

CAPÍTULO 5

ISOTOPOS AMBIENTALES

5.1.- Introducción

El presente capítulo trata el estudio de las aguas meteóricas y subterráneas del área de estudio, mediante técnicas isotópicas ambientales.

Los isótopos estables utilizados en esta investigación corresponden al ^{18}O , ^2H , ^{13}C y ^{34}S , y mientras que los isótopos radiactivos utilizados fueron el tritio y muy preliminarmente el ^{14}C . Dentro de los isótopos estables el $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ son los más importantes y se utilizan de modo conjunto debido a que forman parte de la molécula del agua. Son muy buenos trazadores del movimiento de la misma y de algunos procesos de fraccionamiento natural que las afectan. Los procesos que llevan al fraccionamiento isotópico natural del ^{18}O y ^2H se producen principalmente por procesos de evaporación y condensación (Custodio y Llamas, 1983). En esta investigación fueron realizados análisis de ^{18}O y ^2H tanto de muestras de precipitación como de muestras de agua subterránea.

La composición isotópica del agua subterránea en regiones áridas puede ser en ocasiones bastante diferente de la precipitación local. La causa más común es el enriquecimiento isotópico del agua por evaporación. A diferencia de la transpiración, la evaporación es un proceso altamente fraccionante. El agua puede ser evaporada desde superficies de agua libre, durante la escorrentía antes de la infiltración, y desde la zona no saturada y saturada (Clark y Fritz, 1997). Sin embargo, en algunos casos es posible encontrar situaciones en que el agua subterránea tiene una composición isotópica que se asemeja a la composición de la precipitación. Este es el caso estudiado en la cuenca de Barogo en el África Central, donde los perfiles de suelo muestran un enriquecimiento por evaporación y, sin embargo, las aguas subterráneas no se muestran enriquecidas (Mathieu y Bariac, 1996). Ambos autores explican como posible causa, la existencia de macroporos y canales de flujo preferencial en la zona no saturada (nidos de termitas, grietas de desecación profundas y raíces de plantas) que permiten un rápido desplazamiento del agua de lluvia hacia la zona saturada.

También puede ocurrir que la composición isotópica de las aguas subterráneas en zonas áridas sea mucho más ligera que la composición isotópica media de las precipitaciones. Estas diferencias en muchos casos tienen su origen en cambios climáticos que indican que la recarga se produjo en condiciones climáticas más húmedas en periodos anteriores a la aridez. Brouste *et al.* (1997) estudiaron la composición isotópica de la precipitación y del agua subterránea del acuífero superior del desierto de Chihuahua en México. En este estudio se concluyó que la composición isotópica más ligera del agua subterránea respecto a las

precipitaciones actuales se deben a que la recarga se produjo en condiciones climáticas más húmedas de hace 4 a 30 ka.

Las aguas subterráneas en climas áridos son extremadamente susceptibles a cualquier cambio ambiental y en particular a cambios en el uso de los suelos, la cubierta vegetal y la morfología superficial (Gat, 1991).

El estudio de los isótopos estables de ^{18}O y ^2H también es útil como indicador del origen de las aguas subterráneas y puede ayudar eficazmente en la identificación del origen de la salinidad y/o diferenciar entre varios procesos que pueden estar involucrados en la salinización del agua subterránea. La composición isotópica del agua de mar es estable y muy diferente a la composición isotópica de las aguas continentales, lo que le da una marca conservativa que permite el trazado de la mezcla del agua de mar con las aguas subterráneas.

5.2 Estudio del ^{18}O , ^2H y tritio

5.2.1.- Datos isotópicos (^{18}O - ^2H -tritio) de la precipitación

Los datos utilizados para la caracterización isotópica de la precipitación fueron tomados por el autor en el marco de la presente investigación y son los primeros obtenidos en un estudio hidrogeológico en la isla de Fuerteventura. Se trabajó con muestras correspondientes a cuatro eventos puntuales de precipitación tomadas en enero y diciembre del año 1998. A estos análisis se añaden algunos datos puntuales tomados por el autor durante los trabajos de campo. Las muestras de lluvia obtenidas el 2/12/98, 5/12/98 y el 2/12/99 corresponden a muestras de precipitación diaria recuperadas el mismo día en que se registran las precipitaciones, mientras que las obtenidas el 2/01/98 corresponden a muestras de lluvia de menor intensidad ocurridas durante cuatro días continuos de precipitación. Todos los análisis isotópicos de ^{18}O , ^2H y tritio fueron realizados en los laboratorios de análisis isotópicos del CEDEX en Madrid.

Debido a las escasas precipitaciones que caen en la isla, sólo fue posible obtener cuatro muestras para análisis isotópico de tritio (1 litro de muestra). En la Tabla 5.1 se presentan los resultados de los análisis isotópicos de la precipitación, indicándose además la cantidad de precipitación diaria y la cota del terreno a la que se tomaron las muestras. La Figura 4.1 presenta la situación de las estaciones de muestreo de agua de lluvia.

Muestra	Cota (m)	Precipitación (mm)	Fecha	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^2\text{H}\text{‰}$	$\text{d}\text{‰}$	Tritio (UT \pm ?)	Cl (mg L ⁻¹)
Ajuy-1	2	4,8	02/01/98	-0,59	6,80	11,52	-	266
Pozo Negro-1	90	3,9	02/01/98	-0,70	1,70	7,30	-	22
Morro de Velosa-1	680	4,0	02/01/98	-2,28	-4,80	13,44	1,64 \pm 0,15	22
Pájara-1	190	4,8	02/01/98	-2,65	-7,60	13,60	0,18 \pm 0,16	16
P. de Rosario-0	20	5,3	1/27/98	-3,31	-15,50	10,98	-	9
P. de Rosario-1	20	2,9	02/01/98	0,25	6,00	4,00	-	28
Tuineje-1	200	9,0	02/01/98	-2,17	-2,80	14,56	1,48 \pm 0,14	20
V. de Ortega-1	230	-	02/01/98	-1,36	0,20	11,08	-	16
P. del Rosario-5	20	7,4	03/10/99	-4,30	-21,37	13,03	-	17
Tuineje-2	200	3,4	12/02/98	-2,60	-3,63	17,17	-	148
Pájara-2	190	1,8	12/02/98	-2,90	-5,56	17,64	-	238
Morro de Velosa-2	680	4,8	12/02/98	-3,29	-13,69	12,63	-	260
Tuineje-3	200	15,0	12/05/98	-3,08	-12,97	11,67	-	3
Pajara-3	190	6,6	12/05/98	-2,29	0,20	18,52	-	81
Morro de Velosa-3	680	24,2	12/05/98	-4,43	-15,18	20,26	-	11
Pozo Negro-3	90	9,8	12/05/98	-2,22	-1,23	16,53	-	19
Pájara-6	190	7,1	26/03/99	-2,50	-10,29	9,71	-	70
Pozo Negro-6	90	5,3	26/03/99	-2,86	-20,64	2,24	-	34
Pájara-8	190	70,0	16/11/99	-3,58	-18,90	9,74	0,52 \pm 0,16	143
Pajara-9	190	-	02/12/99	-4,19	-35,80	-2,28	-	
Morro de Velosa-9	680	-	02/12/99	-4,91	-29,70	9,58	-	
Pozo Negro-9	90	-	02/12/99	-3,23	-16,20	9,64	-	

Tabla 5.1.- Determinaciones de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y tritio en las aguas de lluvia de Fuerteventura. Se incluyen las determinaciones de cloruro del agua de lluvia (mg L⁻¹).

5.2.2.- Datos isotópicos (^{18}O - ^2H -Tritio) del agua subterránea

Para la caracterización isotópica de las aguas subterráneas se realizaron dos campañas de muestreo principales en abril de 1998 y en noviembre de 1999. Durante la primera campaña se muestrearon principalmente sondeos profundos en el área de Tuineje, Tiscamanita y Tesejerague, y además sondeos poco profundos en el sector del Malpaís. En la segunda campaña los puntos muestreados correspondieron principalmente a manantiales y pozos, aunque también se incluyeron muestras de sondeos profundos en puntos que no fueron muestreados durante la primera campaña. También se realizaron muestreos puntuales para análisis isotópicos de aguas de pozos y sondeos profundos durante las campañas de octubre de 1998 y marzo de 1999.

En total se obtuvieron 53 muestras de agua para análisis isotópicos de ^{18}O y ^2H en 43 puntos distintos. La Figura 5.1 presenta la situación de los puntos en que se realizó análisis isotópicos y la Tabla 5.2 los resultados obtenidos. En algunos sondeos que estaban desmantelados y en los que se observó estratificación del agua subterránea fueron tomadas muestras a distintas profundidades para análisis isotópico. En el caso de muestras de tritio se obtuvo un total de 38 muestras en 33 puntos distintos

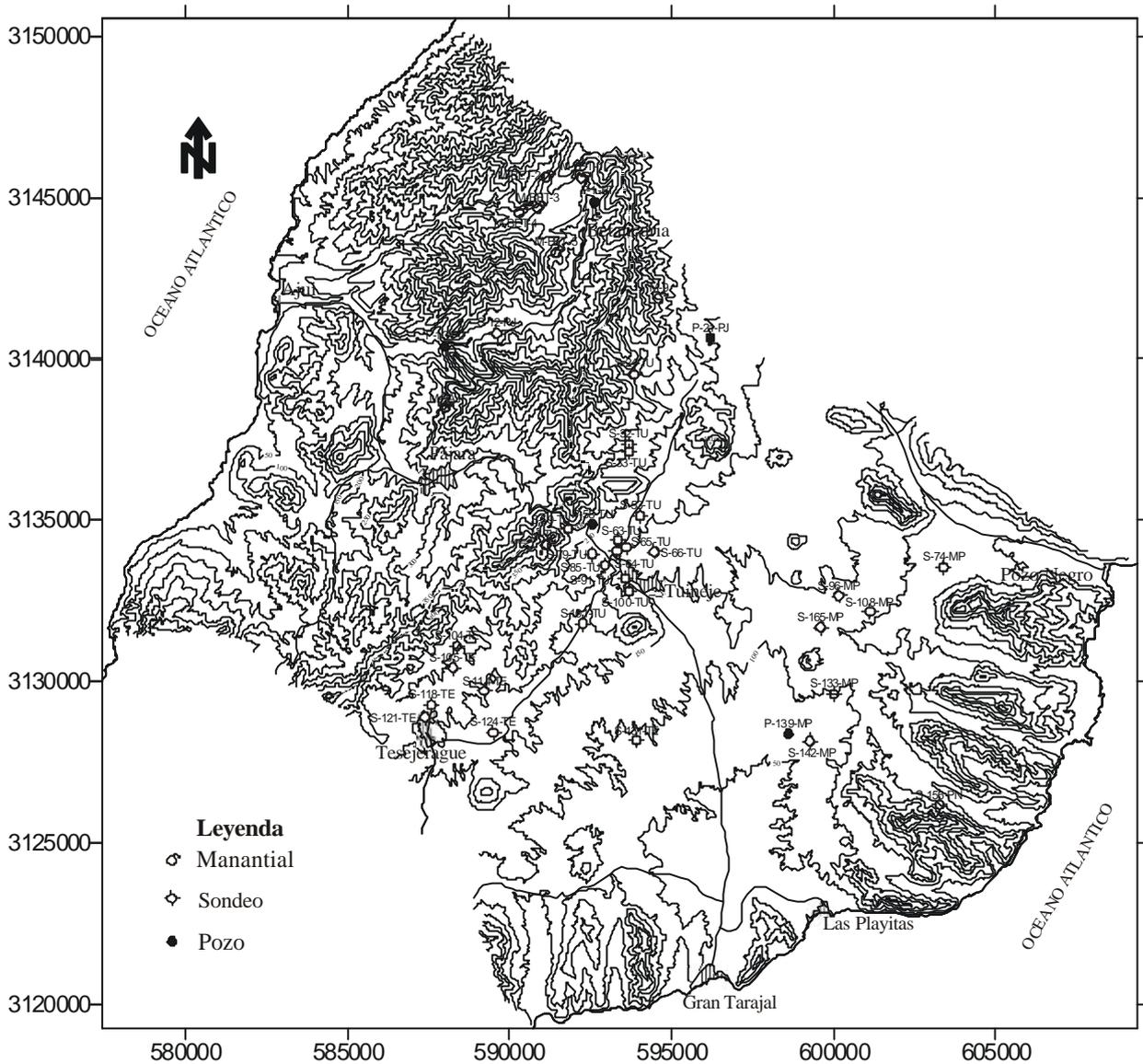


Figura 5.1.- Situación de los puntos de agua con determinación isotópica de ^{18}O , ^2H y tritio del área de estudio.

5.2.3.- Estudio isotópico de la precipitación

Las precipitaciones en Fuerteventura ocurren en otoño e invierno, concentrándose principalmente entre los meses de noviembre y febrero. Son raras las precipitaciones ocurridas en los meses de primavera y verano, y durante el transcurso de esta investigación no se registraron este tipo de lluvias. Otra característica de la precipitación en la isla de Fuerteventura es que para un mismo evento de lluvia la distribución de agua caída es muy irregular de un lugar a otro.

Punto	Tipo de captación	Unidad Hidrogeológica	Muestra	Fecha	Método de muestreo	$\delta^2\text{H}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$d\text{‰}$	Tritio (UT ? ?)	Cl (mg L ⁻¹)
S-33-TU	Sondeo	Unidad Inferior	E-2-CHL	27/04/98	Bombeo	-22,5	-3,55	5,9	0,06 ? 0,11	2480
S-53-TU	Sondeo	Unidad Inferior	E-4-CHL	27/04/98	Bombeo	-20,1	-3,22	5,66	0,04 ? 0,11	2220
S-121-TE	Sondeo	Unidad Inferior	E-3-CHL	27/04/98	Bombeo	-17,1	-3,27	9,06		3620
S-65-TU	Sondeo	Unidad Inferior	B-5-CHL	24/04/98	Bombeo	-16,2	-2,51	3,88	0,6 ? 0,11	3380
S-64-TU	Sondeo	Unidad Inferior	B-4-CHL	24/04/98	Bombeo	-18,7	-2,95	4,9	0,29 ? 0,11	2880
S-101-TU	Sondeo	Unidad Inferior	D2-CHL	26/04/98	Bombeo	-21,4	-3,35	5,4	0,83 ? 0,11	2110
S-79-TU	Sondeo	Unidad Inferior	A3-CHL	23/04/98	Bombeo	-15,5	-3,47	12,26	0 ? 0,11	2300
S-91-TU	Sondeo	Unidad Inferior	E1-CHL	27/04/98	Bombeo	-15,4	-3,01	8,68		2030
S-142-MP	Sondeo	Malpaís	F5A-CHL-(21m)	28/04/98	Tomamuestra	-22,6	-3,94	8,92	2,13 ? 0,11	596
S-142-MP	Sondeo	Malpaís	F5B-CHL-(35m)	28/04/98	Tomamuestra	-20,2	-3,59	8,52	2 ? 0,11	1310
S-118-TE	Sondeo	Unidad Inferior	D3-CHL-COM	26/04/98	Bombeo	-24,2	-4,37	10,76	2,53 ? 0,11	980
S-118-TE	Sondeo	Unidad Inferior	D3-CHL-FIN	26/04/98	Bombeo	-22,1	-3,47	5,66	1,8 ? 0,11	3700
S-74-MP	Sondeo	Malpaís	E5-CHL	27/04/98	Tomamuestra	-16,3	-3,47	11,46		1690
S-124-TE	Sondeo	Unidad Inferior	C4A-CHL	25/04/98	Tomamuestra	-13,4	-1,6	-0,6	0,57 ? 0,11	4440
S-124-TE	Sondeo	Unidad Inferior	C4B-CHL	25/04/98	Tomamuestra	-13,3	-2,13	3,74	0,81 ? 0,11	6600
S-124-TE	Sondeo	Unidad Inferior	C4C-CHL	25/04/98	Tomamuestra	-13,1	-1,96	2,58	0,24 ? 0,11	8300
S-105-TE	Sondeo	Unidad Inferior	N-3-X-R	14/10/98	Bombeo	-19,33	-2,71	2,35	0,00 ? 0,015	5700
P-139-MP	Pozo	Unidad Inferior	H-4-X-R	10/10/98	Bombeo	-21,76	-3,41	5,52		3020
S-85-TU	Sondeo	Unidad Inferior	G-3-F-J	17/03/99	Bombeo	-13,19	-3,32	13,37		2100
P-58-TU	Sondeo	Unidad Inferior	B-1-F-J	20/03/99	Tomamuestra	-16,83	-3,08	7,81		348
S-63-TU	Sondeo	Unidad Inferior	B-3-F-J	15/03/99	Tomamuestra	-18,59	-2,89	4,53		2960
M-PAJ	Manantial	Unidad Superior	MAN-PAJ-FJ	22/03/99	Manual	-16,4	-3,47	11,36		482
S-100-TU	Sondeo	Unidad Inferior	T-3-F-J	24/03/99	Bombeo	-10,76	-2,71	10,92		2780
M-BET-1	Manantial	Unidad Superior	M-BET-1	25/11/99	Manual	-21,2	-5,21	20,48	2,22 ? 0,19	1340
M-BET-2	Manantial	Unidad Superior	M-BET-2	19/11/99	Manual	-20,1	-3,53	8,14	2,78 ? 0,19	1080
M-BET-3	Manantial	Unidad Superior	M-BET-3	19/11/99	Manual	-8,8	-2,1	8	0,79 ? 0,16	2070
M-BET-4	Manantial	Unidad Superior	M-BET-4	19/11/99	Manual	-21,7	-3,41	5,58	0,16 ? 0,13	1620
M-BET-5	Manantial	Unidad Superior	M-BET-5	19/11/99	Manual	-17	-3,38	10,04	3,12 ? 0,19	540
M-9	Manantial	Unidad Superior	M-ANTE	23/11/99	Manual	-17,5	-3,2	8,1	2,68 ? 0,18	752
M-TUI	Manantial	Unidad Superior	MAN-TUI	24/11/99	Manual	-12,5	-2,34	6,22	0,47 ? 0,15	692
M-PAJ	Manantial	Unidad Superior	MAN-PAJ-JS	18/11/99	Manual	-15,3	-3,18	10,14	0,78 ? 0,16	480
S-24-TU	Sondeo	Unidad Superior	Z-5-J-S	23/11/99	Tomamuestra	-17,2	-2,86	5,68	0,53 ? 0,16	850
S-59-TU	Sondeo	Unidad Superior	T-4-J-S	16/11/99	Tomamuestra	-18,3	-2,95	5,3	0,85 ? 0,16	952
S-12-PJ	Sondeo	Unidad Superior	P-VEGA-1	25/11/99	Bombeo	-13,4	-2,66	7,88	0,5 ? 0,15	812
S-79-TU	Sondeo	Unidad Inferior	A-3-J-S	22/11/99	Bombeo	-21,1	-3,55	7,3	0,85 ? 0,16	2080
S-66-TU	Sondeo	Unidad Inferior	R-1-J-S	22/11/99	Bombeo	-21,7	-2,99	2,22		2460
S-32-TU	Sondeo	Unidad Inferior	PAU-J-S	22/11/99	Bombeo	-15,4	-3,38	11,64	0,0 ? 0,13	2250
S-91-TU	Sondeo	Unidad Inferior	E-1-J-S	26/11/99	Bombeo	-19,5	-3,34	7,22	1,03 ? 0,15	2030
S-100-TU	Sondeo	Unidad Inferior	T-3-J-S	26/11/99	Bombeo	-19,6	-3,14	5,52	0,12 ? 0,14	2940
S-105-TE	Sondeo	Unidad Inferior	N-3-J-S	26/11/99	Bombeo	-14,9	-3,7	14,7		5800
S-108-MP	Sondeo	Malpaís	E-6-J-S	20/11/99	Tomamuestra	-14,7	-3,5	13,3	0,44 ? 0,14	1540
S-165-MP	Sondeo	Malpaís	Z-9-J-S	20/11/99	Tomamuestra	-29,4	-4,32	5,16	0,57 ? 0,16	4300
P-21-PJ	Pozo	Unidad Superior	SEVERO	23/11/99	Bombeo	-10,4	-2,41	8,88	0,63 ? 0,16	1430
S-131-TE	Sondeo	Unidad Inferior	X-2-J-S	22/11/99	Tomamuestra	-24,7	-3,17	0,66		9100
S-96-MP	Sondeo	Malpaís	Z-8-J-S	20/11/99	Tomamuestra	-17,8	-3,33	8,84	0,22 ? 0,13	2840
P-13-PJ	Pozo	Unidad Superior	POZOPRESA	24/11/99	Tomamuestra	-11,6	-2,03	4,64		1320
P-1-BT	Pozo	Unidad Superior	P.BET-2	25/11/99	Tomamuestra	-2,8	-0,7	2,8	0,23 ? 0,15	752
S-104-TE	Sondeo	Unidad Inferior	N-2-J-S	26/11/99	Tomamuestra	-18,1	-2,26	-0,02	0,37 ? 0,14	7250
S-124-TE	Sondeo	Unidad Inferior	C-4-J-S	22/11/99	Tomamuestra	-16,4	-2,05	0		6700
S-133-MP	Sondeo	Malpaís	J-2-J-S	20/11/99	Tomamuestra	-26,9	-5,1	13,9	0,67 ? 0,16	260
S-114-TE	Sondeo	Unidad Inferior	C-3-J-S	21/11/99	Tomamuestra	-16,8	-2,18	0,64		7300
S-146-PN	Sondeo	Sierras Orientales	K-8-X-R	12/10/98	Bombeo	-19,68	-2,51	0,4	0,03 ? 0,16	1190
PPAJARA	Pozo	Sierras Orientales	PPAJARA	24/11/99	Bombeo	-16,3	-2,2	1,3	0,86 ? 0,16	1710

Tabla 5.2.- Determinaciones de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y tritio (UT) en las aguas subterráneas del área de estudio. Se incluyen las determinaciones de laboratorio del cloruro (mg L⁻¹).

La Figura 5.2 presenta la relación ^{18}O /precipitación, donde se observa un aligeramiento en la composición isotópica del agua de lluvia para los eventos de mayor precipitación. Si bien el número de datos isotópicos de precipitación es reducido para establecer tendencias de

la evolución de la composición isotópica respecto a la cantidad de precipitación, se observa que al aumentar la cantidad de precipitación el valor isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ se sitúa en torno a -4% . Estos resultados concuerdan con los obtenidos en la parte sur de la isla de Gran Canaria por Gasparini (1989), donde los valores de $\delta^{18}\text{O}$ para las precipitaciones de mucha intensidad se estabilizan en torno a -4% .

La Figura 5.3 presenta todos los datos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las muestras de precipitación obtenidas en el área de estudio, donde se diferencian según el volumen de precipitación diaria caída y se comparan con la línea meteórica mundial ($\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$). Se observa que las precipitaciones de mayor intensidad son de una composición isotópica más ligera respecto a las precipitaciones de menor intensidad.

También se observa que algunas muestras correspondientes a la primera campaña de muestreo (Pozo Negro-1, Ajuy-1, Valles de Ortega-1 y Puerto del Rosario-1) presentan un enriquecimiento por evaporación y que éstas coinciden con las precipitaciones de menor volumen diario de agua caída. Estos puntos se disponen formando una recta de pendiente 5,0 como resultado del mayor enriquecimiento de $\delta^{18}\text{O}$ respecto al $\delta^2\text{H}$ en el agua residual. La presencia de una lámina de vaselina en los tomamuestras permite interpretar que la evaporación se produce durante la caída de la lluvia. Este fenómeno es interpretado como consecuencia del intercambio isotópico durante la precipitación y se produce por la diferencia entre la composición isotópica de las gotas de lluvia y la humedad ambiental. En el caso de lluvias de menor intensidad existe un gradiente con la humedad ambiental capaz de producir evaporación en las gotas de lluvia (Custodio y Llamas, 1983).

Descartando las muestras que presentan claro enriquecimiento por evaporación se deduce la línea meteórica local por interpolación lineal por mínimos cuadrados como:

$$\delta^2\text{H} = 8,6\delta^{18}\text{O} + 15 \quad (n = 17; r^2 = 0,85)$$

En general las muestras correspondientes a una mayor precipitación, que acumulan una lámina de agua diaria de más de 5 mm diarios, presentan valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ menores que el -3% . La excepción la constituyen dos muestras de lluvia correspondientes a Pozo Negro-3 (12/05/98) y Pájara-3 (12/05/98) que presentan valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ en torno a $-2,3\%$. En este caso particular al comparar el volumen de precipitación caída en estas dos estaciones de monitoreo (Pozo Negro-3 = 9,8 mm y Pájara-3 = 6,6 mm) con la precipitación caída en las otras dos estaciones (Tuineje-3 = 15 mm y Morro de Velosa-3 = 24,2 mm) ubicadas más al norte, se observa que en las primeras es en donde se registra una menor cantidad de precipitación. Por lo tanto, no se descarta que los valores más pesados de las estaciones de Pozo Negro-3 y Pájara-3 sean consecuencia del continuo aligeramiento de la masa de aire por la caída preferencial de las especies isotópicas más pesadas.

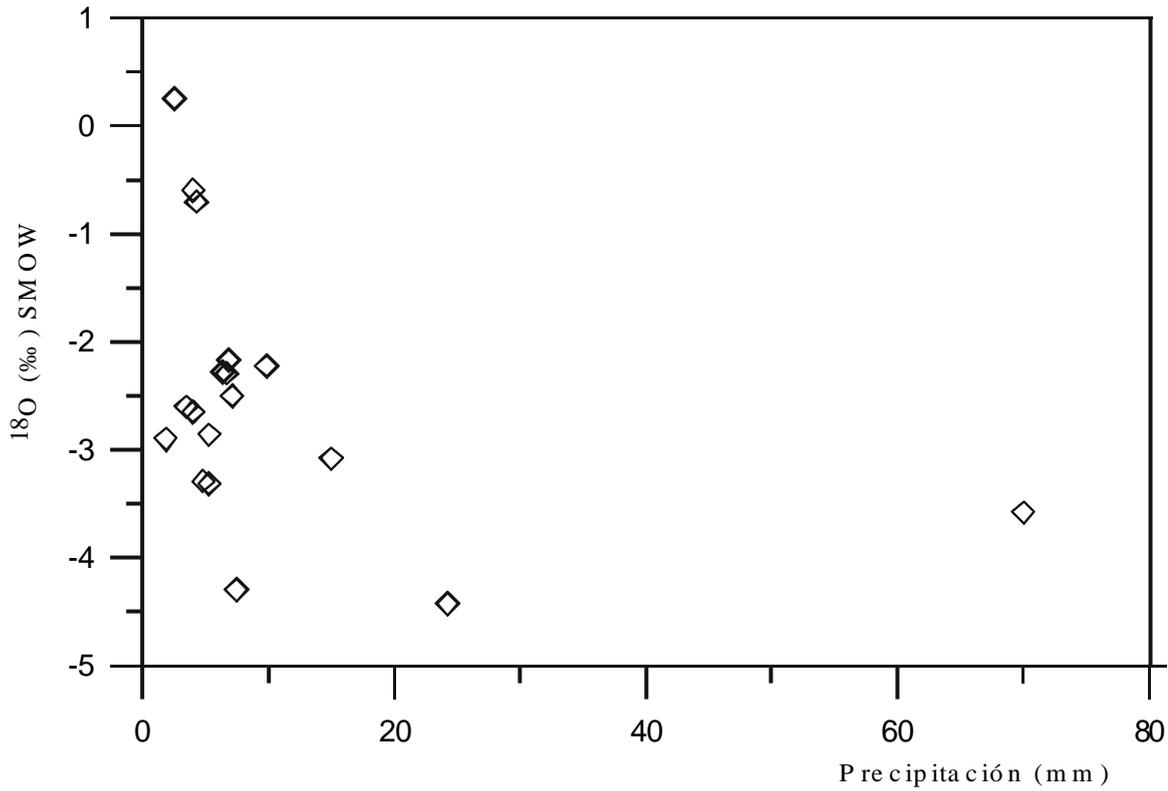


Figura 5.2.- Relación entre el valor de ^{18}O y la altura de agua de las precipitaciones diarias de Fuerteventura.

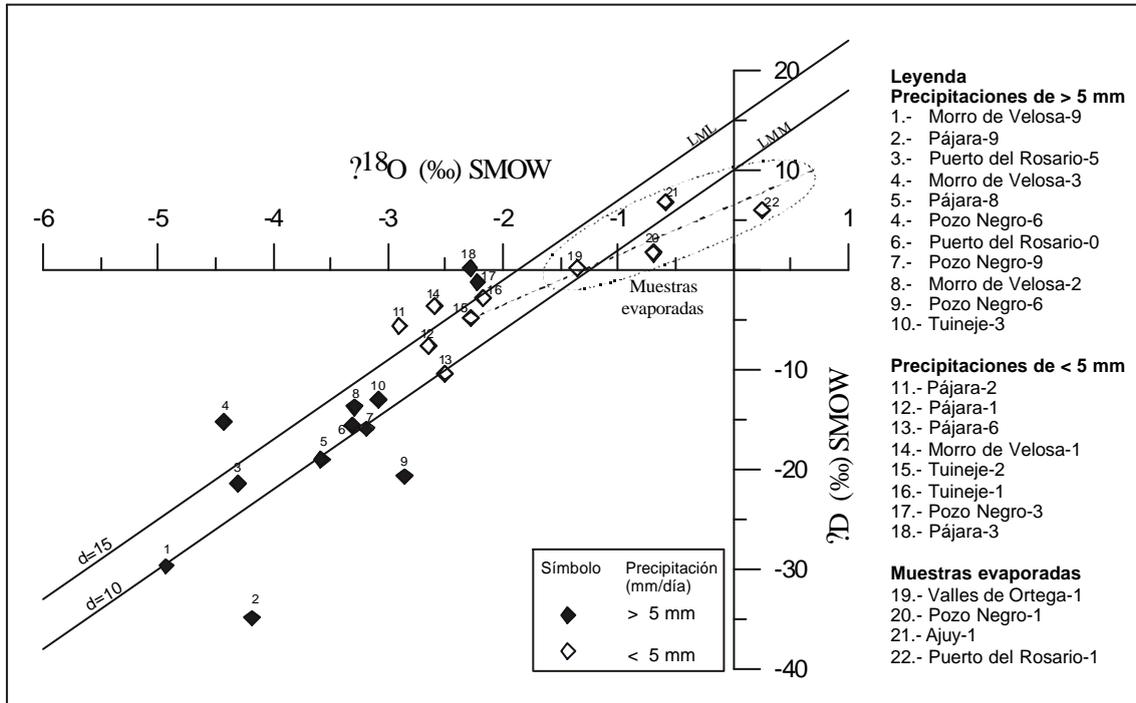


Figura 5.3.- Relación $^{18}\text{O}/\text{D}$ correspondiente a la precipitación en la Isla de Fuerteventura durante el período 1998-99. LMM= Línea meteórica mundial; LML= Línea meteórica local.

Un valor representativo de la composición isotópica de las precipitaciones una vez descartadas las muestras que presentan claro fraccionamiento por evaporación se obtiene a partir del valor mediano para el ^{18}O y ^2H y corresponden a: $\delta^{18}\text{O} = -2,86\text{‰}$ ($\sigma = 0,7$) y $\delta^2\text{H} = -10,2\text{‰}$ ($\sigma = 7,2$). Si sólo se consideran las muestras de más de 5 mm diarios de precipitación el valor se aproxima a: $\delta^{18}\text{O} = -3,18\text{‰}$ ($\sigma = 0,76$) y $\delta^2\text{H} = -14,4\text{‰}$ ($\sigma = 7,4$)

Relación con la altitud

El escaso número de datos isotópicos de precipitación existentes en la zona de estudio, unido al relativo bajo relieve de la zona y a la gran variabilidad temporal de la composición isotópica, no ha permitido establecer una tendencia clara de la composición isotópica de la precipitación respecto a la altitud. Sin embargo, a partir de los cuatro eventos de precipitación con los que se cuenta con datos isotópicos permite establecer algunas características de interés. La Figura 5.4 presenta la relación entre la altitud y la composición isotópica (^{18}O) de las muestras de precipitación, a partir de la cual se ponen de manifiesto las siguientes observaciones:

- a) En el caso de las precipitaciones de menor intensidad ocurridas el 2/01/98, las muestras que presentan fraccionamiento por evaporación están localizadas a cotas menores a los 200 ms.n.m. Por lo tanto, la evaporación afectaría a las gotas de lluvia en zonas más bajas, donde las temperaturas son relativamente más altas y donde las gotas de lluvia tienen un mayor recorrido de caída.
- b) Los gradientes altitudinales obtenidos para $\delta^{18}\text{O}$ oscilan entre $-0,25$ y $-0,32 \text{‰}/100 \text{ m}$ y son coherentes con los gradientes altitudinales definidos en otras islas del Archipiélago de Canarias. La Tabla 5.3 presenta los gradientes altitudinales definidos en otras islas del Archipiélago de Canarias, donde se destaca la proximidad del gradiente altitudinal obtenido en esta investigación con el obtenido por Gonfiantini (1973) en el sur de Gran Canaria.
- c) Las muestras de precipitación tomadas a mayor altitud (Morro de Velosa) presentan marcadas diferencias en la composición isotópica para cada uno de los eventos de precipitación. Así el rango en la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ en este punto varía entre $-2,28$ y $-4,91\text{‰}$.
- d) Las muestras tomadas a una altitud aproximada de 200 m presentan para todas los puntos un valor isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ en torno a los $-2,5\text{‰}$.
- e) Una muestra puntual tomada en Puerto de Rosario (20 ms.n.m.) el 12/03/99 y que corresponde a una tormenta de fuerte intensidad, presenta un valor isotópico de $-4,3\text{‰}$. Considerando la baja altitud a la que fue obtenida esta muestra, no se descartan valores

isotópicos aún más ligeros en cotas más altas que, sin embargo, no fueron muestreados en esta investigación.

	$\delta^{18}\text{O}$ ‰/100 m
G. Canaria (N)	-0.129 (Gonfiantini, 1973)
G. Canaria (S)	-0.250 (Gonfiantini, 1973)
G. Canaria (N)	-0.18 (Gasparini, 1989)
G. Canaria (S)	-0.21 (Gasparini, 1989)
Tenerife	-0.222 (Gonfiantini, 1973)
Tenerife	-0.243 (Custodio <i>et al.</i> , 1987)
La Gomera	-0.243 (Custodio y Manzano, 1990)
Fuerteventura	-0.27 a -0.32 (este trabajo)

Tabla 5.3.- Gradientes altitudinales del $\delta^{18}\text{O}$ obtenidos en otras islas del Archipiélago de Canarias.

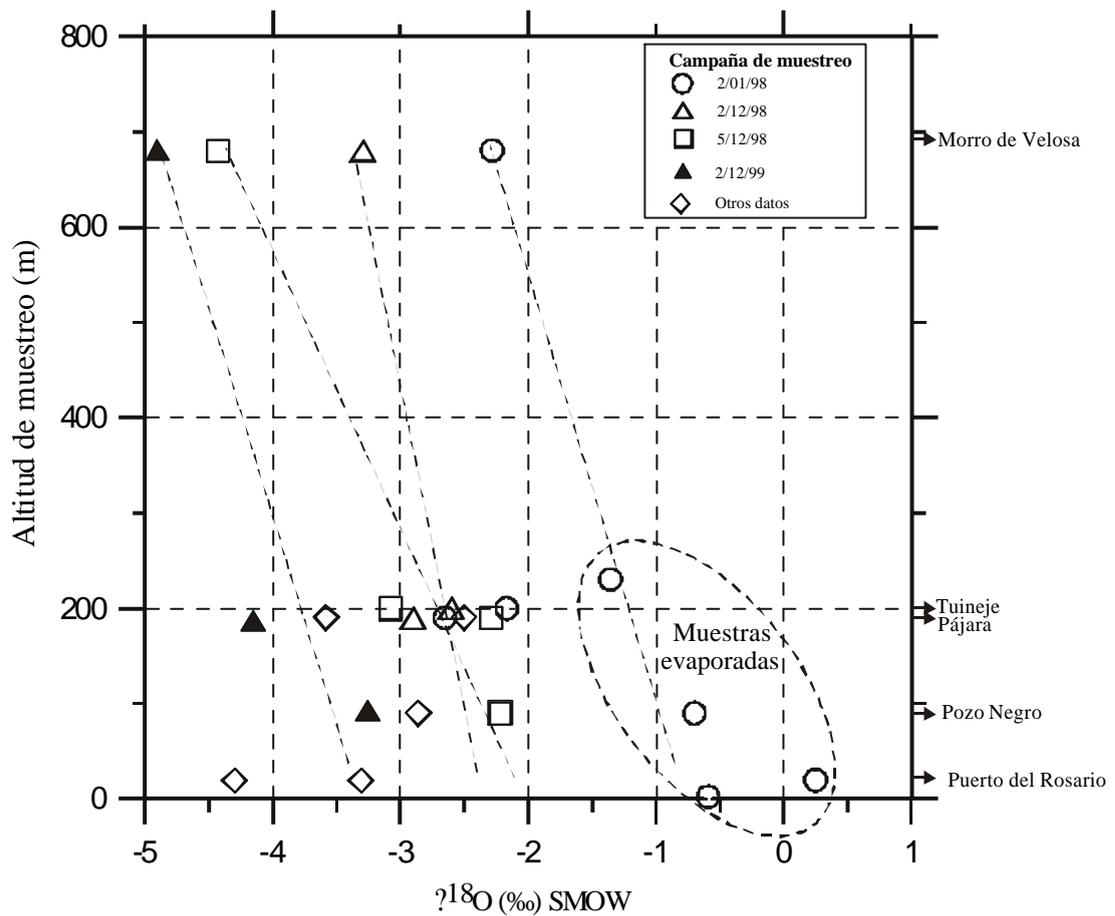


Figura 5.4.- Relación del valor de $\delta^{18}\text{O}$ de la precipitación con la altitud de las muestras.

5.2.4.- Estudio de la relación $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ del agua subterránea

En la Figura 5.5 se representan todos los datos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las muestras de precipitación y de agua subterránea del área de estudio, donde se comparan con la línea meteórica mundial ($\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$) y la línea meteórica local ($\delta^2\text{H} = 8,6\delta^{18}\text{O} + 15$). En la figura se agrupan las muestras de agua subterránea más representativas de cada una de las unidades, descartándose de estas agrupaciones aquellas muestras que presentan fraccionamiento por evaporación y las muestras en que se sospecha mezcla importante de agua de distintas unidades. La mayoría de las muestras de agua subterránea se localizan por debajo de la recta meteórica local. Se observa que las muestras obtenidas en manantiales, pozos y sondeos poco profundos de la Unidad Superior presentan valores de $\delta^{18}\text{O}$ más ligeros respecto a las muestras de los sondeos profundos en Tuineje y Tesejerague, mientras que los valores de deuterio son aproximadamente iguales para ambos grupos de agua. En general las muestras de la Unidad Superior se encuentran más próximas a los valores isotópicos de la precipitación respecto a las muestras de la Unidad Inferior. También se destacan las muestras tomadas en el Malpaís, las cuales presentan una composición isotópica en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ más ligera respecto al resto de muestras de agua subterránea.

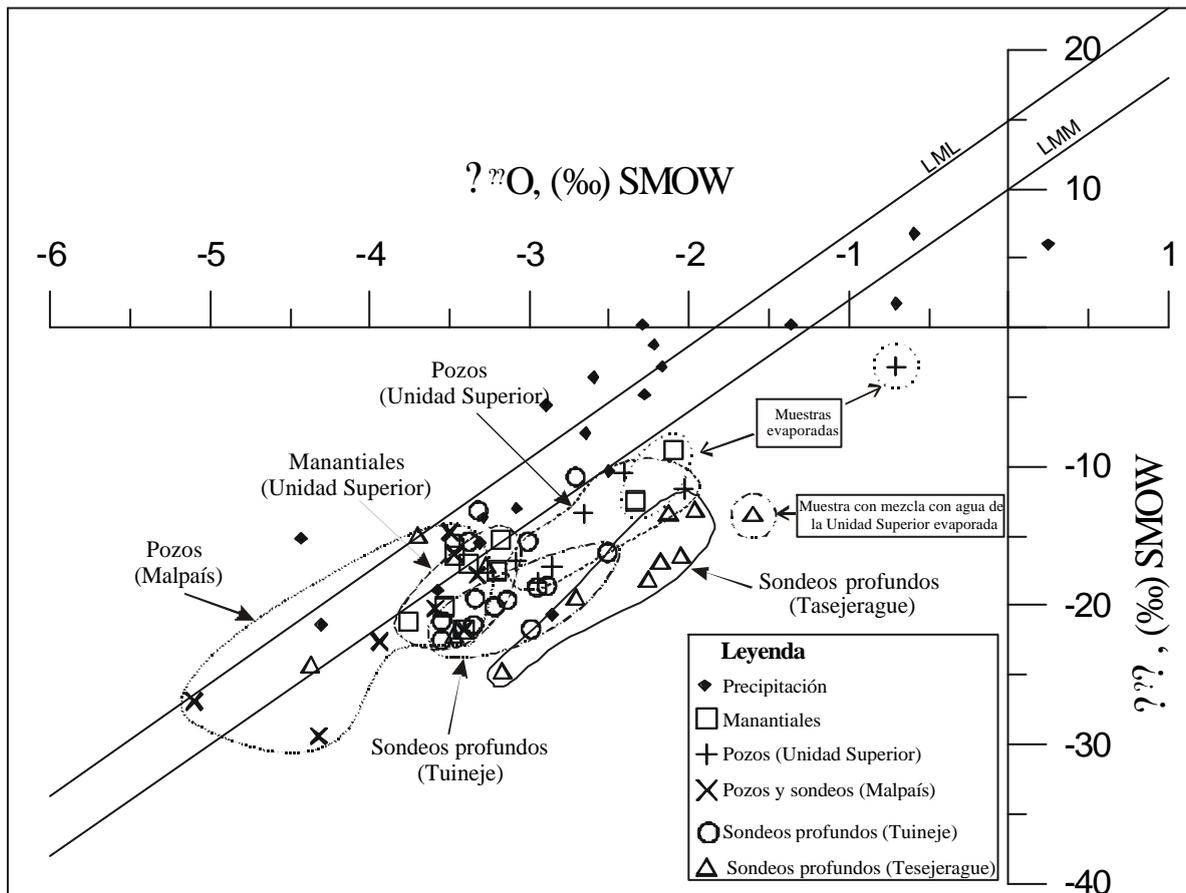


Figura 5.5.- Composición isotópica ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$) correspondiente a la precipitación y aguas subterráneas del área de estudio. LMM = Línea meteórica mundial; LML = Línea meteórica local.

Unidad Superior

En la Figura 5.6 se presentan los datos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las muestras de manantiales, pozos y sondeos poco profundos de la Unidad Superior.

Las muestras de agua subterránea de manantiales y pozos representativas de la Unidad Superior, descartadas las muestras sospechosas de estar enriquecidas por evaporación, presentan valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ algo más pesados respecto a los valores isotópicos de la precipitación. Las muestras de los manantiales en general presentan una buena agrupación de puntos (descartando las muestras con fraccionamiento por evaporación), mientras que las muestras en pozos presentan una mayor dispersión de valores.

Las muestras obtenidas en los manantiales presentan una composición isotópica más ligera respecto a las muestras obtenidas en pozos y sondeos poco profundos. Estas diferencias isotópicas pueden estar relacionadas con la altitud de recarga de los manantiales, ya que sus aguas surgen a cotas superiores a los 400 ms.n.m., mientras que los pozos se sitúan en zonas más bajas. Por otro lado las muestras obtenidas en pozos presentan un mayor rango de variación en su composición isotópica, lo que podría indicar posibles mezclas de aguas recargadas a distintas altitudes. Las muestras de manantiales se agrupan bien para valores de $\delta^{18}\text{O} = -3,2\text{‰}$ y de $\delta^2\text{H} = -18\text{‰}$, mientras que las muestras de pozos se agrupan en torno a valores de $\delta^{18}\text{O} = -2,9\text{‰}$ y de $\delta^2\text{H} = -17\text{‰}$.

Se destaca el fraccionamiento por evaporación que presentan algunas muestras de manantiales y pozos. Estos puntos se disponen formando una recta de pendiente aproximada de 6,0 que resulta típica para evaporación desde superficies de agua libre. En el caso de las dos muestras de manantiales que presentan fraccionamiento por evaporación se sospecha que ésta es circunstancial y estaría relacionada con el método de muestreo, debido a que los caudales de los manantiales de carácter algo difuso son muy pequeños. Por otro lado, el fraccionamiento de algunas muestras obtenidas en pozos puede estar relacionado con la evaporación que se produce dentro de las mismas captaciones, al tener estas una importante superficie de agua expuesta a la atmósfera. No obstante, no se descarta que la evaporación tenga su origen en el mecanismo de recarga del agua subterránea, ya que en las zonas donde se localizan este tipo de captaciones existe gran cantidad de presas y “gavias”, las cuales se recargan a partir del agua de escorrentía procedente de las partes más altas, lo que permitiría un fraccionamiento por evaporación desde la superficie de agua estancada que recarga.

Unidad Inferior

La Figura 5.7 presenta los datos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las muestras de sondeos profundos de Tuineje y Tesejerague, representativos de la Unidad Inferior. En general se observa que las muestras de los sondeos profundos de Tuineje presentan valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ más ligeros respecto a los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras de los sondeos profundos de Tesejerague.

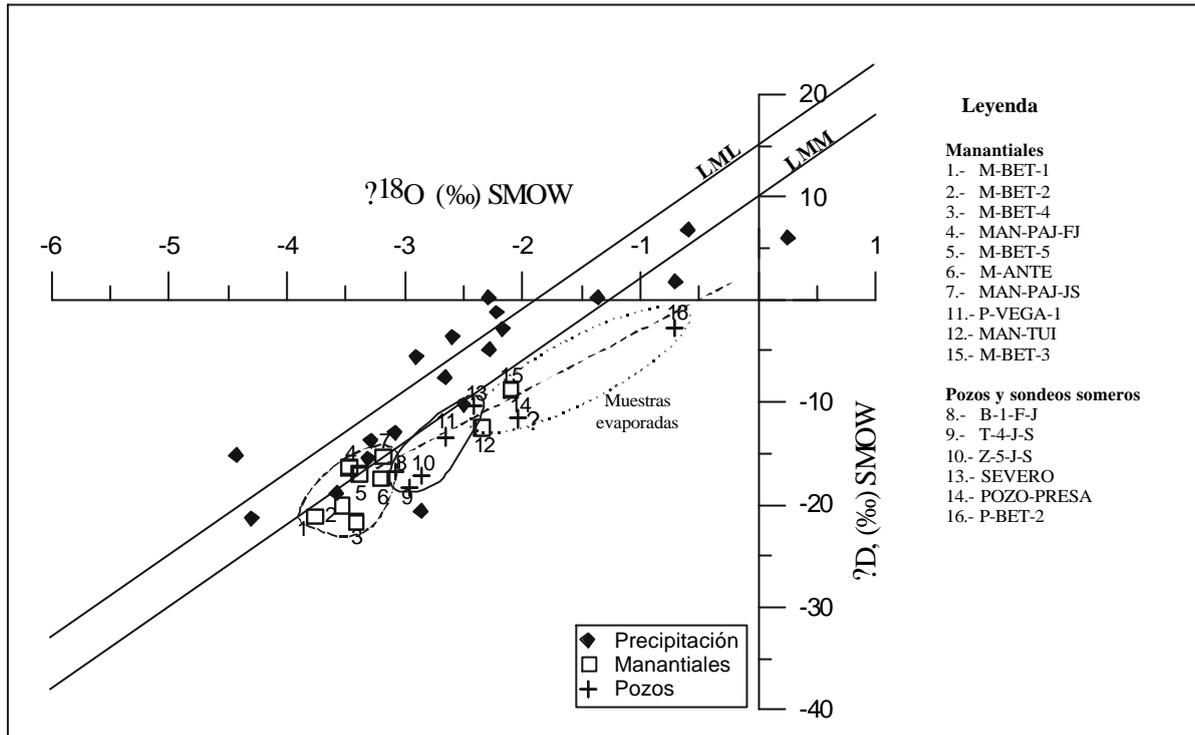


Figura 5.6.- Composición isotópica ($^{18}\text{O}/\text{H}$) correspondiente a la precipitación y aguas subterráneas de la Unidad Superior. LMM = Línea meteórica mundial; LML = Línea meteórica local.

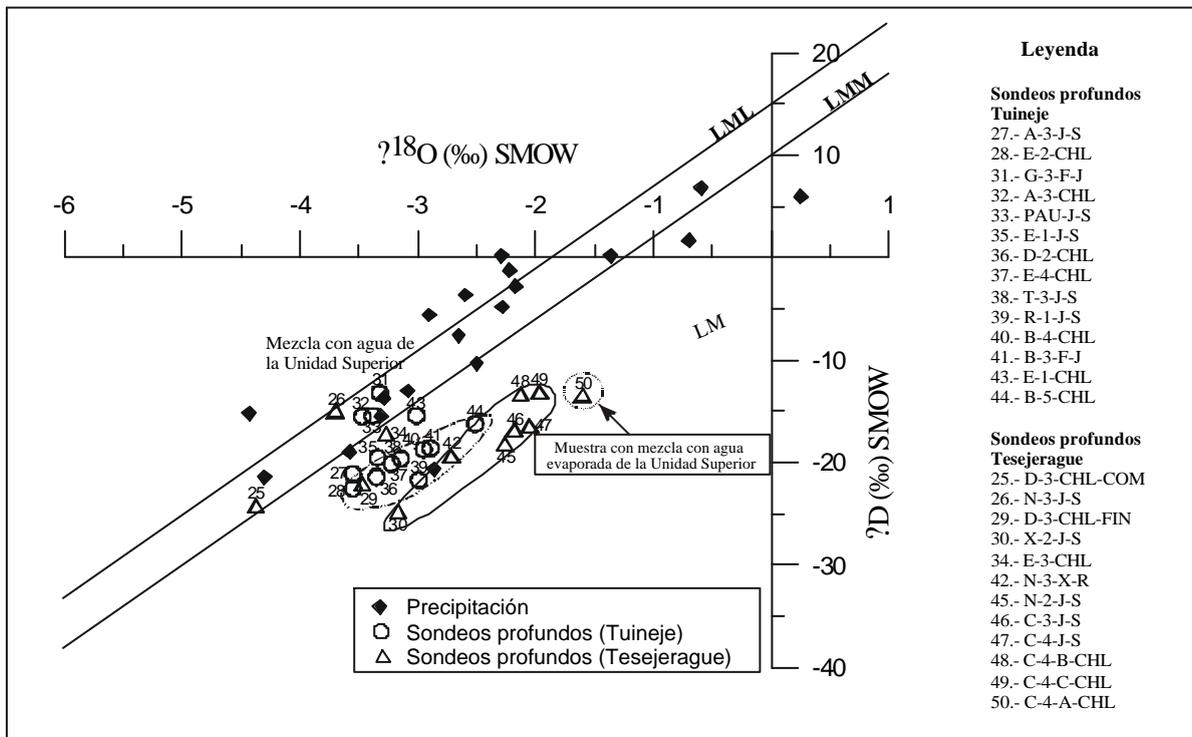


Figura 5.7.- Composición isotópica ($^{18}\text{O}/\text{H}$) correspondiente a la precipitación y aguas subterráneas de la Unidad Inferior. LMM = Línea meteórica mundial; LML = Línea meteórica local.

Sondeos profundos en Tuineje

En la Figura 5.7 se observa que la distribución de muestras de sondeos profundos de Tuineje se sitúa entre valores isotópicos próximos a las muestras de la Unidad Superior y las muestras con valores de $\delta^{18}\text{O}$ más pesados. En el caso de las muestras con valores isotópicos próximos a los de la Unidad Superior se presume la mezcla de aguas de la Unidad Superior con aguas de la Unidad Inferior. El origen de la mezcla se explica por las características constructivas de los sondeos, los cuales al no tener en la mayoría de los casos entubación, permiten que se mezclen dentro del sondeo aguas de la Unidad Superior y la Unidad Inferior. La Figura 5.8 presenta la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las muestras de los sondeos profundos de Tuineje, donde se indica el valor de la concentración de cloruro (meq L^{-1}) de cada una de las muestras. Se observa que las muestras sospechosas de presentar mezcla con aguas de la Unidad Superior presentan contenidos de cloruro inferiores a los obtenidos en las muestras con valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ más pesados.

La composición isotópica obtenida en los sondeos profundos de Tuineje, una vez descartadas las muestras sospechosas de presentar mezclas con aguas de la Unidad Superior, se presentan alineadas según la recta:

$$\delta^2\text{H} = 6,4\delta^{18}\text{O} + 0,05$$

Las características de esta recta hacen suponer una mezcla entre aguas de origen meteórico con agua de origen marino. En la Figura 5.8 se observa que la mayoría de puntos alineados en la recta teórica de mezcla con agua de mar presentan contenidos de cloruros más altos a medida que los puntos se aproximan al valor de la composición isotópica supuesta para el agua de mar.

Sondeos profundos en Tesejerague

La Figura 5.7 presenta los valores isotópicos de las muestras de los sondeos profundos de Tesejerague. Al igual que en las muestras de los sondeos profundos de Tuineje se observan muestras con valores isotópicos próximos a la Unidad Superior y muestras con valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ más pesados que las muestras de la Unidad Superior. En el caso de las muestras próximas a los valores isotópicos de la Unidad Superior también se sospecha mezcla de agua de la Unidad Superior y la Unidad Inferior. La Figura 5.9 presenta la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las muestras de los sondeos profundos de Tesejerague, donde se indica la concentración de cloruro (meq L^{-1}) de cada una de las muestras. En esta figura se aprecia que las muestras con valores isotópicos próximos a las muestras de la Unidad Superior también presentan menores concentraciones de cloruro que las muestras con valores de $\delta^{18}\text{O}$ más pesados.

En el sondeo profundo de Tesejerague S-118-TE se obtuvieron dos muestras de agua subterránea por bombeo, una al inicio y otra tres horas después de iniciada la explotación (D-3-CHL-COM y D-3-CHL-FIN). En la Figura 5.9 se observa la evolución de la composición

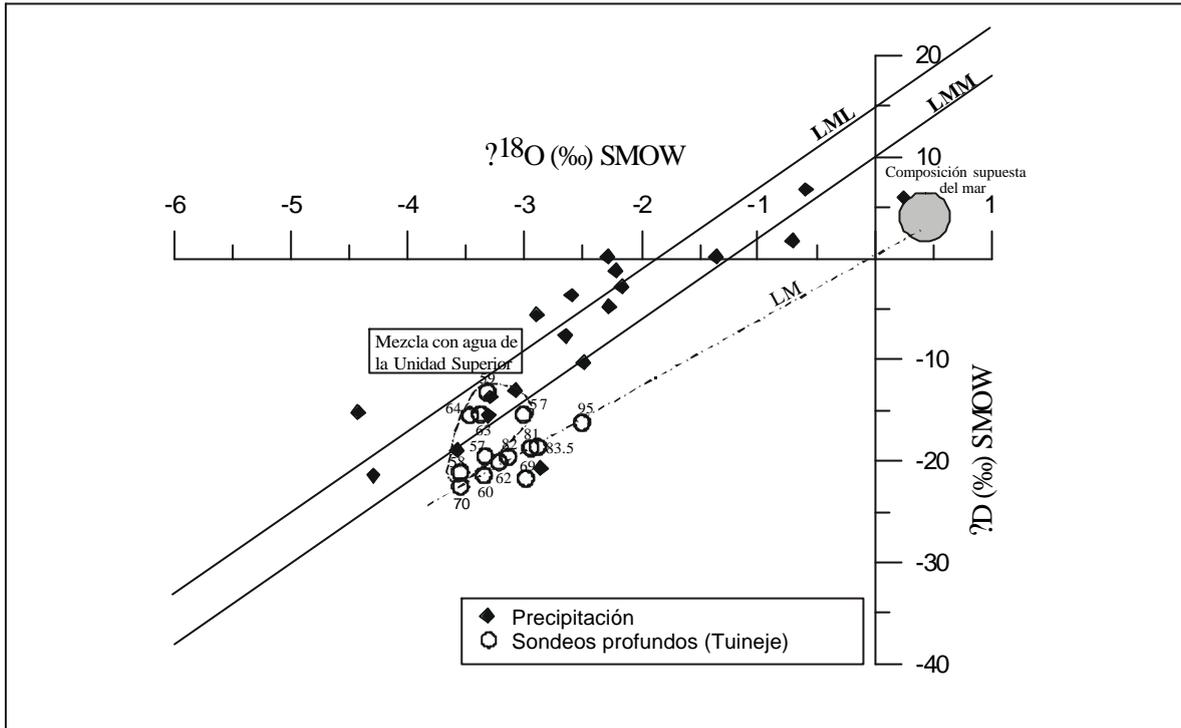


Figura 5.8.- Composición isotópica ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$) correspondiente a la precipitación de aguas subterráneas de los sondeos profundos en Tuineje. El número indica concentración de cloruro (meq L^{-1}). LMM = Línea meteórica mundial; LML = Línea meteórica local; LM = Línea de mezcla.

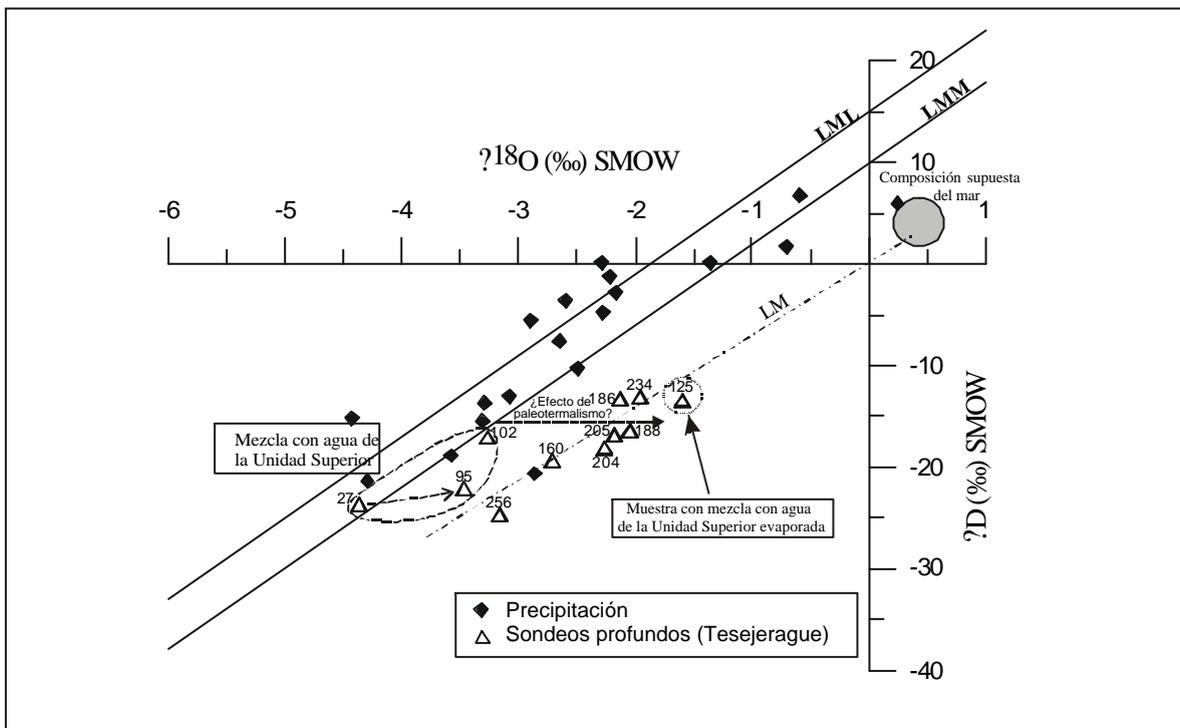


Figura 5.9.- Composición isotópica ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$) correspondiente a la precipitación de aguas subterráneas de los sondeos profundos en Tesejergue. El número indica concentración de cloruro (meq L^{-1}). LMM = Línea meteórica mundial; LML = Línea meteórica local; LM = Línea de mezcla.

isotópica de estas muestras, que pasan de una composición isotópica característica de la Unidad Superior a una composición más típica de las muestras agrupadas en los sondeos profundos de Tesejerague. Esta evolución en la composición isotópica viene acompañada por un aumento importante en los contenidos de cloruro de agua que pasa de 27 a 95 meq L⁻¹. Este fenómeno indica una menor aportación de agua de la Unidad Superior en las muestras obtenidas a medida que progresa el bombeo.

Por otro lado aquellas muestras en que no se sospecha mezcla con agua de la Unidad Superior presentan una composición isotópica en $\delta^{18}\text{O}$ más pesada respecto a las muestras obtenidas en los sondeos profundos de Tuineje. Este valor isotópico más pesado podría ser consecuencia de un efecto termal que afecte a las aguas en este sector. No obstante, según los registros de la temperatura realizados en los sondeos de este sector, no se observan fenómenos de termalismo en las aguas en la actualidad, aunque no pueden descartar efectos de paleotermalismo que afectaron a estas aguas en tiempos pasados y que dejaron una marca isotópica en las mismas.

En la Figura 5.9 se presentan los datos de ^{18}O y ^2H de las muestras de sondeos profundos de Tesejerague una vez descartadas las muestras sospechosas de presentar mezcla con agua de la Unidad Superior. Se observa que las muestras de agua se presentan aproximadamente alineadas según la recta:

$$\delta^2\text{H} = 7,6\delta^{18}\text{O} + 0,07$$

Las muestras se presentan alineadas según una recta que aparece desplazada hacia valores en $\delta^{18}\text{O}$ más pesados respecto a la recta obtenida para los sondeos profundos de Tuineje. No obstante, ambas rectas tienden a converger en el valor de la composición isotópica del agua de mar. Por lo tanto, se puede deducir un posible efecto de mezcla de aguas meteóricas afectadas previamente por termalismo con agua de origen marino.

Malpaís

El Malpaís está constituido por numerosas coladas de lavas recientes de composición basáltica situadas en la parte central del área de estudio y que sobreyacen principalmente a rocas volcánicas miocenas.

La Figura 5.10 presenta los datos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las muestras obtenidas en pozos y sondeos poco profundos situados en el Malpaís. Se observa que todas las muestras de agua subterránea muestreadas en esta unidad presentan una composición isotópica más ligera respecto a las muestras de los pozos de la Unidad Superior.

Para explicar el origen de la composición isotópica más ligera de las aguas presentes en el sector del Malpaís se plantean dos hipótesis:

a) una recarga producida en las lavas del Malpaís sólo por fuertes precipitaciones, las cuales presentan una composición isotópica más ligera respecto a las muestras de precipitación muestreadas durante esta investigación. El reducido fraccionamiento isotópico por evaporación que presentan estas muestras indica la posibilidad de que esta recarga sea de tipo preferencial. Esta hipótesis es bastante factible si se considera la elevada permeabilidad que presentan las coladas de lava del Malpaís gracias al importante desarrollo de vesículas, presencia de estructuras columnares y la ausencia de barrancos que permitan la escorrentía en la misma.

b) agua recargada a partir de la escorrentía procedente de las partes más altas del Macizo de Betancuria y que se encharca en los márgenes de las lavas del Malpaís. El encharcamiento se produce debido a que las lavas del Malpaís constituyen un obstáculo natural para la circulación del agua de escorrentía. La recarga en las zonas de encharcamiento se produciría por un flujo vertical del agua en los charcos. No obstante, no se descarta que a medida que llegue agua de la escorrentía hacia los márgenes de las lavas recientes, parte de la misma se mueva según un flujo horizontal hacia el interior de las coladas de lava para posteriormente cambiar a un flujo vertical y recargar el acuífero. Estos encharcamientos han sido observados por el autor durante las precipitaciones ocurridas en marzo de 1999 y superficialmente pueden extenderse varios kilómetros cuadrados. Las zonas donde se producen los encharcamientos aparecen descritas en el mapa geológico como depósitos aluviales de limos y arenas.

Tampoco se descarta que el agua recargada en este sector se produzca por una combinación de los dos mecanismos de recarga indicados anteriormente.

La Figura 5.11 presenta la relación ^{18}O y ^2H para las muestras del Malpaís, con indicación del contenido de cloruro (meq L^{-1}) de cada muestra. Se aprecia que las muestras con mayor contenido de cloruro tienen valores isotópicos más pesados y con una composición más próxima a la composición isotópica de las muestras de la Unidad Inferior. A partir del flujo regional del agua subterránea, desde las rocas del Complejo Basal en las partes más altas del Macizo de Betancuria hacia la Depresión Central compuesta en el subsuelo principalmente por lavas miocenas, se deduce que la composición isotópica de estas muestras corresponde a una mezcla de aguas recargadas en el margen occidental del Malpaís con aguas de mayor mineralización correspondientes a la Unidad Inferior

En el sondeo S-142-MP se obtuvieron dos muestras a distinta profundidad debido a la estratificación que presenta el agua subterránea y la cual queda caracterizada por un aumento de la salinidad con la profundidad. La muestra F-5-CHL(21m) tomada a 21 m de profundidad es la muestra de menor mineralización ($2000 \text{ } \mu\text{S/cm}$) y presenta una composición isotópica más ligera respecto a la muestra F-5-CHL (35m) tomada a 35 m de profundidad y con una mayor mineralización ($4005 \text{ } \mu\text{S/cm}$). La muestra más profunda y con mayor mineralización tiene una composición isotópica más pesada y no se descarta que presente una mezcla en menor medida con agua de la Unidad Inferior.

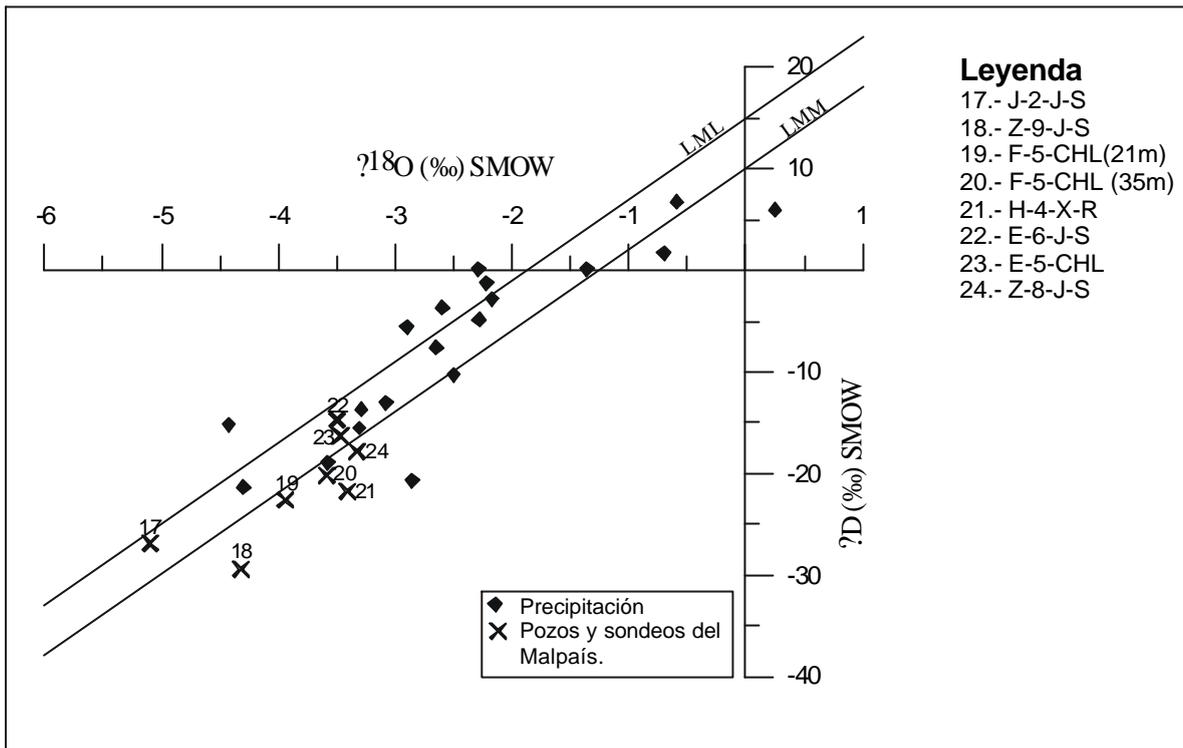


Figura 5.10.- Relación 18O/D correspondiente a la precipitación y aguas subterráneas del Malpaís. LMM = Línea meteórica mundial; LML = Línea meteórica local.

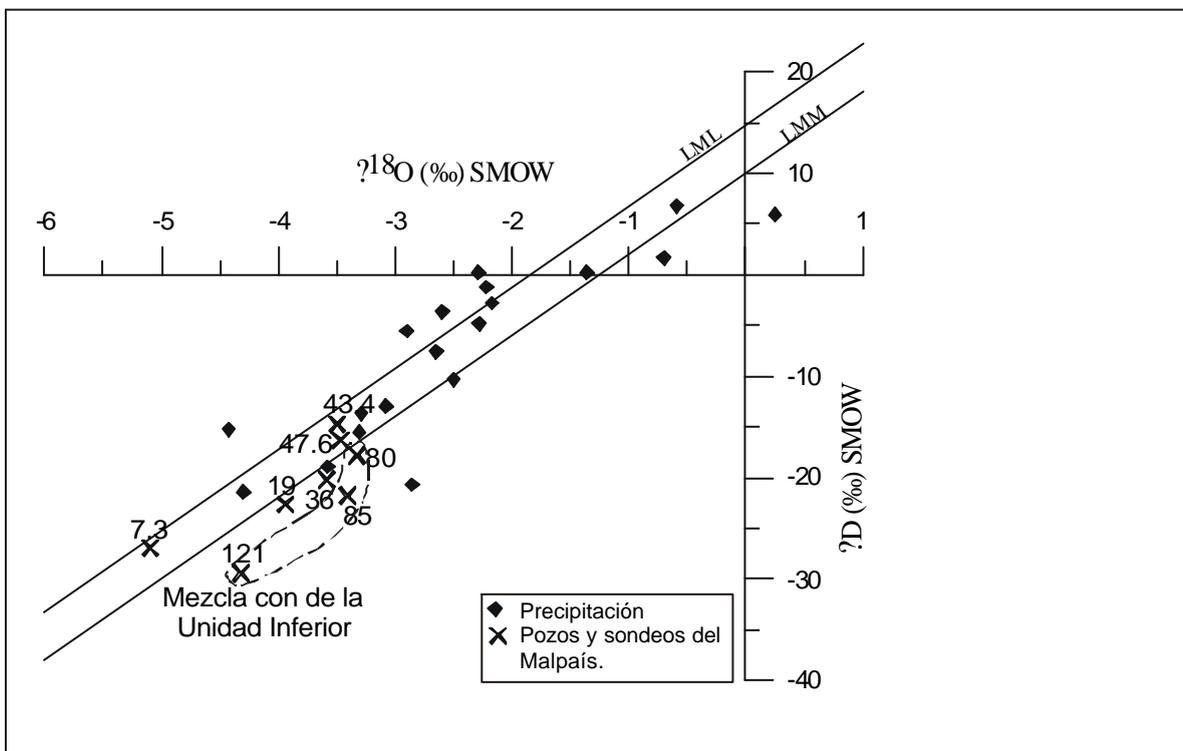


Figura 5.11.- Relación 18O/D correspondiente a la precipitación y aguas subterráneas del Malpaís. El número indica concentración de cloruro (meq L^{-1}) del agua. LMM = Línea meteórica mundial; LML = Línea meteórica local.

5.2.5.- Estudio de la relación entre los contenidos isotópicos y la salinidad

Estudio de la relación entre el ^{18}O y el Cl

La Figura 5.12 presenta la relación entre los valores isotópicos de ^{18}O y los cloruros de las muestras de precipitación y agua subterránea del área de estudio, donde se han trazado las curvas de mezcla teórica del agua meteórica y el agua de mar. Los puntos de precipitación utilizados para la construcción de las curvas de mezcla corresponden a las muestras de composición isotópica más ligera y en las que se ha descartado fraccionamiento por evaporación. A grandes rasgos se observa que la mayoría de las muestras de agua subterránea se sitúan en torno a las curvas de mezcla teórica con agua de mar. Las muestras de agua subterránea en que se detectó fraccionamiento por evaporación a partir de la gráfica de ^{18}O y D quedan fuera de la de mezcla teórica con agua de mar.

Las muestras de la Unidad Superior presentan una composición isotópica de ^{18}O y de concentración de cloruro que las sitúa más próximas a los valores de la precipitación. Las muestras de los manantiales presentan valores de ^{18}O más ligeros, mientras que los pozos y sondeos someros en su mayoría tienen valores isotópicos de ^{18}O más pesados. Algunos valores isotópicos más pesados en ^{18}O correspondientes a muestras de manantiales y pozos de la Unidad Superior concuerdan con puntos en que se detecta un enriquecimiento por evaporación en la representación de ^{18}O y ^2H .

Las muestras tomadas en el Malpaís se caracterizan por presentar valores isotópicos de ^{18}O más ligeros respecto al resto de muestras de agua subterránea y se corresponden bien con los valores obtenidos para la precipitación. A partir del trazado de las curvas de mezcla teórica se obtiene que las precipitaciones que dieron origen a las aguas subterráneas en el Malpaís tienen una composición isotópica en ^{18}O menor a -4% . Se destacan dos muestras de agua subterránea tomadas en sondeos someros en el Malpaís que presentan una composición isotópica más ligera y que quedan fuera de los límites de las curvas de mezcla teóricas del agua de lluvia y el agua de mar.

Las muestras de los sondeos profundos de Tuineje y Tesejerague en general se sitúan dentro del campo definido por las líneas de mezcla entre de agua de lluvia y el agua de mar. El trazado de las líneas de mezcla teórica, que incluye las muestras de agua subterránea de los sondeos profundos, indica que esta agua tienen su origen a partir de precipitaciones con una composición isotópica en ^{18}O menor a $-3,4\%$. Se escapa de esta tendencia la muestra C-4-A-CHL, la cual presenta mezcla con aguas de la Unidad Superior que ha sufrido fraccionamiento por evaporación y queda sobre las líneas de mezcla de agua meteórica y agua de mar.

Si bien la mayoría de las muestras de los sondeos profundos de Tuineje presentan una composición isotópica de ^{18}O y de contenido de cloruros que las sitúa en el campo de mezcla del agua meteórica y agua de mar, estas muestras presentan una tendencia hacia el campo de evaporación a medida que aumenta el contenido de cloruro y que las desvía de la línea de mezcla con el agua de mar. Del mismo modo las muestras de los sondeos profundos de

Tesejerague también presentan una tendencia de hacia el campo de evaporación a medida que aumenta el contenido de cloruro, pero con una mayor proximidad hacia el campo de mezcla con el agua de mar. Estas observaciones ponen de manifiesto que las muestras de la Unidad Inferior posiblemente sufren una combinación de evaporación con mezcla de agua marina.

Estudio de la relación entre el exceso de deuterio y los contenidos de cloruro

La Figura 5.13 presenta la relación entre el exceso de deuterio y la concentración de cloruros (mg L^{-1}) de las muestras de precipitación y agua subterránea del área de estudio. Se han trazado las curvas de mezcla teórica entre el agua lluvia y el agua de mar.

Los valores de exceso de deuterio y de concentración de cloruros de las muestras de agua representativas de la recarga (Unidad Superior) se ajustan con los valores obtenidos para la precipitación. Las muestras de los manantiales son las que presentan mayores variaciones en el valor de exceso de deuterio y en general se ajustan bien a los valores de la precipitación, mientras que las aguas de pozos presentan contenidos de exceso de deuterio más bajos que los sitúan en el campo de la evaporación. En general las muestras con valores de exceso de deuterio más bajos coinciden con muestras que en la representación de $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ presentan fraccionamiento por evaporación.

Algunas muestras de los sondeos profundos de Tuineje y Tesejerague se ajustan bien a las curvas de mezcla con el agua de mar a medida que aumenta la concentración de cloruro. Sin embargo, la mayoría quedan ligeramente desplazadas respecto a la curva de mezcla, con valores de exceso de deuterio más bajos. A partir de los valores más bajos en exceso de deuterio de algunas muestras a medida que aumenta la concentración de cloruros, no se descarta que algunas muestras tengan una combinación de evaporación y mezcla con agua de mar.

Algunas muestras tomadas en el Malpaís que presentan una alta concentración de cloruro y que se sitúan próximas a los valores de los sondeos profundos, corresponden a muestras en que se sospecha la mezcla con agua de la Unidad Inferior.

5.2.6.- Tritio

Las concentraciones de tritio en las aguas subterráneas son muy variables entre las aguas de la Unidad Superior y la Unidad Inferior. La Figura 5.14 presenta la relación tritio/cloruro, donde se observa que en general a medida que aumenta la concentración de cloruro en el agua subterránea, los contenidos en tritio se hacen cada vez menores. Sin embargo, las muestras de la Unidad Superior, con menores concentraciones de cloruro presentan una mayor dispersión de las concentraciones de tritio respecto a las muestras de la Unidad Inferior.

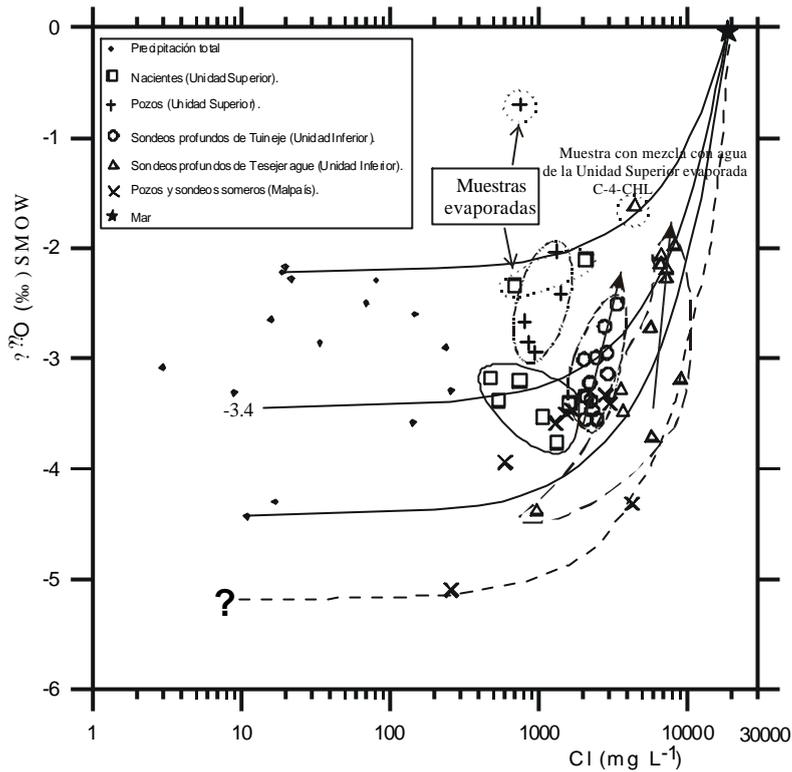


Figura 5.12.- Representación de las relación $\delta^{18}\text{O}$ versus Cl (mg L^{-1}) para las muestras de la precipitación y aguas subterráneas del área de estudio.

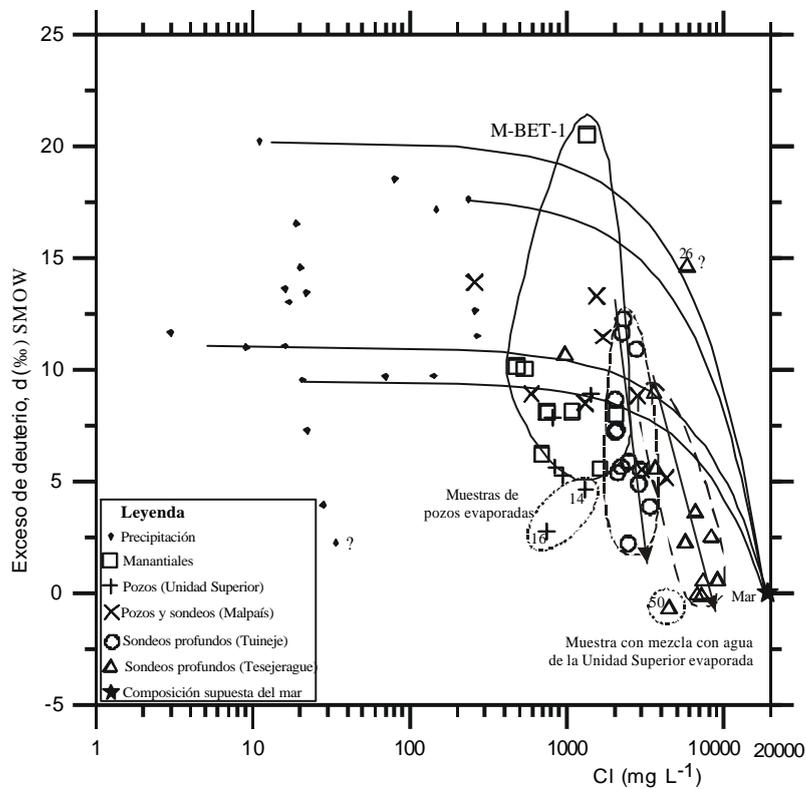


Figura 5.13.- Relación entre el exceso de deuterio y la concentración de cloruro (mg L^{-1}) en la precipitación y aguas subterráneas del área de estudio.

Las concentraciones de tritio de la precipitación actual son bajas e inferiores a 1,7 UT. Estos valores son en muchos casos inferiores a los obtenidos en muestras de aguas subterráneas de la Unidad Superior.

Unidad Superior y sector del Malpaís

Las concentraciones de tritio en muestras de la Unidad Superior presentan una gran dispersión de valores. Dentro de las muestras de la Unidad Superior los manantiales son los que presentan una mayor dispersión, mientras que las muestras obtenidas en pozos presentan concentraciones actuales de menos de 1 UT.

A partir de las concentraciones de tritio se pueden diferenciar dos grupos de manantiales: a) aquellos que presentan contenidos actuales en tritio mayores a 2 UT y que corresponden a los manantiales M-BET-1, M-BET-2, M-BET-5 y M-ANTE, y b) manantiales con concentraciones de tritio inferiores a 0,8 UT, en los que se encuentran los manantiales M-BET-3, M-BET-4, MAN-PAJ-JS y MAN-TUI. A partir de estos antecedentes no se descarta que el agua de los manantiales con mayores contenidos de tritio incorpore agua de escorrentía que circula por los barrancos y que se infiltra en los depósitos aluviales. Esta hipótesis adquiere validez si se considera que las muestras en manantiales fueron obtenidas después de períodos de fuertes precipitaciones, no se puede descartar que la mayor concentración de tritio de estas muestras se deba a que corresponden a manantiales esporádicos.

En general los contenidos de tritio observados en pozos de la Unidad Superior varían entre 0,5 y 1 UT. Si bien los contenidos de tritio son bajos, estos resultan difíciles de explicar considerando la existencia de una zona no saturada de más de 30 m en caso de flujo de recarga tipo pistón. Estas concentraciones de tritio pueden ser explicadas posiblemente por una recarga de tipo preferencial debido a encharcamientos de las aguas en superficie que recargan el acuífero.

El contenido de tritio en las muestras tomadas en el sector del Malpaís es muy variable, y en general disminuye a medida que aumenta la concentración de cloruro (Figura 5.14). Así en las muestras con contenidos de cloruros próximos a los de la Unidad Superior se reconocen contenidos de tritio próximos a los de las muestras obtenidas en manantiales, mientras que en las muestras con concentraciones de cloruros similares a los de la Unidad Inferior los contenidos de tritio tienden a disminuir. Esta tendencia descendente de los contenidos de tritio a medida que aumenta la concentración de cloruro confirmaría que las muestras con mayor mineralización obtenidas en este sector corresponden a mezclas de aguas recargadas en este sector con aguas correspondientes a la Unidad Inferior, que llegan al sector del Malpaís como consecuencia del flujo regional del agua subterránea.

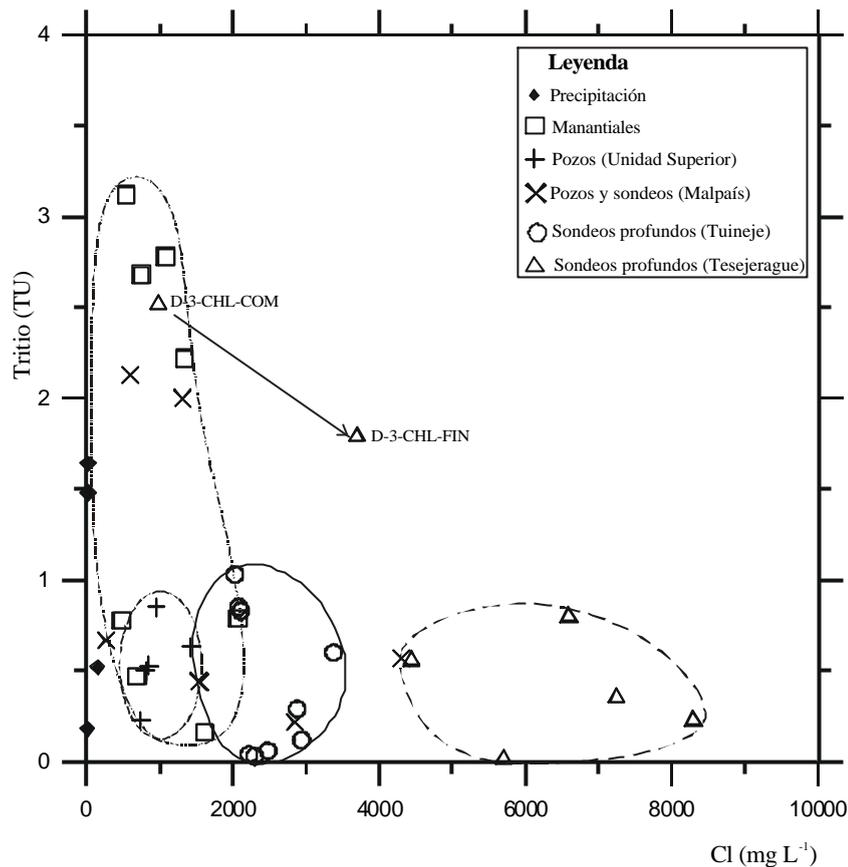


Figura 5.14.- Relación de los contenidos de tritio (TU) y cloruro (mg L^{-1}) en las muestras de agua subterránea de la Unidad Superior, Unidad Inferior y Malpaís.

Unidad Inferior

En general las muestras recuperadas en sondeos profundos del sector de Tuineje y Tesejerague presentan contenidos de tritio menores a 1 UT y en la mayoría de los casos inferiores a 0,4 UT, lo que hace suponer la explotación de aguas subterráneas antiguas. En tres muestras de agua de esta unidad (A-3-CHL, N-3-X-R y PAU-J-S) las concentraciones de tritio fueron nulas.

En el caso de las muestras de la Unidad Inferior que contienen mayores contenidos de tritio no se descarta la mezcla dentro del sondeo de aguas de la Unidad Superior con agua de la Unidad Inferior. Un ejemplo lo constituyen las muestras tomadas en el sondeo profundo S-118-TE ubicado en la localidad de Tesejerague, donde se obtuvieron dos muestras para análisis de tritio: una al inicio del bombeo (D-3-CHL-COM) y otra tres horas después (D-3-CHL-FIN). Se observa que la concentración de cloruro aumenta de 980 mg/l a 3700 mg/l , mientras que el contenido en tritio disminuye de 2,5 UT a 1,8 UT. Este fenómeno es explicado por la mezcla dentro del sondeo de aguas de menor mineralización de la Unidad Superior con aguas más antiguas y de mayor mineralización, representativas de la Unidad Inferior. Aparentemente la influencia de las aguas de la Unidad Superior disminuiría al transcurrir el tiempo de explotación, aunque su influencia persistiría e incidiría en la detección de altos contenidos de tritio.

En el sondeo S-124-TE se tomaron 3 muestras para análisis de tritio a distintas profundidades debido a la estratificación del agua subterránea, la cual queda caracterizada por un aumento de la salinidad con la profundidad. La muestra de menor profundidad (25m) presenta una concentración de tritio de $0,57 \pm 0,11$ UT y su composición podría estar influenciada por el agua de una presa ubicada 10 m aguas arriba de la ubicación del sondeo. La muestra tomada a 35 m de profundidad presenta una concentración de tritio de $0,81 \pm 0,11$ UT y la muestra obtenida a 57 m de profundidad tiene una concentración de tritio de $0,24 \pm 0,11$ UT. La muestra de 35 m de profundidad es representativa de una pequeña interfaz entre las aguas menos salinas de la parte superior y las aguas más salinas de mayor profundidad, y su alto contenido de tritio puede representar una mayor influencia del agua de la presa. La muestra de mayor profundidad presenta una composición química característica de las aguas de la Unidad Inferior en Tuineje.

5.2.7.- Discusión

El estudio de la relación $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ de la precipitación indica que las variaciones isotópicas de la misma están relacionadas con la cantidad de precipitación caída. Así, la composición isotópica de las precipitaciones de mayor intensidad presenta una composición isotópica más ligera respecto a las precipitaciones más reducidas, que presentan en algunos casos fraccionamiento por evaporación. El efecto de la cantidad de precipitación en la composición isotópica de la misma estaría asociado al intercambio isotópico durante la precipitación, el cual se produce por la diferencia entre la composición isotópica de las gotas de lluvia y la humedad ambiental. De esta forma, en el caso de lluvias de menor intensidad existe un gradiente con la humedad ambiental capaz de producir evaporación en las gotas de lluvia.

La composición isotópica de ^{18}O y ^2H de las muestras de la Unidad Superior muestran importantes variaciones según su altitud y tipo de captación. Así las muestras obtenidas de manantiales presentan una composición isotópica más ligera respecto a las muestras obtenidas en pozos y sondeos someros situados a en cotas más bajas. La composición isotópica más ligera de las muestras de los manantiales puede ser atribuida a la mayor altitud los manantiales (en torno a los 450 m), lo que implica una mayor cota de recarga del agua de descarga en los manantiales. La composición isotópica más pesada del agua de los pozos respecto a los manantiales puede ser explicada por que es recargada a altitudes más bajas.

Las muestras de agua subterránea obtenidas en el sector del Malpaís presentan una composición isotópica más negativa respecto a las muestras de la Unidad Superior. El origen de la composición isotópica más ligera puede ser explicada por dos hipótesis:

a) El agua de lluvia que recarga en esta unidad volcánica sólo se produce durante fuertes precipitaciones, las cuales presentan una composición isotópica más ligera. Debido al reducido fraccionamiento isotópico por evaporación que presentan estas aguas no se descarta que esta recarga sea de tipo preferencial.

b) El agua que recarga esta unidad procede del agua de escorrentía que viene de las partes más altas del Macizo de Betancuria y que se encharca en torno a las lavas del Malpaís, debido a que esta unidad volcánica constituyen un obstáculo para su circulación aguas abajo de los barrancos. La procedencia del agua de escorrentía de cotas más altas incide en una composición isotópica más ligera del agua de los charcos. De esta manera una parte la de recarga se produce por la infiltración directa a través de estas lagunas y otra posiblemente a medida que llegue agua de la escorrentía hacia los márgenes de las lavas recientes, donde parte de la misma se movería según un flujo horizontal hacia el interior de las coladas de lava para posteriormente cambiar a un flujo vertical y recargar el acuífero.

No se descarta que los dos mecanismos de recarga indicados anteriormente actúen conjuntamente en mayor o menor medida en la recarga que se produce en este sector.

Los valores de ^{18}O y D medidos en aguas de los sondeos profundos de Tuineje se aproximan al valor marino a medida que aumenta la concentración de cloruro en el agua. Esta tendencia hace suponer una posible mezcla de agua de origen meteórico con agua de mar. No obstante, la representación de $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ de las muestras de los sondeos profundos de Tesejague indica ciertas discrepancias entre la situación de algunas muestras en la línea de mezcla con agua de mar y la concentración de cloruros, de tal manera que muestras con mayores concentraciones de cloruros se encuentran más alejadas de la composición isotópica del mar respecto a muestras con menores contenidos de cloruros. Estas diferencias posiblemente estén relacionadas con un mayor fraccionamiento por evaporación del agua meteórica original, que posteriormente se mezclaría con agua marina.

La gran variación en las concentraciones de tritio en las muestras de la Unidad Superior y más próxima a la concentración de tritio del agua de lluvia indica que en algunos casos la recarga del agua en esta unidad se produce con posterioridad a las más importantes explosiones termonucleares registradas a comienzos de 1960. No obstante, en algunas muestras las concentraciones de tritio son bajas, por lo que no se descarta la existencia de aguas más antiguas.

Las pequeñas concentraciones de tritio determinadas en todas las muestras de la Unidad Inferior, y que en algunos casos son nulas, hacen suponer que la recarga es anterior al año 1960. No obstante, en algunas muestras de la Unidad Inferior se detectan ciertas concentraciones de tritio y no se descarta que su origen este relacionado con la mezcla con aguas de la Unidad Superior.

5.2.8.- Conclusiones

- A partir de los valores isotópicos de ^{18}O y ^2H de las muestras de precipitación, una vez descartadas aquellas muestras que presentan fraccionamiento isotópico por evaporación, se obtiene una recta meteórica local de $^2\text{D} = 8,6^{\circ}^{18}\text{O} + 15$.

- La composición isotópica (^{18}O y ^2H) representativa de las precipitaciones de mayor magnitud (> 5 mm/día) es aproximadamente similar a la composición isotópica de las aguas de manantiales y pozos de la Unidad Superior. Por lo tanto, las aguas de la Unidad Superior se recargan a partir de esta lluvia.
- El estudio de la relación $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ de las muestras de la Unidad Superior indica que la composición isotópica de estas muestras se aproxima a los valores isotópicos de la precipitación. En la Unidad Superior algunas muestras de aguas de pozos se presentan alineadas según una recta de evaporación con pendiente 6,1. Esta pendiente resulta característica por evaporación desde superficie de agua libre, por lo que no se descarta una recarga importante a partir de los numerosos embalses y gaviás existentes en la zona.
- La relación $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ de las muestras de la Unidad Inferior pone de manifiesto que las muestras de los sondeos profundos de Tuineje se presentan alineadas según líneas de mezcla con agua de mar. El aumento de los contenidos de cloruro con la aproximación de las muestras al valor isotópico del mar confirmaría esta hipótesis.
- Las muestras de pozos y sondeos de menor profundidad localizados en el Malpaís se caracterizan por presentar valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ más ligeros respecto a las muestras de la Unidad Superior. Además se observa que estas muestras presentan un mínimo enriquecimiento isotópico por evaporación.

5.3.- Estudio de los isótopos de ^{13}C y ^{14}C

5.3.1.- Generalidades

En este apartado se presenta la interpretación de datos isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{14}\text{C}$ obtenidos en manantiales, pozos y sondeos profundos en la isla de Fuerteventura. Se incluyen tres muestras de $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 del suelo obtenidas en la zona de estudio. Todas las muestras de $\delta^{13}\text{C}$ de agua subterránea fueron tomadas en dos campañas de campo realizadas en marzo y noviembre de 1999, y todos los análisis isotópicos fueron realizados en el Servicio de Aplicaciones Nucleares del CEDEX (Madrid).

El objetivo de esta investigación es caracterizar el ciclo del carbono en las aguas subterráneas de Fuerteventura y estudiar las posibles reacciones que involucran al carbono inorgánico disuelto en el agua.

5.3.2.- Introducción teórica

La adquisición de carbonato inorgánico disuelto total (CIDT) responde a la cadena de equilibrios que rige la distribución de diferentes especies carbonatadas, cuya suma constituye el CIDT ($CIDT = mH_2CO_3 + mHCO_3^- + mCO_3^{2-}$; siendo $m =$ milimoles/litro)

- | | | |
|-----|--------------------------------|---|
| (1) | $CO_{2g} ? CO_{2d}$ | (que depende de la pCO_{2g}) |
| (2) | $CO_{2d} + H_2O ? H_2CO_3$ | $K_0 = aH_2CO_3 / aCO_{2d}$ |
| (3) | $H_2CO_3 ? HCO_3^- + H^+$ | $K_1 = aHCO_3^- \cdot aH^+ / aH_2CO_3$ |
| (4) | $HCO_3^- ? CO_3^{2-} + H^+$ | $K_2 = aCO_3^{2-} \cdot aH^+ / aHCO_3^-$ |
| (5) | $MeCO_3 ? CO_3^{2-} + Me^{2+}$ | $K_3 = Ps = aCO_3^{2-} \cdot aMe^{2+}$ ($Me^{2+} = Ca^{2+}, Mg^{2+}, etc.$) |
| (6) | $H_2O ? H^+ + OH^-$ | $K_e = aOH^- \cdot aH^+$ |

Siendo $g =$ gas; $d =$ disuelto y $a =$ actividad

Los valores de las constantes a 25° son las siguientes (Custodio y Llamas, 1983):

$$K_0 = 10^{-3}; pK_1 = 6,34; pK_2 = 10,25; pK_3 = 8,3 \text{ y } pK_e = 14,0.$$

Por lo tanto el CIDT proviene por un lado de la disolución del CO_2 gaseoso, según la ecuación (1) y regido por la presión parcial de CO_2 gaseoso, y por otro lado de la disolución de carbonato sólido de una fase mineral carbonatada, según la ecuación (5).

En el medio natural el CO_2 gaseoso proviene de tres fuentes principales:

- La atmósfera con una $pCO_2 = 0,00033 \text{ atm}$ ($\log pCO_2 = -3,5$).
- El suelo, donde la actividad edáfica produce un CO_2 que puede alcanzar valores de $pCO_2 = 0,001$ a $0,1 \text{ atm}$ en el medio gaseoso.
- El volcanismo, con valores muy variables de pCO_2

La distribución de las especies carbonatadas depende del sistema geoquímico respecto al reservorio de CO_2 que existe. En sistema abierto el reservorio de CO_2 es infinito y el CIDT esta en equilibrio completo con una determinada pCO_2 , y por lo tanto $aH_2CO_3 = cte$. En sistema cerrado la acción del CO_2 esta limitada, bien cuando la pCO_2 es pequeña o cuando la percolación rápida del agua no permite un equilibrio completo de la cadena de reacciones anteriores. En este último para cualquier pH el CIDT se mantiene constante si no se produce desgasificación, precipitación ni disolución.

La abundancia de ^{13}C en las rocas, gas, materia orgánica y en el agua subterránea se expresa en tanto por mil de la desviación de la relación $^{13}C/^{12}C$. Su concentración $\delta^{13}C$ se establece respecto al estándar de una determinada caliza de origen marino (carbonato de un belemnites de la Formación Pee Dee de California) y viene dada por:

$$\delta^{13}C = \frac{(C13/C12)_{muestra} - (C13/C12)_{standard}}{(C13/C12)_{standard}}$$

siendo $(^{13}C/^{12}C)_{standard} = 1/90$, y se suele dar en partes por mil (‰).

El valor de $\delta^{13}C$ en el agua depende de la cadena de equilibrios carbónicos definidos en el apartado (3) y están determinados por la composición isotópica del CO_2 de la fuente. Cada

reacción implica un fraccionamiento isotópico (δ) entre los contenidos isotópicos de las especies que reaccionan y las especies producidas. El factor de fraccionamiento de las distintas especies carbonatadas varía de acuerdo a la temperatura según las siguientes ecuaciones:

$$\delta^{13}\text{C}_{(\text{CO}_2\text{g}/\text{H}_2\text{CO}_3)} = -0,19 + 373/\text{T} = \delta_{\text{ga}}$$

$$\delta^{13}\text{C}_{(\text{CO}_2\text{g}/\text{HCO}_3)} = 23,89 - 9483/\text{T} = \delta_{\text{gb}}$$

$$\delta^{13}\text{C}_{(\text{CO}_2\text{g}/\text{CO}_3)} = 22,73 - 9037/\text{T} = \delta_{\text{gc}}$$

$$\delta^{13}\text{C}_{(\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3)} = 15,10 - 4232/\text{T} = \delta_{\text{s}}$$

, donde $\delta^{13}\text{C}\%$ vs. PDB, T en °K, g = CO₂, a = H₂CO₃, b = HCO₃⁻, c = CO₃⁻² (Cabrera, 1995)

La Tabla 5.4 presenta los valores de enriquecimiento isotópico $\delta^{13}\text{C}$ (‰) de CO_{2(g)}, CO_{2(d)}, HCO₃⁻, CO₃⁻² y CaCO₃ para distintas temperaturas factibles de encontrar en aguas subterráneas.

Temperatura (°C)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{ga}}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{gb}}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{gc}}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{s}}(\text{‰})$
5	-1.2	-10.2	-9.8	-3.3
10	-1.1	-9.6	-9.2	-3.0
15	-1.1	-9.0	-8.6	-2.8
20	-1.1	-8.5	-8.1	-2.6
25	-1.1	-7.9	-7.6	-2.4
35	-1.0	-6.9	-6.6	-2.2
50	-1.0	-5.5	-5.2	-1.9
75	-0.9	-3.3	-3.2	-1.8

Tabla 5.4.- Valores de enriquecimientos isotópicos en el sistema CO_{2(g)}, CO_{2(d)}, HCO₃⁻, CO₃⁻² y CaCO₃ (modificado de Clark, 1987); g = CO₂, a = H₂CO₃, b = HCO₃⁻, c = CO₃⁻²

En sistema abierto al CO₂, si el equilibrio isotópico entre el CIDT y el CO₂ biogénico es completo, el fraccionamiento responde a su valor teórico y la ecuación de balance de masas es:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{CIDT}} = \frac{\sum m_i [\delta^{13}\text{C}_g - \delta^{13}\text{C}_i]}{\sum m_i}$$

Si se considera que los pH normales en las aguas subterráneas varían entre 7 y 8, la especie dominante es el bicarbonato y la ecuación se reduce a:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{CIDT}} = \delta^{13}\text{C}_g - \delta^{13}\text{C}_g/b$$

En sistema cerrado al CO₂, sin carbonatos en el medio y sin precipitación de carbonatos, con el CIDT constante, la masa de carbono se conserva y por lo tanto el $\delta^{13}\text{C}$ del CIDT en el agua es función del pH del agua en el momento en que tiene lugar el aislamiento.

Si se considera que el bicarbonato es la especie dominante en el agua en el momento del aislamiento, el $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 puede ser aproximadamente:

$$\delta^{13}\text{C}_g = \delta^{13}\text{C}_{\text{CIDT}} + \delta_{\text{gb}}$$

5.3.3.- Muestreo del CO_2 del suelo

El muestreo de CO_2 del suelo para el análisis de $\delta^{13}\text{C}$ se realizó en tres zonas con distintos tipos litológicos y distinta vegetación. Este se hizo clavando una barra hueca de 1 metro de longitud en el suelo, con pequeños orificios en la parte inferior y con un tubo de salida en la parte superior. El entorno de la superficie del suelo donde se clavaba la barra era humedecido y cubierto con plástico para evitar la entrada de aire atmosférico por la parte inferior de la barra. La salida superior de la barra era conectada a una pequeña bomba manual de aspiración, la cual a la vez era conectada a una serie de tres difusores sumergidos en una solución de CaCl_2 , a pH 10. Al entrar el aire en las botellas el CO_2 del mismo era atrapado en forma de CaCO_3 , dando un precipitado de color blanco. La cantidad de precipitado recolectado disminuye desde la primera a la última botella.

5.3.4.- Caracterización del $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ del suelo

La evolución del CIDT y el $\delta^{13}\text{C}_{\text{CIDT}}$ comienza con el CO_2 atmosférico, el cual en las Islas Canarias varía entre -8,0 ‰ y -6,4‰ vs PDB (Gasparini, 1989). Los procesos de fotosíntesis de las plantas conducen a un aligeramiento en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ atmosférico entre un 5 y 25‰ vs PDB. Por lo tanto, la composición isotópica del anhídrido carbónico del suelo depende del tipo de cubierta vegetal que lo produce. En la naturaleza se distinguen tres ciclos fotosintéticos principales, cuyas características más importantes se presentan en la Tabla 5.5.

Ciclo	Tipo de cubierta vegetal	$\delta^{13}\text{C}$ plantas (‰ vs PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ suelo (‰ vs PDB)
Ciclo Calvin o C_3	Especies silvestres (clima templado)	-22 a -30	-25
Ciclo Hatch-Slack o C_4	Hierbas y gramíneas (clima subtropical)	-10 a -20	-12
Ciclo del metabolismo ácido de las Crasuláceas (CAM)	Plantas crasulentas (clima subtropical)	-18	-17

Tabla 5.5.- Ciclos fotosintéticos de la naturaleza (modificado de Gasparini, 1989)

Se han realizado determinaciones de $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 del suelo en otras islas del archipiélago de Canarias. En la isla de La Palma se ha realizado la determinación de una muestra de gas del suelo, la cual tiene un valor isotópico de $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 de -28.4‰ (Veeger, sin publicar). Muestras de gas del suelo de las islas de Tenerife y Gran Canaria presentan

valores de $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 del suelo comprendidas entre -18.1 a -22.4‰ y -15.5 a -22.9‰ respectivamente (Veeger, sin publicar). En esta investigación se incluye la determinación de tres muestras de $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 del suelo tomadas en las localidades de Tuineje, Corralejo y Tiscamanita (Malpaís). Las características climáticas semiáridas que dominan en la parte sur de la isla de Gran Canaria, unida su proximidad geográfica con la isla de Fuerteventura, permiten considerar en esta caracterización isotópica 18 muestras de $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 del suelo, tomadas por Gasparini (1989) en la zona de Amurga en Gran Canaria. La Tabla 5.6 presenta los resultados de estas determinaciones, además de otras características físicas del medio en que fueron tomadas las muestras.

En Fuerteventura los valores obtenidos para el $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 del suelo varían entre $-15,8$ y $-18,32\text{‰}$, muy próximos al valor medio de $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 del suelo obtenido por Gasparini (1989) en el sur de Gran Canaria, que tiene un valor de $-16,27\text{‰}$. A partir del total de datos de $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 del suelo se obtiene un valor medio de $-16,4\text{‰}$, con una desviación típica de $-2,66\text{‰}$.

La Figura 5.15 presenta el histograma de valores de $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 del suelo, donde se distinguen 2 grupos bien definidos: uno con una composición más ligera en $\delta^{13}\text{C}$ (-22 y -23‰ vs. PDB), el cual queda caracterizado sólo por dos muestras obtenidas en Gran Canaria y un segundo grupo de mayor distribución y con una composición ligeramente más pesada en $\delta^{13}\text{C}$ (-19 y -22‰ vs. PDB). A partir de estos resultados es posible diferenciar la coexistencia de los ciclos fotosintéticos de Calvin y HATCH-SLACK en las muestras estudiadas.

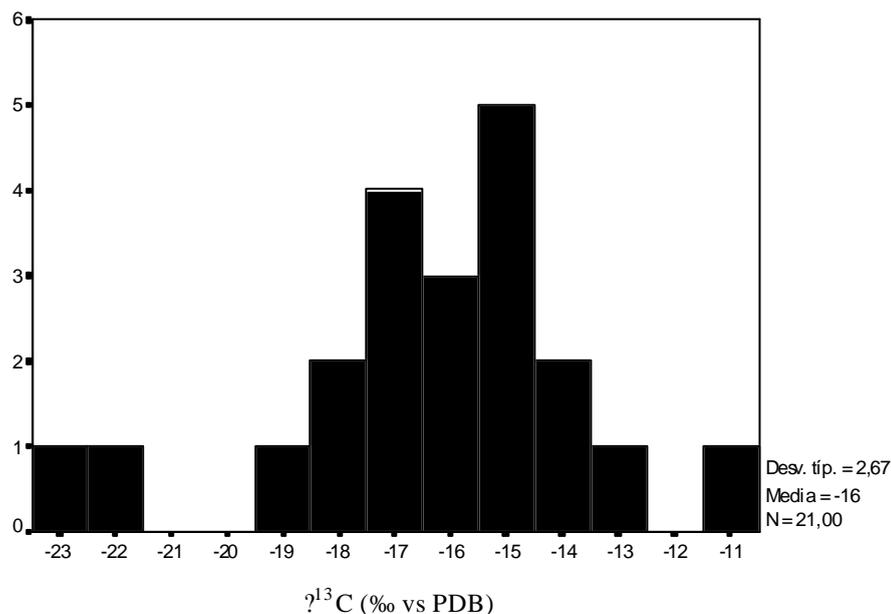


Figura 5.15.- Histograma de distribución de $\delta^{13}\text{C}$ (‰ vs PDB) del CO_2 del suelo. N = número de datos

Isla	Toponimia	Cota, m	$\delta^{13}\text{C}\%$	Observaciones
Gran Canaria	Valle Negro	1150	-19,46	Terreno arcilloso con Gramíneas
Gran Canaria	Las Lagunas	930	-15,46	Terreno arcilloso con Gramíneas
Gran Canaria	Por encima de Fataga	770	-15,9	Derrubios vegetados
Gran Canaria	Hoya grande	730	-15,05	Aluviones arcillosos con Gramíneas
Gran Canaria	Lomo Morales	680	-15,46	Fonolitas (litosuelo)
Gran Canaria	La Barrera	615	-17,18	Arcillas y fonolitas
Gran Canaria	Los Caserones	460	-22,52	Derrubios fonolíticos y arcillas
Gran Canaria	Aldea Blanca	400	-16,76	Derrubios fonolíticos
Gran Canaria	Gl. Alta	330	-16,91	Limos
Gran Canaria	Aldea Blanca	240	-13,25	Limos
Gran Canaria	Rosiana	630	-15,57	Terreno arcilloso con gramíneas
Gran Canaria	El Gallego 1	470	-13,66	Derrubios fonolíticos y arcillas
Gran Canaria	Gl. Alta	455	-14,36	Arcillas y fonolitas
Gran Canaria	Bco. Tirajana	405	-18,02	Arcillas con palmeras y acáceas
Gran Canaria	Las Culatillas (*)	220	-14,61	Derrubios fonolíticos y arcillas
Gran Canaria	Bco. San Agustín (*)	205	-11,38	Derrubios fonolíticos y arcillas
Gran Canaria	Bco. de Berriel (*)	115	-22,01	Fondo de barranco algo vegetado
Gran Canaria	Bco. Hondo (*)	115	-15,45	Derrubios fonolíticos y arcillas
Fuerteventura	Tuineje	250	-18,32	Fondo de barranco
Fuerteventura	Tiscamanita (*)	150	-15,8	Limos sin vegetación
Fuerteventura	Corralejo	70	-17,36	Dunas con escasa vegetación

Tabla 5.6.- Resultados de determinaciones de $\delta^{13}\text{C}\%$ vs PDB del CO_2 del suelo y características de la vegetación y suelo de los puntos de muestreo en Gran Canaria (Gasparini, 1989) y Fuerteventura (esta Tesis). (*) Áreas áridas con escasa vegetación.

5.3.5.- Presentación de datos de ^{13}C y ^{14}C del agua subterránea

a) ^{13}C

En esta investigación se han realizado un total de 30 determinaciones de $\delta^{13}\text{C}$ del carbono disuelto en el agua subterránea (Tabla 5.7). La mayoría de las determinaciones de $\delta^{13}\text{C}$ fueron realizadas en los laboratorios de análisis isotópicos del CEDEX en Madrid, mientras que cinco análisis de $\delta^{13}\text{C}$ fueron realizados conjuntamente con determinaciones de $\delta^{14}\text{C}$ en el Leibniz-Labor, en Alemania.

Se han analizado por duplicado dos muestras de $\delta^{13}\text{C}$ obtenidas en la segunda campaña de muestreo (muestras A-3-J-S y N-3-J-S) en los laboratorios indicados anteriormente. Las determinaciones de $\delta^{13}\text{C}$ hechas en el CEDEX fueron realizadas por espectrometría de masas (MS), mientras que las determinaciones realizadas en Alemania fueron realizadas con el método de espectrometría de masas con acelerador de iones (AMS). Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ obtenidos en Alemania son más ligeros que los valores obtenidos en el CEDEX. Con la finalidad de comprobar el valor de $\delta^{13}\text{C}$ de la muestra N-3-J-S analizada en el CEDEX, se

realizó por segunda vez esta determinación en este mismo laboratorio, obteniéndose valores similares a los anteriores. No se tienen antecedentes precisos acerca de las diferencias analíticas, pero el laboratorio que realizó las determinaciones por el método AMS en Alemania advierte acerca de la escasa cantidad de carbono recuperado de las muestras enviadas (0,2 mg) y de que para mayor precisión en la determinación de $\delta^{13}\text{C}$ se requiere por lo menos 1 mg de C, por lo que indica ciertas dudas para los resultados obtenidos. La única muestra cuyo valor de $\delta^{13}\text{C}$ determinado en Leibniz-Labor se enmarca dentro de los resultados obtenidos por el CEDEX para las muestras de la Unidad Superior es la muestra P-VEGA-1, la cual corresponde a una muestra en que se logró recuperar mayor cantidad de carbono (3,1 mg) respecto a las otras muestras. Por lo tanto, de las determinaciones de $\delta^{13}\text{C}$ realizadas en Alemania sólo se considera como válida en este estudio la muestra P-VEGA-1.

b) ^{14}C

En este trabajo se realizaron cinco determinaciones de $\delta^{14}\text{C}$ del carbono disuelto en el agua. Cuatro muestras fueron tomadas en sondeos profundos de Tuineje y Tesejerague y una en un sondeo poco profundo localizado en rocas intrusivas del Complejo Circular de Vega de Río Palmas y cuya agua tiene una composición química característica de las muestras de la Unidad Superior. La gran cantidad de sulfato disuelto en el agua y la baja concentración de carbono disuelto requería un sistema de recuperación del carbono por desplazamiento ácido a partir de un gran volumen de muestra. Al no ser posible se optó por una precipitación cuantitativa del CID con C_2Ba de una cantidad moderada de muestra, a sabiendas de que el volumen precipitado solo contenía una muy pequeña concentración de carbono y que existía riesgo de fraccionamiento isotópico. Así la determinación de $\delta^{14}\text{C}$ se realizó por espectrometría de masas con acelerador de iones (AMS) y fueron realizadas en Leibniz-Labor, conjuntamente con las determinaciones de $\delta^{13}\text{C}$. La ventaja del método radica en que la baja cantidad de carbono necesario para realizar el análisis (1 mg de carbono).

Como se indicó anteriormente las importantes diferencias observadas entre los valores de $\delta^{13}\text{C}$ obtenidos en las muestras enviadas a Leibniz-Labor y las realizadas en el CEDEX plantean dudas razonables acerca de los resultados obtenidos. No obstante, debido a que el valor de $\delta^{13}\text{C}$ obtenido en la muestra P-VEGA-1 responde en parte al valor esperado para las muestras de los pozos de la Unidad Superior y considerando que esta muestra es la que más carbono tiene de las enviadas al laboratorio, no se descarta una mayor precisión en la determinación de este análisis. También este laboratorio le da una mayor fiabilidad a la muestra PAU-JS, obtenida en un sondeo profundo de Tuineje y cuya composición química responde a las muestras representativas de la Unidad Inferior.

5.3.6.- Caracterización del $\delta^{13}\text{C}_{\text{CITD}}$ del agua subterránea

Las muestras obtenidas en manantiales y pozos de la Unidad Superior presentan valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CITD}}$ comprendidos entre $-9,1$ y $-16,2\%$ vs PDB. Las muestras obtenidas en sondeos profundos de Tuineje presentan valores comprendidos entre $-10,0$ y $-12,1\%$ vs PDB, y las muestras de sondeos profundos de Tesejerague valores que varían entre $-13,7$ y $-21,7\%$ vs PDB. Por otro lado las muestras de pozos y sondeos someros tomadas en el sector del Malpaís presentan valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CITD}}$ más pesados y comprendidos entre $-8,1$ y $-10,7\%$ vs PDB.

Punto	Muestra	Fecha	Captación	Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (ρ S/cm)	Log PCO ₂	pH (*)	HCO ₃ ⁻³ (mg L ⁻¹)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CITD}}$	Laboratorio
S-63-TU	B-3-F-J	15-mar-99	Sondeo	25	12083	-2,08	7,4	274	-10,05	CEDEX
S-64-TU	B-4-F-J	22-mar-99	Sondeo	25,2	8743	-1,98	7,3	260	-10,75	CEDEX
S-65-TU	B-5-F-J	16-mar-99	Sondeo	24,4	11421	-1,73	7,3	480	-10,48	CEDEX
S-69-TU	A-3-F-J	15-mar-99	Sondeo	25,5	10893	-1,80	6,93	170	-11,85	CEDEX
S-66-TU	R-1-F-J	16-mar-99	7Sondeo	25,2	11133	-1,91	7,15	227	-10,84	CEDEX
S-85-TU	G-3-F-J	17-mar-99	Sondeo	26,7	10593	-1,80	6,97	187	-11,06	CEDEX
S-66-TU	R-1-J-S	22-nov-99	Sondeo	25,2	12153	-1,81	6,98	192	-12,11	CEDEX
S-66-TU	R-1-J-S	22-nov-99	Sondeo	25,2	12153	-1,81	6,98	192	-23,69	Leibniz-Labor
S-91-TU	E-1-J-S	26-nov-99	Sondeo	24,9	9163	-2,06	7,25	195	-13,91	CEDEX
P-21-TU	SEVERO-JS	23-nov-99	Pozo	20,4	5203		7,98	314	-11,55	CEDEX
S-156-PN	K-8-F-J	18-mar-99	Sondeo	27	5313	-2,46	7,9	320	-10,48	CEDEX
P-139-MP	H-4-F-J	20-mar-99	Pozo	22	11373	-2,64	7,65	130	-10,67	CEDEX
S-73-MP	J-1-F-J	19-mar-99	Sondeo	20	6121	-2,45	7,8	280	-8,15	CEDEX
S-165-MP	Z-9-J-S	20-nov-99	Sondeo	21,5	14603	-3,15	8,18	159	-9,14	CEDEX
M-BET-1	M-BET-1-JS	25-nov-99	Manantial	15,3	5083	-2,20	7,82	562	-16,23	CEDEX
M-BET-2	M-BET-2-JS	19-nov-99	Manantial	17	4453	-2,65	8,08	360	-12,43	CEDEX
M-BET-3	M-BET-3-JS	19-nov-99	Manantial	17,5	7723	-3,08	8,59	453	-11,01	CEDEX
M-ANTE	M-ANTE-JS	23-nov-99	Manantial	18,4	3193	-2,61	8,11	412	-13,4	CEDEX
M-PAJ	MAN-PAJ-JS	18-nov-99	Manantial	21	2403	-2,56	8,02	340	-9,06	CEDEX
S-24-TU	Z-5-J-S	23-nov-99	Sondeo	22	3563	-2,37	7,89	404	-12,73	CEDEX
P-58-TU	B-1-F-J	20-mar-99	Pozo	23,3	1370	-2,93	7,9	103	-13,49	CEDEX
S-105-TE	N-3-J-S	26-nov-99	Sondeo	24	21044	-2,88	7,6	77	-19,92	Leibniz-Labor
S-105-TE	N-3-J-S	26-nov-99	Sondeo	24	21044	-2,88	7,6	77	-15,49	CEDEX
S-105-TE	N-3-F-J	17-mar-99	Sondeo	23,5	21881	-2,12	7,27	200	-20,03	CEDEX
S-121-TE	E-3-F-J	19-mar-99	Sondeo	25	10983	-2,06	7,45	310	-9,1	CEDEX
S-131-TE	X-2-J-S	22-nov-99	Sondeo	24,4	30504	-2,42	7,23	98	-15,08	CEDEX
S-104-TE	N-2-J-S	26-nov-99	Sondeo	24	24624	-1,05	6,79	784	-21,74	CEDEX
S-124-TE	C-4-J-S	22-nov-99	Sondeo	24,5	24704	-2,52	7,35	97	-13,67	CEDEX
P-12-PJ	P-VEGA-1	24-nov-99	Sondeo	22	4000	-2,28	7,87	468	-11,93	Leibniz-Labor
S-69-TU	A-3-J-S	22-nov-99	Sondeo	25,5	8420	-1,80	6,99	198	-21,06	Leibniz-Labor

Tabla 5.7.- Valores de $\delta^{13}\text{C}$ en ‰ vs PDB de las muestras de agua subterránea. (*) pH medido en campo.

La Figura 5.16 presenta el histograma de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CITD}}$, donde se observa una agrupación de datos en torno al valor de -11% . En el histograma se destacan dos muestras que se alejan de la distribución general de $\delta^{13}\text{C}$ en el agua subterránea. Estas presentan valores de $\delta^{13}\text{C}$ de $-20,0\%$ y $-21,7\%$ vs PDB y corresponden a muestras obtenidas en sondeos profundos en Tesejerague. La muestra que presenta un valor de $-20,0\%$ vs PDB fue repetida en la segunda

campana de muestreo obteniéndose un valor de $-15,6\%$ vs PDB, por lo que no se descarta un error en la preparación de la primera muestra, siendo descartada de la interpretación. En el caso de la muestra que presenta un valor de $-21,5\%$ vs PDB corresponde a una muestra tomada en un sondeo donde se sospecha de reducción de sulfatos debido a actividad bacteriológica por contaminación desconocida y que queda limitada a esta captación.

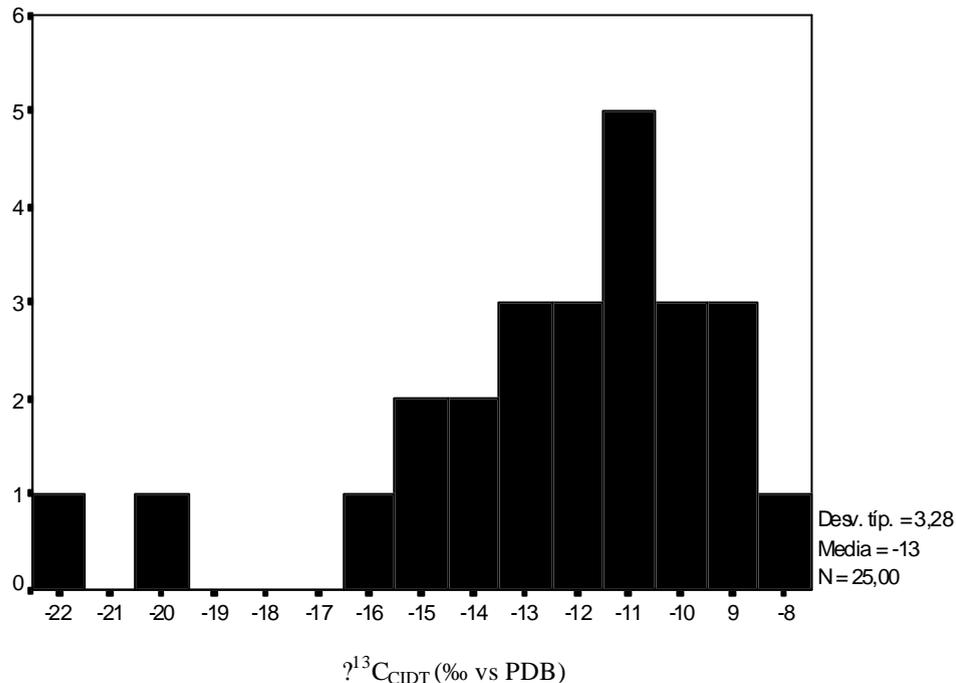


Figura 5.16.- Histograma de distribución de $^{13}\text{C}_{\text{CIDT}}$ (‰ vs PDB) del agua subterránea.

La Figura 5.17 presenta la relación de ^{13}C respecto a los contenidos de bicarbonato disuelto, logaritmo de la presión parcial de CO_2 y pH de campo. Se observa una buena agrupación de puntos respecto a la situación espacial de cada una de las unidades estudiadas.

Las muestras de manantiales y pozos de la Unidad Superior presentan en parte valores de ^{13}C más ligeros respecto a muestras obtenidas en el sector del Malpaís. La totalidad de estas muestras corresponde a aguas representativas de la recarga, lo que hace suponer que la mayoría del carbono disuelto proviene del CO_2 de origen biogénico. En las muestras de manantiales y pozos de la Unidad Superior los valores de ^{13}C se hacen más ligeros a medida que aumenta la concentración de bicarbonato disuelto en el agua. Por otro lado a medida que aumenta la presión parcial de CO_2 los valores de ^{13}C se hacen más ligeros. En estas muestras también se observa una cierta tendencia a disminuir el pH a medida que los valores de ^{13}C se hacen más ligeros. A partir de estas observaciones se deducen distintas variaciones de la aportación de CO_2 de origen biogénico a las aguas subterráneas, de manera que a medida que aumenta la aportación de CO_2 de origen biogénico aumenta el contenido de bicarbonato disuelto en el agua y aumenta la presión parcial de CO_2 en el suelo. Por otro lado el pH tiende

a disminuir a medida que los valores de $\delta^{13}\text{C}$ se hacen más ligeros, lo que también indica una mayor aportación de CO_2 de origen biogénico.

Las muestras del Malpaís presentan valores de $\delta^{13}\text{C}$ más pesados, que se sitúan muy próximos al valor de $\delta^{13}\text{C}$ atmosférico. Estos valores se corresponden con la escasa vegetación reconocida en este sector. La relación $\delta^{13}\text{C}$ versus bicarbonato (Figura 5.17) indica que estas muestras responden aproximadamente a la relación obtenida para las muestras de la Unidad Superior, con valores de $\delta^{13}\text{C}$ más pesados y menor contenido de bicarbonatos. Por otro lado la relación $\delta^{13}\text{C}$ versus PCO_2 también responde a la relación obtenida en las muestras de la Unidad Superior, con valores más pesados de $\delta^{13}\text{C}$ y presiones parciales de CO_2 más bajas, lo que es coherente con la escasa vegetación reconocida en este sector.

En las muestras de la Unidad Inferior tomadas en los sondeos profundos de Tuineje y Tesejerague se observa que al aumentar la concentración de bicarbonato disuelto en el agua los valores de $\delta^{13}\text{C}$ se hacen más pesados. Las muestras obtenidas en los sondeos profundos de Tesejerague presentan menores concentraciones de bicarbonato y valores de $\delta^{13}\text{C}$ más ligeros que las muestras de los sondeos profundos de Tuineje. Demény *et al.* (1998) ha determinado valores de $\delta^{13}\text{C}$ en numerosas muestras de calcita de carbonatitas en la isla de Fuerteventura. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en esta calcita varían entre $-6,5$ y $-3,0\text{‰}$ vs PDB, estando en valor medio en torno a $-6,0\text{‰}$ vs PDB. Estos valores de $\delta^{13}\text{C}$ de la calcita probablemente son los responsables de los valores más pesados de $\delta^{13}\text{C}$ determinados en la Unidad Inferior como consecuencia de la disolución de este mineral.

Para las muestras de los sondeos profundos en Tuineje también se observa que a medida que aumenta el pH del agua, el $\delta^{13}\text{C}$ se hace más pesado. No ocurre lo mismo con las muestras de Tesejerague, las cuales presentan en general pH más altos respecto a las muestras de Tuineje. A partir de estas observaciones no se descarta que en este sector se produzca disolución de carbonatos sólidos, lo cual incide en que el $\delta^{13}\text{C}$ se haga más pesado a medida que aumenta la concentración de bicarbonato disuelto, al mismo tiempo que aumenta el pH como consecuencia del CO_2 que se consume en las reacciones de meteorización y que incluyen a la calcita. Tampoco se puede descartar que las diferencias entre los pH medidos en Tuineje y Tesejerague pueden ser debidas a una incorporación diferencial de CO_2 de origen volcánico en estas dos unidades. Una de las muestras obtenida en un sondeo profundo en Tesejerague (S-104-TE) presenta un valor de $\delta^{13}\text{C}$ anormalmente alto ($-21,74\text{‰}$ vs PDB) respecto a las muestras profundas obtenidas en este sector. A partir de las características observadas en campo se sospecha que esta muestra está perturbada por fluidos de perforación que quedaron retenidos en el sondeo y que por lo tanto han alterado la composición isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ en esta muestra. No obstante, tampoco se puede descartar una aportación de CO_2 de origen profundo en este punto, debido al elevado contenido de HCO_3^- que tiene y al menor pH que presenta.

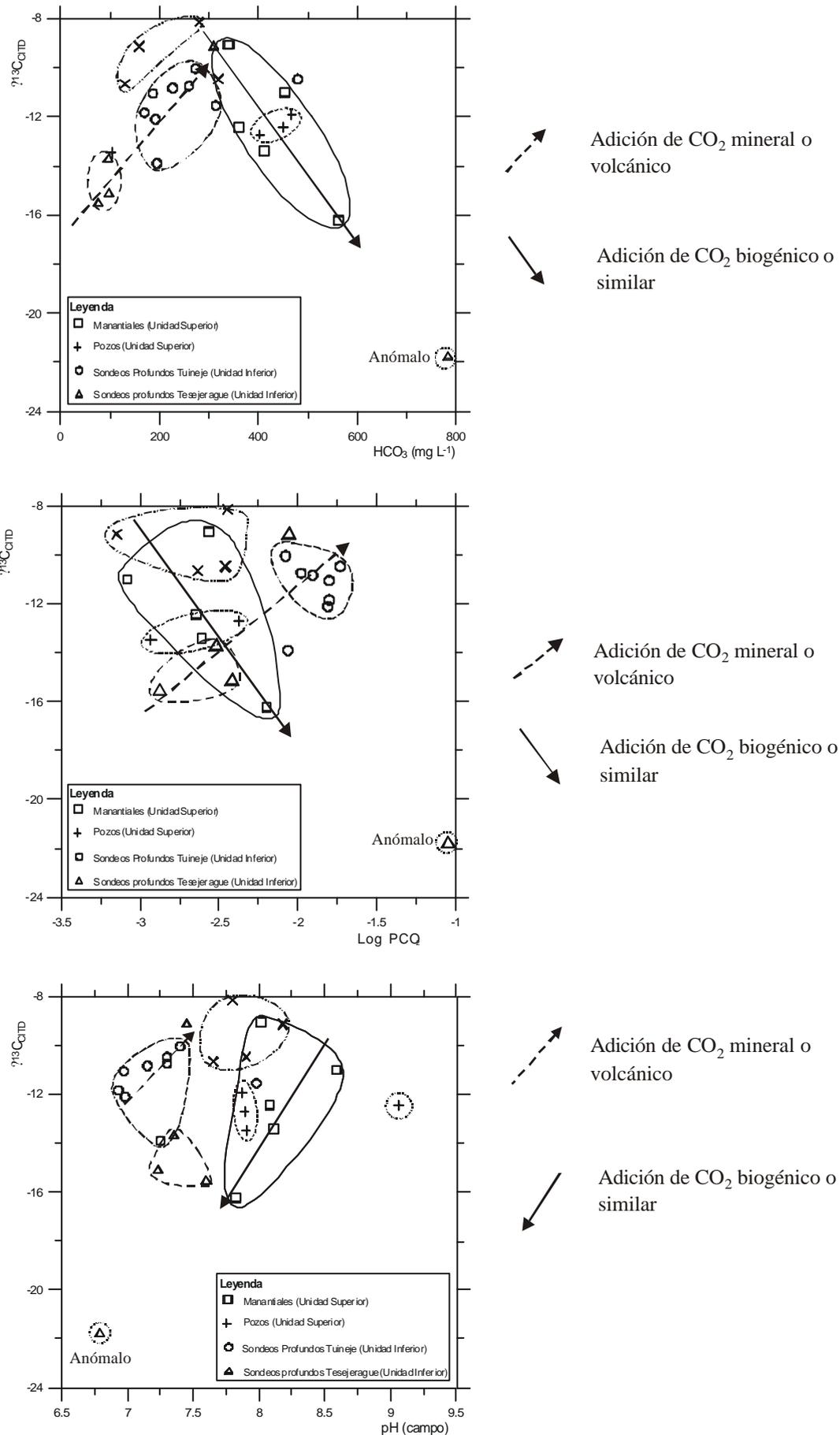


Figura 5.17.- Relación de: (a) $\delta^{13}\text{C}$ - bicarbonato, (b) $\delta^{13}\text{C}$ - LogPCO $_2$ y (c) $\delta^{13}\text{C}$ - pH de campo.

5.3.7.- Caracterización del $\delta^{14}\text{C}$ del agua subterránea

En esta caracterización de ^{14}C se realiza una determinación preliminar de la edad de las aguas subterráneas. También se presenta una discusión preliminar acerca de la validez de los valores de ^{14}C obtenidos respecto a los valores de ^{13}C . La Tabla 5.8 presenta los valores de ^{14}C obtenidos para muestras analizadas.

Punto	Muestra	Cantidad de C recuperado para el análisis, mg	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ vs PDB)	$\delta^{14}\text{C}$ pcm	Método	Laboratorio
P-12-PJ	P-VEGA-1	3.1	-10.7	69.2	AMS	Leibniz-Labor
S-69-TU	A-3-J-S	0.5	-18.4	78.2	AMS	Leibniz-Labor
S-66-TU	R-1-J-S	0.3	-19.55	73.3	AMS	Leibniz-Labor
S-105-TE	N-3-J-S	0.4	-20.7	92.4	AMS	Leibniz-Labor
S-32-TU	PAU-JS	0.6	-16.9	51.1	AMS	Leibniz-Labor

Tabla 5.8.- Determinaciones de ^{13}C y ^{14}C de las aguas subterráneas del área de estudio.

Como se discutió en el apartado 5.3.5, de las cinco muestras en que se realizó el análisis de ^{14}C , sólo los valores de las muestras P-VEGA-1 y PAU-JS pueden ser considerados fiables para una interpretación preliminar. A modo introductorio hay que mencionar que estas muestras presentan una composición química características de las aguas de la Unidad Superior y la Unidad Inferior respectivamente. La muestra P-VEGA-1 fue obtenida en un sondeo poco profundo situado en rocas intrusivas del Complejo Basal correspondientes a las Intrusiones Subvolcánicas Circulares Finales. A diferencia de las otras unidades intrusivas del Complejo Basal, éstas rocas afloran en superficie. La muestra PAU-JS fue obtenida en un sondeo profundo excavado en rocas intrusivas del Complejo Basal en el área de Tiscamanita. A diferencia del caso anterior, las rocas intrusivas se encuentran a mayor profundidad, situadas bajo lavas basálticas submarinas del Complejo Basal.

Tal como se indicó en el apartado 5.3.5, los resultados de $\delta^{13}\text{C}$ obtenidos por medio del método AMS no resultan del todo fiables (salvo la muestra P-VEGA-1), por lo que su utilización es tomada con reserva. En el caso particular de estas muestras tampoco se tienen datos de $\delta^{13}\text{C}$ realizados en otras campañas de muestreo. No obstante, debido a que los valores de $\delta^{13}\text{C}$ obtenidos para las muestras de la Unidad Inferior presentan una desviación típica muy baja, se ha intentado realizar una caracterización con el $\delta^{13}\text{C}$ utilizado el valor medio de esta unidad. Para las aguas de la Unidad Inferior se considera un valor medio de $\delta^{13}\text{C}$ de -10.5‰ vs PDB como característico de las aguas de esta unidad. El valor de $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 del suelo más representativo del sector corresponde al obtenido en el sector de Tuineje y tiene un valor de -18.3‰ vs PDB.

La Figura 5.18 muestra la relación entre el $\delta^{14}\text{C}$ y el $\delta^{13}\text{C}$ de la muestra del sondeo profundo PAU-JS y de la muestra de la Unidad Superior P-VEGA-1 y en el que se ha trazado

una zona de mezcla comprendida entre un polo con la composición isotópica del CO₂ de origen biogénico y un polo con la composición isotópica de la calcita que compone las carbonatitas (Demény *et al.*, 1998). Se observa que la muestra P-VEGA-1 se sitúa desplazada de la zona de mezcla que une ambos polos. La muestra P-VEGA-1 incorpora tritio termonuclear ($0,5 \pm 0,15$ UT) y posiblemente se encuentra desplazada de la zona de mezcla debido a la incorporación de ¹⁴C también de origen termonuclear. En el caso de la muestra de la Unidad Superior P-VEGA-1 no resulta extraño el valor de $\delta^{13}\text{C}$ más pesado que el resto de muestras de la Unidad Superior, debido a que esta ha sido obtenida en rocas intrusivas del Complejo Basal y posiblemente también incorpora carbono como consecuencia de la disolución de calcita. Por otro lado la muestra del sondeo profundo PAU-JS se sitúa en la zona de mezcla y además no contiene tritio detectable.

Al comparar en esta gráfica la situación de los puntos de Fuerteventura con las muestras de aguas profundas de Tenerife que incorporan CO₂ de origen volcánico (Custodio, 1989), se observa una diferencia significativa de ambos grupos de agua, ya que las muestras de Tenerife presentan valores de $\delta^{13}\text{C}$ más pesados. Esto hace suponer que el origen del carbono en las muestras profundas del área de estudio estaría más relacionado a la disolución de calcita de las carbonatitas que a aportaciones de CO₂ de origen volcánico. No obstante, Gasparini (1989) en la isla de Gran Canaria determinó un valor de $\delta^{13}\text{C}$ de $-5,3\text{‰}$ vs PDB en una muestra de agua que incorporan CO₂ de origen volcánico, por lo que esta deducción debe ser tomada con reserva.

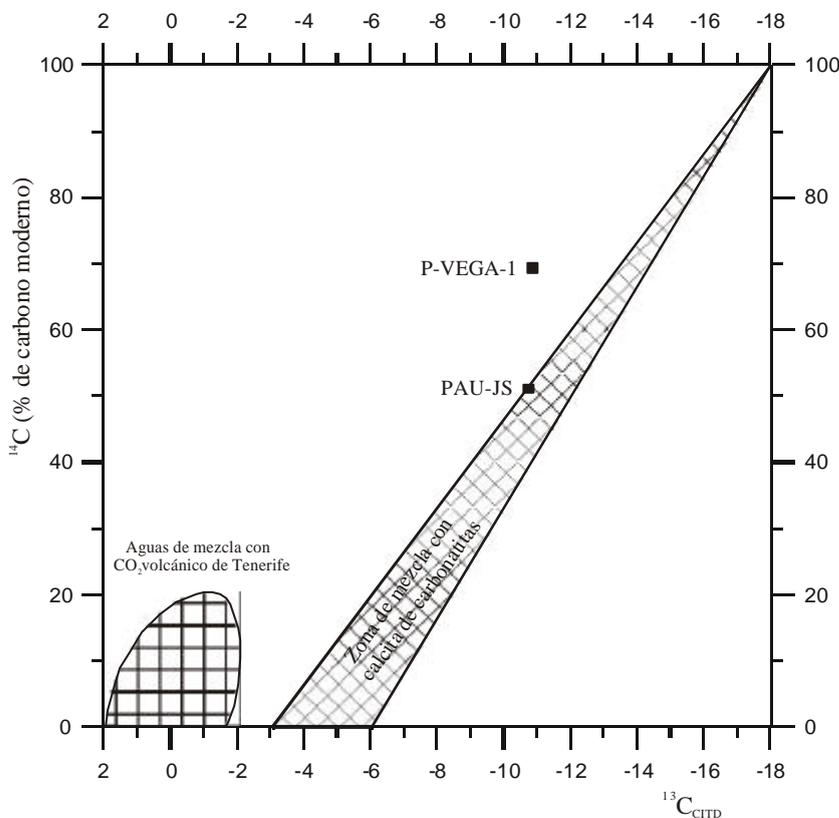


Figura 5.18.- Relación de ¹³C vs ¹⁴C en las aguas de la Unidad Superior y Unidad Inferior que muestra el efecto de mezcla entre carbono procedente de la disolución de calcita de las carbonatitas y carbono moderno.

Una primera aproximación para determinar la edad aparente de estas muestras sin aplicar ningún tipo de corrección da para la muestra P-VEGA-1 una edad aparente de 3060 años y para la muestra PAU-JS de 5560 años. Sin embargo, a partir de la interpretación con el ^{13}C presentada anteriormente no se descarta que las muestras obtenidas en los sondeos profundos incorporen carbono como consecuencia de la disolución de calcita del medio. Para determinar la edad de la muestra considerando un medio carbonatado se puede utilizar la corrección de Tamers (1975) la cual queda definida por:

$$f = \frac{x + y/2}{x + y}$$

donde:

x = moles de CO_2 residual (que no reaccionó) en el agua (obtenido a partir de la formula de Tillman)

y = moles de HCO_3

A partir de esta corrección se obtiene una edad para la muestra P-VEGA-1 de -2350 años, mientras que la muestra del sondeo profundo PAU-JS se tiene una edad de 604 años. Estos resultados corroboran en el caso de la muestra P-VEGA-1 que existe incorporación de ^{14}C termonuclear, hecho que resulta coherente con el contenido de tritio que esta muestra presenta. En el caso de la muestra PAU-JS la edad obtenida indicaría que no existe incorporación de ^{14}C termonuclear, lo que resulta coherente también considerando que esta muestra no contiene tritio.

Finalmente es necesario destacar que debido a las características constructivas propias de los sondeos donde se obtuvieron muestras de agua, existirían en mayor o menor medida mezcla de agua de la Unidad Superior y Unidad Inferior. Esto incide en que las muestras analizadas de la Unidad Inferior no sean totalmente representativas y, por lo tanto, el ^{14}C analizado en éstas este mezclado con ^{14}C procedente de la Unidad Superior.

Por otro lado tampoco se pueden descartar completamente pequeños aportes de CO_2 de origen profundo, los cuales podrían distorsionar los valores del ^{13}C obtenidos para las aguas subterránea y, por lo tanto, generar un error importante en la corrección de los valores de ^{14}C .

5.3.8.- Conclusiones

- Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ obtenidos para el CO_2 del suelo se corresponden con los valores de $\delta^{13}\text{C}$ más altos obtenidos para las muestras de agua subterránea de la Unidad Superior.

- Las aguas subterráneas en el Malpaís presentan un valor de $\delta^{13}\text{C}$ más pesados y próximos al valor esperado para el CO_2 de origen atmosférico. Por lo tanto no se descarta la entrada de CO_2 atmosférico en las zonas más permeables de las lavas del Malpaís.
- El estudio de la relación $\delta^{13}\text{C}/\text{bicarbonato}$ y $\delta^{13}\text{C}/\text{pH}$ de campo indica que en parte el aumento del contenido de carbono disuelto en las aguas de la Unidad Inferior se origina posiblemente por la disolución de carbonato de las carbonatitas. Por otro lado el estudio del par $^{13}\text{C} - ^{14}\text{C}$ también apunta a esta hipótesis. No obstante, tampoco se puede descartar una incorporación de CO_2 de origen volcánico en estas aguas.
- El estudio de la relación $\delta^{13}\text{C}$ -bicarbonato, $\delta^{13}\text{C}$ -presión de CO_2 y $\delta^{13}\text{C}$ -pH de campo indica que el aligeramiento de los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en las aguas de la Unidad Superior esta relacionado con la adición de CO_2 de origen biogénico.
- Las edades probables de las aguas subterráneas obtenidas por medio del ^{14}C indican que las aguas de la Unidad Superior son modernas e incorporan ^{14}C de origen termonuclear. Por otro lado la muestra del sondeo profundo PAU-JS es más antigua que la de la Unidad Superior y no incorpora ^{14}C de origen termonuclear.

5.4.- Estudio del $\delta^{34}\text{S}$ y de $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato disuelto

5.4.1.- Generalidades

El estudio de los contenidos isotópicos de $\delta^{34}\text{S}$ y el $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato disuelto en el agua es una herramienta para definir el posible origen del sulfato disuelto en el agua. Para una mejor comprensión de los resultados de los análisis isotópicos del sulfato es necesario hacer su interpretación considerando las características hidroquímicas de las aguas subterráneas del medio.

5.4.2.- Presentación de datos

Se realizaron dos campañas de muestreo de agua en manantiales, sondeos profundos y pozos del Malpaís para análisis isotópicos de $\delta^{34}\text{S}$ y de $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato. En la primera campaña se obtuvieron un total de 5 muestras, en las cuales sólo se analizó el $\delta^{34}\text{S}$ del sulfato, mientras que en la segunda campaña se tomaron 7 muestras, y en todas se analizó $\delta^{34}\text{S}$ y $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato. Cinco muestras de $\delta^{34}\text{S}$ del sulfato fueron analizadas en el Laboratorio Isotópico de Geología de la Universidad de Barcelona, mientras que 7 muestras de $\delta^{34}\text{S}$ y de $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato fueron realizadas en el Instituto de Física Maria Curie de la Universidad de Sklodowska (MCUS) en Polonia. La Tabla 5.9 presenta los resultados de las determinaciones realizadas.

Número	Muestra	Fecha	Punto	Método de muestreo	Profundidad captación (m)	Conductividad eléctrica (ρ S/cm)	rCl	rSO ₄	rSO ₄ /rCl	$\delta^{34}\text{S}\text{‰}(\text{SO}_4)$ vs. CDT	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}(\text{SO}_4)$ vs. SMOW	Laboratorio
1	B-4-F-J	22/03/99	Sondeo	Bombeo	160	S.D.	62,04	23,92	0,39	7,9	S.D.	UB
2	B-5-F-J	16/03/99	Sondeo	Bombeo	140	S.D.	73,32	37,86	0,52	7,6	S.D.	UB
3	A-3-F-J	15/03/99	Sondeo	Bombeo	200	S.D.	59,78	45,97	0,77	7,6	S.D.	UB
4	R-1-F-J	16/03/99	Sondeo	Bombeo	130	7500	68,53	42,43	0,62	7,9	S.D.	UB
5	J-1-F-J	19/03/99	Sondeo	Bombeo	54	5700	45,12	8,11	0,18	17,4S.	S.D.	UB
6	M-BET-1	25/11/99	Manantial	Manual	-	5310	37,79	4,60	0,12	15,89	15,54	MCUS
7	M-BET-3	19/11/99	Manantial	Manual	-	5950	58,37	9,24	0,16	18,09	10,36	MCUS
8	MAN-PAJ-JS	18/11/99	Manantial	Manual	-	1920	13,54	3,74	0,28	8,49	9,11	MCUS
9	A-3-J-S	22/11/99	Sondeo	Bombeo	200	8420	58,66	45,76	0,78	7,96	4,1	MCUS
10	R-1-J-S	22/11/99	Sondeo	Bombeo	130	9000	69,37	46,59	0,67	8,13	6,09	MCUS
11	X-2-J-S	22/11/99	Sondeo	Tomamuestra	129	13,76	256,62	38,48	0,15	9,69	9,91	MCUS
12	N-2-J-S	26/11/99	Sondeo	Tomamuestra	152	23900	204,45	27,04	0,13	26,18	11,62	MCUS

Tabla 5.9.- Determinaciones de $\delta^{34}\text{S}\text{‰}$ vs. CDT y $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ vs. SMOW en el sulfato disuelto en el agua subterránea ($r = \text{meq L}^{-1}$; S.D.= no determinado).

Dos muestras para análisis isotópico de $\delta^{34}\text{S}$ tomadas en la primera campaña de muestreo y analizadas en la Universidad de Barcelona (A-3-F-J y R-1-F-J) fueron repetidas en la segunda campaña de muestreo y analizadas en la Universidad de Sklodowska (A-3-J-S y R-1-J-S). Las diferencias obtenidas en ambas campañas en los distintos laboratorios son mínimas y no superan el 0,2 ‰ vs. CDT.

También se han considerado en esta interpretación determinaciones de $\delta^{34}\text{S}$ realizadas por Demény *et al.* (1999) en muestras de sulfuro (pirita) de rocas volcánicas e intrusivas, así como también en muestras de minerales de sulfato reconocidos en rocas intrusivas carbonatíticas. Los valores obtenidos en los sulfuros son siempre negativos y presentan un valor característico de $-2,5\text{‰}$, mientras que los sulfatos de las carbonatitas tienen un valor en torno a $+4,5\text{‰}$.

5.4.3.- Estudio de los datos de $\delta^{34}\text{S}$ en el sulfato disuelto

A partir de los valores de $\delta^{34}\text{S}$ medidos en el agua subterránea se pueden diferenciar dos familias diferentes. Una está compuesta por dos muestras de manantiales y de un sondeo poco profundo ubicado en el Malpaís; presentan un valor medio de $\delta^{34}\text{S}$ de $+17,1\text{‰}$ y cabe relacionarlo con el valor del sulfato de la lluvia, que tiene asociada una importante componente de aerosol marino ($\delta^{34}\text{S} = +20\text{‰}$), suponiendo la ausencia de fenómenos reductores que alteren su composición isotópica. En el otro extremo se sitúan aguas subterráneas tomadas en sondeos profundos en Tuineje y Tesejerague que alcanzan un valor medio de $\delta^{34}\text{S}$ de $8,1\text{‰}$. Respecto al origen de este valor se plantean dos hipótesis: a) disolución de sulfato de origen ígneo, asociado a la importante actividad magmática reconocida en toda el área y b) aportes de SH_2 o SO_2 de origen endógeno. A partir de los

resultados del estudio hidroquímico presentado en el Capítulo 4, la hipótesis de disolución de sulfato de un origen distinto al marino parece ser la hipótesis más probable.

También se reconoce una muestra que presenta un valor muy pesado en $\delta^{34}\text{S}$ (+26,18‰) obtenida en un sondeo profundo en Tesejerague. A partir de datos de la concentración de sulfato, pH y características de campo no se descarta que se produzca una reducción de sulfato que permite que el valor del $\delta^{34}\text{S}$ del sulfato residual del agua sea más pesado. No obstante, a partir de las observaciones de campo no se descarta que obedezca a una contaminación de residuos de los fluidos utilizados en la perforación, por lo que su interpretación no será considerada determinante en el estudio del origen del sulfato en el agua.

Estudio de la relación $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ vs. $\delta^{34}\text{S}$

La Figura 5.19 presenta los valores de $\delta^{34}\text{S}$ frente a la relación $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ calculada a partir de los mismos análisis. Se observa que las muestras se agrupan en torno a dos familias principales. Una agrupación de datos esta compuesta por 2 manantiales y un sondeo poco profundo del Malpaís, y corresponden a muestras cuya composición química es típica de la Unidad Superior (M-BET-1, M-BET-3 y J-1-F-J). Presentan un valor de la relación $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ menor a 0,2, mientras que los valores de $\delta^{34}\text{S}$ varían entre +15,9‰ y +18,1‰. Este grupo se sitúa próximo al valor de la relación $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ y de $\delta^{34}\text{S}$ para un origen marino, por lo que el sulfato presente en el agua es asociado a la aportación de sulfato en el aerosol marino.

Una segunda agrupación de datos presenta un valor de la relación $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ más alta, que varía entre 0,4 y 0,8, mientras que el valor de $\delta^{34}\text{S}$ es más ligero y oscila entre +7,6‰ y +8,1‰. El valor de la relación $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ más alto que el valor marino indica una fuente de aporte de sulfato distinto al mar y con un valor de $\delta^{34}\text{S}$ más ligero. Son aguas cuya composición química es representativa de la Unidad Inferior y corresponden a las muestras A-3, R-1, B-4 y B-5.

Dos muestras se alejan de las agrupaciones de puntos citadas anteriormente y se sitúan en una posición intermedia entre ambas familias. Corresponden a la muestra del manantial MAN-PAJ-JS, cuya composición química se asocia a la Unidad Superior y a la muestra X-2-J-S tomada en un sondeo profundo en Tesejerague y cuya composición química es característica de la Unidad Inferior.

En el caso de la muestra MAN-PAJ-JS tomada en un manantial que surge en rocas intrusivas del Complejo Basal, el valor de la relación $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ es más alto que el resto de muestras de la Unidad Superior y a las que se supone una aportación principal de sulfato de origen meteórico. Esto pone de manifiesto una aportación de sulfato adicional en esta muestra, distinta a la meteórica y que estaría asociada a un aporte de tipo litológico. Al ser esta muestra la única que surge en un manantial en rocas intrusivas del Complejo Basal, se asocia la aportación de sulfato a este tipo litológico.

La muestra X-2-J-S presenta un valor de la relación r_{SO_4}/r_{Cl} próximo al valor del mar, pero presenta un valor de $\delta^{34}S$ mucho más ligero que el marino y más próximo al valor que presentan las muestras de la Unidad Inferior en Tuineje.

Estudio de la relación $r_{Cl}/\delta^{34}S$ y $r_{SO_4}/\delta^{34}S$

En la Figura 5.20 se representan los datos de $\delta^{34}S$ y cloruro de las muestras de la Unidad Superior, Unidad Inferior y Malpaís, donde se ha considerado el valor de $\delta^{34}S$ de $-4,5\text{‰}$ como representativo del polo de sulfato de origen litológico (Demény *et al.*, 1999), mientras que para el valor marino se ha considerado un valor de $\delta^{34}S$ de $+20\text{‰}$ con una concentración de cloruro de 19000 mg/l. Se observa que los puntos de los sondeos profundos de Tuineje se sitúan aproximadamente sobre la línea de mezcla entre el $\delta^{34}S$ del sulfato y el valor $\delta^{34}S$ /cloruro del agua de mar. Del mismo modo la muestra X-2-J-S, que presenta una concentración de cloruro más alta (9100 mg/l), también se localiza aproximadamente sobre esta línea de mezcla. Esto pone de manifiesto que el valor de $\delta^{34}S$ del sulfato de las muestras de la Unidad Inferior tiene un origen mixto, ligado tanto a la disolución de sulfato presente en las carbonatitas, como de sulfato del agua de mar.

Por otro lado, las muestras de manantiales representativos de la Unidad Superior y de un sondeo poco profundo del Malpaís se sitúan alineadas según la recta definida por el valor de $\delta^{34}S$ asociado a la disolución de sulfato ($-4,5\text{‰}$) y el valor de $\delta^{34}S$ ligado al sulfato de la lluvia que incorpora una importante componente de aerosol marino a medida que aumenta la concentración de cloruro. De esta alineación se desprende que gran parte del sulfato disuelto de la muestra MAN-PAJ-JS (manantial) tiene un origen litológico asociado a la disolución de sulfato, mientras que las muestras MBET-1, M- sulfato de la lluvia con una importante componente de aerosol marino.

La Figura 5.21 presenta la relación entre el $\delta^{34}S$ y la concentración de sulfato de las muestras de la Unidad Superior, Unidad Inferior y Malpaís. Para el mar se ha considerado una concentración de sulfato de 2800 mg L^{-1} y una composición isotópica de $\delta^{34}S$ de $+20\text{‰}$ vs. CDT. Se observa que las muestras con menor concentración de sulfato de la Unidad Superior presentan una composición isotópica de $\delta^{34}S$ próxima a $+20\text{‰}$, por lo que se deduce que el BET-3 y J-1-F-J contienen mayoritariamente sulfato proviene principalmente del aporte de aerosol marino de la lluvia. Se escapa de esta tendencia la muestra del manantial MAN-PAJ-JS, la cual presenta una concentración de sulfato menor que resto de manantiales y un valor de $\delta^{34}S$ próximo a las muestras obtenidas en los sondeos profundos de la Unidad Inferior, por lo que se puede suponer que el sulfato presente en esta muestra corresponde de la disolución de yeso

Por otro lado las muestras obtenidas en los sondeos profundos presentan concentraciones de sulfato mayores que la de los manantiales y ligeramente inferiores a la concentración en el mar. La muestra X-2-J-S, que es la que presenta un valor isotópico de $\delta^{34}S$ más próximo al del mar, también presenta una mayor concentración de sulfato, por lo

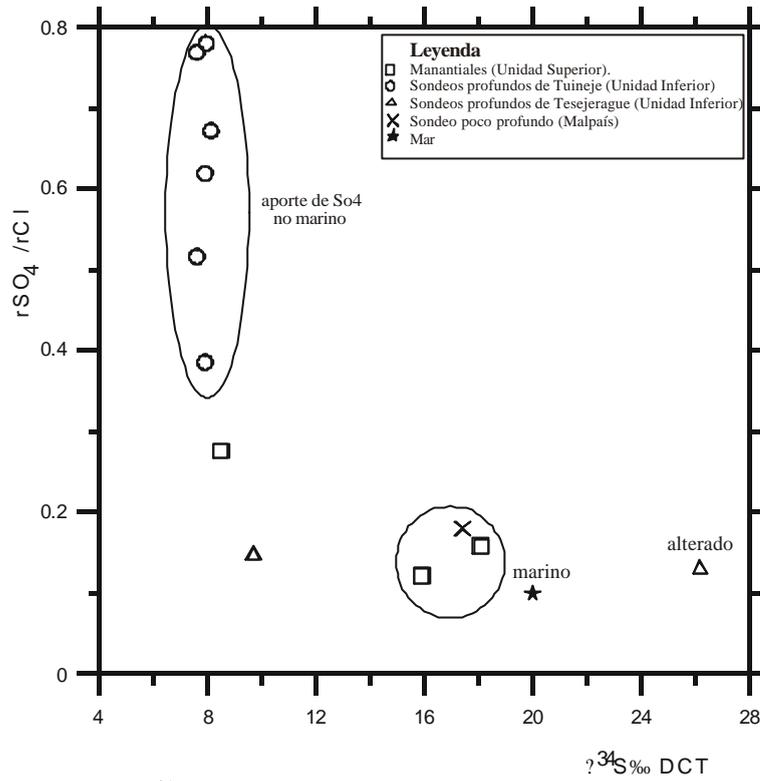


Figura 5.19.- Relación de $\delta^{34}\text{S}$ frente a la relación $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ calculada para las muestras de la Unidad Superior, Unidad Inferior y Malpaís.

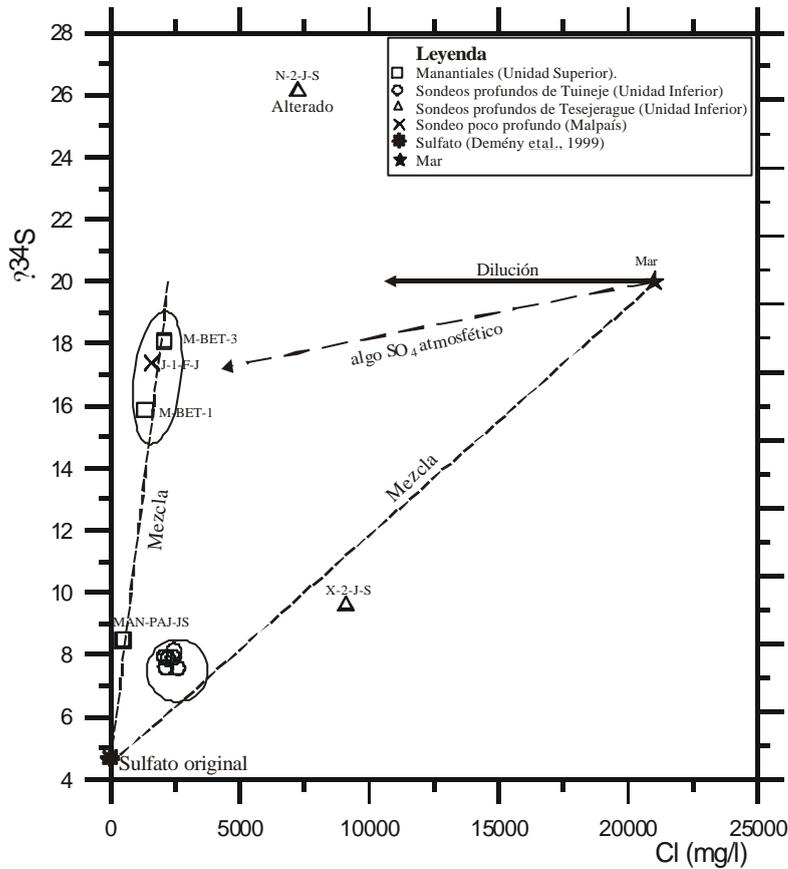


Figura 5.20.- Relación de $\delta^{34}\text{S}$ y cloruro de las muestras de la Unidad Superior, Unidad Inferior y Malpaís.

que se confirma que el sulfato presente en esta muestra tiene un origen mixto entre el litológico y el marino.

5.4.4.- Estudio de la relación $\delta^{34}\text{S}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato disuelto

La Figura 5.22 muestra el gráfico con la relación entre el $\delta^{34}\text{S}$ y el $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato disuelto, además del valor supuesto para el agua de mar ($\delta^{34}\text{S} = +20\text{‰}$ vs. CDT y el $\delta^{18}\text{O} = +9,6\text{‰}$ vs. SMOW).

Las muestras de los manantiales MAN-PAJ-JS y M-BET-3 y del sondeo X-2-J-S presentan valores del $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato disuelto comprendidos entre $+9,3\text{‰}$ y $+10,11\text{‰}$. La muestra MBET-1 presenta un valor de $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato disuelto más alto de lo esperado ($15,54\text{‰}$) y no se descarta que exista un error en la preparación de la muestra.

Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato disuelto de las muestras MAN-PAJ-JS, M-BET-3 y X-2-J-S se aproximan bastante al valor del $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato disuelto del agua de mar. Como se explicó en el apartado anterior, existen marcadas diferencias en la composición química de las muestras X-2-J-S y las muestras MAN-PAJ-JS y M-BET-3. Para todas se supone una componente importante de sulfato disuelto de origen marino. Sin embargo, para la muestra X-2-J-S se sospecha un aporte por mezcla directa con agua de mar, mientras que para las muestras MAN-PAJ-JS y M-BET-3 se consideran solo un aporte de sulfato marino a partir del aerosol marino.

Por otro lado, las muestras tomadas en sondeos profundos de Tuineje (A-3-J-S y R-1-J-S) presentan valores de $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato mucho más ligeros y quedan comprendidos entre $4,1\text{‰}$ y $6,1\text{‰}$.

Si bien no se cuenta con determinaciones de ^{18}O de los sulfatos minerales presentes en los intrusivos del Complejo Basal, se tienen gran cantidad de datos de este isótopo, medidos por Demény *et al.* (1998) y Kaj y Robert (1991) en los carbonatos y biotitas que conforman los intrusivos carbonatíticos. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ medidos en estos minerales presentan una homogeneidad muy grande y oscilan entre $4,1$ y $7,9\text{‰}$. Estos datos ponen de manifiesto la estrecha correlación entre los valores de ^{18}O medido en el sulfato disuelto en el agua y los valores de ^{18}O determinados en los minerales que conforman las carbonatitas, y que pueden ser extrapolados como posible valor de $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato mineral de origen ígneo presente en estas rocas.

5.4.5.- Conclusiones

- Los valores de $\delta^{34}\text{S}$ medidos en la piritita presente en las rocas volcánicas e intrusivas del Complejo Basal son negativos y más ligeros que los valores de $\delta^{34}\text{S}$ medidos en el agua subterránea. Los valores de $\delta^{34}\text{S}$ medidos en minerales de sulfato reconocidos en las carbonatitas presentan valores de $\delta^{34}\text{S}$ en torno a $+4,5\text{‰}$ y se sitúan próximos a los valores medidos en las aguas subterráneas de la Unidad Inferior.

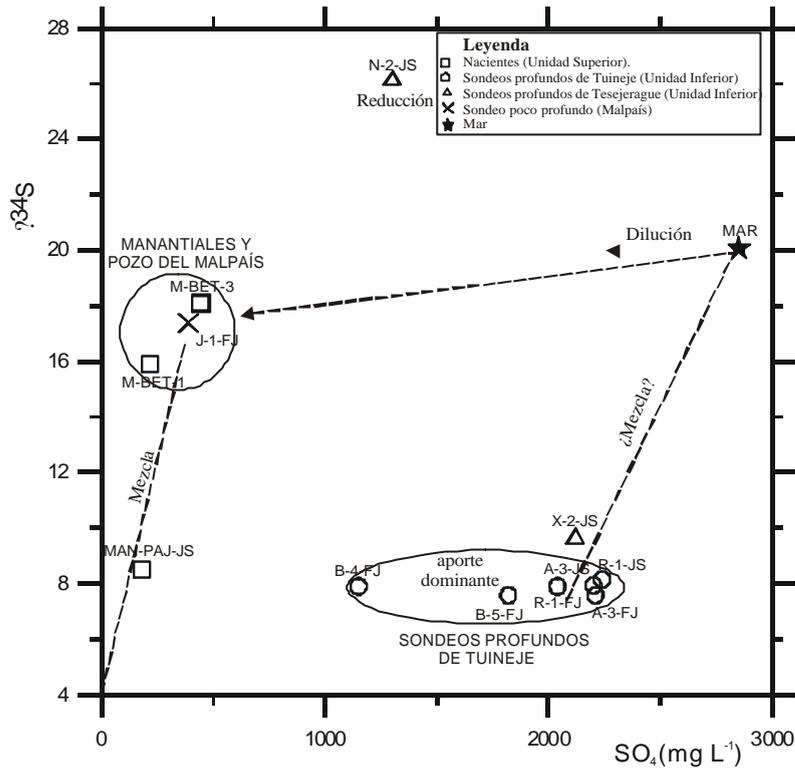


Figura 5.21.- Relación de ^{34}S y concentración de sulfato (mg L^{-1}) de las muestras de la Unidad Superior, Unidad Inferior y Malpaís.

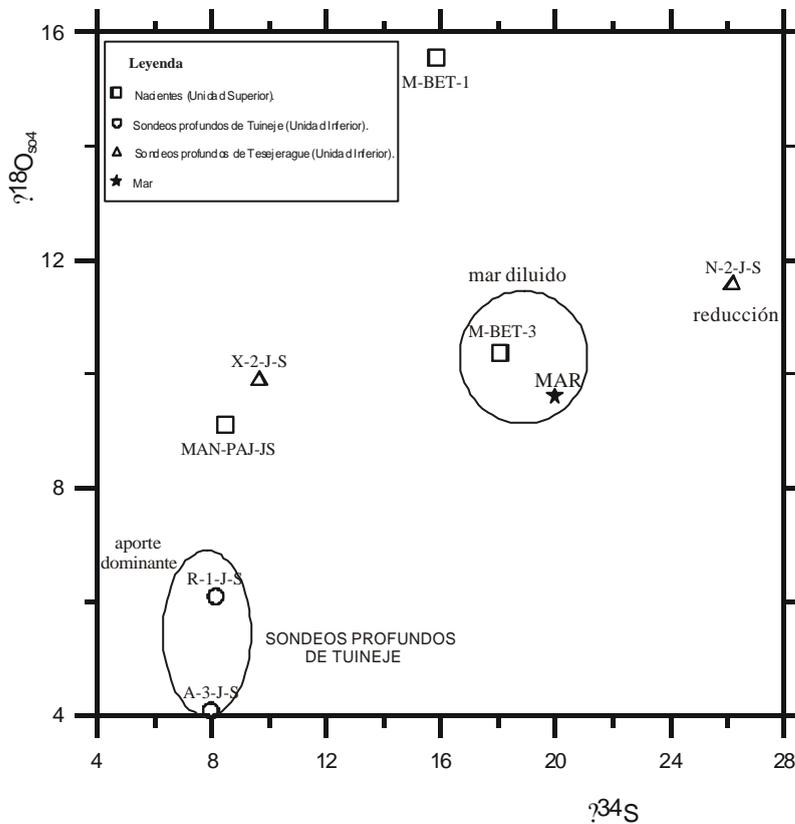


Figura 5.22.- Relación entre ^{34}S y el ^{18}O de las muestras de la Unidad Superior, Unidad Inferior y Malpaís.

- El estudio de las características químicas del agua permite deducir que los aportes de sulfato de las muestras de aguas subterráneas de los sondeos profundos están ligados a la disolución de sulfato. A partir de los valores de $\delta^{34}\text{S}$ se deduce que el sulfato disuelto no es de origen marino. Lo más probable es que este asociado a la actividad magmática que dio origen a los numerosos plutones que intruyen a las lavas submarinas.

- En general las muestras de agua de la Unidad Superior presentan valores de $\delta^{34}\text{S}$ próximos al valor del agua de mar, que se atribuyen al aporte de aerosol marino que incorpora la lluvia. No obstante, en el caso de la muestra de manantial MAN-PAJ-JS, cuya composición química es típica de aguas de la Unidad Superior, los valores de $\delta^{34}\text{S}$ son mucho más ligeros y están más próximos a los valores de $\delta^{34}\text{S}$ medidos en minerales de sulfato en las carbonatitas y de las aguas de la Unidad Inferior. Esta composición de $\delta^{34}\text{S}$ resulta coherente si se considera que el agua de esta muestra surge desde un manantial localizado en las rocas intrusivas del Complejo Basal.

- Los valores de $\delta^{34}\text{S}$ de SH_2 y SO_2 de gases volcánicos procedentes de galerías de Tenerife están entre +1,5 y +6,0‰, y los de $\delta^{18}\text{O}$ entre +5,0 y +6,0‰ (Cabrera, 1995). Estos valores se ajustan aproximadamente con los valores de $\delta^{34}\text{S}$ y el $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato disuelto en el agua de los sondeos profundos (A-3 y R-1), por lo que la hipótesis de aportes de gases de origen endógeno debe ser considerada.