

# El exceso de deuterio en la lluvia y en la recarga a los acuíferos en el área circum-mediterránea y en la costa mediterránea española

J. Jiménez-Martínez y E. Custodio

Departamento de Ingeniería del Terreno. Universidad Politécnica de Cataluña-UPC, Gran Capitán s.n., 08034 Barcelona, España.  
E-mails: joaquin.jimenez@upc.edu - emilio.custodio@upc.edu

## RESUMEN

El Mar Mediterráneo es una región del planeta con un clima característico. Se encuentra afectado por la entrada de diversas masas de aire. Principalmente se trata de vientos fríos continentales del Norte, del Este -en algunos casos desde el Índico-, y del Oeste, principalmente atlánticos. La procedencia del frente condiciona la composición isotópica de la precipitación y por tanto de las aguas subterráneas a las que recargan. Para reconocer las variaciones de la composición isotópica, y principalmente del parámetro *d* (*exceso de deuterio*), a lo largo de la ribera mediterránea, y en concreto en la costa mediterránea española, tanto en las precipitaciones como en las aguas subterráneas, se ha empleado la información contenida en diversos trabajos publicados, así como información de la base de datos GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation) de la OIEA. Resulta que el patrón de distribución geográfica del parámetro *d* es similar tanto para las precipitaciones como para las aguas subterráneas, salvo algunas excepciones debidas a fenómenos de evaporación previa a la recarga, recargas de diferente procedencia estacional o mezcla con paleoaguas.

Palabras clave: acuíferos, exceso de deuterio, precipitación, recarga

## ***Deuterium excess in rain and in recharge to aquifers in the Circum-mediterranean area and Spanish Mediterranean coast***

### ABSTRACT

*The Mediterranean Sea is a region of the Earth with a characteristic climate. It is affected by different masses of air, mainly continental cold air from North, from the East – some times come from the Indic Ocean-, and from the West, mainly of Atlantic origin. The origin of the air mass conditions the isotopic composition of precipitation and therefore of groundwater. In order to know the variation of the isotopic composition, and mainly of the parameter *d* (deuterium excess) along the Mediterranean basin, and especially in the Spanish Mediterranean coast, in the precipitation as well as in groundwater, information from diverse published sources has been used, as well as information of the GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation) data base of the IAEA. The result is that the distribution pattern of the parameter *d* is similar for precipitation and groundwater, except in some cases due to evaporation produced previous to recharge, recharge variable seasonal origin, or mixing with palaeogroundwater.*

*Key words: aquifers, deuterium excess, precipitation, recharge*

## Introducción

Las variaciones tanto espaciales como temporales del  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  son debidas al fraccionamiento isotópico que acompaña a la evaporación en el océano y a la condensación durante el transporte del vapor de agua (Dansgaard 1964), además de la contibución continental. Es decir, la precipitación local está preliminarmente controlada por procesos de escala regional (Merlivat y Jouzel 1979). El valor de la desviación isotópica,  $\delta$ , se define por la relación:

$$\delta = (R - R_{\text{VSMOW}}) / R_{\text{VSMOW}}$$

donde *R* representa el cociente isotópico  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  o  $^2\text{H}/^1\text{H}$  de la muestra y  $R_{\text{VSMOW}}$  un valor medio para los océanos que se toma como estándar (VSMOW). Los factores que influyen en la composición isotópica de las aguas de precipitación son: latitud, continentalidad, altitud, estacionalidad, cantidad y temperatura, guardando esta última relación directa con las anteriores (Mook 2002).

El *exceso de deuterio* viene definido por la ecuación  $d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$ . Sus valores se adquieren durante la evaporación y no cambian significativamente en la evolución posterior de la masa nubosa, salvo por evaporación. Puede ser un indicador de la génesis de ese vapor (Rindsberger *et al.*, 1983). El parámetro  $d$  se obtiene por cálculo a partir de los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ , debiendo corresponder a una misma muestra de agua y no a valores medios, para evitar introducir errores. A pesar de ello, los valores que se utilizan tienen un error analítico, además del de muestreo y preparación de la muestra que se envía al espectrómetro. Si se admiten errores normalmente distribuidos, la desviación estandar de  $d$ ,  $\sigma_d$ , vendría dada por:

$$\sigma_d^2 = \sigma_H^2 + 8\sigma_O^2$$

en la que  $\sigma_H$  y  $\sigma_O$  son respectivamente la desviación estandar de las medidas de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ . Para valores de  $\sigma_H$  de 1 a 2‰ y de  $\sigma_O$  de 0,1 a 0,2‰, resulta  $\sigma_d = 1,3$  a 1,9‰ sólo por incertidumbre analítica en el espectrómetro. Así pues, para que las variaciones de  $d$  sean significativas éstas deben ser mayores que 2‰.

Los valores de  $d$  entorno a 10‰ indican un origen Atlántico y los valores entorno a 22‰ indican una procedencia del Este del Mediterráneo, pudiendo llegar a alcanzarse valores superiores a 32‰ (Gat y Carmi 1970). Los valores próximos a 14‰ corresponden a áreas del Oeste del Mediterráneo. El aumento del valor de  $d$  hacia el Este del Mediterráneo se debe a un mayor efecto de fraccionamiento isotópico cinético en la evaporación marina y a una menor influencia atlántica, es decir, a la presencia de temperaturas más elevadas y a una mayor sequedad del ambiente. También en el área del archipiélago de Canarias es  $d \approx 14\%$ , por sequedad ambiental, a pesar de tratarse del Océano Atlántico.

Para agregar los datos isotópicos de precipitación -que suelen ser de acumulaciones de lluvia mensuales- y obtener medias anuales o multianuales, se hacen medias. Las medias aritméticas pueden diferir de las ponderadas por la cantidad de lluvia o por la recarga que producen al acuífero. En ocasiones esto no está suficientemente claro en la fuente de datos y requiere mostrar atención. Las aguas subterráneas tienen una composición isotópica que es un promedio ponderado por la recarga de la composición isotópica de las precipitaciones que se producen en un área y puede variar de un área a otra según las circunstancias en las que se produce la recarga. Si se tratase de masas de aire de dos orígenes principales se podría determinar el porcentaje de precipitación de

cada uno de los orígenes. Pero hay una serie de fenómenos que pueden provocar la alteración de la composición isotópica de las aguas subterráneas como son el hidrotermalismo, la evaporación previa durante el proceso de recarga o durante la propia precipitación, la recarga a cotas distintas a las que se está realizando el muestreo, la mezcla con paleoaguas o la alteración antrópica.

El objetivo de este trabajo es reconocer cómo varía la composición isotópica y fundamentalmente el parámetro  $d$ , tanto de las precipitaciones como de las aguas subterráneas a lo largo de la ribera mediterránea, además de tratar de discernir qué origen de la precipitación domina en cada una de las zonas y qué fenómenos pueden provocar la alteración de la composición isotópica. Estos mismos objetivos se persiguen en el estudio más detallado realizado para la costa mediterránea española.

## Metodología

Para la realización de este estudio se ha contado con datos isotópicos de carácter mensual y anual, y valores puntuales de las precipitaciones, obtenidos a partir de la base de datos GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation) del Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA), disponibles hasta el año 2004 en el momento de la recopilación.

En el caso de las aguas subterráneas, la inexistencia de una red de control en la que se mida la composición isotópica de las mismas ha llevado a recopilar numerosos trabajos puntuales, en los que se aborda el estudio isotópico detallado de las aguas de diferentes acuíferos en las áreas de interés.

Finalmente se ha comparado la composición isotópica de las precipitaciones con la de las aguas subterráneas, y a su vez se ha discernido la relación que muestran con respecto al origen de las masas nubosas que provocan las precipitaciones.

## Área Circum-Mediterránea

En este apartado se muestran de manera resumida las características isotópicas y el exceso de deuterio para las precipitaciones, deducidas por diferentes autores en diversos trabajos, para distintas zonas de la cuenca mediterránea (Tabla 1).

La inexistencia de una red de control de la composición isotópica en el caso de las aguas subterráneas sólo deja la opción de emplear datos de carácter puntual en el espacio y en el tiempo (Tabla 2).

País	Referencia	Periodo	Localidad	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)		$\delta^2\text{H}$ (‰)		$d$ (‰)							
				<i>m</i>	$\sigma$	<i>m</i>	$\sigma$	<i>m</i>	$\sigma$						
Argelia	Saighi (2005)	2000/2004		-5	3	-28	21	11.4	7.4						
Croacia	Horvatincic <i>et al.</i> , 2005	Sept.00/Dic.03	Zagreb	-8.2	-	-	-	8.4	-						
			Malinska	-6.6	-	-	-	13.1	-						
			Zavizan	-9.3	-	-	-	14.4	-						
			Zadar	-5.1	-	-	-	8.9	-						
			Komiza	-5.4	-	-	-	10.1	-						
Egipto	El-Asrag (2005)	Dec.00/Mar.03	Alejandro	[-1.8; -4]	-	[-6.03; -15]	-	[19; -0.7]	-						
			Sidi Barrani	-	-	-	-	-	-						
Libano	Aouad-Rizk <i>et al.</i> , 2005	Nov.01/May.03	Monte Libano	-	-	-	-	[30; 10]	-						
			Pendeli	-	-	-	-	17	4						
			Thission	-	-	-	-	15	6						
			Patras	-	-	-	-	11	8						
			Thesaloniki	-	-	-	-	13	8						
			Hellinicon	-	-	-	-	14	4						
			Rhodos	-	-	-	-	16	7						
			Heraklion	-	-	-	-	17	4						
			Methoni	-	-	-	-	13	5						
			Grecia (GNIP Series)	-	-	-	-	14	7						
Grecia	Argiriou <i>et al.</i> , 2005	Ago.00/Mar.03	Grecia (ISOHS Series)	-	-	-	-	15	5						
			Grecia (Todos datos)	-	-	-	-	15	6						
			Israel	Gat <i>et al.</i> , 2005	1961/1987	Bet Dagan	-5.02	0.55	-	-	18.4	-			
						Har-Kna'an	-	-	-	-	23.2	-			
						Zannone	-5.35	-	-29	-	-	-			
						Fogliano	-4.32	-	-22.7	-	-	-			
						Ninfa	-5.62	-	-30.2	-	-	-			
						Roma-DST	-5.42	-	-33	-	[23; -2]	-			
						Italia	Bono <i>et al.</i> , 2005	1998/2003	S.Scolastica	-6.28	-	-38.2	-	[22; -7]	-
									Compostaffi	-9.02	-	-58.8	-	-	-
Trieste	-7.46	-							-45.3	-	-	-			
Cagliari Elmas	-4.18	-							-19.8	-	-	-			
Italia	Longinelli y Selmo (2003)	1991/2002	Capo Caccia	-5.56	-	-38	-	-	-						
			Península Italiana	-	-	-	-	[19.1; 9.2]	-						
			Norte	-	-	-	-	-	-						
Marruecos	Ouda <i>et al.</i> , 2005	2000/2003	Centro	-	-	-	-	-	-						
			Sur	-	-	-	-	-	-						
			Rabat	-	-	-	-	14	-						
Marruecos	Ouda <i>et al.</i> , 2005	2000/2003	Beni Mellal	-	-	-	-	14.2	-						
			Bab Bou Idir	-	-	-	-	16.5	-						
				-	-	-	-	-	-						
Eslovenia	Vreca <i>et al.</i> , 2005	2001/2003	Ljubljana	-	-	-	-	[12; 9]	-						
			Portoroz Airoport	-	-	-	-	[12; 8]	-						
			Kozina	-	-	-	-	[15; 10]	-						
España	Plata (1994)/ Araguás y Teijeiro (2005)	1984/1998	Barcelona	-5.6	-	-32.3	-	11.8	-						
		1986/2000	Madrid	-7.26	-	-49.9	-	8.2	-						
		1961/2001	Gibraltar	-4.83	-	-26.4	-	11.8	-						
Turquía	Dirican <i>et al.</i> , 2005	1963/2001	Turquía	-	-	-	-	[21.9; 10.4]	-						
		1963/2001	Ankara	-8.6*	-	-57.2*	-	11.9*	-						
		1963/2001	Antalaya	-5.4*	-	-27.7*	-	16.2*	-						
		1966/2000	Andana	-5.2*	-	-24*	-	18.1*	-						
Francia	Celle-Jeanton (2000) Celle-Jeanton <i>et al.</i> , 2000 Celle-Jeanton <i>et al.</i> , 2004	1978/1998	Campistrous	-7.73*	-	-46.3*	-	-	-						
			Montpellier	-4.32*	-	-23.84*	-	-	-						
			Avignon	-5.44*	-	-34.01*	-	-	-						
			Gardanne	-5.47*	-	-30.78*	-	-	-						
			Carpentras	-5.46*	-	-34.51*	-	-	-						
Túnez	Celle-Jeanton <i>et al.</i> , 2001	1968/1998	Tunis	-	-	-	-	-							
		1992/1998	Sfax	-	-	-	-	-							
Siria	Kattan (1997)	Dic.89/Abr.90		-	-	-	-	19	-						

Tabla 1. Contenidos isotópicos para las precipitaciones en diferentes países del Mediterráneo. En la mayoría de los casos se trata de valores ponderados según la cantidad de precipitación. Valores de  $d$  calculados por los autores originales.  $m$ : valor medio y  $\sigma$ : desviación estándar.  $[x;y]$ : valores máximo y mínimo. \*: datos mensuales

Table 1. Isotopic content of precipitation in different Mediterranean countries. In the majority of the cases they are weighted values according to the amount of precipitation.  $d$  values are calculated by the original authors.  $m$ : mean value and  $\sigma$ : standard deviation.  $[x;y]$ : maximum and minimum value. \*: monthly data

Conviene destacar que como consecuencia del rápido enfriamiento en el continente y la relativa calidez del Mediterráneo, sobre el área mediterránea se suelen producir precipitaciones muy intensas e isotó-

picamente pesadas, que son frecuentes en Septiembre y Octubre. Por esta razón la contribución de las precipitaciones mediterráneas a la recarga de los acuíferos periféricos puede ser en general mayor

País	Referencia	Acuífero	Sector	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	<i>d</i> (‰)	Punto ubicación*	
Italia	Barbieri <i>et al.</i> , 2005	Gran Sasso		-	-	9	1	
			Pavia	-8.50[-8.02; -8.94]	-55.47[-53.5; -57.9]	12.56	2	
	Pilla <i>et al.</i> , 2006	Lomellina	-9.6 [-8.32; -10.64]	-62.51[-58.0; -75.6]	12.43			
Turquía	Nativ <i>et al.</i> , 1999	Travertino de Meseta	Meseta Alta	-7.8	-45	17.4	3	
			Meseta Media	-7.1	-40	16.8		
	Elhatip y Günay (1998)	Kas-Kalkan		[-5.12; -6.98]	[-24.3; -44.2]	14.45	4	
Jordania	Salameh (2004)	Valle del Jordán	Tierras altas	-6	-30	18	5	
			Tierras intermedias	-5	-23	17		
			Valle del Jordán	-3.8	-18	12.4		
Abu Jeber (2001)	Tulul al Alshaquif		-	-	-			
Bajjali (2006)	Nuaimah		-6.14 [-5.4; -7.2]	-30.51[-28.5; -32.7]	18.65 [24.9; 14.7]	6		
Egipto	Sadek y Abd-El Samie (2001)	Cuaternalio El Cairo		1.17	13.13	3.77	7	
	Abd-El Samie y Sadek (2001) Wallin <i>et al.</i> , 2005	Nubia		-7.52 [-6.04; -9.53]	-51.5 [-37.3; -72.3]	8.35 [11.02; 4.24]	8	
Siria	Kattan (2001)	Paleógeno Ras Al-Ain		-7.01 [-6.28; -8.15]	-39.2 [-36.8; -45]	16.22 [20.3; 13.4]	9	
España/Portugal	Plata (1994)		Vertiente Atlántica	[-1; -11]	[0; -80]	11.5		
			Vertiente Mediterránea	[-3; -11]	[-10; -70]	19		
	Cruz San-Julián <i>et al.</i> , 1990			Segura	-	-	12.0±1.3	10
				Cazorla	-	-	12.8±1.5	
				Baza	-	-	11.4±1.1	
				Gádor	-	-	11.3±1.5	
				Lújar	-	-	11.1±2.4	
				Doñana	-	-	10.9±3.1	
	Benavente <i>et al.</i> , 1990							
	Benavente <i>et al.</i> , 1992							
Andreo <i>et al.</i> , 2004		Yunkera-Nieves	-7.31	-44.2	16.36 [18.5; 17]			
Vandenschrick <i>et al.</i> , 2002			Campo de Dalías	-8.7	-55.8	13.79 [15.1; 11.4]	12	
			Gádor	-7.74	-49.46	12.5 [15.2; 10.9]		
Argelia	Guendouz y Moulla (2006)	Acuífero freático Sahara Noroeste	Región de Oued-Souf	-2.60 [0.3; -3.8]	-28.2 [-15.4; -43.8]	-		
	Wallin <i>et al.</i> , 2005	Acuífero "Complejo Terminal" Sahara Noroeste		-5.3 [-5; -9.2]	-25 [-47; -74]	-1.95 [17.4; -11.8]	13	

Tabla 2. Características isotópicas para las aguas de diferentes acuíferos del entorno mediterráneo. [x;y]: valores máximo y mínimo. \* Posición de los acuíferos en las Fig. 8 y 9. Valores según los autores  
 Table 2. Isotopic characteristics of different aquifers around the Mediterranean sea. [x;y]: maximum and minimum value. \* Location of the aquifers in Fig. 8 and 9. Values given by the authors

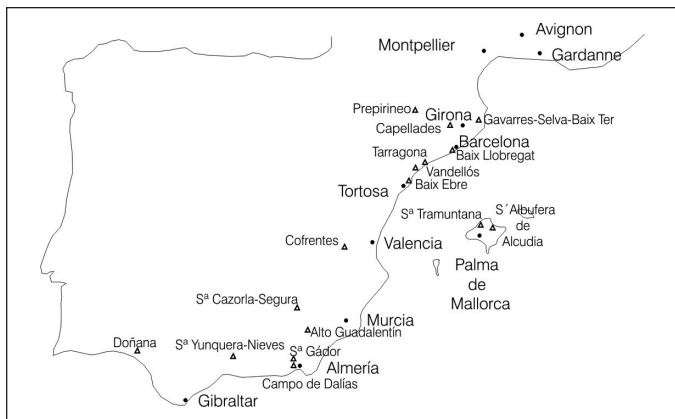


Fig. 1. Ubicación de las estaciones de control meteorológicas de la franja costera mediterránea, incluidas dentro de la base de datos GNIP/OIEA (puntos) y los diferentes acuíferos seleccionados (triángulos).

Fig. 1. Location of meteorological monitoring stations in the Mediterranean coast included into of the GNIP/IAEA data base (points), and the different selected aquifers (triangles).

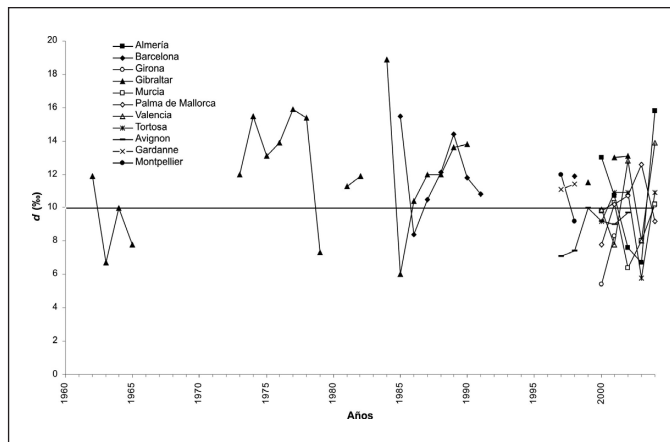


Fig. 3. Evolución del valor anual de d (‰) (medias ponderadas anuales) para cada una de las estaciones (base de datos GNIP/OIEA)

Fig. 3. Evolution of the annual value of d (‰) (annual weighted values) for each one of the stations (GNIP/IAEA database)

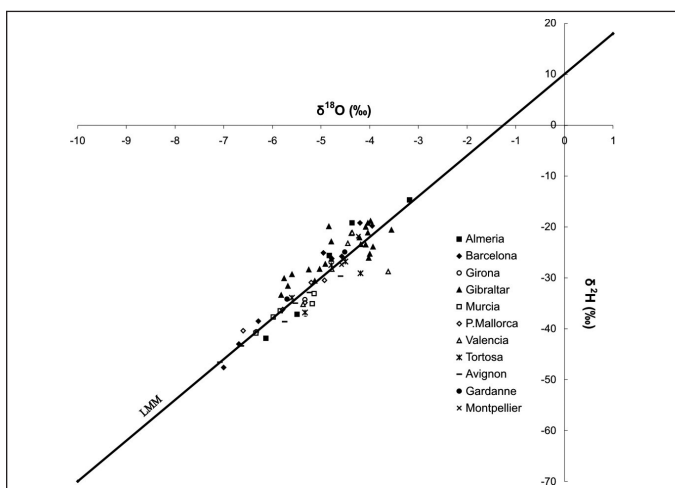


Fig. 2. Representación de  $\delta^{18}O$  vs.  $\delta^2H$  para valores medios anuales (valores ponderados) en las diferentes estaciones. LMM (Línea Meteorológica Mundial) (base de datos GNIP/OIEA)

Fig 2. Plot of  $\delta^{18}O$  vs.  $\delta^2H$  for annual mean values (weighted values) in the different stations. LMM=GMWL (Global Meteoric Water Line) (GNIP/IAEA database)

de lo que pudiera parecer (Plata 1994), aunque ésta es una afirmación que no ha sido bien documentada ni cuantificada en detalle. El régimen de las precipitaciones atlánticas es diferente al de estas típicas precipitaciones mediterráneas. Como periodo de recarga útil en la ribera mediterránea se considera de Octubre a Abril. Los frentes de origen atlántico llegan desgastados, por lo que generalmente producen precipitaciones de baja intensidad que con frecuencia no lle-

gan a producir una recarga significativa, sobre todo a medida que se desplazan hacia el Este del Mediterráneo.

### Costa mediterránea española

En lo que se refiere a la costa mediterránea española, existen trabajos previos, como el realizado por Araguás-Araguás (1991), en los que se recopilan datos isotópicos de las aguas subterráneas y de la zona no saturada del suelo en diferentes puntos del país. Por otro lado Plata (1994) realizó un estudio comparado entre la composición isotópica de las precipitaciones y las aguas subterráneas para el total de la Península Ibérica. La precisión de este estudio es

Estación	Periodo de registro
Gibraltar	1961-2004 (numerosas interrupciones)
Almería	2000-2004
Murcia	2000-2004
Valencia	2000-2004
Palma de Mallorca	2000-2004
Tortosa	2000-2004
Barcelona	1984-1991 y 1998
Girona	2000-2004
Montpellier	1997-1998
Avignon	1997-2002
Gardanne	1997-1998

Tabla 3. Estaciones y periodos de registro (base de datos GNIP/OIEA) en 2004

Table 3. Stations and data periods (GNIP/IAEA database) in 2004

limitada debido a la gran extensión que abarca. También cabe destacar el trabajo realizado por Araguás-Araguás y Díaz Teijeiro (2005) en el que se aborda el estudio isotópico de las precipitaciones y del vapor de agua durante las precipitaciones, y su relación con la circulación de masas de aire en la Península Ibérica.

En cuanto a la composición isotópica de las precipitaciones, para valores medios anuales (Fig. 2 y 3) se cuenta con información de un total de once estacio-

Acuíferos	Referencia
S <sup>o</sup> Cazorra-Segura	Cruz-San Julián <i>et al.</i> (1990) / Cruz-San Julián <i>et al.</i> (1992)
S <sup>o</sup> Gádor. Manantiales I	Benavente <i>et al.</i> (1990) / Domínguez y Custodio (1994)
Campo de Dalías. Sondeos I	Benavente <i>et al.</i> (1990) / Domínguez y Custodio (1994)
S <sup>o</sup> Gádor. Manantiales II	Vandenschrick <i>et al.</i> (2002)
Campo de Dalías. Sondeos II	Vandenschrick <i>et al.</i> (2002)
Alto Guadalestín	Cerón <i>et al.</i> (1998)
S <sup>o</sup> Yunquera-Nieves	Andreo <i>et al.</i> (2004)
Baix Llobregat	Iribar Sorazu (1992)
S <sup>o</sup> Albufera de Alcedia	Rodríguez Morillo (1992)
Tarragona	Confederación Hidrográfica del Ebro
Baix Ebre	Touris y Custodio (1983)
Capellades	Lambán Jiménez (1997)
Vandellós	Bosch y Custodio (1986)
Cofrentes	Custodio <i>et al.</i> (1994)
Gavarres-Selva-Baix Ter	Vilanova (2004)
Doñana*	Baonza <i>et al.</i> (1984) / Custodio <i>et al.</i> (1993) / Iglesias (1999) / Lozano <i>et al.</i> (2001) / Manzano <i>et al.</i> (1991) / Manzano <i>et al.</i> (2001) / Manzano <i>et al.</i> (2001) / Sacks <i>et al.</i> (1992) / Veta <i>et al.</i> (1987)
S <sup>o</sup> Tramuntana	Cardoso (1997)
Prepirineo	Custodio (com. pers.). Datos de 1985

Tabla 4. Relación de acuíferos españoles y referencias a partir de las cuales se han extraído los datos  
 Table 4. List of Spanish aquifers and references from which data has been obtained

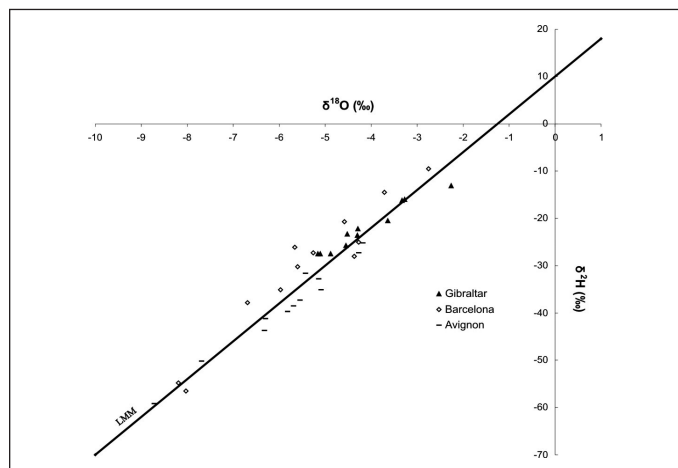


Fig. 4. Representación de  $\delta^{18}O$  vs.  $\delta^2H$  para valores medios mensuales (valores ponderados) en las estaciones de Barcelona, Gibraltar y Avignon. LMM (Línea Meteorica Mundial) (base de datos GNIP/OIEA)

Fig 4. Plot of  $\delta^{18}O$  vs.  $\delta^2H$  for monthly mean values (weighted values) in Barcelona, Gibraltar and Avignon stations. LMM=GMWL (Global Meteoric Water Line) (GNIP/IAEA database)

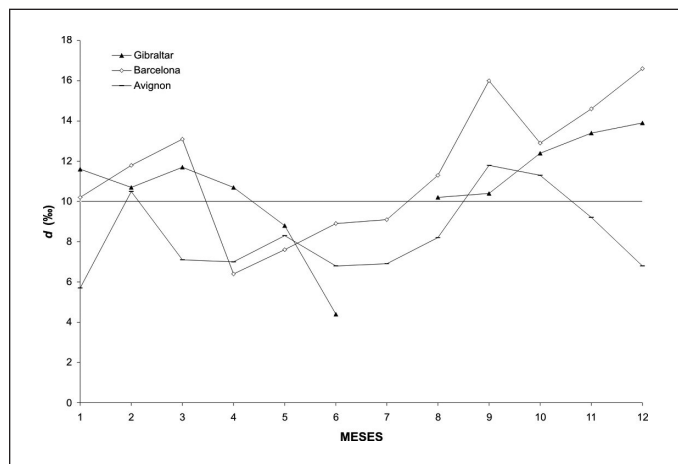


Fig. 5. Evolución mensual de d (‰) (medias ponderadas mensuales) para las estaciones de Barcelona, Gibraltar y Avignon (base de datos GNIP/OIEA)

Fig. 5. Monthly evolution of d (‰) (monthly weighted values) for the Barcelona, Gibraltar and Avignon stations (GNIP/IAEA database)

nes: Gibraltar, Almería, Murcia, Valencia, Palma de Mallorca, Tortosa, Barcelona, Girona, Avignon, Montpellier y Gardanne (Fig. 1), con diferentes periodos de registro (Tabla 3). En el caso de valores mensuales (Fig. 4 y 5) sólo se han empleado, por su mayor período de registro, tres estaciones: Avignon, Barcelona y Gibraltar. El período empleado para obtener valores medios mensuales en el caso de la estación de Avignon está comprendido entre 1997 y 2002, de 1985 a 1991 para Barcelona y de 1961 a 2004 -con algunas interrupciones- para Gibraltar.

Para la composición isotópica de las aguas subterráneas se ha llevado a cabo una recopilación bibliográfica (Tabla 4) de trabajos referentes a isótopos ambientales en diferentes acuíferos (Fig. 1), tratando de cubrir el área de interés.

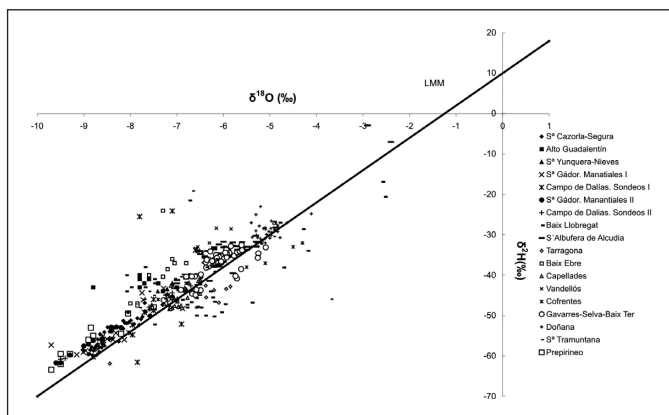


Fig. 6. Representación de  $\delta^{18}O$  vs.  $\delta^2H$  para aguas de los diferentes acuíferos españoles seleccionados. LMM (Línea Meteorica Mundial)

Fig 6. Plot of  $\delta^{18}O$  vs.  $\delta^2H$  for water from the different selected Spanish aquifers. LMM=GMWL (Global Meteoric Water Line) (GNIP/IAEA database)



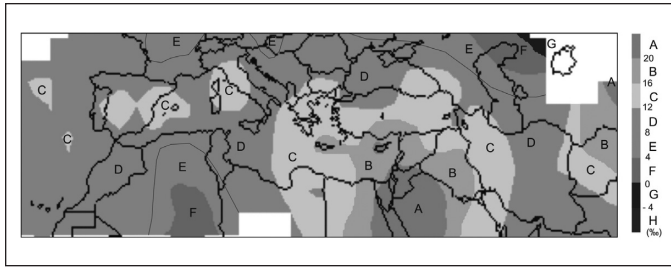


Fig. 7. Media ponderada anual de  $d$  (‰) en las precipitaciones del Mediterráneo (figura generada a partir de la fuente ISOHIS/OIEA).  
 Fig. 7. Annual weighted average of  $d$  (‰) in the Mediterranean Sea precipitations (figure generated from of the ISOHIS/IAEA database)

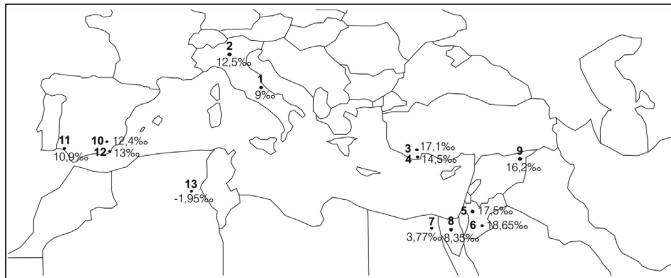


Fig. 8. Valores estimativos de  $d$  (‰) en los diferentes acuíferos estudiados en toda la ribera Mediterránea  
 Fig. 8. Estimative value of  $d$  (‰) in the different studied aquifers in the whole Mediterranean basin

### Discusión sobre el área Circum-Mediterránea

En el caso de la composición isotópica de las precipitaciones se muestra su variabilidad espacial y temporal, mientras que en el caso de la composición isotópica de las aguas subterráneas sólo es posible mostrar la variabilidad espacial. Esto permite obtener una idea general de los factores que afectan a la composición isotópica de las precipitaciones y de las aguas subterráneas.

El valor  $d$  puede usarse como indicador de la interacción entre masas de aire. En la parte Oeste del Mediterráneo es del orden de 14 ‰, mientras que en el Este del Mediterráneo es del orden de 22‰. Estos valores promedio son el resultado de precipitaciones principalmente de origen Atlántico ( $d = 10$ ‰) y Mediterráneo, con  $d$  mayor, el cual puede ser explicado por un mayor déficit de humedad relativa en el mar Mediterráneo. El gradiente existente entre el Este y Oeste Mediterráneo se explica por una menor influencia de las precipitaciones de origen Atlántico hacia el Este, es decir, por un mayor dominio de las precipitaciones de origen Mediterráneo y por las ocasionales precipitaciones a partir de masas procedentes desde el Océano Índico. Es necesario mencionar

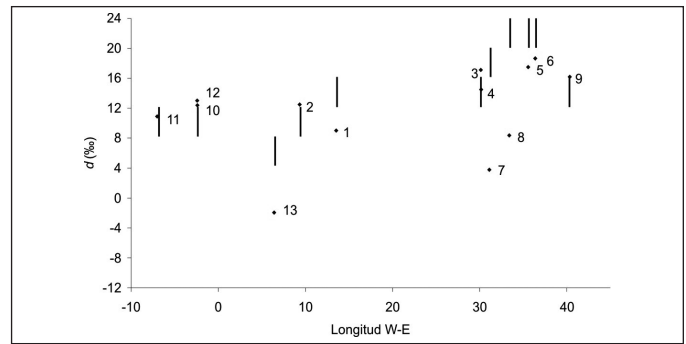


Fig. 9. Comparación entre los valores medios de  $d$  (‰) en las aguas de los diferentes acuíferos estudiados (puntos), ordenados según la longitud, y el intervalo de variación de  $d$  (‰), según OIEA, en las precipitaciones sobre esos mismos puntos (barras)  
 Fig. 9. Comparison between the mean values of  $d$  (‰) in the water of the different aquifers (points), ordered by the longitude, and the variation interval of  $d$  (‰), according to IAEA, in precipitations over the same points (bars)

que existen situaciones intermedias como es el caso de Grecia, donde se registran valores mínimos de 10‰ y máximos de 17‰. Los efectos de continentalidad se observan sobre todo en el caso de la Península Ibérica, y se reconocen efectos provocados por la topografía en la margen Norte del Mediterráneo, sobre todo en Italia (Fig. 7).

La composición isotópica de las aguas subterráneas a lo largo del Mediterráneo difiere de la composición isotópica de las precipitaciones que se producen sobre dicha zona, ya que no sólo son consecuencia directa de las precipitaciones locales, sino también lo son de contribuciones de mayor elevación, aunque esto afecta poco al valor de  $d$  si el origen de la precipitación es el mismo. La evaporación que se produzca antes de la recarga supondría una disminución de  $d$ , y la mezcla con paleoaguas supondría una alteración de la composición de isotópica de aguas recientes.

La comparación de los mapas de  $d$  de las precipitaciones (Fig. 7) y de las aguas subterráneas (Fig. 8) para el Mediterráneo permite observar que, a grandes rasgos, el valor  $d$  de las aguas subterráneas presenta un patrón de distribución semejante al de las precipitaciones, dándose los valores mayores de  $d$  en el Este Mediterráneo, como muestra la Fig. 9.

### Discusión sobre la costa mediterránea española

En el caso de la composición isotópica de las precipitaciones sólo se cuenta con valores medios anuales suficientes para trazar la línea meteórica local en las

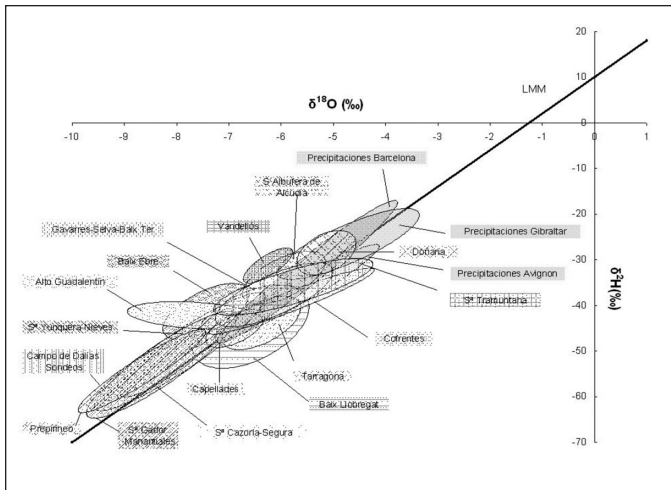


Fig. 10. Comparación entre los contenidos isotópicos anuales para las estaciones de Barcelona, Gibraltar y Avignon (rellenos en gris) con la composición isotópica de los diferentes acuíferos seleccionados (rellenos con tramas). LMM (Línea Meteorológica Mundial) (base de datos GNIP/OIEA)

Fig. 10. Comparison between the annual isotopic content of Barcelona, Gibraltar and Avignon stations (shaded in grey) with the isotopic composition of the different selected aquifers (shaded and wefted). LMM=GMWL (Global Meteoric Water Line) (GNIP/OIEA database)

estaciones de Barcelona, Gibraltar y Avignon. Estas tres mismas estaciones han sido empleadas para representar los valores medios mensuales por presentar un mayor período de registro. Cabe destacar que el rango de variación en el contenido isotópico de las precipitaciones ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ), ya sean valores mensuales o anuales, es mayor en el caso de Barcelona que en el de Gibraltar y Avignon (Fig. 2 y 4). Esto puede ser explicado debido a que en Barcelona las precipitaciones tienen dos orígenes claros -Atlántico a través de los Pirineos, y Mediterráneo- mientras que la estación de Gibraltar y Avignon reciben fundamentalmente precipitaciones de un solo origen.

Las aguas de los diferentes acuíferos seleccionados muestran algunas características comunes y otras muy específicas para cada uno de ellos. Como característica común cabe destacar que en casi todos los casos la pendiente de las líneas meteóricas del agua de cada uno de los acuíferos (eje mayor de las elipses) es aproximadamente 8, similar a la de la línea del agua meteórica mundial media (LMM) (Fig. 10). Destaca la posición horizontal de la elipse que engloba los datos del Alto Guadaentín, que Cerón *et al.* (1998) explican por un posible intercambio geotérmico de  $\text{O}_2$  (fraccionamiento por presencia de  $\text{CO}_2$ ).

Si se representan los valores medios de  $d$  de las

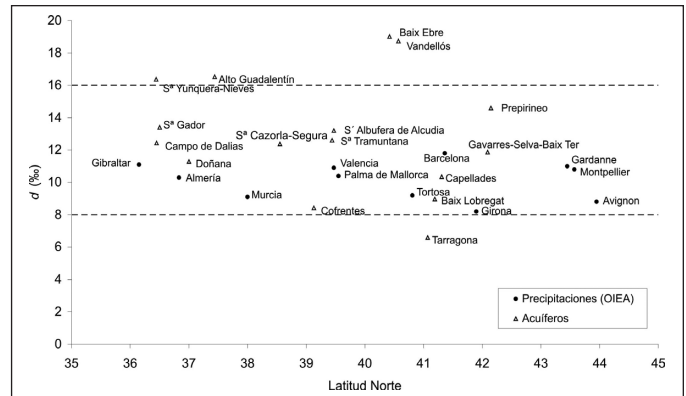


Fig. 11. Relación entre los valores medios de  $d$  (‰) y la latitud para cada una de las estaciones (base de datos GNIP/OIEA). Intervalo de  $d$  (‰) para las precipitaciones en la Península Ibérica (líneas de trazo)

Fig. 11. Mean values of  $d$  (‰) versus the latitude for each one of the stations (GNIP/OIEA database). Interval of  $d$  (‰) for the precipitations in the Iberian Peninsula (dashed lines)

diferentes estaciones meteorológicas puede reconocerse una clara tendencia de variación con la latitud, es decir,  $d$  disminuye a medida que aumenta la latitud. En el caso de los acuíferos seleccionados también puede reconocerse esa variación con la latitud (Fig. 11). La mayoría de ellos presentan valores medios de  $d$  similares a los de la estación de muestreo de lluvia más próxima, con algunas excepciones.

Como puede observarse en la Fig. 11, en general los valores medios de  $d$  para los acuíferos son algo mayores que los valores de  $d$  de las precipitaciones. En el caso de la estación de Palma de Mallorca de la base GNIP/OIEA se ha observado que el valor  $d$  para esta estación está alejado del valor  $d$  de los acuíferos de Sierra de Tramuntana y S' Albufera de Alcudia. El valor medio  $d = 13,7\%$  para las precipitaciones recopiladas por Cardoso (1997) alerta de la necesidad de revisar el procedimiento de muestreo y análisis en el caso de las precipitaciones en Palma de Mallorca. La posición que ocupa Barcelona es el resultado de la doble influencia mediterránea y atlántica gracias a la existencia del valle del Ebro. Por otro lado podría pensarse que en la estación de Girona ocurre lo mismo que en la de Palma de Mallorca, al tener un valor de  $d$  muy diferente al del acuífero Gavarres-Selva-Baix Ter, pero los datos de precipitaciones recopilados en la zona por Vilanova (2004) dan un valor medio de  $d$  incluso inferior al de la estación de Girona.

Baix Ebre y Vandellós se alejan mucho de los valores de  $d$  para las precipitaciones de Tortosa y Barcelona, que son las estaciones más próximas. Los



autores originales de los trabajos a partir de los cuales se han extraído los datos señalan que podría tratarse de datos con algunos errores analíticos.

Los ejemplos de Baix Llobregat y Tarragona son el resultado de una recarga a partir de aguas superficiales o de regadío que han sufrido una cierta evaporación, y por tanto muestran una disminución en el valor de *d*.

## Conclusión

A grandes rasgos, para toda la ribera mediterránea, el valor *d* de las aguas subterráneas presenta un patrón de distribución semejante al de las precipitaciones, dándose los valores mayores de *d* en el Este del Mediterráneo. Cabe destacar la importante presencia de paleoaguas en casi todo el Norte de África, las cuales, al mezclarse, alteran la señal isotópica de aguas contemporáneas, como es el caso de los acuíferos del Sahara Noroeste. Además cabe resaltar la escasa o nula información existente en el Noroeste de África, en países como Túnez, Argelia, Marruecos o Libia.

Tanto en las precipitaciones como en las aguas subterráneas en la costa española el valor *d* disminuye a medida que aumenta la latitud. El hecho que en general el valor *d* tiende a ser algo mayor en las aguas subterráneas que en las precipitaciones se debe a los diferentes orígenes de las masas nubosas a lo largo del año y a la diferente ponderación, puesto que la recarga preferente se produce en determinadas épocas del año. Las elevadas temperaturas y la sequedad del ambiente contribuyen a que los valores de *d* sean altos. Por el contrario la evaporación que tiene lugar en el suelo hace que disminuyan los valores de *d*. Finalmente cabe destacar la cautela con la que han de ser tratados los datos tanto de precipitaciones como de aguas subterráneas.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado dentro del proyecto CGL-2004-05963-C04-01 plan nacional I+D+I del Ministerio de Educación y Ciencia. Se agradecen las revisiones realizadas por Dr. Luís Araguás y Dr. Javier Rodríguez, que han contribuido a mejorar notablemente el texto.

## Referencias

Abu-Jaber, N., Ismail, M. 2003. Hydrogeochemical modeling of the shallow groundwater in the northern Jordan Valley. *Environmental Geology*, 44: 391-399.

- Abu-Jaber, N. 2001. Geochemical evolution and recharge of the shallow aquifers at Tulul al Ashaqui, NE Jordan. *Environmental Geology*, 41: 372-383.
- Andreo, B., Liñan, C., Carrasco, F., Jiménez de Cisneros, C., Caballer, F., Mudry, J. 2004. Influence of rainfall quantity on the isotopic composition ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{O}$ ) of water in mountainous areas. Application for groundwater research in the Yunquera-Nieves karst aquifers (S Spain). *Applied Geochemistry*, 19: 561-574.
- Aouad-Rizk, A., Job, J.L., Najem, W., Travi, Y., Blavoux, B., Gourcy, L. 2005. Oxygen-18 and deuterium contents over Mount Lebanon related to air mass trajectories and local parameters. *Isotopic Composition of Precipitation in the Mediterranean Basin in Relation to Air Circulation Patterns and Climate*. IAEA-TECDOC-1453, Viena: 75-82.
- Araguás-Araguás, L.J. 1991. Adquisición de los contenidos isotópicos ( $^{18}\text{O}$  y D) de las aguas subterráneas: variaciones en la atmósfera y en la zona no saturada del suelo. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona.
- Araguás-Araguás, L.J., Diaz Teijeiro, M.F. 2005. Isotope composition of precipitation and water vapour in the Iberian Peninsula. *Isotopic Composition of Precipitation in the Mediterranean Basin in Relation to Air Circulation Patterns and Climate*. IAEA-TECDOC-1453, Viena: 173-190.
- Argiriou, A.A., Lykoutis, S.P. 2005. Stable isotopes in rainfall over Greece: Results of the 2000-2003 measurement campaign. *Isotopic Composition of Precipitation in the Mediterranean Basin in Relation to Air Circulation Patterns and Climate*. IAEA-TECDOC-1453, Viena: 83-98.
- Baonza, E., Plata, A., Silgado, A. 1984. Hidrología isotópica de las aguas subterráneas del Parque Nacional de Doñana y zona de influencia. Cuadernos de Investigaciones, C7, CEDEX. Madrid: 1-139.
- Bono, P. Gonfiantini, R., Alessio, M., Fiori, C., D'Amelio, L. 2005. Stable isotopes ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ) and tritium in precipitation: Results and comparison with groundwater perched aquifers in Central Italy. *Isotopic Composition of Precipitation in the Mediterranean Basin in Relation to Air Circulation Patterns and Climate*. IAEA-TECDOC-1453, Viena: 115-124.
- Bajjali, W., Abu-Jaber, N. 2001. Climatological signals of the paleogroundwater in Jordan. *Journal of Hydrology*, 243: 133-147.
- Bajjali, W. 2006. Recharge mechanism and hydrochemistry evaluation of groundwater in the Nuaimah area, Jordan, using environmental isotope techniques. *Hydrogeology Journal*, 14: 180-191.
- Barbieri, M., Boschetti, T., Petitta, M., Tallini, M. 2005. Stable isotope ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy). *Applied Geochemistry*, 20: 2063-2081.
- Benavente, J., Cardenal, J., Cruz-San Julián, J. J., García-López, S., Araguás, L. and López-Vera, F. 1990. Content analysis of stable isotopes in aquifers from the coastal mountainous Caín of Gádor-Lújar (Southeast Andalusia, Spain). *Memories of the 22nd Congress IAH*, Vol. XXII, Lausanne: 414-424.
- Bosch, X., Custodio, E. 1986. Interpretación de los datos iso-

- tópicos ambientales tomados para el informe sobre el plan de control hidrogeológico de los pozos del sector de Cadaloques (Vandellós, Tarragona). Nota Técnica: 1-7.
- Cardoso, G. 1997. Comportamiento de los manantiales del karst nororiental de la Serra de Tramuntana, Mallorca. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña; Barcelona: 1-370.
- Celle-Jeanton, H. 2000. Caracterisation des precipitations sur le pourtour de la Méditerranée Occidentale. Approche isotopique et chimique. Thèse. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse: 1-222.
- Celle-Jeanton, H., Zouari, K., Travi, Y., Daoud, A. 2001. Caractérisation isotopique des pluies en Tunisie. Essai de typologie dans la région de Sfax. *Earth and Planetary Sciences*, 333 : 625-631.
- Celle-Jeanton, H., Daniel, M., Mudry, J., Blavoux, B. 2000. Signal pluie et traçage par les isotopes stables en Méditerranée occidentale. Exemple de la région avignonnaise (Sud-Est de la France). *Earth and Planetary Sciences*, 331: 647-650.
- Celle-Jeanton, H., Gonfiantini, R., Travi, Y., Sol, B. 2004. Oxygen-18 variations of rainwater during precipitation : application of the Rayleigh model to selected rainfalls in Southern France. *Journal of Hydrology*, 289: 165-177.
- Cerón, J.C., Pulido-Bosch, A., Sanz de Galdeano, C. 1998. Isotopic identification of CO<sub>2</sub> from a deep origin in thermomineral waters of southeastern Spain. *Chemical Geology*, 149: 251-258.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO. <http://www.chebro.es>
- Cruz San Julián, J., Araguás, L., Rozanski, K., Cardenal, J., Hidalgo, M.C., García López, S., Martínez Garrido, J.C., Moral, F., Olías, M. 1992. Sources of precipitation over south-eastern Spain and groundwater recharge. An isotopic study. *Tellus*, 44B: 226-236.
- Cruz-San Julián, J.J., Benavente, J., Martínez-Garrido, J.C., Moral, F., Araguás; L., and López-Vera, F. 1990. Deuterium and oxygen-18 content in karstic aquifers in the Sierras de Cazorla and Segura (Betic Cordillera, Spain). *Memories of the 22nd Congress IAH*, Vol. XXII, Lausanne: 425-433.
- Custodio, E., Bayó, A., Badiella, P. 1994. Informe acerca del modelo conceptual de funcionamiento de los acuíferos que subyacen bajo la Central Nuclear de Cofrentes y su entorno. Informe Técnico: 1-137.
- Custodio, E., Iglesias, M., Manzano, M. 1993. Informe del estudio hidrogeológico del área de El Abalarío (Huelva) (1ª Fase). Informe Técnico: 1-71.
- Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16: 567-584.
- Dirican, A., Ünal, S., Acar, Y., Demarcan, M. 2005. The temporal and seasonal variation of H-2 and O-18 in atmospheric water vapour and precipitation from Ankara, Turkey in relation to air mass trajectories at Mediterranean Basin. *Isotopic Composition of Precipitation in the Mediterranean Basin in Relation to Air Circulation Patterns and Climate*. IAEA-TECDOC-1453, Viena: 191-214.
- Domínguez, P. y Custodio, E. 1994. Aplicación de técnicas de isótopos ambientales estables del agua como apoyo al estudio de los acuíferos del Sector Noroeste del Campo de Dalías (Almería) afectados por intrusión marina. *Análisis y Evolución de la Contaminación de las Aguas Subterráneas en España*. Inter. Assoc. Hydrogeologist, spanish Chapter. Alcalá de Henares. T.I: 73-90.
- El-Asrag, A.M. 2005. Effect of synoptic and climatic situations on fractionation of stable isotopes in rainwater over Egypt and east Mediterranean. *Isotopic Composition of Precipitation in the Mediterranean Basin in Relation to Air Circulation Patterns and Climate*. IAEA-TECDOC-1453, Viena: 51-74.
- Elhatip, H., Günay, G. 1998. Karst hydrogeology of the Kas-Kalkan springs along the Mediterranean coast of Turkey. *Environmental Geology*, 36 (1-2):150-158.
- Eraifej, N., Abu-Jaber, N. 1999. Geochemistry and pollution of shallow aquifers in the Mafraq area, North Jordan. *Environmental Geology*, 37 (1-2):162-170.
- Gat, J. R., Carmi, I. 1970. Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area. *Journal Gheophysical Research*, 75: 3039-3048.
- Gat, J.R., Ben-Mair, R., Yam, R., Yakir, D., Wernli, H. 2005. The isotope composition of atmospheric waters in Israel's coastal plains. *Isotopic Composition of Precipitation in the Mediterranean Basin in Relation to Air Circulation Patterns and Climate*. IAEA-TECDOC-1453, Viena: 99-114.
- Guendouz, A. and Moulla, A.S. 2006. Hydrochemical and isotopic evolution of a Saharan phreatic aquifer (case of Oued-Souf region, Algeria). *Las Aguas Subterráneas en los Países Mediterráneos*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas. N° 17, Madrid: 159-166.
- Horvatincic, N., Krajcar Bronic, I., Barešic, J., Obelic, B., Vidic, S. 2005. Tritium and stable isotope distribution in the atmosphere at the coastal Region of Croatia. *Isotopic Composition of Precipitation in the Mediterranean Basin in Relation to Air Circulation Patterns and Climate*. IAEA-TECDOC-1453, Viena: 37-50.
- Iglesias, M. 1999. Caracterización hidrogeoquímica del flujo del agua subterránea en El Abalarío, Doñana, Huelva. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña; Barcelona.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Isotope Hydrology Information System. The ISOHIS Database, <http://isohis.iaea.org/>.
- Iribar Sorazu, V. 1992. Evolución hidroquímica e isotópica de los acuíferos del Baix Llobregat. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona: 1-187.
- Kattan, Z. 1997. Chemical and environmental isotope study of precipitation in Syria *Journal of Arid Environments*, 35: 601-615.
- Kattan, Z. 2001. Uses of hydrochemistry and environmental isotopes for evaluation of groundwater in the Paleogene limestone of the Ras Al-Ain area (Syrian Jezireh). *Environmental Geology*, 41: 128-144.
- Lambán Jiménez, L.J. 1997. Estudio hidrogeológico del sis-

- tema acuífero de Carme-Capellades-La Llacuna-Sant Quintí de Mediona (Cordillera Prelitoral Catalana). Tesis de Master en Hidrología Subterránea. ETSICCP-UPC, Barcelona: 1-120.
- Longinelli, A., Selmo, A. 2003. Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map. *Journal of Hydrology*, 270: 75-88.
- Lozano, E., Delgado, F., Manzano, M., Custodio, E. 2001. Interacción entre las lagunas freáticas de Doñana (SO España) y el acuífero según los isótopos ambientales. Las Caras del Agua Subterránea (Medina y Carrera, eds.) Congreso en Memoria de Germán Galarza. Barcelona. Septiembre de 2001. IGME. Temas Aguas Subterráneas. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Número 1/2001. Tomo I: 379-385.
- Manzano, M., Custodio, E., Poncela, R. 1991. Contribución de la hidrogeoquímica al conocimiento de la hidrodinámica de los acuíferos del área de Doñana. Actas del III Simposio sobre el Agua en Andalucía. ITGE, Madrid: 133.146
- Manzano, M.; Custodio, E.; Loosli, H.; Cabrera, M.C.; Riera, X.; Custodio, J. 2001. Palaeowater in coastal aquifers of Spain. Palaeowaters in Coastal Europe: Evolution of Groundwater since the Late Pleistocene (Ed. W.M. Edmunds y C.J. Milne). Geological Society of London, Special Publication 189: 107-138.
- Manzano, M.; Soler, A.; Carrera, J.; Custodio, E. 2001. Composición isotópica ( $d^{18}O$ ,  $d^2H$  y  $d^{34}S$ ) de las aguas del área afectada por el vertido minero de Aznalcóllar (SO España). Las caras del agua subterránea (Medina y Carrera, eds.). Congreso en Memoria de Germán Galarza. Barcelona. Septiembre de 2001. IGME. Temas Aguas Subterráneas. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Número 1/2001. Tomo I: 477-487.
- Merlivat, L., Jouzel, J. 1979. Global climatic interpretation of the deuterium, oxygen-18 relationship for precipitation. *Journal Geophysical Research*, 84: 5029-5033.
- Mook, W.G. 2002. Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico. Principios y aplicaciones. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid: 1-596.
- Nativ, R., Günay, G., Hötzl, H., Reichert, B., Solomond, D.K., Tezcanb, L. 1999. Separation of groundwater-flow components in a karstified aquifer using environmental tracers. *Applied Geochemistry*, 14: 1001-1014.
- Ouda, B., El Hamdaoui, A., Ibn Majah, M. 2005. Isotopic composition of precipitation at three Moroccan stations influenced by Oceanic and Mediterranean air masses. *Isotopic Composition of Precipitation in the Mediterranean Basin in Relation to Air Circulation Patterns and Climate*. IAEA-TECDOC-1453, Viena: 125-140.
- Plata, A. 1994. Composición isotópica de las precipitaciones y aguas subterráneas de la Península Ibérica. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Vol. 39. Madrid: 1-139.
- Pilla, G., Sacchi, E., Zuppi, G., Braga, G., Ciancetti, G. 2006. Hydrochemistry and isotope geochemistry as tools for groundwater hydrodynamic investigation in multilayer aquifers: a case study from Lomellina, Po plain, South-Western Lombardy, Italy. *Journal of Hydrology*, 14: 795-808.
- Rindsberger, M., Margaritz, M., Carmi, I. and Gilad, D. 1983. The relation between air mass trajectories and the water isotopic composition in the Mediterranean Sea area. *Geophysical Rev. Lett.*, 10: 43-46.
- Rodríguez Morrillo, H. 1992. Estudio hidrogeológico de la S'Albufera de Alcudia con énfasis hidrogeoquímico e isotópico ambiental (Isla de Mallorca). Tesis de Master en Hidrología Subterránea. ETSICCP-UPC, Barcelona: 1-125.
- Sacks, L.A., Herman, J.S., Konikow, L.F., Vela, A.L. 1992. Seasonal dynamics of groundwater-lake interactions at Doñana National Park, Spain. *Journal of Hydrology*, 136: 123-154.
- Sadek, M.A., Abd El-Samie, S.G. 2001. Pollution vulnerability of the Quaternary aquifer near Cairo, Egypt, as indicated by isotopes and hydrochemistry. *Hydrogeology Journal*, 9: 273-281.
- Saighi, O. 2005. Isotopic composition of precipitation from Algiers and Assekrem. *Isotopic Composition of Precipitation in the Mediterranean Basin in Relation to Air Circulation Patterns and Climate*. IAEA-TECDOC-1453, Viena: 5-18.
- Salameh, E. 2004. Using environmental isotopes in the study of the recharge-discharge mechanisms of the Yarmouk catchment area in Jordan. *Hydrogeology Journal*, 12: 451-463.
- Tantawi, M. A., El-Sayed, E., Awad, M. A. 1998. Hydrochemical and stable isotope study of groundwater in the Saint Catherine-Wadi Feiran area, south Sinai, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 26 (2): 277-284.
- Touris R. y Custodio, E. 1983. Nuevos conocimientos hidrogeológicos del Bajo Ebro. V Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Madrid. Com. (4): 1819-1834.
- Vandeschrick, G. van Wesemael, B., Frot, A., Pulido-Bosch, A., Molina, L., Stiévenard, M., Souchez, R. 2002. Using stable isotope analysis ( $\delta D$ - $\delta^{18}O$ ) to characterise the regional hydrology of the Sierra de Gador, south east Spain. *Journal of Hydrology*, 265: 43-55.
- Vela, A. Herráez, I., Tenajas, J. 1987. Relaciones isotópicas entre las aguas superficiales y subterráneas en el área peridunar del Parque Nacional de Doñana. II Congreso de Geoquímica en España, Soria: 79-82.
- Vilanova, E. 2004. Análisis de los sistemas de flujo en el área de Gavarres-Selva-Baix Empordá. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona. 1-337.
- Vreca, P., Kandùè, T., Žigon, S., Trkov, Z. 2005. Isotopic composition of precipitation in Slovenia. *Isotopic Composition of Precipitation in the Mediterranean Basin in Relation to Air Circulation Patterns and Climate*. IAEA-TECDOC-1453, Viena: 157-172.
- Walli, B., Gaye, C., Gourcy, L. and Aggarwal, P. 2005. Isotope methods for management of shared aquifers in Northern Africa. *Groundwater* 43 (5): 744-749.

Recibido: diciembre 2007

Aceptado: abril 2008