

# 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

*Continuous spatial distribution model of  $\delta^{18}\text{O}$  in recent precipitation in Burgos province (Spain). Methodology development and application in hydrology*

J. Rodríguez-Arévalo <sup>(1,4)</sup>, S. Castaño <sup>(1)</sup>, M.F. Díaz-Teijeiro <sup>(2,4)</sup>, L.A. Marcos <sup>(3)</sup> y M. Vázquez-Marroquín <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Instituto Geológico y Minero de España. C/ Ríos Rosas, 23. 28003-Madrid. jra@igme.es; s.castano@igme.es.

<sup>(2)</sup> Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Alfonso XII, 3. 28014-Madrid. marife.diaz@cedex.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Química. Escuela Universitaria Politécnica. Universidad de Burgos. Avda. de Cantabria s/n. 09006-Burgos. qplamn@ubu.es.

<sup>(4)</sup> Laboratorio Conjunto IGME/CEDEX de Hidrología Isotópica. lab-igme-cedex@cedex.es.

## ABSTRACT

*The main aim of this paper is to develop a methodology to obtain a continuous spatial distribution of isotopic composition in precipitation over Spain. The methodology applies Geographic Information Systems (GIS) tools to a polynomial model that relates  $\delta^{18}\text{O}$  to latitude and elevation. First steps in the development of this methodology have been made and tested in a limited part of Spain, the province of Burgos, where the resulting map of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation has been compared with isotope data from river water and ground-water.*

**Key words:** Stable isotopes, precipitation, GIS tools, hydrogeology.

Geogaceta, 43 (2007), 79-82  
ISSN: 0213683X

## Introducción

El estudio de la composición isotópica de las aguas meteóricas ha facilitado en gran manera en las últimas décadas el conocimiento sobre el funcionamiento general del ciclo hidrológico, y ha mostrado ser clave en numerosos estudios aplicados, que van desde la estimación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, a la evaluación de su calidad, la investigación en cambio climático, y el estudio de ecosistemas.

La investigación de la composición isotópica de la parte atmosférica del ciclo hidrológico ha sido auspiciada y organizada por 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, <http://isohis.iaea.org/> en 2007).

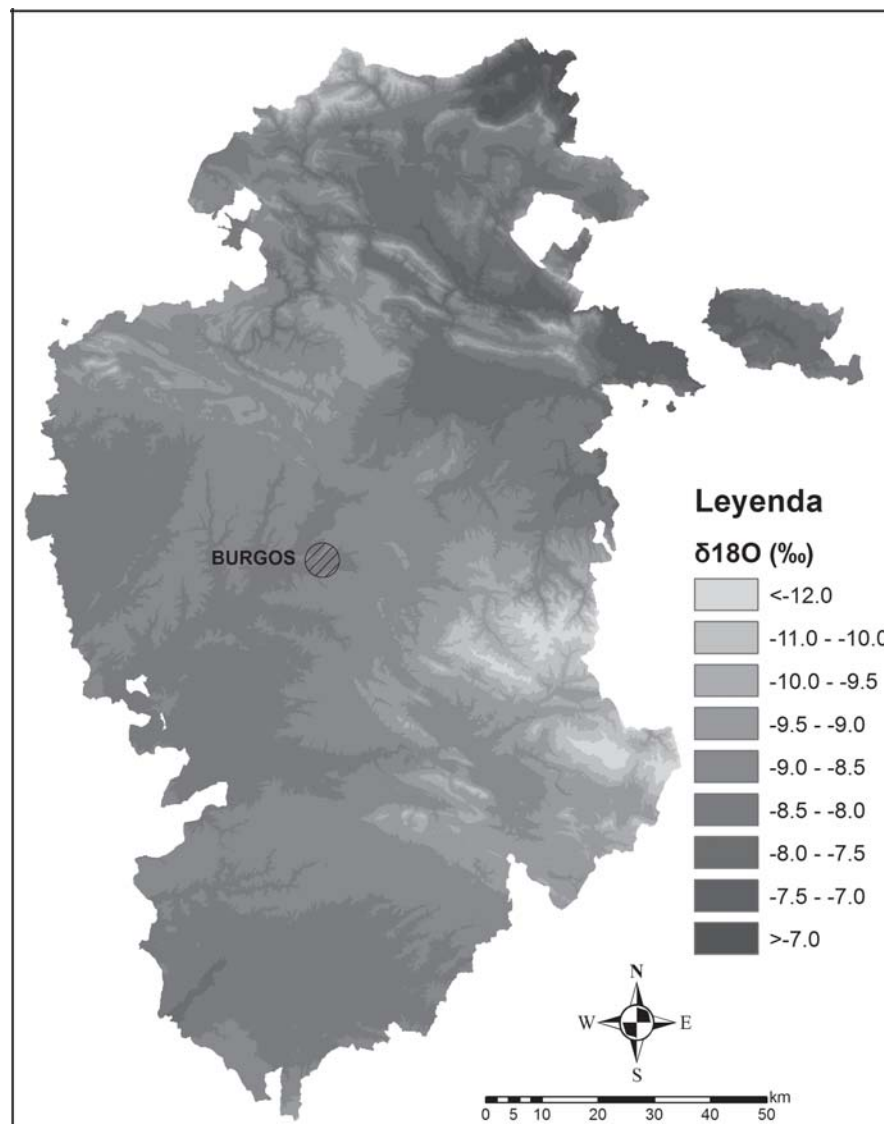
La Red Española de Vigilancia de Isótopos en la Precipitación (REVIP), que forma parte de GNIP, está constituida por 16 estaciones en las que se recogen y analizan muestras acumuladas

mensuales de agua de lluvia. Está operativa y es gestionada desde 2000 por el Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA) del CEDEX, en colaboración con el Instituto Nacional de Meteorología (INM).

Recientemente, Díaz *et al.* (2007) han analizado los datos de cinco años de funcionamiento de REVIP (2000-2004) y han avanzado en el conocimiento de las características isotópicas de la precipitación en España y los factores que las regulan. Díaz *et al.* (2007) muestran que la distribución espacial de las características isotópicas ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) de las aguas de precipitación en la España peninsular y Baleares puede explicarse, para sus valores ponderados plurianuales, con un modelo de correlación con la latitud y la cota topográfica, bajo el que subyace la fuerte correlación de estas características isotópicas con la temperatura (Dansgaard, 1964; Yurtsever y Gat, 1981, Rozanski *et al.*, 1993, Clark y Fritz, 1997). En el presente artículo se muestra una metodología que permite aplicar este modelo de forma continua a un sector limitado del territorio peninsular español, la provincia de Burgos, en la

que existe un proyecto en marcha sobre hidrogeología urbana en el que es necesaria la diferenciación del origen de distintos tipos de aguas.

La ciudad de Burgos se sitúa mayoritariamente en materiales aluviales de los ríos Arlanzón y Vena, que son zonas de descarga de acuíferos neógenos y mesozoicos más extensos. Estas descargas subterráneas condicionan la calidad y la cantidad de las aguas del río Arlanzón aguas abajo de la ciudad. Existe también una estrecha relación entre los ríos y los acuíferos aluviales en esta zona. En la ciudad se producen afecciones al acuífero aluvial modificando el sistema de flujo, las relaciones entre los diferentes acuíferos y la calidad de sus aguas. Uno de los métodos que se están empleando para caracterizar los distintos tipos de agua que intervienen en el sistema hídrico y entender mejor su funcionamiento hidrogeológico son los isótopos estables del agua ( $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$ ), y el  $^3\text{H}$ , incluidas las características del agua de precipitación en las cuencas vertientes a esta zona. Se ha verificado la utilidad de la metodología desarrollada en este estudio para la



**Metodología de construcción de un mapa continuo de δ18O en precipitación**

El estudio de los datos isotópicos de REVIP durante el período 2000-2004 ha permitido establecer un modelo de variación de δ18O en la España peninsular y Baleares (Díaz *et al.* 2007). 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 (las principales variables que influyen en el proceso de fraccionamiento isotópico) en la variación de δ18O. La función que define este modelo es (Díaz *et al.*, 2007):

$$\delta^{18}O = -0.0025LAT^2 + 0.0922LAT - 0.0034ALT - 4.9298 \quad (1)$$

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

Sobre la base de ese modelo y con ayuda de herramientas de Sistema de Información Geográfica (SIG) se ha realizado un mapa continuo de la variación de δ18O para la provincia de Burgos, siguiendo una aproximación similar a la de Dutton *et al.* (2005) para los Estados Unidos, en la que se modifica el modelo global de Bowen y Wilkinson (2002) y se realiza una cartografía de la distribución de δ18O para ese país considerando exclusivamente los valores ponderados de su red de isótopos en precipitación.

La base para la construcción del mapa de δ18O para la provincia de Burgos ha sido un modelo digital del terreno (MDT) del Servicio Geográfico del Ejército, con paso de malla de 100m. Esta información cartográfica, originalmente en formato matricial, se ha tratado con ArcGis 9.1 de ESRI, con lo cual se han debido transformar a formato vectorial.

Los centros de las celdas del MDT, originalmente con un sistema de proyección UTM, han debido ser proyectadas en coordenadas geográficas con formato decimal. A la tabla que contiene simultáneamente la información de latitud y cota se ha aplicado el modelo de Díaz *et al.* (2007), obteniéndose así un mapa continuo de δ18O en la precipitación para la provincia de Burgos en formato vectorial. Con las transformaciones necesarias, el mapa se convierte en formato matricial (Fig. 1). La mayor resolución utilizada en la Fig. 1 es de un 0,5% δ18O, suficiente para resaltar las varia-

**Fig. 1.- Distribución espacial de δ18O en agua de lluvia en la provincia de Burgos según el modelo propuesto por Díaz *et al.* (2007) utilizando un modelo digital del terreno y herramientas de SIG.**

*Fig. 1.- Spatial distribution of δ18O in precipitation in Burgos province based on the model of Díaz *et al.* (2007) using a digital terrain model and GIS tools.*

interpretación de los datos obtenidos de la caracterización isotópica de las aguas superficiales y subterráneas de varios acuíferos del entorno de Burgos.

Clásicamente, la comparación de la composición isotópica de las aguas superficiales y subterráneas con las aguas de precipitación, de las que proceden en origen, se ha realizado por interpolación lineal entre las estaciones pluviométricas de muestreo o por referencia a la estación más cercana. En las proximidades de la ciudad de Burgos sólo se dispone de un número reducido de datos isotópicos en la precipitación. Concretamente, en la red GNIP, sólo se han encontrado los correspondientes a las precipitaciones mensuales de octubre, noviembre y diciembre de 2002

(<http://isohis.iaea.org/> en 2007). De las estaciones más próximas incluidas en la red REVIP, León, Valladolid y Santander, sólo la primera se encuentra en una posición latitudinal y altimétrica similar a la ciudad de Burgos. En cualquier caso, los datos existentes tienen un valor discreto, que no corresponde normalmente a las zonas de cotas más elevadas en las que tienen su origen muchas aguas superficiales y subterráneas. Por ello, la utilización de metodologías que permitan obtener una distribución areal continua de valores isotópicos de la precipitación, como es la modelización propuesta en este artículo, pueden servir de apoyo a numerosos estudios en los que no se disponga de valores medidos representativos.

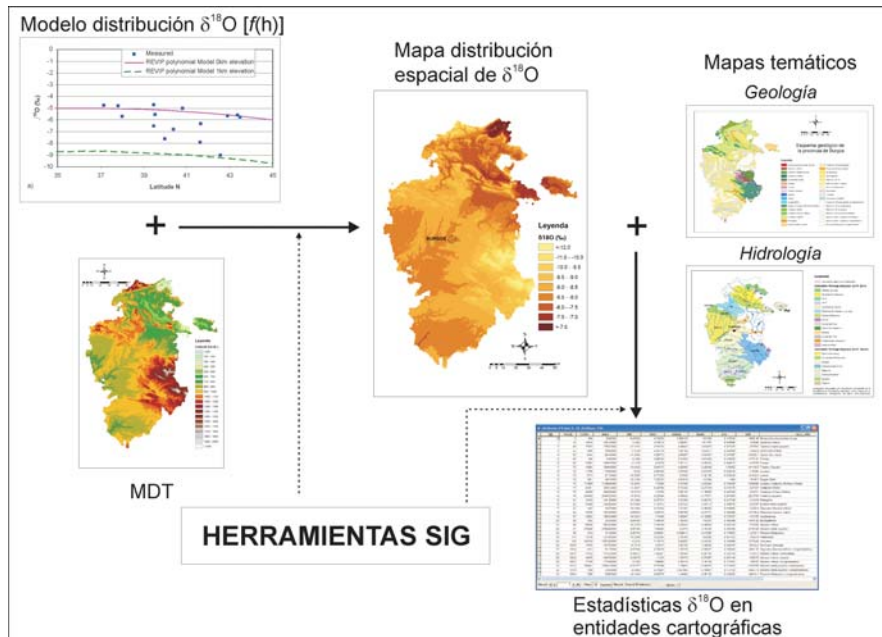
ciones isotópicas de interés en la zona de estudio en Burgos capital. El método admite el uso de resoluciones mayores, pero debe cuidarse la representatividad de los resultados en la utilización de desviaciones superiores a un 0,5‰ d<sup>18</sup>O, útiles para casos en los que sean necesarias aproximaciones cuantitativas de detalle.

**Aplicación en hidrología del mapa continuo de distribución isotópica en la precipitación en la provincia de Burgos**

Una vez obtenido el mapa continuo de distribución isotópica en la precipitación, la combinación de esta capa de información digital con otras capas de interés en estudios hidrológicos y su tratamiento con tecnologías de SIG permite obtener una zonación de las características isotópicas de las aguas de lluvia correspondientes a diferentes entidades cartográficas (Fig. 2). El conocimiento de las características isotópicas de las aguas de lluvia en dichas zonas o entidades cartográficas facilitará la interpretación de los contenidos isotópicos encontrados en las aguas superficiales y subterráneas de dichas zonas y de los procesos que pueden dar lugar a desviaciones del modelo propuesto.

Como un ejemplo de aplicación, el mapa de d<sup>18</sup>O en el agua de lluvia (Fig. 1) y el mapa geológico a escala 1:1.000.000 del IGME (se puede obtener en www.igme.es, en 2007) se han utilizado para definir la distribución de d<sup>18</sup>O sobre las formaciones geológicas con interés hidrológico en la provincia de Burgos. Para ello se han diferenciado las siguientes etapas:

- ▶ Las formaciones geológicas se reagrupan en el mapa geológico por su interés hidrológico (formaciones por las que discurren cauces fluviales y formaciones permeables del ámbito de la ciudad de Burgos).
- ▶ Mediante análisis espacial se obtiene, para cada grupo de formaciones geológicas, las estadísticas básicas referentes a la variación de su cota y del d<sup>18</sup>O de la lluvia que cae sobre su superficie aflorante, resumidas en la Tabla I.
- ▶ Con el modelo digital del terreno se obtienen los valores extremos de cota y latitud para la provincia de Burgos. La aplicación del modelo de Díaz *et al.* (2007) mostrará la variabilidad general de los valores medios de d<sup>18</sup>O en función de la cota en esta provincia (Fig. 3).



**Fig. 2.- Esquema de la metodología para obtener un mapa continuo de distribución de d<sup>18</sup>O en agua de lluvia en la provincia de Burgos y su posterior utilización en aplicaciones hidrológicas.**

*Fig. 2.- Chart representing the methodology to map the continuous distribution of d<sup>18</sup>O in precipitation in Burgos province, and its application in hydrology.*

- ▶ Los distintos valores obtenidos mediante la aplicación del modelo de distribución de d<sup>18</sup>O se pueden comparar con los valores reales de muestras de distinta procedencia que se estén estudiando.
- ▶ En el caso de las muestras de la ciudad de Burgos (Fig. 3), los datos isotópicos de las aguas subterráneas del entorno de la ciudad (muestreadas a cotas muy similares), se ajustan al modelo construido y se sitúan próximos a las formaciones geológicas de las que proceden y a los valores para el agua de lluvia de la estación de León de la red REVIP. En general, se observa una ligera desviación hacia valores más elevados de d<sup>18</sup>O para las aguas subterráneas y una

desviación algo mayor para las aguas superficiales, lo que parece sugerir la existencia de procesos de fraccionamiento isotópico por evaporación. No se observa la influencia de valores más ligeros de d<sup>18</sup>O procedentes de aguas precipitadas a cotas más elevadas que el punto de muestreo, que podría ser más notorio para el caso de las aguas superficiales. No obstante, debe tenerse en cuenta que la procedencia las aguas de los ríos puede ser muy variada (escorrentía directa, aportación de aguas subterráneas, embalses, vertidos urbanos a los cauces, etc.) y su composición estar afectada por varios procesos modificadores de los valores de d<sup>18</sup>O.

Formaciones	Cota (m s.n.m.)				δ <sup>18</sup> O (‰)			
	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Típica	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Típica
Pleistoceno-Holoceno	255	1384	837.121	111.118	-10.171	-6.491	-8.308	0.361
Caliza del Páramo	778	1092	922.71	43.0175	-9.190	-8.088	-8.569	0.158
Mioceno medio-superior	559	1230	883.566	67.6929	-9.605	-7.469	-8.459	0.230
Cretácico superior	165	1420	872.33	188.372	-10.377	-6.187	-8.519	0.611
Purbeck a Utrillas	157	2050	1070.93	208.16	-12.405	-6.161	-9.141	0.679
Paleozoico+Triás	279	2121	1228.9	307.134	-12.679	-6.564	-9.656	1.016

**Tabla I.- Estadísticos básicos de cotas y d<sup>18</sup>O para distintos grupos de formaciones geológicas en la provincia de Burgos obtenidos mediante herramientas de SIG.**

*Table I.- Statistics of elevation and d<sup>18</sup>O for different geological formations in Burgos province obtained with GIS tools.*

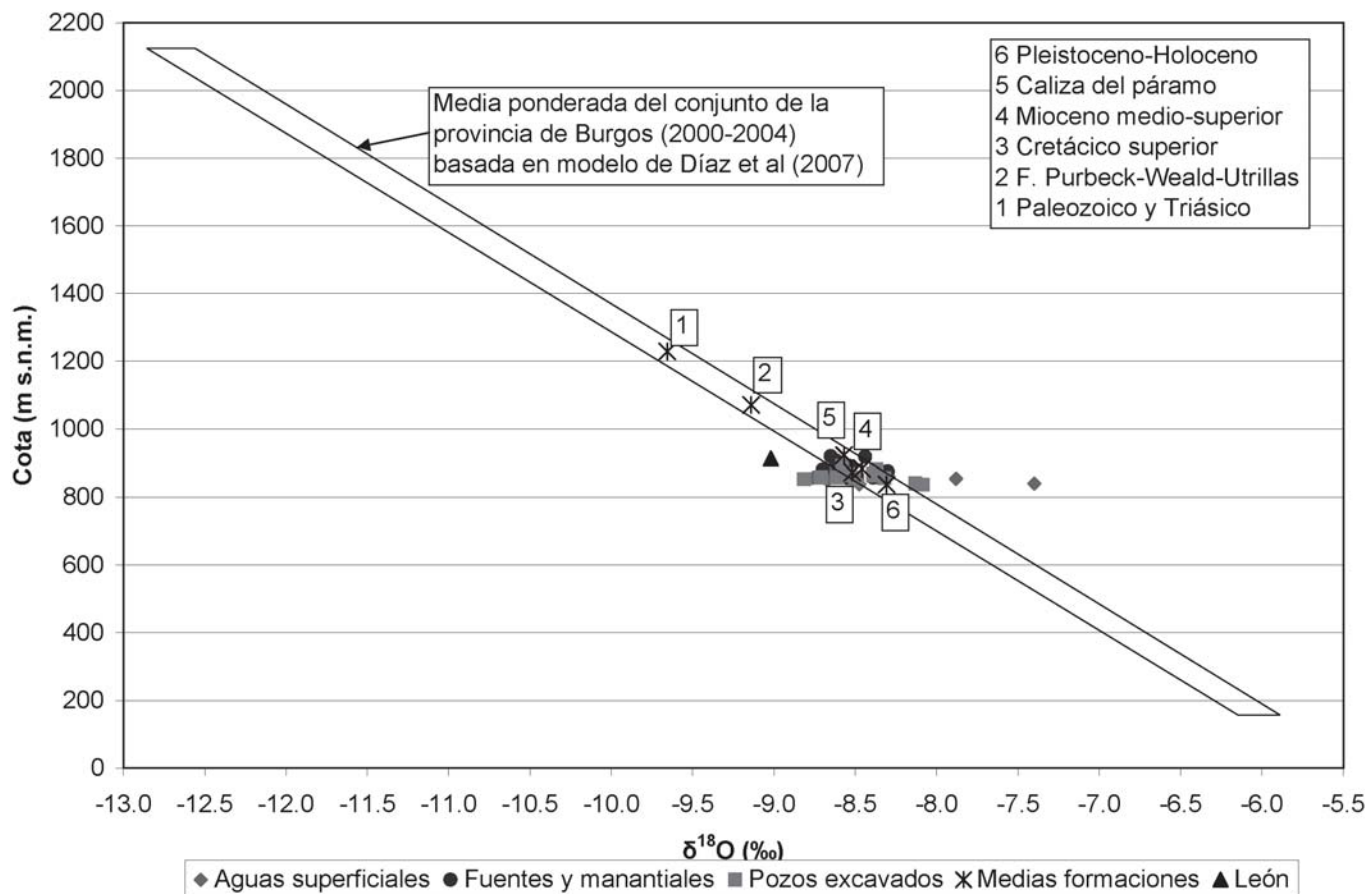


Fig. 3.- Comparación de datos medidos de  $\delta^{18}O$  en aguas superficiales y aguas subterráneas en la ciudad de Burgos y modelizadas en aguas de lluvia para: 1) la superficie de Burgos provincia, y 2) la superficie de afloramiento de distintas formaciones geológicas de las que pueden proceder dichas aguas (se representan los valores medios de  $\delta^{18}O$  en agua de lluvia sobre estas formaciones).

Fig. 3.- Comparisson of the  $\delta^{18}O$  data measured in surface and ground waters in Burgos city against the modelled values in precipitation for: 1) the area of Burgos province, and 2) the outcropping areas of the different geological formations as potential source of these waters (average values of  $\delta^{18}O$  in precipitation on these formations are shown).

**Conclusiones**

La utilización de herramientas de SIG unida al uso de un modelo para la predicción de la composición isotópica media plurianual de la precipitación, basado en la latitud y altitud como factores reguladores principales, ha permitido realizar una cartografía continua de distribución de  $\delta^{18}O$  en la precipitación para la provincia de Burgos. Una vez realizada esa cartografía puede ser utilizada, también con ayuda de herramientas de SIG, como apoyo a estudios relacionados con los isótopos estables del agua en numerosos campos y especialmente la hidrología.

La aplicación de esta metodología a escala de toda España permitirá evaluar los procesos que regulan los patrones locales y regionales de  $\delta^{18}O$  en la precipitación y en las aguas superficiales y subterráneas, e identificar e interpretar las posibles desviaciones entre ellas. Su aplicación extensiva a zonas con distin-

tas latitudes y cotas servirá también para verificar la validez del modelo utilizado.

**Agradecimientos**

Queremos agradecer a Ángel Prieto Martín y Carlos Lorenzo Carnicero del Área de Sistemas y Tecnologías de la Información del IGME el apoyo prestado en la utilización de las herramientas de ArcGIS 9.1. Agradecemos también a Luis Araguás la sugerencia de elaborar un mapa de isótopos en las aguas meteóricas de España, actividad que ha dado origen al desarrollo y prueba de la metodología presentada en este artículo.

**Referencias**

Bowen, G.J. y Wilkinson, B.H. (2002). *Geology*, 30, 315-318.  
 Clark, I. y Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis publishers, 328 p.

Dansgaard, W. (1964). *Tellus*, 16, 436-468.  
 Díaz, M.F., Rodríguez, J., Pérez, E., Castaño, S. y Araguás, L. (2007). En: *IAEA International Symposium on Advances in Isotope Hydrology and its Role in Sustainable Water Resources Management, (IHS-2007)*. Vienna, Austria, 21-25 May 2007.  
 Dutton, A., Wilkinson, B.H., Welker, J.M., Bowen, G.J. y Lohmann, K.C. (2005). *Hydrological Processes*, 19, 4121-4146.  
 Rozanski, K., Araguás, L. y Gonfiantini, R. (1993). En: *Climate change in Continental Isotopic Records* (Swart, P.K., Lohmann, K.C., McKenzie y J., Savin, S., Eds.). Geophysical Monograph, American Geophysical Union. Vol. 78, 1-36.  
 Yurtsever, Y. y Gat, Jr. (1981). En: *Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle* (Gat, Jr. y Gonfiantini, R., Eds.). IAEA, 103-139.