

La Red Española de Vigilancia de Isótopos en la Precipitación (REVIP): distribución isotópica espacial y aportación al conocimiento del ciclo hidrológico

M^º FE DÍAZ-TEIJEIRO (*), JAVIER RODRÍGUEZ-ARÉVALO (*) y SILVINO CASTAÑO (**)

RESUMEN Se exponen los resultados de siete años de funcionamiento de la Red Española de Vigilancia de Isótopos (^2H , ^{18}O y ^3H) en la Precipitación (REVIP), gestionada desde 2000 por el Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) en colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Los datos de esta red se remiten al Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA) para formar parte de la Red Global de Isótopos en la Precipitación (GNIP).

La distribución espacial de los isótopos estables (^{18}O y ^2H) de las aguas de precipitación en España sigue un modelo de correlación con la latitud y la cota topográfica, elementos geográficos que muestran fuerte relación con la temperatura, un factor clave que controla el fraccionamiento isotópico.

Esta información sobre ^{18}O y ^2H es útil para trazar el agua en el suelo y el subsuelo y, junto con la información sobre la distribución espacial y la evolución de la concentración de tritio (^3H) en la precipitación, permite datar dichas aguas para estimar así direcciones y velocidades de flujo, y evaluar la tasa de renovación de los recursos hídricos y la vulnerabilidad de acuíferos.

SPANISH NETWORK FOR ISOTOPES IN PRECIPITATION: ISOTOPE SPATIAL DISTRIBUTION AND CONTRIBUTION TO THE KNOWLEDGE OF THE HYDROLOGICAL CYCLE

ABSTRACT *The results of seven years of operation of the Spanish Network for Isotopes (^2H , ^{18}O y ^3H) in Precipitation (REVIP) are shown. This Network is managed since 2000 by the Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas of the Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) in collaboration with the Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). The results of REVIP are sent to the International Atomic Energy Agency (IAEA) in order to be integrated in the Global Network for Isotopes in Precipitation (GNIP).*

The spatial distribution of stable isotopes (^{18}O y ^2H) in precipitation in Spain follows a multiple regression model, based on two geographic factors: latitude and elevation, which is strongly correlated with temperature, an important factor controlling isotope fractionation.

This information on ^{18}O and ^2H is useful to trace surface and ground waters and, combined with the information about the spatial and temporal distribution of the Tritium (^3H) concentration in precipitation, allows to date these waters in order to estimate flow directions and velocities, and to evaluate the residence time of water resources and aquifer vulnerability.

Palabras clave: Isótopos, Precipitación, España, REVIP.

Keywords: Isotopes, Precipitation, Spain, REVIP.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la composición isotópica (^2H , ^{18}O y ^3H) de las aguas de precipitación, superficiales, subterráneas, y del vapor de agua atmosférico, así como de las causas de sus cambios espaciales y temporales, ha facilitado, en las últimas décadas, el

conocimiento del funcionamiento general del ciclo hidrológico. Además de haber contribuido a una mejor identificación de los procesos implicados en este ciclo y de los factores que los regulan, ha permitido realizar estimaciones más aproximadas del flujo entre sus diferentes componentes, tanto a escala global como regional y local (Dansgaard, 1964, Gat, 1980, Yurtsever y Gat, 1981, Rozanski et al, 1993, Mook, 2002).

Las moléculas de agua que forman parte de los componentes del ciclo hidrológico contienen distintas cantidades de los isótopos estables del hidrógeno y del oxígeno (^1H y ^2H , D o deuterio, y ^{16}O y ^{18}O son los más abundantes respectiva-

(*) Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).

(**) Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

mente) y se comportan de manera desigual en los cambios de fase y otras reacciones del agua, debido a su diferente masa (el agua es en su mayor parte $^1\text{H}_2\text{ }^{16}\text{O}$, cuya masa es de 18 comparada con la de $^2\text{H}_2\text{ }^{16}\text{O}$ o la de $^1\text{H}_2\text{ }^{18}\text{O}$, cuyas masas son de 20). Esta situación es el resultado de un efecto, conocido como fraccionamiento isotópico, que hace que la proporción de isótopos ligeros y pesados sea distinta entre los compuestos o fases que interaccionan y los productos de la reacción, y permite distinguir o "trazar" masas de agua por su origen. El "trazado" de estas masas de agua y el estudio de las modificaciones naturales o artificiales de su composición, nos informa sobre su origen y movimiento en el medio natural, su renovación potencial en el tiempo, su interacción con el medio sólido, su evolución geoquímica y, finalmente, sobre la cantidad y la calidad de esas aguas como recurso hídrico (Clark y Fritz, 1997, Cook y Herczeg, 2001, Kendal y McDonnell, 2006).

Por su parte, el tritio, el isótopo radiactivo del hidrógeno de número de masa 3 (^3H o T), se produce de forma natural en la alta atmósfera a partir de reacciones nucleares inducidas por los neutrones y protones liberados por la radiación cósmica con los núcleos atmosféricos, principalmente ^{14}N . Este tritio se incorpora a las precipitaciones en forma de agua tritiada (THO), en concentraciones muy pequeñas pero detectables con las técnicas de medida que existen en la actualidad. Los ensayos termonucleares realizados en la atmósfera, principalmente durante la década de 1952 a 1962, aumentaron las concentraciones de tritio en las precipitaciones a escala de todo el globo y, particularmente, en las del Hemisferio Norte, dos o tres órdenes de magnitud sobre las producidas de forma natural (Erikson, 1983, Rozanski et al., 1991).

La principal utilidad del tritio para estudios hidrológicos se basa en el hecho de que este isótopo ha producido el marcado natural de las aguas meteóricas del globo, de forma que tanto en los acuíferos como en los perfiles del suelo puede distinguirse entre: 1) aguas de precipitaciones anteriores a los años 50, que tendrían en la actualidad concentraciones de tritio difícilmente detectables, dado que el periodo de semidesintegración del tritio es de 12,32 años; 2) aguas con una huella de las concentraciones alcanzadas en los años 1952 a 1962; y 3) aguas recientes, en las que la concentración de tritio ha vuelto a tener valores similares a las de épocas anteriores a los ensayos termonucleares. De este modo pueden estimarse valores de la recarga y velocidades de infiltración de interés en la evaluación de recursos hídricos y en su protección (Dincer et al., 1974, Münnich, 1983, Robertson y Cherry, 1989, Scanlon et al., 2002).

Para poder desarrollar los proyectos de investigación que han proporcionado estos conocimientos ha sido imprescindible la caracterización rigurosa y sistemática de la composición isotópica de la atmósfera, la parte del ciclo hidrológico en la que se dan los mayores cambios en la composición isotópica de las aguas naturales. Esta caracterización dio comienzo a principios de los años 50 y se organizó en los años 60 bajo los auspicios de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en la denominada Red Global de Isótopos en la Precipitación (GNIP en sus siglas en inglés).

Entre los campos de aplicación que se han beneficiado de los conocimientos sobre la composición isotópica de las aguas de precipitación generados a partir de esta red, y en los que se han desarrollado mayor número de estudios, destacan la hidrología superficial y la hidrología subterránea o hidrogeología. En los últimos años el estudio de las bases de datos proporcionadas por GNIP, y por las redes nacionales

que soportan dicha red global, ha cobrado un interés renovado, por su demostrada aportación a las ciencias medioambientales, la ecología y los estudios de cambio global (Griffiths, 1998, IAEA 2001 y 2007, Michener y Lajtha, 2007, Sodeman et al., 2008), y por la continua diversificación de sus aplicaciones en disciplinas como antropología, arqueología, agronomía, biología, ecología, ciencias marinas, geoquímica, paleontología, ciencias médicas, toxicología y regulación alimentaria.

En España, los primeros estudios sobre la composición isotópica de las precipitaciones y las aguas subterráneas realizados en el CEDEX proporcionaron un marco general de gran utilidad para la interpretación de los resultados isotópicos en hidrogeología y una valiosa aportación sobre los factores que regulan las características isotópicas de estas aguas (Plata, 1994). También pusieron de manifiesto la carencia de información sistemática en estaciones meteorológicas distribuidas por todo el territorio nacional, que entonces se limitaban a las estaciones de Barcelona, Madrid, Málaga y Pontevedra. Las estaciones de muestreo de isótopos en precipitación con series más largas de datos son Barcelona y Madrid, que se han mantenido operativas desde 1971, aunque de forma discontinua. Existen además algunas series en otras estaciones con datos desde los años 80.

Con objeto de resolver esta carencia en 2000 se creó la Red Española de Vigilancia de Isótopos en Precipitación (REVIP), que es gestionada desde entonces por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) en colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

El CEDEX realizó una primera evaluación de los resultados de la REVIP a los dos años de su inicio (Araguás-Araguás y Díaz Teijeiro, 2005), aportando por primera vez información recopilada sistemáticamente en España sobre el agua de precipitación y el vapor de agua. En la actualidad, con datos de siete años de funcionamiento de la REVIP, se dispone de series suficientemente largas de información y de amplia distribución geográfica que permiten avanzar en el conocimiento de las características isotópicas de la precipitación en España y las causas de sus variaciones.

En la presente publicación se pretende analizar la información isotópica de ese período, contribuir a la difusión de los trabajos del CEDEX en hidrología, y promover la extensión de las aplicaciones isotópicas a otros estudios e investigaciones multidisciplinarias, como cambio climático o ecología, líneas seguidas en los últimos años por otras redes nacionales e internacionales de isótopos en la precipitación y por diferentes programas y proyectos internacionales.

1.1. FACTORES QUE REGULAN LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DE LAS PRECIPITACIONES

La evaporación del agua del océano en las franjas subtropicales es el origen de la mayor parte del vapor de agua que da lugar a precipitación en nuestro planeta. Esta evaporación en el océano genera un vapor de agua más ligero isotópicamente que el agua de mar de la que proviene dejando una primera huella isotópica en dicho vapor. Este fenómeno se compone de una serie compleja de procesos de fraccionamiento isotópico en equilibrio y cinético por difusión y mezcla del vapor generado y el vapor residual presente en la atmósfera oceánica (Craig y Gordon, 1965; Merlivat y Jouzel, 1979), que dependen de la temperatura de la superficie del océano, de la velocidad del viento, de la presión atmosférica y, principalmente, de la humedad relativa del aire sobre el océano.

A medida que las masas de aire húmedo se alejan de su origen de evaporación en los océanos, y disminuye la tempe-

ratura de su entorno, sufren condensaciones sucesivas según avanzan en su circulación general hacia latitudes mayores, regiones más frías y cotas más elevadas, originando sucesivos eventos de precipitación. Las primeras precipitaciones que se producen están enriquecidas en isótopos pesados con relación a las siguientes, que son progresivamente más ligeras según se va haciendo también más ligero el valor del que proceden. Este proceso de condensación da lugar a un fraccionamiento que ocurre en equilibrio en el interior de la nube, que es función principalmente de la temperatura, y que imprime una huella isotópica en el agua de precipitación.

1.2. LA LÍNEA METEÓRICA MUNDIAL

El resultado del muestreo y análisis de la composición isotópica de las aguas meteóricas ha permitido comprobar este proceso de fraccionamiento isotópico, que ocurre durante la evaporación y la precipitación, y descubrir la existencia de una correlación entre la variación de los contenidos de ¹⁸O y ²H de dichas aguas (Craig, 1961) representada en la denominada Línea Meteórica Mundial que responde a la ecuación:

$$\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10 \quad (1)$$

La pendiente de esta recta está controlada por la relación entre los factores de fraccionamiento isotópico del ¹⁸O y del ²H durante la condensación, dependientes principalmente de la temperatura (Dansgaard, 1964). El punto de corte de

esta recta con el eje de ordenadas ($\delta^2\text{H}$), está controlado principalmente por la humedad relativa del aire durante el proceso de fraccionamiento cinético desde la superficie oceánica. El valor de 10‰ se corresponde con una humedad relativa algo superior al 85%, representativa de la formación de vapor de agua a escala global en las franjas subtropicales. Por esto la Línea Meteórica Mundial tiene un exceso de deuterio ($d = \delta^2\text{H}8 \cdot \delta^{18}\text{O}$) del 10‰. Valores superiores al 10‰, del orden de 22‰, se han observado para humedades inferiores al 70%, situación normal en las precipitaciones cuyo origen está en mares con defecto de humedad relativa como es el caso del mar Mediterráneo oriental (Gat y Dansgaard, 1972).

2. LA RED ESPAÑOLA DE VIGILANCIA DE ISÓTOPOS EN LA PRECIPITACIÓN (REVIP)

2.1. OBJETIVOS Y DISEÑO DE LA RED DE VIGILANCIA

REVIP cuenta con 16 estaciones de vigilancia en las que se procede al muestreo y, posteriormente, al análisis sistemático y periódico de la composición isotópica de la precipitación en España. Se encuentran distribuidas en las principales cuencas hidrográficas españolas, con una amplia cobertura geográfica (Figura 1) que se puede considerar representativa de las principales zonas climáticas del país.

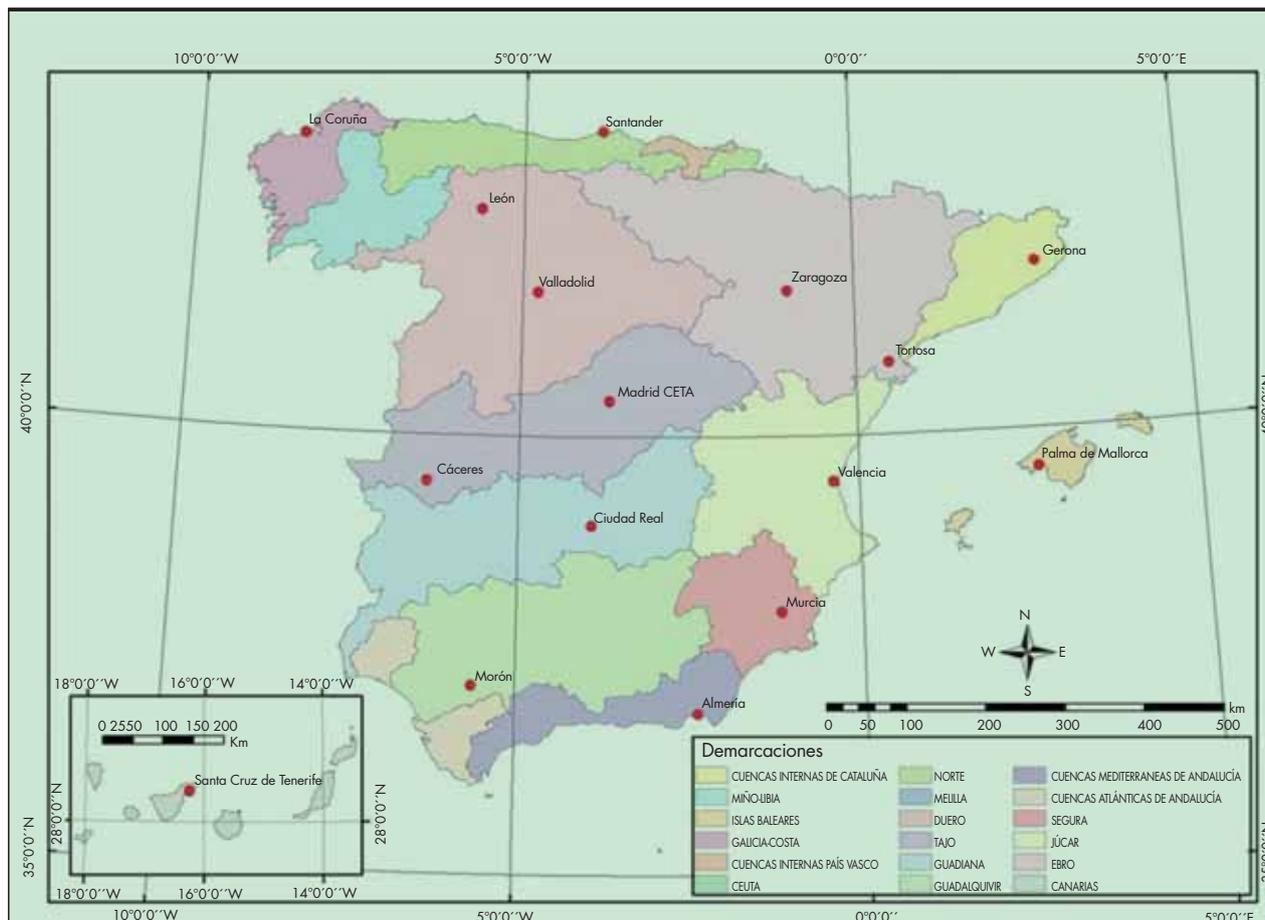


FIGURA 1. Situación de las 16 estaciones de la Red Española de Vigilancia de Isótopos en Precipitación (REVIP) y de las principales demarcaciones hidrográficas españolas.

Con la implantación de la REVIP se pretendían los siguientes objetivos:

- Identificar los parámetros geográficos y climáticos que regulan la composición isotópica de la precipitación.
- Mejorar el conocimiento sobre los eventos meteorológicos que afectan a diferentes zonas de España.
- Apoyar la investigación en hidrología, y los estudios de estimación de recursos hídricos (recarga), protección frente a la contaminación, y prevención de riesgos de avenidas e inundaciones.
- Apoyar la calibración de modelos de circulación global de la atmósfera y aportar información relevante para la comprensión de procesos meteorológicos y la evaluación del cambio climático.
- Contribuir desde España a los desarrollos e investigaciones que se realizan en el marco del OIEA.

Teniendo en cuenta estos objetivos, la REVIP se diseñó para que cubriera los siguientes aspectos:

- Amplia cobertura geográfica (Norte-Sur, Este-Oeste, Península y zonas insulares: Baleares y Canarias, con diferente entorno orográfico y distinta cota topográfica).
- Cobertura de distintas zonas climáticas (zonas húmedas y secas; continentales, litorales e insulares; atlánticas y mediterráneas).
- Adecuada representación de cuencas hidrográficas.

2.2. METODOLOGÍA DE MUESTREO Y ANÁLISIS

En las estaciones de la REVIP se toman muestras mensuales acumuladas para la determinación de isótopos estables del agua, y muestras integradas anuales para la determinación de tritio, siguiendo el protocolo de muestreo, análisis y registro establecido por el OIEA. En Madrid además, se toman muestras de eventos de precipitación. Todas las estaciones de la REVIP se sitúan en estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), excepto la de Madrid-Retiro que es gestionada y muestreada directamente por el personal del Laboratorio de Aplicaciones Isotópicas (LAI) del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX.

Para el muestreo del agua de precipitación, durante todos y cada uno de los días de cada mes, el agua de precipitación recogida en el pluviómetro es transferida por el personal de AEMET a una botella de 10L (muestra mensual integrada) que se mantiene cerrada herméticamente para evitar la evaporación. El primer día del mes siguiente, se agita el agua acumulada en la botella de 10L, y se trasvasa a otra de 0,5L hasta su completo llenado, descartándose la cantidad sobrante. Cada 6 meses las botellas almacenadas en las distintas estaciones son enviadas al LAI para su análisis. Las botellas de muestreo y la infraestructura para el transporte de las muestras son proporcionadas por el CEDEX.

En el LAI, las muestras de agua de lluvia, se analizan determinándose su contenido en isótopos estables (deuterio y oxígeno), mediante un espectrómetro de Masas Ligeras (IRMS) de doble entrada, Delta Plus Advantage. Para ello se equilibra durante 10 horas un set constituido por 20 muestras de agua de precipitación y cuatro patrones internos, catalizadas por un portador de platino. Posteriormente, se miden estas muestras en el IRMS, invirtiendo en este proceso 18 horas más. Los resultados analíticos se expresan como desviación isotópica de la muestra, δ_m , con respecto a una

escala de patrones VSMOW-SLAP (Vienna-Standard Mean Ocean Water-Standard Light Antarctic Precipitation), la cual viene dada por la expresión siguiente:

$$\delta_m = \frac{R_m - R_{VSMOW}}{R_{VSMOW}} \times 10^3 \quad (2)$$

donde R representa la relación entre el número de moléculas pesadas (moléculas del tipo $^2\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$ o $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$) y ligeras ($^1\text{H}_2^{16}\text{O}$) existentes en la muestra (subíndice m) ó en el patrón (subíndice VSMOW). La incertidumbre para los análisis realizados en el LAI es de $\pm 0,2\%$ para $\delta^{18}\text{O}$ y de $\pm 1,5\%$ para $\delta^2\text{H}$.

Las muestras de tritio son analizadas también en el LAI, componiendo una muestra anual integrada de cada una de las 15 estaciones de AEMET. Para la estación de Madrid-Retiro se miden mensualmente todas las muestras recogidas. La actividad de tritio se mide en un espectrómetro de centelleo líquido, después de un proceso previo de concentración electrolítica. El equipo utilizado es un Quantulus 1220. La Actividad Mínima Detectable en estos procesos está en el rango de 0,04-0,05 Bq/L.

Las concentraciones de tritio se expresan en unidades de tritio (UT). La unidad de tritio equivale a una relación T/H igual a 10^{-18} en número de átomos de ^3H respecto a ^1H . Las equivalencias con otras unidades de radiactividad son:

$$1 \text{ UT} = 3,1927 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/m}^3$$

$$1 \text{ UT} = 0,11813 \text{ bequerelios/litro (Bq/L)}$$

2.3. RESULTADOS

Los resultados medios obtenidos en la red REVIP para el período 2000-2006 se recogen en la Tabla 1. En el caso de los isótopos estables los valores medios de las desviaciones isotópicas y del exceso de deuterio están ponderados con la precipitación, con el objeto de eliminar el peso de datos isotópicos, que son con frecuencia extremos, y que corresponden a volúmenes escasos de precipitación de poca relevancia en hidrología. En estudios de procesos atmosféricos y climáticos puede ser de interés trabajar con los datos de contenidos isotópicos sin ponderar con la precipitación.

3. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA (^2H Y ^{18}O) DE LAS PRECIPITACIONES EN ESPAÑA

3.1. LA LÍNEA METEÓRICA LOCAL PARA ESPAÑA

El establecimiento de la línea de aguas meteóricas a escala regional o local y el conocimiento de los valores de las desviaciones isotópicas medias en una zona proporcionan la base sobre la que se pueden establecer comparaciones y desviaciones de muestras representativas de agua de los diferentes componentes del ciclo hidrológico en esa zona y un apoyo fundamental para los estudios ambientales en ese entorno.

La Figura 2 muestra la ecuación de Línea Meteórica Local obtenida en España para el periodo 2000-2006, que coincide prácticamente con la Línea Meteórica Mundial. El buen ajuste entre las poblaciones de datos globales y locales proporciona una garantía de calidad de la información aportada por la REVIP, sobre la que se apoyan los estudios y análisis que se exponen en este artículo y los que puedan hacerse en el futuro en otros trabajos previstos por el propio CEDEX, o en colaboración con otros organismos interesados.

Estación	Long (° ' ")	Lat (° ' ")	Cota (m s.n.m.)	Prec. Media (mm)	Temp. Media (°C)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	d (‰)	Tritio (2000 y 2006) (UT)
1. Vertiente atlántica									
1.a. Insulares									
Santa Cruz de Tenerife(*)	16 14 56 W	28 27 18 N	36	262,5	21,8	-2,52	-13,2	6,9	3,85-2,48
1.b. Costeras									
La Coruña (Estación Completa)	08 25 10 W	43 22 02 N	58	1064,4	15,1	-5,44	-34,7	8,9	1,99-2,61
Santander (C.M.T.)	03 47 59 W	43 29 30 N	52	1000,2	14,9	-5,71	-32,8	12,9	3,69-3,34
1.c. Continentales									
Morón. Base Aérea	05 36 57 W	37 09 30 N	87	533,2	18,2	-4,78	-28,6	9,7	2,65-2,68
Cáceres. Carretera Trujillo	06 20 22 W	39 28 20 N	405	549,6	16,4	-6,31	-41,1	9,4	3,30-2,89
Ciudad Real (Escuela de Magisterio)	03 55 11 W	38 59 22 N	627	384,5	16,0	-7,12	-47,0	10,0	3,95-4,14
Madrid. Retiro	03 40 41 W	40 24 40 N	667	444,5	15,3	-7,07	-47,6	8,9	4,60-4,03
Valladolid (Observatorio)	04 46 00 W	41 39 00 N	735	447,4	13,0	-7,97	-55,9	7,9	4,63-4,25
León. Virgen del Camino	05 38 58 W	42 35 20 N	916	516,0	11,1	-8,39	-58,9	8,2	3,88-4,09
2. Vertiente Mediterránea									
2.a. Insulares									
Palma de Mallorca (Centro Meteorológico)	02 37 35 E	39 33 20 N	3	418,6	18,7	-5,69	-35,5	10,0	4,66-3,75
2.b. Costeras									
Almería. Aeropuerto	02 23 17 W	36 50 35 N	20	188,5	19,1	-5,15	-31,8	9,5	4,40-3,44
Valencia	00 22 52 W	39 28 48 N	11	460,6	18,6	-5,03	-30,1	10,2	9,98-4,13
Tortosa. Observatorio del Ebro	00 29 29 E	40 49 14 N	48	565,4	18,1	-5,08	-30,3	10,4	4,11-3,48
2.c. Continentales									
Murcia	01 10 10 W	38 00 10 N	62	270,7	18,9	-5,26	-33,2	8,9	5,48-5,35
Zaragoza. Aeropuerto	01 00 29 W	41 39 43 N	247	346,0	15,8	-6,04	-41,0	7,3	4,53-5,58
Gerona. Aeropuerto Costa Brava (**)	02 45 37 E	41 54 05 N	127	603,2	15,1	-5,80	-37,3	9,1	5,19-4,50

(*) No se han considerado los datos del año 2000 para oxígeno-18, deuterio y exceso de deuterio.

(**) No se han considerado los datos de los años 2002 y 2003 para oxígeno-18, deuterio y exceso de deuterio.

TABLA 1. Datos geográficos meteorológicos y medios ponderados de ^{18}O , ^2H , d (exceso de ^2H), para el período 2000-2006, y datos de tritio medidos en 2000 y 2006.

Las diferencias entre estaciones son acordes con las observaciones realizadas por Craig (1961) y corroboradas por otros estudios de escala global, regional o local, que muestran que, a partir de un origen único para el vapor de agua, las aguas se empobrecen en isótopos pesados según los frentes de lluvia avanzan de las zonas más cálidas a las zonas más frías, principalmente por el efecto de la latitud y la altitud (Dansgaard, 1964). En España ambos efectos se solapan, lo que se refleja como una tendencia única de empobrecimiento isotópico, en la que se integran los ámbitos atlántico y mediterráneo (Figura 2).

Las estaciones mediterráneas de la red REVIP muestran una menor variabilidad en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, en intervalos aproximados de -5 a -6‰ y -30 a -41‰ respectivamente, que las estaciones atlánticas, que muestran aproximadamente valores de $\delta^{18}\text{O}$ en el intervalo de -5 a -8‰ y de

$\delta^2\text{H}$ en el intervalo de -28 a -59‰, debido a que estas últimas se localizan en un intervalo mayor de altitud.

La estación de Santa Cruz de Tenerife muestra una localización extrema, con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en torno al 2,5‰ y -13‰ respectivamente (Figura 2), ya que se separa del contexto climático general del resto de las estaciones por tener un clima cálido y estar próxima a uno de los focos origen de la precipitación en nuestro país, el Atlántico tropical. La precipitación de esta estación puede representar los primeros estadios de condensación del vapor de agua marina según el modelo de circulación atmosférica global (Rozanski et al., 1993).

El valor medio del exceso de deuterio, parámetro indicativo de la fuente de procedencia del vapor de agua, es de 9,4 para España peninsular y Baleares, con un máximo en Santander y un mínimo en Zaragoza (Tabla 1).

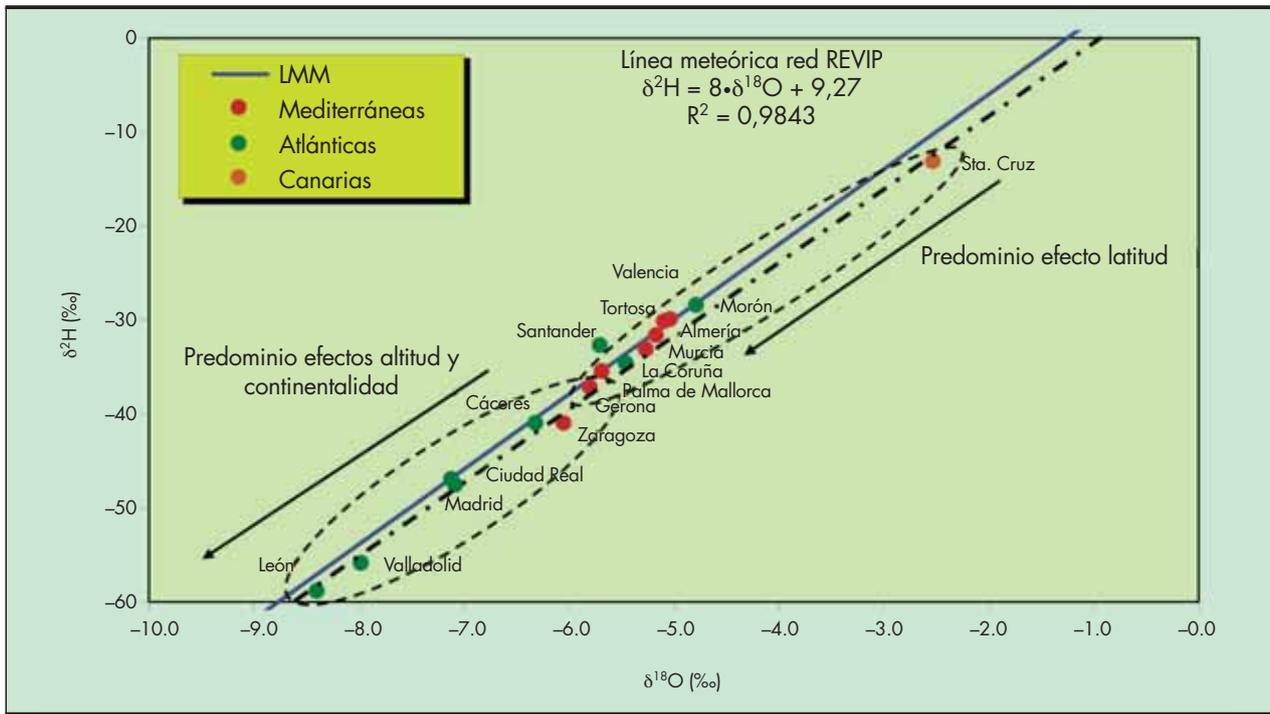


FIGURA 2. Relación $\delta^{18}\text{O}$ SMOW - $\delta^2\text{H}$ SMOW para las medias ponderadas del periodo 2000-2006 en todas las estaciones de la red REVIP diferenciadas por su situación hidrográfica (LMM, Línea Meteorológica Mundial: $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$; Línea meteorológica de España peninsular y Baleares: $\delta^2\text{H} = 8,49 \cdot \delta^{18}\text{O} + 12,40$).

3.2. LA LATITUD

La fuerte correlación lineal que existe entre la composición isotópica media anual de la precipitación y la temperatura media anual del aire a nivel del suelo controla la posición de la precipitación en la Línea Meteorológica Mundial. Esta relación da lugar a un descenso del orden del 1‰ en el valor medio anual de $\delta^{18}\text{O}$ con cada 1,1 a 1,7°C de descenso en la

temperatura media anual (Clark y Fritz, 1997). El resultado de esta variación es que la precipitación a mayores latitudes tiene una composición isotópica más ligera que la precipitación en el ecuador geográfico, de acuerdo con el modelo de circulación atmosférica global.

La Figura 3 muestra este efecto de la latitud, tanto en la zona atlántica como en la mediterránea, por las claras diferen-

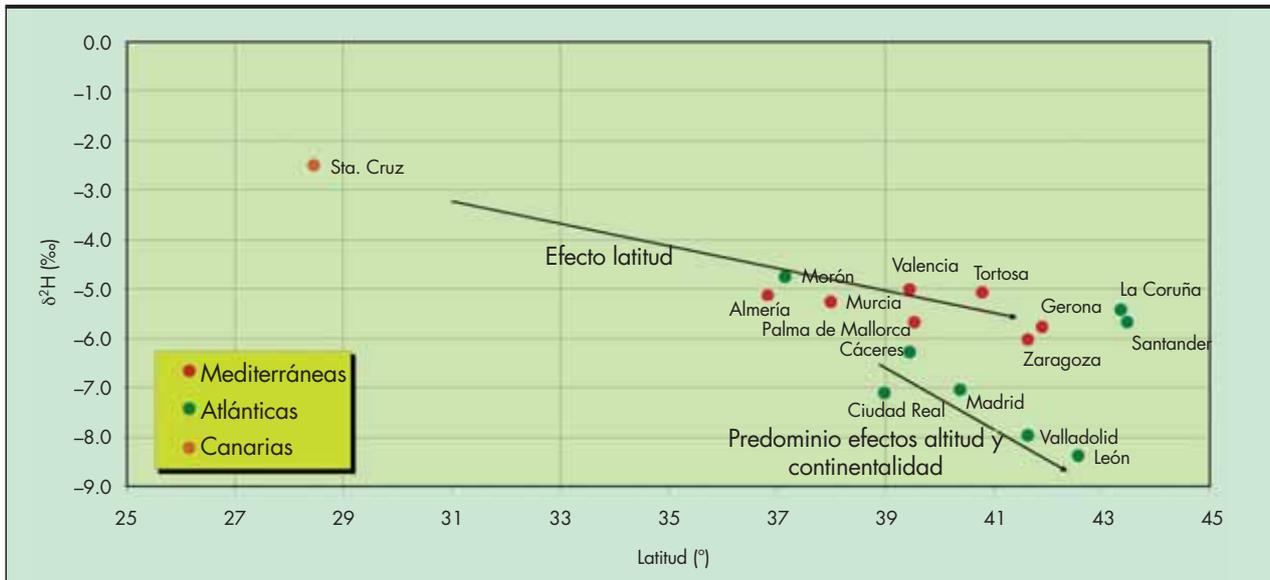


FIGURA 3. Relación Latitud - $\delta^{18}\text{O}$ para las medias del periodo 2000-2006 en todas las estaciones de la red REVIP.

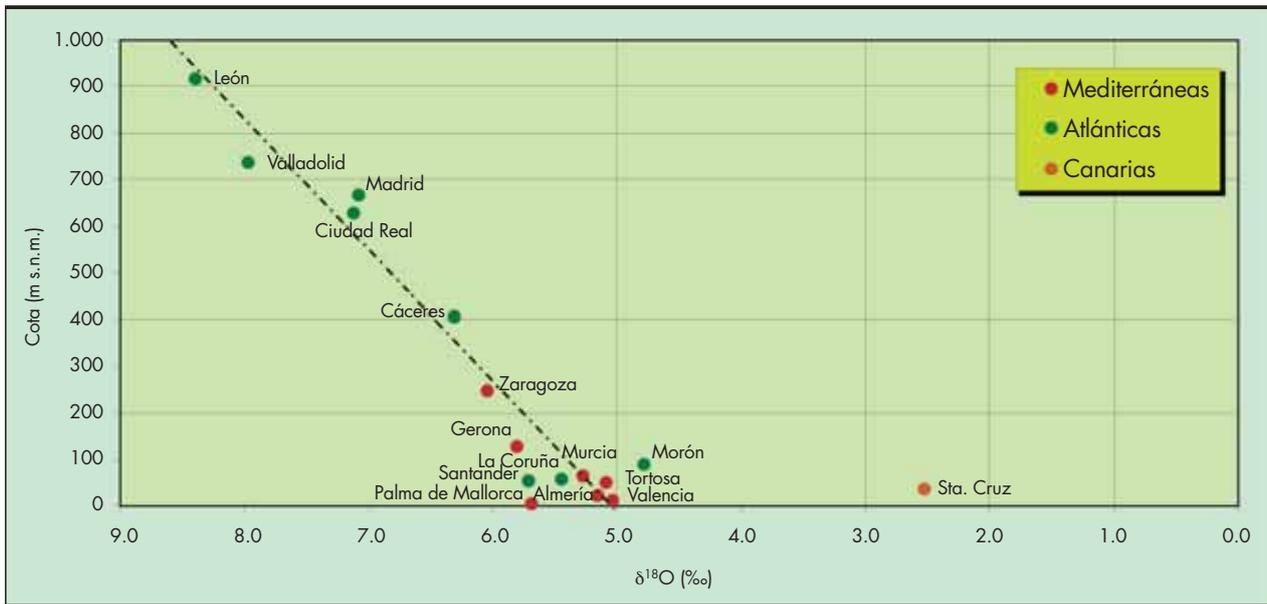


FIGURA 4. Relación $\delta^{18}\text{O}$ - Cota para las medias ponderadas del período 2000-2006 en todas las estaciones de la red REVIP, diferenciadas por su situación hidrográfica.

cias observables en la composición isotópica de la precipitación en España entre las estaciones localizadas más al norte (La Coruña, Santander y Gerona) y las ubicadas más al sur (Santa Cruz de Tenerife, Morón y Almería). Las precipitaciones más enriquecidas corresponden a las estaciones sureñas y más cálidas, de forma coherente con el modelo de relación con la temperatura anteriormente expuesto. Si se exceptúa la estación de Santa Cruz de Tenerife (28°N), las estaciones de la REVIP están distribuidas, en su mayor parte, en un intervalo pequeño de 7° de variación de la latitud (Tabla 1), entre 37°N (Morón, Sevilla) y 43°N (Santander) en la vertiente atlántica, y 36°N (Almería) y casi 41°N (Gerona), pese a lo cual, el efecto de la latitud es suficientemente notorio en la Península Ibérica.

3.3. LA ALTITUD

El mismo efecto de la temperatura en la composición isotópica del agua de lluvia que se observa asociado a la latitud, tiene lugar respecto a la cota topográfica. El empobrecimiento en los isótopos pesados del oxígeno y el hidrógeno con la altitud, debido a las menores temperaturas que se dan a mayores cotas, es de $-0,15$ a $-0,5\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ y de -1 a -4‰ para $\delta^2\text{H}$ con cada 100 m de ascenso en altitud como medias globales (Clark y Fritz, 1997).

Este efecto de la altitud, de notable interés en hidrología por su aportación a la hora de distinguir el origen de las aguas superficiales y subterráneas, es claramente notable en la Península Ibérica. Los gradientes de las medidas son de $-0,35\text{‰}/100\text{m}$ para $\delta^{18}\text{O}$ (Figura 4) y de $-2,9\text{‰}/100\text{m}$ para $\delta^2\text{H}$. La utilización de estos gradientes para cotas mayores sería factible ampliando la red de vigilancia con estaciones a cotas superiores a los 1000 m.

3.4. LA CONTINENTALIDAD

Otro efecto de la correlación existente entre las concentraciones medias de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de la precipitación y la temperatura se manifiesta en que las precipitaciones suele tener valores más negativos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ según aumenta la distancia a la costa (Rozanski et al., 1993). Este efecto tam-

bién se observa en España, de modo que las estaciones continentales se localizan en el extremo más negativo de la Línea Meteorológica Local, mientras que las estaciones costeras se encuentran en el extremo menos negativo (Figura 2). Sin embargo, está enmascarado por el empobrecimiento isotópico con la cota ya que, la topografía de la Península Ibérica está dominada por una meseta, en la que las estaciones más continentales son también las más altas (Figura 5).

Un análisis de los datos mensuales de las oscilaciones de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ muestra que éstas son mayores en las estaciones continentales que en las costeras o en las islas para latitudes similares (Figura 6). Por su distancia al mar, que sirve de regulador térmico, las estaciones continentales suelen tener mayor oscilación de las temperaturas. Dado que el fraccionamiento está ligado a la temperatura, la concentración isotópica tiene una mayor oscilación lejos que cerca de la costa.

En la Figura 6 se observa también una tendencia al aumento de los valores medios de Gerona a Almería y de León a Morón, tanto para $\delta^{18}\text{O}$ como para $\delta^2\text{H}$, que hace patente la validez del modelo de circulación atmosférica global y de correlación de la composición isotópica de la precipitación con la latitud y la cota topográfica antes mencionado.

3.5. MODELO DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

El análisis cuantitativo realizado hasta aquí muestra que la distribución espacial de las características isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) de las aguas de precipitación en España puede explicarse en su mayor parte con un modelo de correlación con la latitud y la cota topográfica, similar al propuesto por Bowen y Wilkinson (2002) a escala global.

Diversas evaluaciones de los datos de GNIP a escala global (Dansgaard, 1964; Yurtsever y Gat, 1981, Rozanski et al., 1993, Bowen y Wilkinson, 2002) han relacionado la variabilidad de la composición isotópica de las aguas de lluvia con parámetros geográficos y climatológicos como la latitud, cota, distancia a la costa e intensidad de precipitación. Recientemente, la modelación de la distribución de la composición isotópica de la precipitación en función de estos pará-

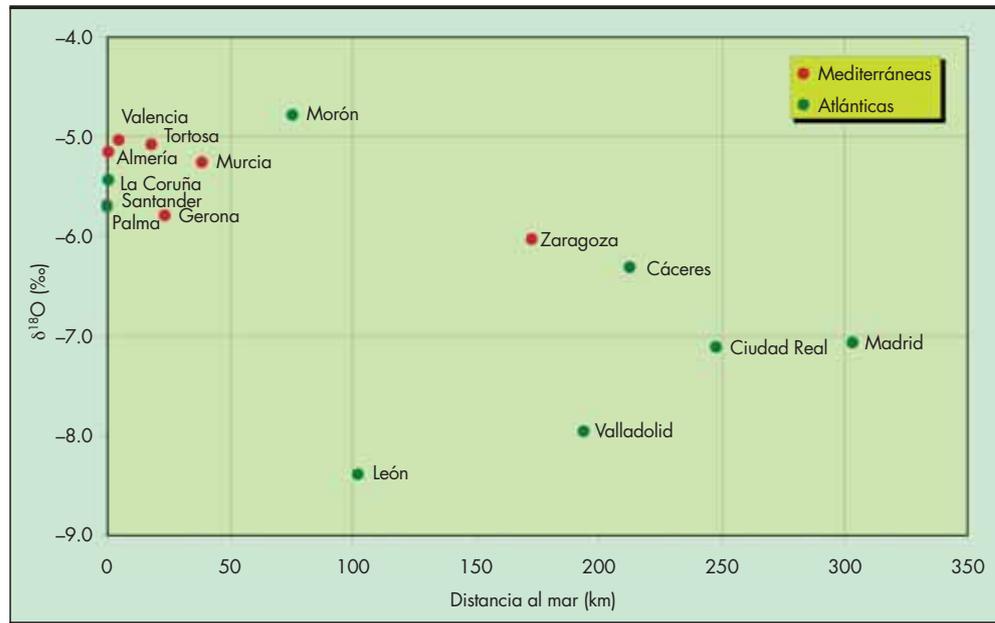


FIGURA 5. Relación $\delta^{18}\text{O}$ – Distancia al mar para las medias ponderadas del período 2000-2006 en las estaciones de la red REVIP de la península y las islas Baleares, diferenciadas por su situación hidrográfica.

metros, y su combinación con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), ha permitido la cartografía continua de la distribución de $\delta^{18}\text{O}$ en varios países (Dutton et al., 2005, Lykoudis y Argiriou, 2007).

Como se ha visto en los apartados anteriores, muchas de las observaciones realizadas en estos estudios globales son de aplicación regional y local. El territorio de España incluye ambientes continentales, costeros y representativos de islas oceá-

nicas; además está afectado por la influencia combinada del Océano Atlántico y del Mar Mediterráneo, y tiene una orografía accidentada con cotas que sobrepasan los 3000 m tanto en la Península como en Canarias. El juego múltiple de los factores antes mencionados favorece en España la aplicación de estudios isotópicos, dado que su geografía y climatología son tan variadas que dejan una huella fácil de seguir y muy útil para el estudio del ciclo hidrológico y el cambio climático.

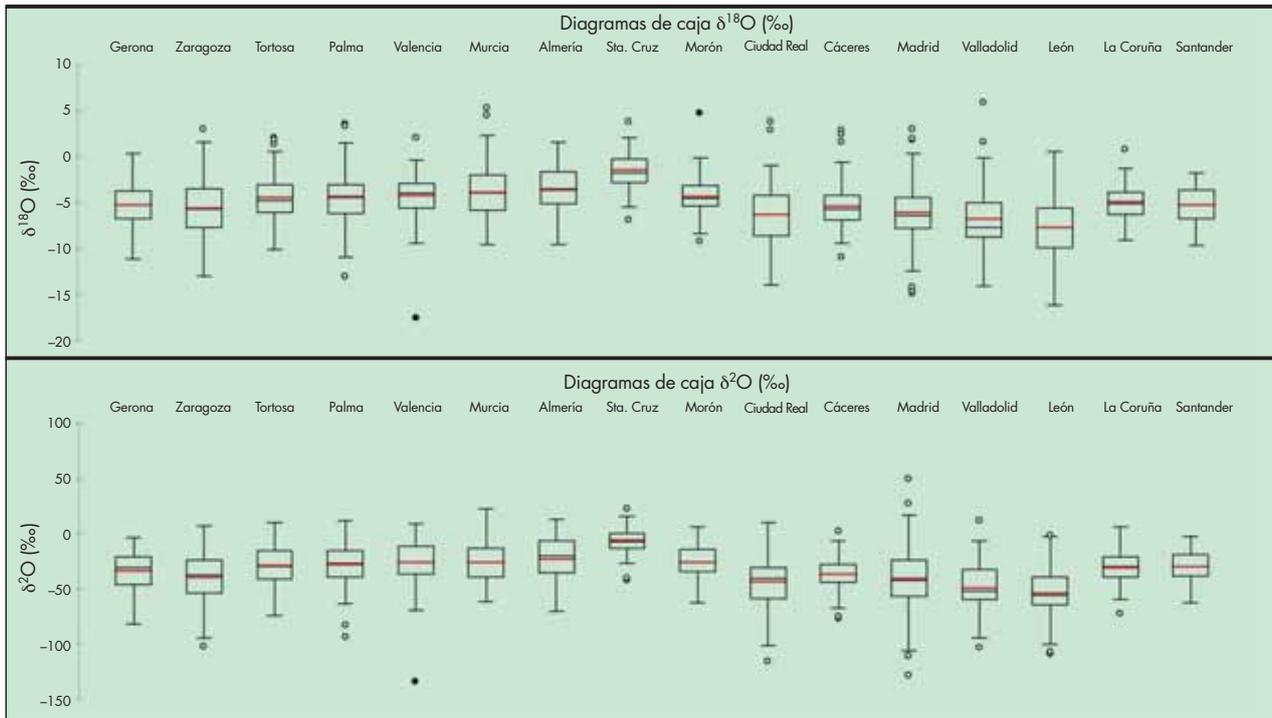


FIGURA 6. Diagramas de caja para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de los datos medios mensuales de todas las estaciones de la red española para el período 2000-2006. (El orden de representación es según las agujas del reloj, empezando por el Mediterráneo al noreste y finalizando por el Cantábrico al norte).

El estudio de los datos isotópicos de REVIP ha permitido establecer un modelo de variación de $\delta^{18}\text{O}$ en la España peninsular y Baleares (Díaz et al.2007) que puede permitir la cartografía continua de las desviaciones isotópicas en la precipitación en España. Para obtener dicho modelo se siguió la aproximación utilizada por Bowen y Wilkinson (2002) a escala planetaria, en la que se aplica una técnica de regresión en dos pasos para obtener los efectos de la latitud y la cota (como las principales variables que influyen en el proceso de fraccionamiento isotópico) en la variación de $\delta^{18}\text{O}$.

La función que define este modelo, utilizando los datos de REVIP entre 2000 y 2004, es (Díaz et al., 2007):

$$\delta^{18}\text{O} = -0,0025\text{LAT}^2 + 0,0922\text{LAT} - 0,0034\text{ALT} - 4,9298 \quad (3)$$

donde LAT es la latitud en grados decimales y ALT es la cota en m s.n.m.

Esta ecuación proporciona un modelo de distribución continua utilizable con herramientas de georreferenciación (SIGs), para su aplicación a estudios hidrológicos (Rodríguez Arévalo et al., 2007). Los últimos avances en este sentido están teniendo lugar en el marco de un Proyecto Coordinado de Investigación del OIEA titulado "Geostatistical analysis of spatial isotope variability to map the sources of water for hydrology and climate studies", en el que participa el CEDEX en colaboración con el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), junto con organismos de otros 15 países miembros.

4. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y VARIABILIDAD TEMPORAL DEL TRITIO (^3H) EN LAS PRECIPITACIONES EN ESPAÑA

La principal utilidad del tritio para estudios hidrológicos se basa en el hecho de que, durante los últimos 53 años, las precipitaciones a escala de todo el globo y, particularmente, las del Hemisferio Norte, han contenido concentraciones de tritio muy superiores a las producidas de forma natural, debido a los ensayos termonucleares realizados en la atmósfera, principalmente, durante las décadas de los años 50 y 60. Este tritio ha producido el marcado natural de todas las aguas meteóricas del globo y, por tanto, también de las aguas subterráneas en su franja más superficial.

Para poder interpretar de forma correcta los valores de concentración de tritio obtenidos en aguas subterráneas, es necesario conocer las concentraciones de las precipitaciones de la zona del estudio durante los últimos 50 años. Estas concentraciones son conocidas en España gracias a las medidas realizadas por el CEDEX desde el año 1970 en las precipitaciones medias de diferentes zonas de la Península Ibérica, y se han sistematizado desde la creación de la red REVIP en 2000. Los datos para el período anterior al año 1970 se determinan haciendo uso del modelo general de distribución del tritio en las precipitaciones para el Hemisferio Norte obtenido a partir de los datos de la red GNIP.

En la distribución espacial de las medidas de la red REVIP realizadas por el CEDEX se observa un ligero incremento de la actividad de tritio en la precipitación hacia el

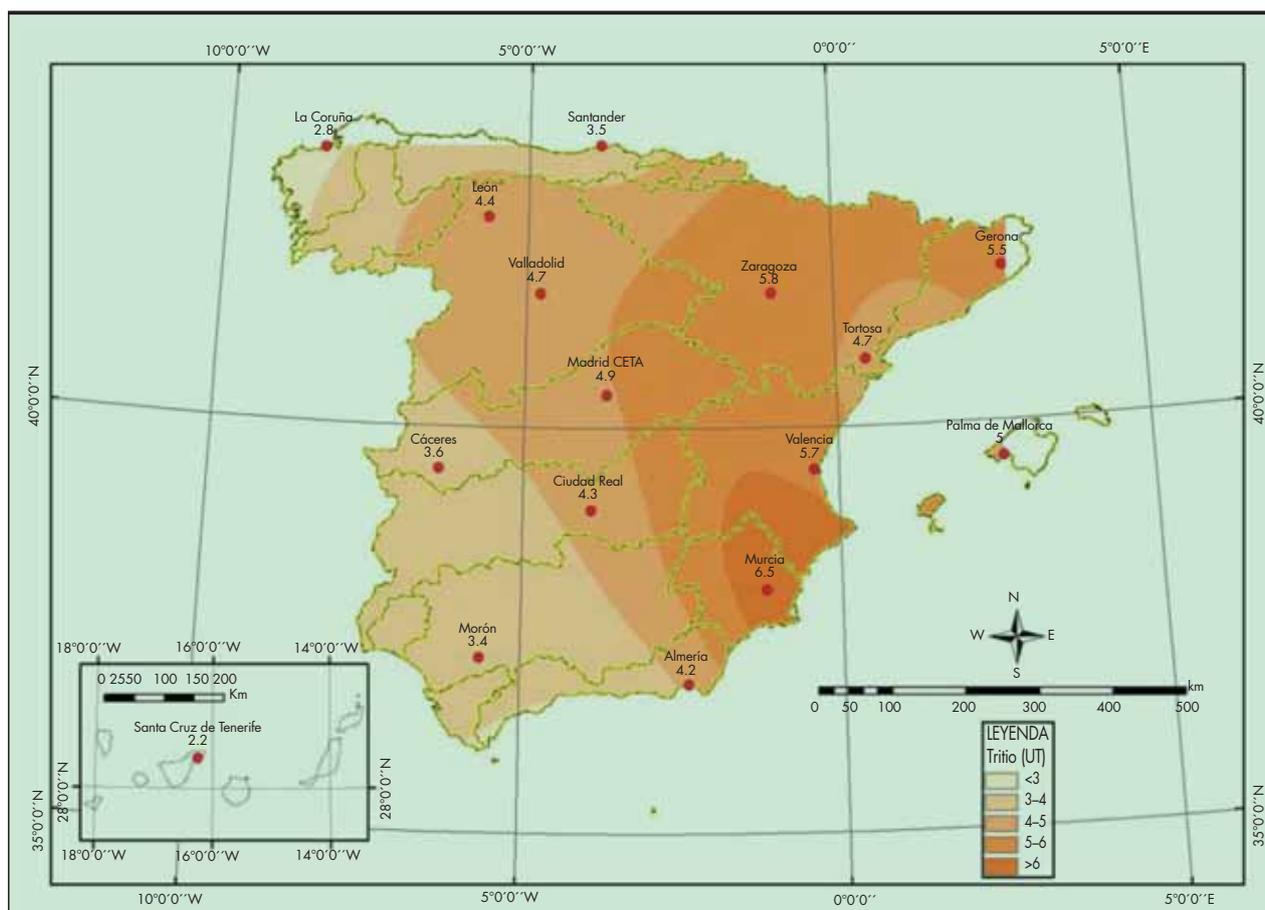


FIGURA 7. Valores medios de concentración de tritio en precipitación del periodo 2000-2006 para las estaciones de la red REVIP.

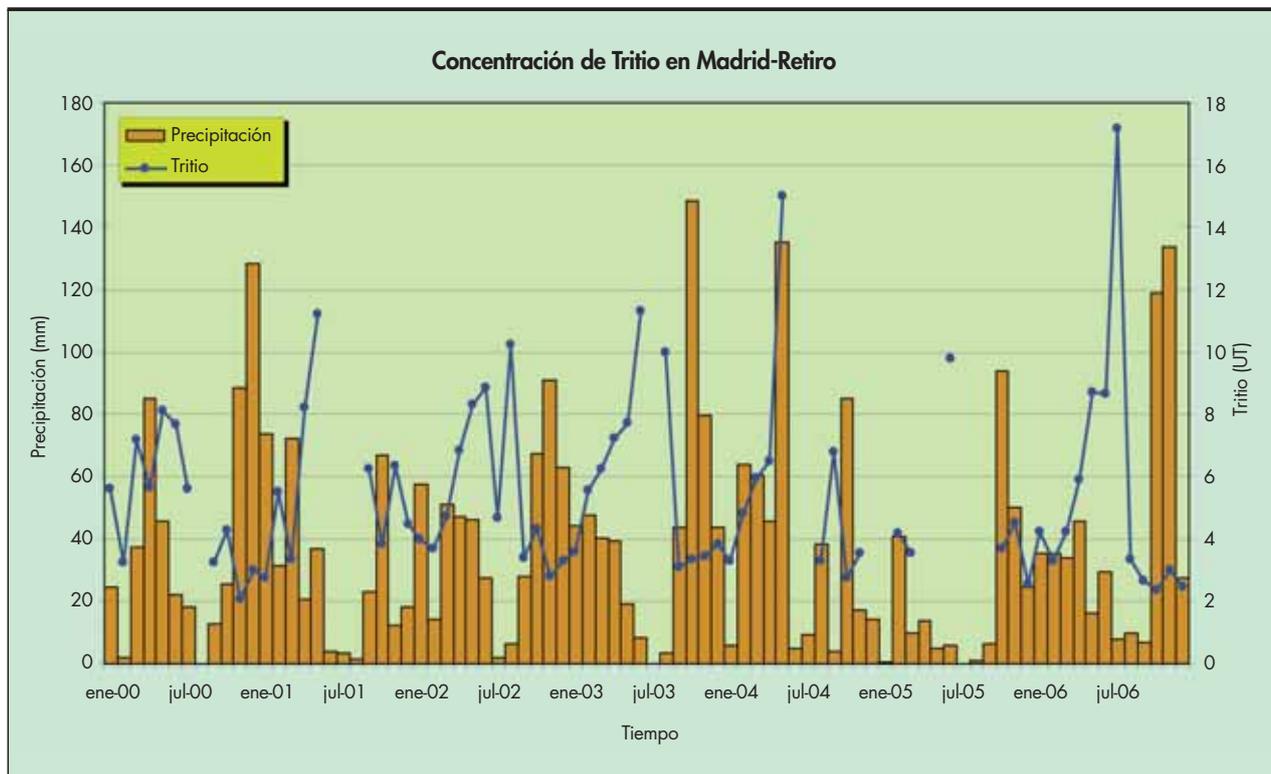


FIGURA 8. Evolución de los valores mensuales de precipitación y concentración de tritio en la estación de Madrid-Retiro durante el período 2000-2006.

Este (Figura 7), reflejo de la circulación preferente de los frentes que dan origen a la precipitación en la España peninsular en ese mismo sentido, y a la recirculación del tritio por evaporación en el continente (Erikson, 1983). Este trazador muestra su utilidad para la identificación de procesos atmosféricos en aquellos casos en los que la señal de los isótopos estables está enmascarada por el solape de distintos factores climáticos y geográficos (IAEA, 2005), como es el caso de la Península Ibérica.

La variación estacional de la concentración de tritio que se observa en la precipitación de Madrid (Figura 8) refleja el efecto de las variaciones bruscas de la tropopausa en las latitudes altas durante la primavera, efecto común a escala global según Rozanski et al. (1991).

5. CONCLUSIONES

Los resultados de isótopos estables aportados por la Red de Vigilancia de Isótopos en Precipitación (REVIP) durante el período 2000-2006 muestran una distribución similar a la de la Línea Meteorológica Mundial, con valores de exceso de deuterio cercanos al 10‰. Las estaciones atlánticas presentan valores de $\delta^{18}\text{O}$ en el intervalo de -5 a -8 ‰ y de $\delta^2\text{H}$ entre -28 y -59 ‰, con la excepción de Santa Cruz de Tenerife, con valores en torno al 2,5‰ y -13 ‰ respectivamente. Las estaciones mediterráneas muestran valores de $\delta^{18}\text{O}$ en un intervalo de -5 a -6 ‰ y de $\delta^2\text{H}$ entre -30 y -41 ‰, con una menor dispersión que las estaciones atlánticas.

La proximidad de esta distribución a la Línea Meteorológica Mundial proporciona una garantía de la calidad de la información aportada por esta red, lo que habilita la aplicación de sus resultados como apoyo en estudios e investigaciones medioambientales.

La distribución espacial de las características isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) de las aguas de precipitación en España puede explicarse en su mayor parte con un modelo de correlación con las variables geográficas latitud y cota topográfica, bajo el que subyace la fuerte correlación de éstas con la distribución de la temperatura. El efecto de la altitud es claramente notable en España, observándose gradientes de $-0,35$ ‰/100m para $\delta^{18}\text{O}$, aunque la variación isotópica debido a la latitud (en un intervalo de 7° en la Península) es también visible.

El modelo mencionado facilita el trazado y la caracterización espacial de las aguas meteorológicas, tanto de las aguas superficiales como de las aguas subterráneas que constituyen los recursos hídricos de nuestro país.

En España el efecto de la latitud se integra con el efecto de la cota para producir una tendencia única de empobrecimiento isotópico de las precipitaciones hacia mayor latitud y cota, en la que no se distinguen claramente los ámbitos atlántico y mediterráneo.

La actividad de tritio en la precipitación en España muestra un ligero incremento hacia el Este, reflejo de la circulación preferente de los frentes que dan origen a la precipitación en la España peninsular en ese mismo sentido, y a la recirculación del tritio por evaporación en el continente. En cuanto a su variabilidad estacional, observada en la estación de Madrid, ésta presenta oscilaciones también presentes en otras estaciones de la red global del OIEA, como consecuencia de procesos atmosféricos globales.

Las conclusiones de este artículo se basan en el análisis de los valores medios de la composición isotópica de la precipitación en España y son aplicables en estudios generales en este ámbito geográfico. Estudios locales del ciclo hídrico requieren normalmente el análisis de las variaciones temporales de la composición isotópica y de las variaciones espaciales a distintas escalas, de mayor detalle.

6. AGRADECIMIENTOS

La colaboración y ayuda del personal de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y del CEDEX fueron primordiales y proporcionaron las muestras y los datos básicos para este artículo. Este artículo se ha realizado en el marco del Convenio CEDEX/IGME para la creación del Laboratorio Virtual Conjunto de Ciencia y Técnica Isotópica. Los autores quieren reconocer también el impulso dado por Luis Araguás-Araguás (OIEA) a la implantación de la red REVIP en sus comienzos.

7. REFERENCIAS

- Araguás-Araguás, L.J. y Díaz Teijeiro, M.F. (2005). Isotope composition of precipitation and water vapour in the Iberian Peninsula. En: *Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate*. IAEA-TECDOC-1453. Vienna. 173-190. (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1453_web.pdf).
- Bowen, G.J. y Wilkinson, B. (2002). Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in meteoric precipitation. *Geology*, 30(4), 315-318.
- Clark, I. y Fritz, P. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers. Boca Raton, USA. 328 pp.
- Cook P. y Herczeg, W., Eds. (2001). *Environmental tracers in subsurface hydrology*. Kluwer Academic Publishers. Boston. 529 pp.
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science, New Series*, 133(3465), 1702-1703.
- Craig, H. y Gordon, L.I. (1965). Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and the marine atmosphere. In *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures* (Tongiorgi, E., Ed.). Consiglio Nazionale Delle Ricerche Laboratorio di Geologia Nucleare. Pisa. 9-130.
- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-468.
- Díaz, M.F., Rodríguez, J., Pérez, J.E., Castaño, S., y Araguás, L. (2007). Factors controlling the stable isotopic composition of recent precipitation in Spain. En *Advances in Isotope Hydrology and its Role in Sustainable Water Resources Management (IHS-2007)*. Proceedings Series. Proceedings of an International Symposium on Advances in Isotope Hydrology and its Role in Sustainable Water Resources Management (IHS-2007), Vol. 1. International Atomic Energy Agency. Vienna. pp 239-249. (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1310_web.pdf).
- Dincer T., Al-Mugrin A. y Zimmermann U. (1974). Study of the infiltration and recharge through the sand dunes in arid zones with special reference to stable isotopes and thermonuclear tritium. *Journal of Hydrology*, 23, 79-109.
- Dutton, A., Wilkinson, B.H., Welker, J.M., Bowen, G.J. y Lohmann, K.C. (2005). Spatial distribution and seasonal variation in $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ of modern precipitation and river water across the conterminous USA. *Hydrological Processes*, 19, 4121-4146.
- Erikson, E. (1983). Stable isotopes and tritium in precipitation. En: *Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology*. T.R.S. n° 91. IAEA. Vienna. 203-222.
- Gat, J.R. (1980). The isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation. En: *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, (Fritz, P. y Fontes, J.C., Eds.), vol. 1. Elsevier. Amsterdam. 21-47.
- Gat, J.R. y Dansgaard, W. (1972). Stable isotope survey of the fresh water occurrences in Israel and the Northern Jordan Rift Valley. *Journal of Hydrology*, 16, 177-212.
- Griffiths, H. Ed. (1998). *Stable isotopes. Integration of biological, ecological and geochemical processes*. Taylor and Francis Group. 438 pp.
- IAEA (2001). *Study of environmental change using isotope techniques*. C&S Papers Series 13/P. Proceedings of an International Conference, Vienna (23-27 abril 2001). 531 pp.
- IAEA (2005). *Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate*. IAEA-TECDOC-1453. Vienna. 223 pp. (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1453_web.pdf).
- IAEA (2007). *Advances in isotope hydrology and its role in sustainable water resources management*. Proceedings Series. Proceedings of a International Symposium HIS-2007, Vienna (21-25 mayo 2007). 2 Vols. 687 y 696 pp. (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1310_web.pdf y http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1310Vol2_web.pdf).
- Kendal, C. y McDonnell, J.J., Eds. (2006). *Isotope tracers in catchment hydrology*. Elsevier. Amsterdam. 839 pp.
- Lykoudis, S.P. y Argiriou, A.A. (2007). Gridded data set of the stable isotopic composition of precipitation over the eastern and central Mediterranean. *Journal of Geophysical Research*, 112, D18107, doi:10.1029/2007JD008472.
- Merlivat, L. y Jouzel, J. (1979). Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 84, N° C8. 5029-5033.
- Michener, R., y Lajtha, K., Eds. (2007). *Stable isotopes in ecology and environmental science*. Blackwell Publishing Ltd. 566 pp.
- Mook, W.G., Ed. (2002). *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico. Principios y aplicaciones*. Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Guías y Manuales N° 1. Madrid. 596 pp.
- Münnich, K.O. (1983). Moisture movement in the unsaturated zone. En: *Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology*, T.R.S. n° 91. IAEA. Vienna. 203-222.
- Plata, A. (1994). *Composición isotópica de las precipitaciones y aguas subterráneas de la Península Ibérica*. M-39. CEDEX. Madrid. 139 pp.
- Robertson, W.D. y Cherry, J.A. (1989). Tritium as an indicator of recharge and dispersion in a groundwater system in central Ontario. *Water Resources Research*, 25, 1097-1109.
- Rodríguez-Arévalo, J., Castaño, S., Díaz-Teijeiro, M.F., Marcos, L.A. y Vázquez-Marroquín, M. (2007). Modelo de distribución espacial continua de $\delta^{18}\text{O}$ en la precipitación en la provincia de Burgos. Desarrollo de la metodología y aplicación en hidrología. *Geogaceta*, 43, 79-82.
- Rozanski, K., Gonfiantini, R. y Araguas-Araguas, L. (1991). Tritium in the global atmosphere: distribution patterns and recent trends. *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 17, S523-S536.
- Rozanski, K., Araguas-Araguas, L. y Gonfiantini, R. (1993). Isotopic patterns in modern global precipitation. *Geophysical Monograph* 78. American Geophysical Unión. 36 pp.
- Scanlon, B.G., Healy, R.W. y Cook, P.G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 18-39.
- Sodeman, H., Masson-Delmotte, V., Schwierz, C., Vinther B.M. y Wernli, H. (2008). Interannual variability of Greenland winter precipitation sources: 2. Effects of North Atlantic Oscillation variability on stable isotopes in precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 113, D12111, doi:10.1029/2007JD009416.
- Yurtsever, Y. y Gat, J.R. (1981). Atmospheric waters. En: *Stable isotopes Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle* (Gat, J.R. y Gonfiantini, R., Eds.). IAEA, Vienna. pp. 103-139.