diferencia de las muestras anteriores, el contenido de sodio obtenido de la mezcla es ligeramente superior al valor de la muestra N-3-X-R y por lo tanto para su reproducción se prescinde de plagioclasa con sodio. Posteriormente se añade 18,6 mmol/L de yeso, 0,72 mmol/L de anortita, 0,9 mmol/L de forsterita, 0,5 mmol/L de dióxido y se precipitan 6,1 mmol/L de calcita, 15,8 mmol/L de cuarzo. A partir de estas reacciones se reproducen razonablemente bien todos los iones a excepción del sodio, el cual queda en un ligero exceso.

La Figura 4.47 presenta el resultado de la reproducción de la muestra C-4-J-S que corresponde a una de las muestras más salinas del área de estudio. Su reproducción se obtiene a partir de la mezcla del 27,3% de agua de mar y 72,7% de agua de la muestra T-4-J-S. Posteriormente esta mezcla se coloca en contacto con 14 mmol/L de yeso, 3,5 mmol/L de plagioclasa, 0,3 mmol/L forsterita y se precipita 1,2 mmol/L de calcita, 1,9 mmol/L de illita, 1,6 mmol/L de montmorillonita y 2,4 mmol/L de cuarzo.

#### 4.5.11.- Análisis multivariante

Para el estudio de las relaciones entre las distintas variables fisicoquímicas de las muestras se utilizó el análisis Cluster y el análisis de Componentes Principales (ACP), cuyas características teóricas básicas más importantes se resumen en el apartado 4.2.5. Debido a las marcadas diferencias químicas entre las aguas de la Unidad Superior y la Unidad Inferior, su aplicación se realizó por separado para ambas unidades.

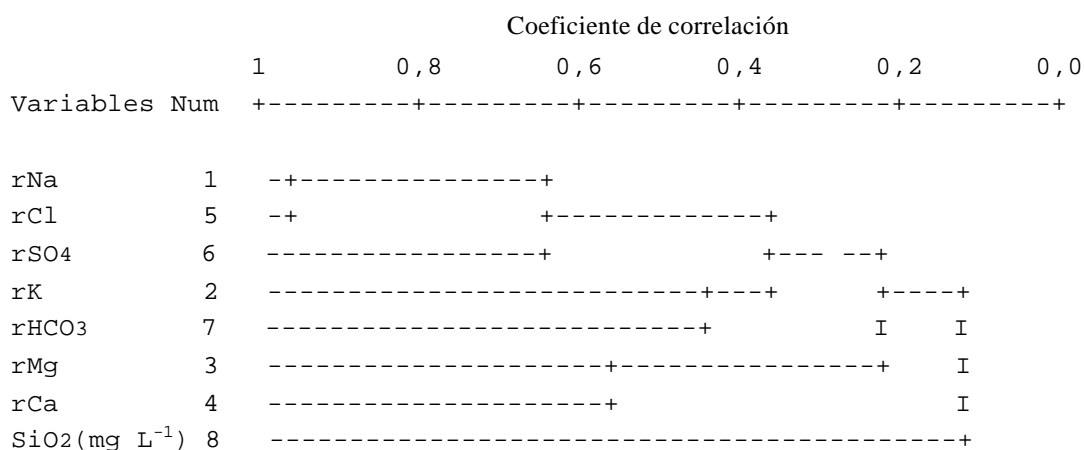
#### Unidad Superior

Para la aplicación del análisis cluster y de componentes principales se contó con un total de 65 muestras, correspondientes a las campañas del proyecto MAC-21 (1980/81) y las obtenidas en la presente investigación (1998/99). Las variables seleccionadas son: cloruro, sodio, calcio, sulfato, magnesio, potasio, bicarbonato + carbonato y sílice. Todas estas variables presentan valores con una distribución normal, por lo que no es necesaria la aplicación de transformaciones.

#### Variables

La Figura 4.48 presenta el dendograma con los resultados del análisis cluster obtenido mediante la correlación de las variables mencionadas anteriormente. Se distingue un conglomerado principal compuesto por los iones cloruro y sodio ( $r=0,88$ ), al que a una

distancia algo mayor se une el sulfato ( $r=0,62$ ) formando un nuevo conglomerado. Estos tres iones pueden considerarse como un conglomerado bien definido, ya que el resto de variables del análisis forma conglomerados con coeficientes de correlación muy bajos y que hacen dudosa su interpretación. Un segundo conglomerado con una correlación medianamente aceptable esta compuesta por el par calcio-magnesio ( $r=0,58$ ).



**Figura 4.48.-** Dendrograma de variables de la Unidad Superior;  $r = \text{meq L}^{-1}$

El análisis de componentes principales indica la existencia de tres componentes principales que explican el 76,3 % de la varianza total (I: 32.15%, II:25.88% y III: 18.29%). La Tabla 4.16 presenta los coeficientes de estructura, donde se observa que las variables con mayor peso sobre la primera componente son el cloruro, sodio, bicarbonato y potasio; sobre la segunda componente el calcio y el magnesio y por último la tercera componente asociada a las variables sílice y algo más distante el sulfato. La Figura 4.49 presenta las tres componentes en espacio factorial rotado.

A diferencia de los resultados obtenidos en el análisis cluster, el ACP muestra que el cloruro, sodio-potasio y bicarbonato muestran una estrecha relación, similar a la observada en las aportaciones iónicas de la lluvia. Es probable que esta asociación este relacionada con la mayor cantidad de aportación de estos tres iones en el agua de recarga. Por otro lado la segunda y tercera componente posiblemente están relacionadas con la aportación litológica de rocas ígneas de composición básica y ultrabásica e indiquen la alteración de algunos minerales característicos de éstas, como son la serpentina (muy abundante en lavas submarinas del Complejo Basal), plagioclasas cálcicas y piroxenos. El par calcio-sulfato muestra una cierta relación, aunque no queda del todo bien definida, por lo que no se descarta la disolución de yeso.

Gráfico de componentes en espacio rotado

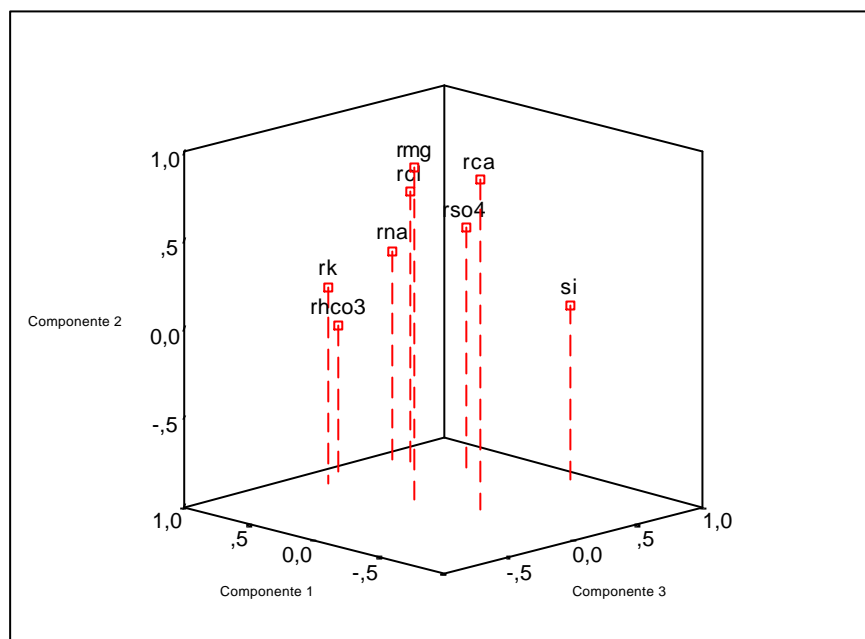


Figura 4.49.- Gráfico de las componentes principales en espacio factorial rotado de las variables de la Unidad Superior.

Variable	Componente		
	1	2	3
rNa	0.83	0.2	0.44
rK	0.79	0.1	-0.089
rMg	0.22	0.87	0.0014
rCa	-0.17	0.86	0.099
rCl	0.64	0.58	0.38
rSO <sub>4</sub>	0.38	0.39	0.54
rHCO <sub>3</sub>	0.78	-0.12	-0.023
SiO <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	-0.08	-0.015	0.89

Tabla 4.16.- Coeficientes de estructura con el valor de correlación entre los componentes rotados y cada una de las variables; r= meq L<sup>-1</sup>.

### Unidad Inferior

Para una mejor comprensión de la relación de variables de la Unidad Inferior fue necesario separar la aplicación de estos métodos para los datos de las campañas de 1989/90 y 1998/99 con el objetivo de evaluar una posible evolución en la composición química del agua.

El nitrato fue descartado para la aplicación de estas técnicas en esta unidad, debido a su baja concentración (incluso bajo los límites de detección de laboratorio) y por la falta de esta determinación en muchas muestras tomadas en campañas del ITGE. En el caso de las



campañas de este estudio también se aplicó este método considerando un número mayor de variables gracias a la determinación de otros parámetros químicos.

También se aplicó análisis multivariante a los datos obtenidos en la campaña de 1998/99 considerando elementos traza (flúor, boro y estroncio) con el fin de establecer posibles orígenes de estos elementos en el agua.

### Variables

En la Figura 4.50 se representan los dendogramas con los resultados del análisis cluster obtenido mediante la correlación de las variables químicas para las campañas de 1989/90 y 1998/99. En los dos casos se distinguen dos conglomerados mayores que coinciden para ambas campañas y que quedan definidos por: a) cloruro, sodio, potasio, bicarbonato y magnesio y b) calcio, sulfato y sílice. No obstante, el grado de correlación de estas variables en cada uno de los conglomerados indicados es muy distinto de una campaña a otra.

Para la campaña de 1989/90 el análisis cluster de variables presenta un grupo principal con un valor de  $r$  mayor que 0,6, constituido por las variables cloruro, sodio y potasio ( $r = 0,81$ ), al que a una distancia mayor se unen el magnesio y bicarbonato. El segundo conglomerado principal, compuesto por calcio, sulfato y sílice no presenta un grado de correlación importante entre sus componentes.

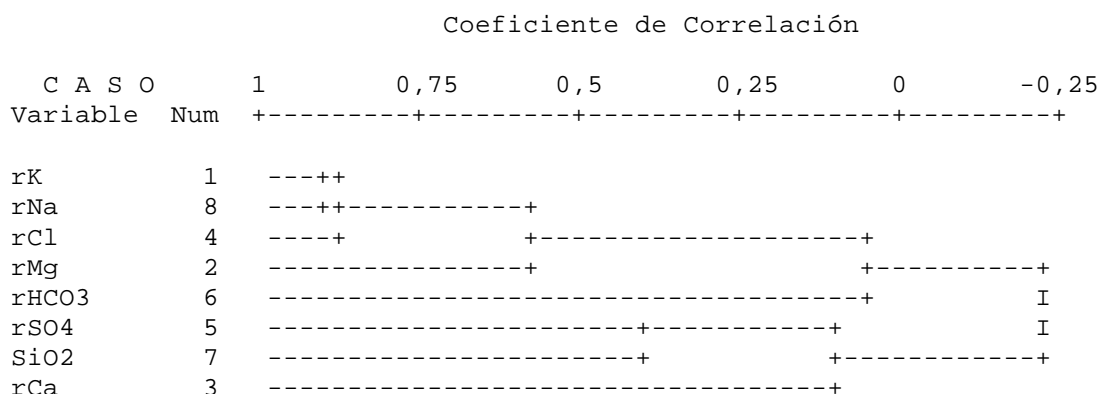
En el análisis cluster de variables de la campaña de 1998/99 se distinguen tres agrupaciones principales con un valor de  $r$  superior a 0,6. La primera esta formada por cloruro y sodio ( $r = 0,84$ ), a la que se unen las variables bicarbonato y potasio ( $r = 0,68$ ), constituyendo ambas un conglomerado al que a una distancia mayor se une el magnesio. Por otro lado está el par constituido por las variables calcio y sulfato ( $r = 0,66$ ), al que se une a una distancia mayor la sílice.

Los resultados del análisis de componentes principales de las dos campañas se presentan en la Figura 4.51. En la campaña de 1989/90 se obtienen dos componentes principales que explican el 68,5 % de la varianza total (I: 43,9% y II: 24,7%) y en la que las variables con más peso sobre la primera componente corresponden a cloruro, sodio, potasio y magnesio; más próximos a la segunda componente se encuentran el calcio, bicarbonato y sulfato; por último equidistante de ambas componentes se encuentra la variable sílice.

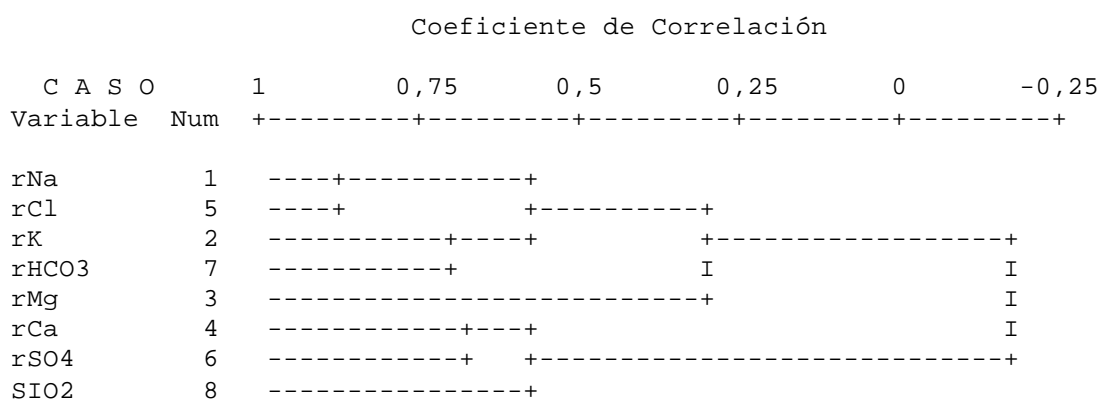
En la campaña de 1998/99 se diferencian claramente dos componentes que concuerdan con los dos conglomerados obtenidos en el análisis cluster. Las dos primeras componentes explican el 72,6 % de la varianza total (I:45,7% y II:26,8%) y muestra que las variables con mayor peso sobre la primera componente es cloruro, sodio, potasio, bicarbonato y magnesio; próximos a la segunda componente se encuentran las variables calcio, sulfato y sílice.

Al comparar los gráficos de los componentes principales de las dos campañas se observa una evolución de algunos iones disueltos del agua, reflejada en un cambio de sus pesos sobre las distintas componentes. Así, la sílice pasa de ubicarse en un punto equidistante entre la primera y segunda componente a situarse de lleno en la segunda componente. El

magnesio y el potasio pasan de ubicarse en la primera componente a tener un peso sobre la segunda componente y el bicarbonato pasa de situarse en la segunda componente a tener también un peso sobre la primera componente.



(a)



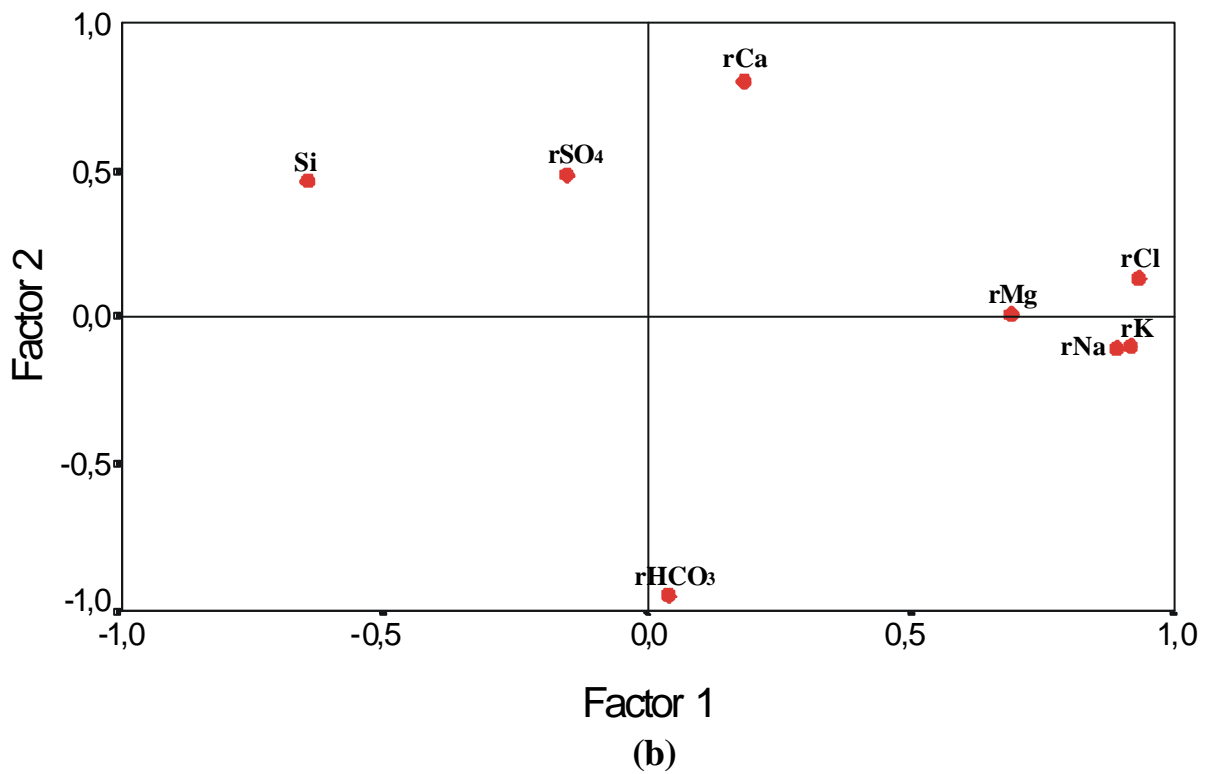
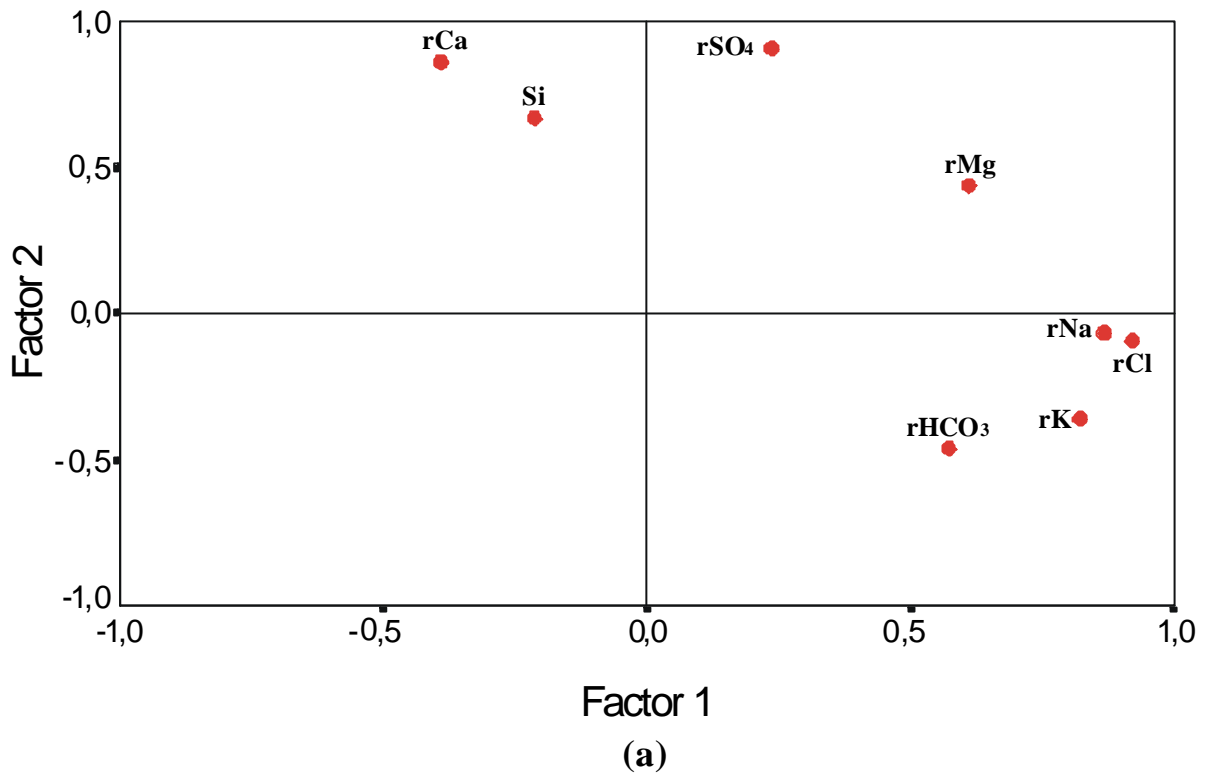
(b)

**Figura 4.50.-** Dendogramas de las variables para las campañas de: (a) 1989/90 y (b) 1998/99.

Variables considerando elementos trazas

Para la campaña de 1998/99 se ha realizado análisis cluster y de componentes principales considerando las variables boro, flúor y estroncio.

La Figura 4.52 presenta el dendograma obtenido con estos datos, donde se diferencian dos conglomerados mayores con una estructura similar a la obtenida en el análisis multivariante de los iones mayoritarios. Dentro del primer conglomerado quedan incluidos el cloruro, sodio, potasio y magnesio, a los que se unen el flúor y el boro. Sin embargo, el flúor se encuentra más próximo al potasio, cloruro y sodio ( $r = 0,78$ ), mientras que el boro aparece a una mayor distancia y más próximo al magnesio ( $r = 0,4$ ). Por otro lado el estroncio queda incluido dentro del segundo conglomerado y aparece estrechamente ligado al calcio ( $r = 0,87$ ), al que se unen a una mayor distancia el sulfato y la sílice ( $r = 0,62$ ).



**Figura 4.51.-** Representación sobre dos factores en espacio factorial rotado del análisis de componentes principales de las variables para las campañas de :(a) 1989-1990 y (b) 1998-1999.

Al igual que en el análisis cluster, el análisis de componentes principales entrega una agrupación de datos similar, con tres ejes principales (Figura 4.53). Las componentes principales explican el 80,2 % de la varianza total (I: 47,5%, II: 21,8% y III: 11,0), donde las variables con mayor peso sobre la primera componente corresponden a cloruro, sodio, potasio, bicarbonato y flúor; más próximos a la segunda componente se encuentran el estroncio, calcio, sílice y sulfato, y por último la tercera componente queda definida por las variables magnesio y boro.

#### 4.5.12.- Discusión

La realización de perfiles de conductividad eléctrica en sondeos profundos del área de estudio ha permitido constatar la existencia de una estratificación importante del agua subterránea. Las mayores diferencias se registran en los sondeos ubicados en la localidad de Tesejague, donde las aguas menos mineralizadas de la parte superior de la columna de agua pueden tener 2500  $\mu\text{S/cm}$ , mientras que las más profundas pueden alcanzar los 24000  $\mu\text{S/cm}$ .

El estudio conjunto de los perfiles de conductividad eléctrica y temperatura realizados en sondeos revela que las aguas con marcadas diferencias de salinidad también presentan temperaturas distintas. Este fenómeno indicaría que aguas con distinta conductividad eléctrica dentro del sondeo están asociadas a distintos niveles desde los cuales entra el agua de temperatura diferente en la captación. Al ser las aguas de mayor conductividad eléctrica las que tienen mayores temperaturas, se supone que los niveles desde los cuales proceden se encuentran a una mayor profundidad respecto a las aguas menos salinas y de temperatura más baja. La distribución térmica del agua a mayor profundidad, marcada por el gradiente térmico normal pone de manifiesto la inexistencia de flujos verticales importantes de agua subterránea en profundidad.

De acuerdo a la temperatura y conductividad eléctrica se pueden diferenciar dos familias principales de aguas que corresponden a: a) aguas de menor conductividad eléctrica (2500-5500  $\mu\text{S/cm}$ ) y temperaturas que varían entre los 18 y los 25  $^{\circ}\text{C}$  y b) aguas de mayor conductividad eléctrica (5500-24000  $\mu\text{S/cm}$ ) y temperaturas variables entre los 25 y 30  $^{\circ}\text{C}$ .

A partir de los perfiles de conductividad eléctrica y temperatura realizados en sondeos en el Malpaís se observa que el agua de recarga que alcanza el acuífero a través esta unidad volcánica es muy reducida y sólo constituyen algunos metros de la parte superior del acuífero. A mayor profundidad se detectan aguas más salinas y de mayor temperatura, similares a las reconocidas a mayor profundidad en el Macizo de Betancuria.

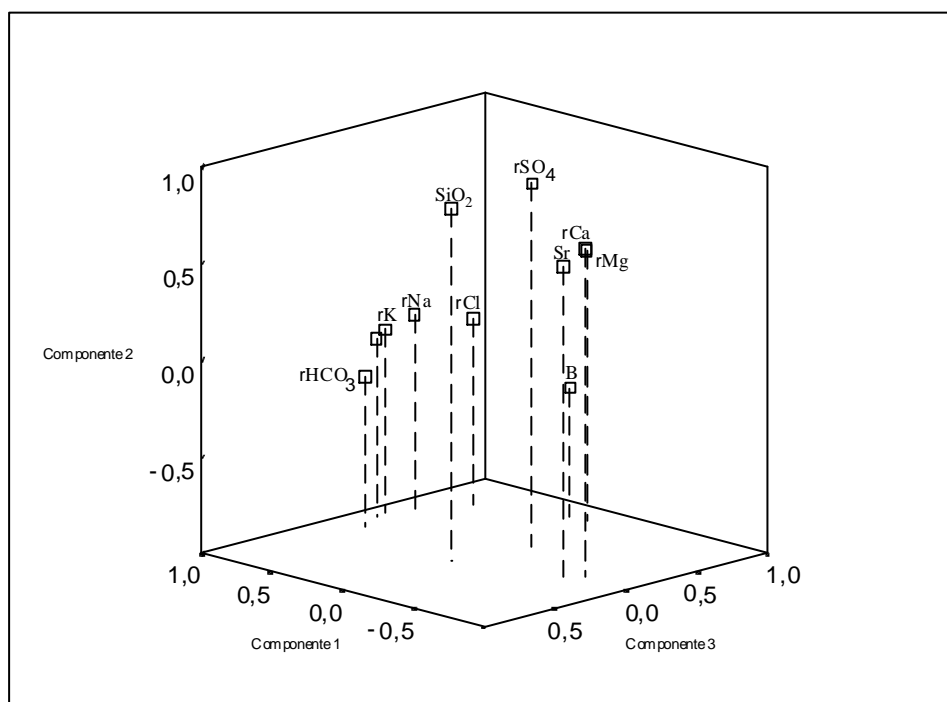
El estudio de las relaciones iónicas  $r\text{Na}/r\text{Cl}$ ,  $r\text{Cl}/r(\text{HCO}_3+\text{CO}_3)$ ,  $\text{Cl}/\text{B}$  (razón molar),  $\text{Cl}/\text{F}$  (razón molar) y  $r\text{Cl}/r\text{Br}$  pone de manifiesto que al aumentar el grado de mineralización de las aguas subterráneas, el valor de dichas relaciones se aproxima al valor teórico del agua de mar. Si bien en las aguas de la Unidad Superior los valores de estas relaciones iónicas se aproximan al valor de la relación del agua de mar, producto de la aportación del aerosol

Coeficiente de correlación

C A S O		1	0,75	0,5	0,25	0	-0,25
Variable	Num	+-----+-----+-----+-----+-----+					
rCa	4	---+-----+-----+-----+-----+-----+					
SR	9	---+-----+-----+-----+-----+-----+					
rSO4	6	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+					
SiO2	8	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+					
rNa	1	---+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+					
rCl	5	---+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+					
rK	2	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+					
F	11	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+					
rHCO3	7	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+					
rMg	3	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+					
B	10	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+					

**Figura 4.52.-** Representación del dendograma de variables para el análisis cluster de variables en muestras de la Unidad Inferior en los sondeos profundos de Tuieneje (1999/2000) considerando iones mayoritarios, boro, flúor y estroncio.

Gráfico de componentes en espacio rotado



**Figura 4.53.-** Representación de componentes principales de variables de las muestras de la Unidad Inferior en los sondeos profundos de Tuieneje (1999/2000) considerando iones mayoritarios, boro, flúor y estroncio.

marino, existe una dispersión importante de los datos. En la Unidad Inferior los valores de estas relaciones presentan una dispersión menor en torno al valor de la relación marina. En las muestras de agua tomadas en el campo de lavas recientes del Malpaís los valores de estas relaciones son muy variables, pero en general también se cumple que al aumentar la salinidad del agua el valor de dichas relaciones se aproxima al valor teórico del agua de mar.

El estudio de la relación  $rSO_4/rCl$  indica para las aguas de la Unidad Superior un origen meteórico del sulfato, mientras que en la Unidad Inferior tendría un origen distinto, posiblemente ligado a la disolución de yeso. Se descarta que las altas concentraciones de sulfato en la Unidad Inferior estén relacionados con retornos de riego debido a que no presentan concentraciones importantes de  $NO_3$  en estas aguas.

Los altos valores de la relación  $rCl/rBr$  de las precipitaciones indican que posiblemente llega halita, quizás transportada eólicamente, que se formaría en la costa por evaporación parcial del rocío de agua marina donde el mar bate fuertemente y el viento es intenso. Sin embargo los escasos datos que se tienen no permiten sacar conclusiones finales y no se descarta que otras precipitaciones presenten valores distintos para esta relación. Además las observaciones indican que los altos valores de esta relación en la precipitación son en cierta medida traspasados al agua subterránea representativa de la recarga. Así tenemos que en las muestras más diluidas de la Unidad Superior y del Malpaís los valores de la relación en algunos casos son superiores a 1000 y disminuyen a medida que aumenta la salinidad, hasta situarse en valores de la relación próximos al valor marino.

En los diagramas de estabilidad de los silicatos de Ca y Mg se observa que las muestras se ubican en el campo de estabilidad de la montmorillonita. Sin embargo, en las muestras de la Unidad Inferior y del Malpaís se observa una ligera tendencia de aproximación hacia el campo de estabilidad de la caolinita respecto a las muestras de la Unidad Superior, lo que indicaría una mayor disponibilidad de hidrogeniones del agua a mayor profundidad, capaz de dar mayor agresividad a la misma.

Los valores de presión parcial de  $CO_2$  calculados con el programa WATEQ4F (Parkhurst *et al.*, 1976) permiten deducir que los valores más bajos de presión parcial de  $CO_2$  corresponden a las muestras tomadas en manantiales y pozos representativos de la Unidad Superior, mientras que los valores más altos fueron medidos en sondeos profundos en Tuineje y Tesejerague.

La aplicación del programa de evolución hidrogeoquímica PHREEQC (Parkhurst, 1995) se ha utilizado para la modelación de tres procesos hidroquímicos principales: (a) modelación de la composición química del agua de escorrentía a partir de muestras representativas de agua de lluvia; (b) reproducción de la composición química del agua de la Unidad Superior a partir de la composición química de muestras representativas del agua de lluvia y escorrentía y (c) reproducción de la composición química del agua de la Unidad Inferior a partir de la mezcla del agua representativa de la Unidad Superior con agua de mar. Los resultados obtenidos a partir de la modelación hidroquímica se resumen en los siguientes

puntos:

- 1.- El exceso de sodio en el agua de la Unidad Superior podría tener su origen en la lixiviación de las plagioclasas. Esta reacción también aportaría al agua una cantidad importante de calcio, el cual posteriormente precipitaría para formar calcita.
- 2.- Las altas concentraciones de cloruro en las muestras de la Unidad Inferior pueden ser explicadas por medio de la mezcla de agua de mar con agua de la Unidad Superior. La proporción de agua de mar que presentan las muestras de la Unidad Inferior varía entre un 3 y 21%.
- 3.- Los altos contenidos de sulfato del agua de la Unidad Inferior tendrían su origen en la disolución de yeso.

Los resultados de la modelación hidrogeoquímica para la reproducción de las aguas de la Unidad Inferior indican que se obtienen mejores reproducciones de estas muestras considerando un sistema cerrado al CO<sub>2</sub>. Por otro lado, para el cálculo de esta simulación se obtienen mejores resultados considerando como muestras representativas de la Unidad Superior las obtenidas en pozos respecto a las muestras de manantiales. Esta diferencia obedece principalmente a las distintas concentraciones de bicarbonato que presentan ambos grupos de agua, ya que las muestras obtenidas en manantiales presentan mayores concentraciones de bicarbonato respecto a las muestras de pozos y sondeos someros. Las mayores concentraciones de bicarbonato en los manantiales pueden ser atribuidas a una mayor generación de CO<sub>2</sub> por parte de las plantas, ya que los manantiales se sitúan en zonas altas, donde la vegetación es más abundante.