



Geodesia eta geofisikako biltzar hispano portugaldarra

Asamblea hispano
portuguesa de
geodesia y geofísica

*Assembleia luso-
espanhola de
geodesia y geofisica*

Portuguese-Spanish Assembly of Geodesy and Geophysics

donostia-san sebastián

23-28 / 06 / 2012

Modelación de la variación temporal del valor de $\delta^{18}\text{O}$ en la precipitación en la España peninsular e islas Baleares

Modelling the temporal variability of $\delta^{18}\text{O}$ values in precipitation in peninsular Spain and Balearic Islands

J. Heredia⁽¹⁾, S. Castaño⁽¹⁾, M.F. Díaz-Teijeiro⁽²⁾, Rodríguez-Arévalo, J.⁽²⁾, J.E. Capilla⁽³⁾, R. Sánchez-Moral⁽¹⁾ y L. Bardasano⁽²⁾

⁽¹⁾Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. j.heredia@igme.es; s.castano@igme.es; r.sanchez@igme.es

⁽²⁾Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Alfonso XII, 3 y 5, 28005 Madrid. javier.rodriguez@cedex.es; marife.diaz@cedex.es; lara.bardasano@cedex.es

⁽³⁾Universitat Politècnica de Valencia. Valencia. jcapilla@upv.es

SUMMARY

Oxygen-18 contents in precipitation is closely correlated with average air temperature, as well as with the availability of this isotope during the sequence of consecutive precipitation events from the place where water vapour originated. Therefore, several geographic parameters like latitude and altitude, that indirectly reflect temperature, and the distance to the coast have been used to provide reference isotopic values in precipitation that help to know the geographic origin of water in other components of the continental hydrologic cycle. However, temperature and front directions are variable in time, and consequently $\delta^{18}\text{O}$ values in precipitation, which points out that the study of the temporal component could help to know better, not only the origin of water regarding geographic location, but other processes relate to forms of precipitation and spatial distribution. One of the possible approaches to estimate the isotope composition ($\delta^{18}\text{O}$) of precipitation is to develop regression models that consider, in a simplified way, different parameters and variables that can explain, directly or indirectly, spatial and temporal variability of such isotopic content. In this project (reference CGL2009-12977, financed by the Ministry of Economy and Competitiveness of Spain), a model has been built to represent the temporal evolution (monthly and annual) of $\delta^{18}\text{O}$ values in precipitation at the local scale of peninsular Spain and the Balearic Islands taking into account the global climatic framework. The independent term of the polynomial model is defined by the geographic variables that are constant in time (latitude, altitude and minimum distance to the coast). Three model structures were investigated, considering climatic variables at local (air temperature and vapour pressure) and regional scale (NAO index). In general, the models based on local climatic variables performed well as they were able to reproduce annual and monthly trends of $\delta^{18}\text{O}$ values, although they did not captured well the monthly maxima. In the models based on the NAO index, a regional scale variable, monthly simulations gave poor representations, while annual simulations produced better results in general.

1. INTRODUCCIÓN

El contenido isotópico del agua de precipitación es función de las condiciones climatológicas tanto al ocurrir la precipitación, como de las imperantes en el origen del vapor y en su evolución temporal. La diferencia de masa entre las moléculas más livianas y más pesadas del agua las lleva a tener un comportamiento diferente en los procesos de evaporación y precipitación dentro del ciclo hidrológico. Por ello una vez que las nubes se forman principalmente sobre el océano y empiezan a precipitar, el vapor de agua que permanece en las nubes y el agua de precipitación cambian su composición isotópica a causa del proceso de fraccionamiento isotópico, de forma que el vapor se va empobreciendo en los isótopos más pesados (^{18}O y ^2H) mientras que el agua de lluvia o la nieve se enriquecen relativamente en estos isótopos (Kendall and McDonnell, 2003). El estudio del contenido de estos isótopos en las aguas de los distintos componentes del ciclo hidrológico es práctica usual en biología, ecología, ciencias hídricas y meteorología. La hidrogeología isotópica permite caracterizar a la recarga, los tiempos de residencia y otros rasgos de los sistemas hidrogeológicos, contribuyendo así a la investigación y gestión de los recursos hídricos.

En particular, valor de $\delta^{18}\text{O}$ en la precipitación está estrechamente correlacionado con la temperatura media del aire, así como con la disponibilidad de ese isótopo durante los sucesivos fenómenos de precipitación desde el lugar de origen del vapor de agua. Por ello, se han utilizado distintos parámetros geográficos y climáticos que reflejan indirectamente la temperatura y la humedad, para estimar valores isotópicos de referencia en la precipitación que ayuden a conocer el origen geográfico del agua de otros componentes del ciclo hidrológico continental. Sin embargo, tanto la temperatura como las trayectorias de los frentes de precipitación son cambiantes en el tiempo y, por tanto, también lo es el valor de $\delta^{18}\text{O}$ en precipitación. Debido a ello el estudio de la componente temporal

podría ayudar a conocer mejor, no sólo el origen del agua en cuanto a su localización, sino también otros procesos relacionados con las formas de precipitación y su distribución espacial. Una de las aproximaciones para estimar el valor de $\delta^{18}\text{O}$ en la precipitación es plantear modelos de regresión que consideren, simplificándolos, distintos parámetros que puedan describir y explicar, directa o indirectamente, la variabilidad espacio-temporal de dicho valor.

El trabajo que se presenta se desarrolló en el marco del proyecto ISOTOPOSHIDRO (ref. CGL2009-12977) financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España. El objetivo ha sido identificar modelos de regresión múltiple basados en parámetros climáticos que describan la evolución temporal a escala mensual del contenido isotópico ($\delta^{18}\text{O}$) en la precipitación en el ámbito de la España peninsular e Islas Baleares. La escala espacial de los modelos es local. Igualmente, se presenta un estudio en primera aproximación de la evolución anual del valor de $\delta^{18}\text{O}$ en la precipitación, con el mismo dominio geográfico.

2. ANTECEDENTES Y DATOS DE PARTIDA

El Organismo Internacional para la Energía Atómica (OIEA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) han establecido desde la década del 60 del pasado siglo una Red Mundial de Isótopos en Precipitación (GNIP, siglas en inglés, Figura 1). España contribuye a esta red con los datos que captura en la Red Española de Vigilancia Isótopos en Precipitación (REVIP), creada en el año 2000 y que gestiona el Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) en colaboración con la Agencia Española de Meteorología (AEMET). Integran REVIP 14 estaciones en España peninsular, una en Mallorca (Figura 2) y otra en La Palma de Gran Canaria (Islas Canarias). Las series que ofrecen estas estaciones son de cadencia mensual, están actualizadas y sus carencias son escasas. Estas características hacen de REVIP una de las mejores redes nacionales que integran GNIP.



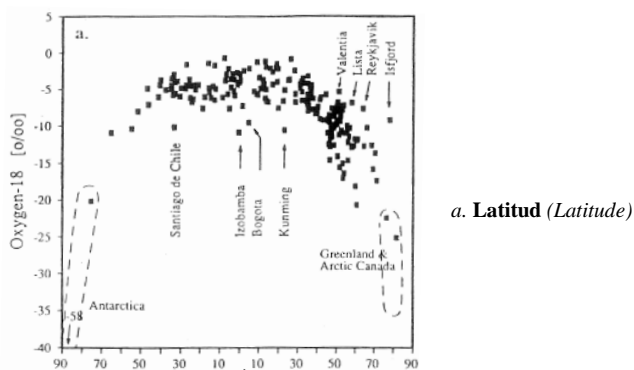
Figura 1 - Red Mundial de Isótopos en Precipitación (GNIP). Operada: IAEA-WMM (Fuente: www.iaea.org) (Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP). IAEA-WMM.Source: www.iaea.org)



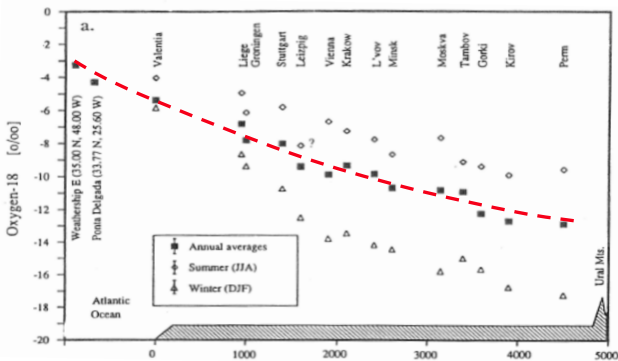
Figura 2 - Red Española de Vigilancia de Isótopos en Precipitación (REVIP). Operada: AEMET-CEDEX (modificada de Google Earth). (Spanish Monitoring Network of Isotopes in Precipitation. Managed: AEMET-CEDEX. Modified of Google Earth)

Basados en datos AIEA-WMM, hace 20 años (Rozanski *et al.*, 1993), estudiaron las correlaciones existentes entre los contenidos de los isótopos en precipitación con distintos parámetros geográficos (latitud, altitud, distancia al mar) y climáticos (temperatura del aire), en sus medias estacionales y anual (Figura 3). Bowen y Wilkinson (2002), 10 años después, modelizaron la variación espacial a escala global del valor medio anual de $\delta^{18}O$ en precipitación, basado en las variables latitud y altitud. Basado en estas variables geográficas, mediante una técnica de identificación de modelo de correlación múltiple diferente, Díaz-Teijeiro *et al.*, (2009) presentaron un modelo que describía la variación espacial del valor medio anual de $\delta^{18}O$ a escala de la España peninsular y Baleares. Posteriormente, este grupo de investigación ajustó el modelo e implementó y estandarizó su representación cartográfica (Figura 4) y su aplicación en aguas del ciclo hídrico (Rodríguez Arévalo *et al.*, 2010, 2011). En el proyecto ISOTOPOSHIDRO se ha profundizado en distintos aspectos de la modelación del valor de $\delta^{18}O$ en precipitación, en la distribución espacial se comenzó a trabajar en el empleo de técnicas geoestadísticas (Capilla *et al.*, 2011) y en la distribución temporal se ha investigado en incorporar variables climáticas a la modelación.

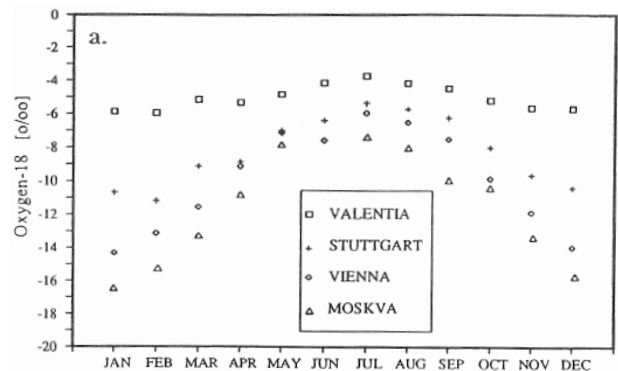
En el campo de la modelación de la evolución temporal del valor de $\delta^{18}O$ en precipitación se deben mencionar los trabajos de Liebming *et al.* (2006, 2007) en Austria y de Lykoudis *et al.* (2010) en el Mediterráneo Oriental. Si bien en ninguno de sus trabajos los modelos describen series temporales, se considera que ambos presentan rasgos metodológicos de interés.



a. Latitud (Latitude)



b. Distancia al mar: continentalidad (Distance to the sea: continentality)



c. Estacional (Seasonal)

Figura 3 - Patrones Isotópicos en la Precipitación Global Moderna recientes, de Rozanski *et al.*, 1993 (Isotopic Patterns in the recent Modern Global Precipitation, source Rozanski *et al.*, 1993)



Figura 4 - Modelo de distribución espacial del valor de $\delta^{18}O$ medio anual para España peninsular e islas Baleares, de Rodríguez Arévalo *et al.*, 2011 (Spatial distribution model of annual mean $\delta^{18}O$ value for peninsular Spain and Balearic Islands, source: Rodríguez Arévalo *et al.*, 2011).

En los trabajos de Liebminger *et al.* (2006, 2007) el dominio espacial es Austria y se identifican modelos que describen las distribuciones espaciales medias estacionales y media anual. Se estudiaron exhaustivamente 7 parámetros geográficos y climáticos, bajo distintas formas algorítmicas, de forma individual o compuesta. Esta exhaustividad es un rasgo positivo, pues estos parámetros no necesariamente impactan sobre el valor de $\delta^{18}O$ en precipitación de forma lineal, ni singular, antes bien la combinación entre ellos puede describir procesos que inciden en el fraccionamiento isotópico. Sin embargo, muchas de las composiciones de parámetros o forma de tratamiento algorítmico que proponen son redundantes, o no se justifican en observaciones, o no tienen un claro sentido físico. Los modelos resultantes alcanzan buenos ajustes, aunque están sobreparametrizados: 13 términos (grados de libertad) para 51 datos.

En el trabajo de Lykoudis *et al.* (2010) el dominio espacial es el Mediterráneo Oriental de Grecia a la costa levantina y se identifican modelos que describen las distribuciones espaciales media anual y medias mensuales. La información presenta limitaciones: las estaciones son escasas y su distribución heterogénea; las series son heterogéneas en extensión y en períodos que cubren y presentan numerosos huecos. Estas limitaciones se acentúan al estudiar escenarios climáticos particulares, pues se restringen aún más las respectivas bases de datos. Los parámetros geográficos y climáticos estudiados sólo son la latitud, cota, temperatura y precipitación.

La valoración de ambos trabajos llevó a atender “*a priori*” los aspectos metodológicos siguientes: 1, contar con una información consistente y homogénea, dos rasgos que ofrecen los datos de REVIP; 2, ser exhaustivos al investigar los potenciales parámetros climáticos a incorporar al modelo y 3, evitar al sobreparametrización al identificar el modelo, tener en cuenta el principio de parsimonia.

3. METODOLOGÍA

Dominios espacial y temporal. Escalas de trabajo

Los modelos de regresión múltiple se identificaron para cada una de las 15 estaciones que componen REVIP en la Península Ibérica e Islas Baleares y para una hipotética estación promedio cuyos datos son las series medias de aquellas. Por lo que, la escala espacial de trabajo es local. Las series son mensuales y comprenden 10 años hidrológicos de Octubre del 2000 a Septiembre del 2010.

Parámetros

Los parámetros geográficos (latitud, L ; longitud, l ; cota, Ct ; distancia al mar, DM) son invariables temporalmente por lo que no se consideran como parámetros de los modelos de correlación múltiple sobre las series temporales.

Los parámetros climatológicos son registros locales de cada estación (temperatura, T ; tensión de vapor, TV ; precipitación, P ; humedad relativa, H ; velocidad del viento, V ; presión, Hg), con la excepción del índice NAO (fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA), que es regional. Algunos de los parámetros también fueron tratados logarítmicamente. Ello tuvo un fundamento empírico basado en las correlaciones observadas de estos parámetros respecto al valor de $\delta^{18}O$ en precipitación. Los parámetros de los modelos han sido simples, definidos por un único parámetro climático, o compuestos, resultantes de la composición de 2 ó 3 parámetros climáticos.

Parámetros: estudio de sensibilidad “*a priori*”

Los objetivos del estudio de sensibilidad “*a priori*” fueron evitar definir modelos con parámetros que: 1, presentasen una baja correlación con el valor de $\delta^{18}O$; 2, su variación tuviera un bajo impacto en la evolución del valor de este isótopo y 3, fuesen dependientes entre sí.

El estudio de sensibilidad “*a priori*” se realizó en todas las estaciones y en la estación “promedio”. Se basó en las matrices de correlación de los parámetros entre sí, incluido el $\delta^{18}O$, y en la correlación estandarizada de los parámetros respecto al $\delta^{18}O$, $\beta_{i\delta^{18}O}$.

$$\beta_{i\delta^{18}O} = C_{i\delta^{18}O} \left(\frac{S_i}{S_{\delta^{18}O}} \right) \quad (1)$$

Donde: $\beta_{i\delta^{18}O}$, es la correlación estandarizada del parámetro i , P_i , respecto al valor de $\delta^{18}O$; $C_{i\delta^{18}O}$, es la correlación de P_i respecto

a valor de $\delta^{18}O$ y S_i y $S_{\delta^{18}O}$ son las desviaciones estándares de P_i y $\delta^{18}O$, respectivamente.

Estructuras de modelos

Se estudiaron 27 estructuras de modelos definidas a partir de los parámetros que el análisis de sensibilidad “*a priori*” indicó como relevantes para modelar el valor de $\delta^{18}O$ en precipitación. Se siguió el principio de parsimonia en la definición de los modelos: se partió de analizar la estructura más simple (un parámetro, dos términos), para pasar a la siguiente estructura en complejidad al agregársele un término más. En cada nivel de complejidad se estudiaron los parámetros manteniendo un orden “jerárquico” en cuanto a su incidencia sobre el valor de $\delta^{18}O$. La sobreparametrización se evitó limitando a 5 el número de términos del modelo, 4 grados de libertad más el término independiente.

Identificación de parámetros de modelo

Los criterios para evaluar la bondad del ajuste de los modelos fueron:

Mínimos cuadrados:

$$CMC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\delta^{18}O_{cl_i} - \delta^{18}O_{ob_i})^2 \quad (2)$$

Donde: N , es el número de datos y $\delta^{18}O_{cl}$ y $\delta^{18}O_{ob}$ los contenidos calculados y observados, siendo su diferencia el residuo, res .

$$res = (\delta^{18}O_{cl_i} - \delta^{18}O_{ob_i}) \quad (3)$$

Media de la sumatoria del valor absoluto de los residuos:

$$MVAR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(\delta^{18}O_{cl_i} - \delta^{18}O_{ob_i})| \quad (4)$$

El coeficiente de correlación:

$$R_{\delta^{18}O_{cl}, \delta^{18}O_{ob}} = \frac{Cov_{\delta^{18}O_{cl}, \delta^{18}O_{ob}}}{(\sigma_{\delta^{18}O_{cl}} \sigma_{\delta^{18}O_{ob}})} \quad (5)$$

Donde: $Cov_{\delta^{18}O_{cl}, \delta^{18}O_{ob}}$ es la covarianza entre $\delta^{18}O_{cl}$ y $\delta^{18}O_{ob}$ y $\sigma_{\delta^{18}O_{cl}}$ y $\sigma_{\delta^{18}O_{ob}}$ son las respectivas desviaciones estándares

Así, CMC penaliza, en particular, la existencia de grandes residuos en el conjunto, $MVAR$ evalúa la bondad del ajuste conjunto y R es un buen indicativo del grado de dispersión del ajuste.

Identificación de estructura de modelos

El contraste y selección entre modelos que presentan distintas estructuras, por grados de libertad o por tipo de parámetros, no se puede realizar con CMC , $MVAR$ o R . Para ello se ha recurrido a dos criterios, cuya minimización contribuiría a identificar la estructura de modelo óptima (Heredia, 1994). Uno de ellos, BIC , se basa en el principio de Máxima Entropía, al que también se llega desde un marco bayesiano. Este criterio no sólo valora el ajuste que alcanza el modelo respecto a los datos observados, sino que, además, tiene en cuenta el principio de parsimonia (atendiendo así al problema de sobreparametrización), al contrastar el número de parámetros del modelo con el de datos (información) en que se basa el modelo:

$$BIC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N res^2 + n_p \ln N \quad (6)$$

Donde: n_p , es el número de parámetros del modelo.

El otro criterio de identificación es el de Kashyap, d_k , que se deriva del teorema de Bayes, al considerar que todos los modelos contrastados son, “*a priori*”, equiprobables. En relación a BIC , este criterio considera además el grado de dependencia de los parámetros del modelo respecto a los datos, que evalúa mediante el determinante de la matriz de información de Fisher, F , cuyo inverso es el límite inferior de la matriz de covarianza del modelo, C .

$$d_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N res^2 + n_p \ln \frac{N}{2\pi} + \ln \left(\frac{1}{N^{n_p}} |C^{-1}| \right) \quad (7)$$

Donde: C es la matriz de covarianza del modelo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estudio de la correlación $\delta^{18}O$ -Parámetros Climáticos en su evolución temporal a escala mensual

En la Tabla 1 se presentan las correlaciones de los parámetros climáticos considerados respecto al valor de $\delta^{18}O$ en precipitación en

cada una de las estaciones que integran REVIP y en la sintética “estación promedio”. Debe observarse que, según los parámetros, las correlaciones pueden ser más o menos claramente logarítmicas (Fig. 5). Las matrices de correlación de los parámetros y las correlaciones estandarizadas de estos respecto a $\delta^{18}O$, $\beta_{\delta^{18}O}$, se calcularon en todas las estaciones. En la Tabla 2, se presentan la matriz de correlación y los $\beta_{\delta^{18}O}$ correspondientes a la estación promedio.

Tabla 1 – Coeficientes de correlación: parámetros climáticos- $\delta^{18}O$. Escala temporal: mensual (Correlation coefficients: climatic parameter- $\delta^{18}O$. Time scale: monthly)

Corr OXIG-18	T*	TV	Pp	Ln Pp	H	Ln H	V	LnV	Hg	Ln Hg	NAO
PROMEDIO	0.781	0.734	-0.640	-0.711	-0.773	-0.778	0.183	0.190	-0.045	-0.044	0.055
A CORUÑA	0.475	0.459	-0.540	-0.602	-0.029	-0.032	-0.055	-0.062	0.186	0.186	-0.012
SANTANDER	0.584	0.624	-0.437	-0.501	0.424	0.421	-0.380	-0.386	0.126	0.127	0.070
MCRON	0.425	0.352	-0.370	-0.633	-0.448	-0.461	0.267	0.257	-0.165	-0.165	-0.069
CACERES	0.456	0.326	-0.397	-0.536	-0.501	-0.494	0.045	0.060	-0.058	-0.058	0.004
CIUDAD REAL	0.590	0.471	-0.392	-0.521	-0.610	-0.614	0.118	0.104	-0.033	-0.032	0.040
MADRID-RETIRO	0.675	0.582	-0.336	-0.497	-0.625	-0.654	0.299	0.277	-0.005	-0.005	0.045
VALLADOLID	0.674	0.552	-0.399	-0.505	-0.690	-0.723	0.137	0.134	0.094	0.094	0.092
LEON	0.637	0.559	-0.304	-0.401	-0.608	-0.624	0.124	0.134	0.197	0.188	0.101
PALMA	0.521	0.491	-0.457	-0.664	-0.335	-0.335	0.255	0.235	0.014	0.014	0.141
ALMERIA	0.414	0.334	-0.533	-0.607	-0.140	-0.142	0.002	0.009	0.008	0.008	-0.119
VALENCIA	0.435	0.417	-0.224	-0.373	-0.028	-0.029	-0.042	-0.035	0.106	0.107	0.078
TORTOSA	0.626	0.608	-0.237	-0.390	-0.341	-0.346	0.133	0.143	-0.015	-0.014	0.142
MURCIA	0.370	0.388	-0.487	-0.652	-0.230	-0.220	0.284	0.265	-0.070	-0.070	-0.125
ZARAGOZA	0.658	0.598	-0.174	-0.313	-0.591	-0.613	0.051	0.050	-0.040	-0.039	0.086
GERONA	0.574	0.567	-0.281	-0.372	-0.371	-0.383	0.280	0.258	0.258	0.259	0.173

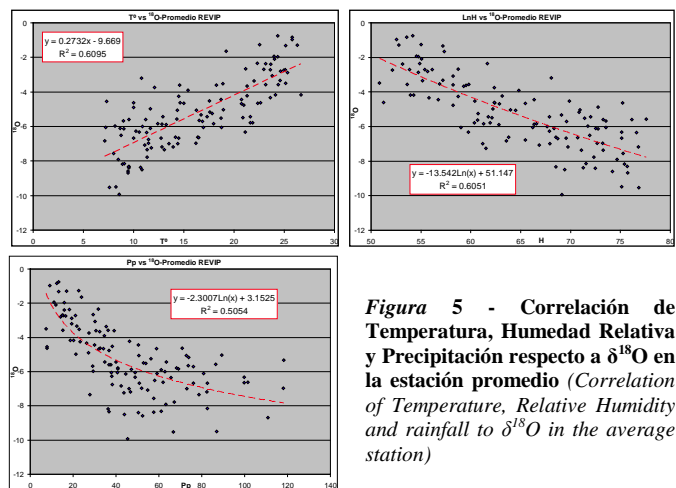


Figura 5 - Correlación de Temperatura, Humedad Relativa y Precipitación respecto a $\delta^{18}O$ en la estación promedio (Correlation of Temperature, Relative Humidity and rainfall to $\delta^{18}O$ in the average station)

Tabla 2 - Matriz de Correlación y Correlación estándar respecto a $\delta^{18}O$ en la Estación Promedio (Correlation matrix and Standard Correlation coefficients to $\delta^{18}O$ in the average station)

OXIG-18	T*	TV	Pp	H	Ln H	V	LnV	Hg	Ln Hg	NAO		
OXIG-18	1	0.781	0.734	-0.633	-0.707	-0.773	-0.778	0.183	0.190	-0.045	-0.044	0.055
T*		1	0.980	-0.433	-0.519	-0.834	-0.839	0.098	0.119	-0.288	-0.288	-0.017
TV			1	-0.346	-0.438	-0.719	-0.726	-0.185	0.007	-0.258	-0.258	-0.032
Pp				1	0.944	0.658	0.664	-0.092	-0.092	-0.284	-0.285	-0.115
Ln Pp					1	0.703	0.717	-0.103	-0.109	-0.194	-0.194	-0.072
H						1	0.999	-0.391	-0.400	0.275	0.275	-0.007
Ln H							1	-0.384	-0.393	0.270	0.269	-0.005
V								1	0.997	-0.496	-0.496	-0.189
LnV									1	-0.506	-0.506	-0.194
Hg										1	1.000	0.462
Ln Hg											1	0.463
NAO												1
β	1,000	2,231	1,227	-7,733	-0,208	-2,834	-0,045	0,032	0,011	-0,063	0,000	0,025

Los parámetros que presentan una correlación mayor, en orden decreciente, son la temperatura, la humedad relativa y la precipitación, aunque muestran un amplio rango de variación en el conjunto de las estaciones. Los tres son parámetros locales. La tensión de vapor, TV, no se consideró en el proceso de identificación del modelo pues, a pesar de presentar una correlación alta respecto a $\delta^{18}O$, es una variable dependiente de la temperatura. La estación promedio posee las correlaciones más altas. Entre las estaciones REVIP, Valladolid y Valencia resultan extremas, al presentar las correlaciones mayores y menores, respectivamente. La temperatura y humedad relativa son los parámetros que gobiernan el fraccionamiento isotópico y la precipitación incide en el efecto cantidad sobre la presencia de $\delta^{18}O$. El viento presenta una correlación baja y las correlaciones de la presión atmosférica y el índice NAO son despreciables. El viento, la presión y el índice NAO

son parámetros ligados entre sí, aunque los dos primeros sean de registro local y el último lo sea regional.

Finalmente, en el proceso de identificación del modelo de variación temporal a escala mensual del $\delta^{18}O$ en precipitación se trabajó con los parámetros de: temperatura, humedad relativa, precipitación y velocidad de viento. La velocidad de viento a pesar de no presentar una correlación alta, se consideró que era un parámetro que debía ser investigado, pues participa en el proceso de evaporación y, por ello, incide en el fraccionamiento isotópico.

Se investigaron 26 estructuras de modelos. Se partió de tres modelos de correlación simple cuyas parámetros respectivos fueron la temperatura, la precipitación y la humedad. Una vez identificada la temperatura como parámetro básico de modelado, se estudiaron los modelos en los que el segundo parámetro pasó a ser el logaritmo de la precipitación o el logaritmo de la humedad relativa y las variantes respectivas de sus ponderaciones por los coeficientes de correlación estandarizado. En esta instancia, no se estudió la velocidad del viento, V, pues este parámetro no incide por sí mismo en el valor de $\delta^{18}O$. Una vez que se identificó al logaritmo de la precipitación sin ponderar, como el segundo parámetro que definía el modelo de tres términos más consistente (modelo básico) se analizó el cuarto término. El estudio de este término fue el más rico en variedad de composiciones de parámetros investigados (18). En la casi totalidad de estos modelos al menos uno de los parámetros era compuesto. En el caso de los modelos de cinco términos, cuatro parámetros, sólo se estudió una única estructura de modelo, en la que a cada parámetro climático le correspondía un término. No se contempló ningún término compuesto, pues para este número de parámetros de modelo se hubiera generado una estructura con información redundante. En esta instancia sí se estudió V, dándole a este parámetro un peso aritmético en el modelo del valor de $\delta^{18}O$ que probablemente no tiene físicamente.

Debido al gran número de modelos estudiados, se presentarán sólo los modelos de regresión simple de la estación promedio REVIP. Esta estación sintética ofrece mejores ajustes que los resultantes de las estaciones reales, aunque por este motivo permite una exposición clara de los rasgos que caracterizan a estos modelos. Entre los tres modelos de regresión simple, el dependiente de la temperatura es algo mejor que el del logaritmo de la precipitación y ambos son ligeramente mejores que el dependiente del logaritmo de la humedad. Ello para todos los indicadores de bondad de ajuste del modelo (Tabla 3). Esto se observa en todas las estaciones REVIP. Al contrastar las series calculadas y medidas (Figura 6) se observa que el modelo de temperatura replica la ciclicidad estacional del parámetro y por ello el aumento monótono de T en primavera no permite reproducir los picos estacionales observados en el $\delta^{18}O$. Probablemente, estos picos están ligados a las precipitaciones de febrero-abril, propias del clima mediterráneo. Los modelos que consideran el logaritmo de la precipitación los reproducen más ajustadamente que los dependientes del logaritmo de la humedad. Ninguno de los tres modelos reproduce adecuadamente los valores extremos observados, en particular los invernales.

Tabla 3 - Modelos de regresión simple: criterios de comparación. Estación promedio (Simple regression models: comparison criteria. Average station)

MODELO	N	np	1/N* Σ res	1/N* Σ res ²	1/N* Σ res	Bic	d_c	det (C ⁻¹)	R
T	120	1	-0.0009	1.6328	1.0678	6.42	-4.23	0.0179	0.7807
LP	120	1	-0.0005	1.6509	1.0509	6.44	1.76	43.9022	0.7779
LH	120	1	-0.0005	2.0681	1.1539	6.86	-1.42	1.2113	0.7109

En la Tabla 4 se presentan el residuo medio, los criterios de identificación de parámetros de modelos (CMC, MVAR y R) y de identificación de modelos (BIC y d_c) correspondientes a los modelos de regresión múltiple básico, el de cuatro parámetros y el óptimo de tres parámetros en la estación promedio y las 15 de la REVIP.

El criterio BIC ha primado siempre al modelo básico (T, Ln P) y penalizó los sucesivos modelos acorde se incrementaba el número de parámetros. Indicando así que en ningún caso el aumento en grados de libertad del modelo justificaba la mejora del ajuste alcanzado.

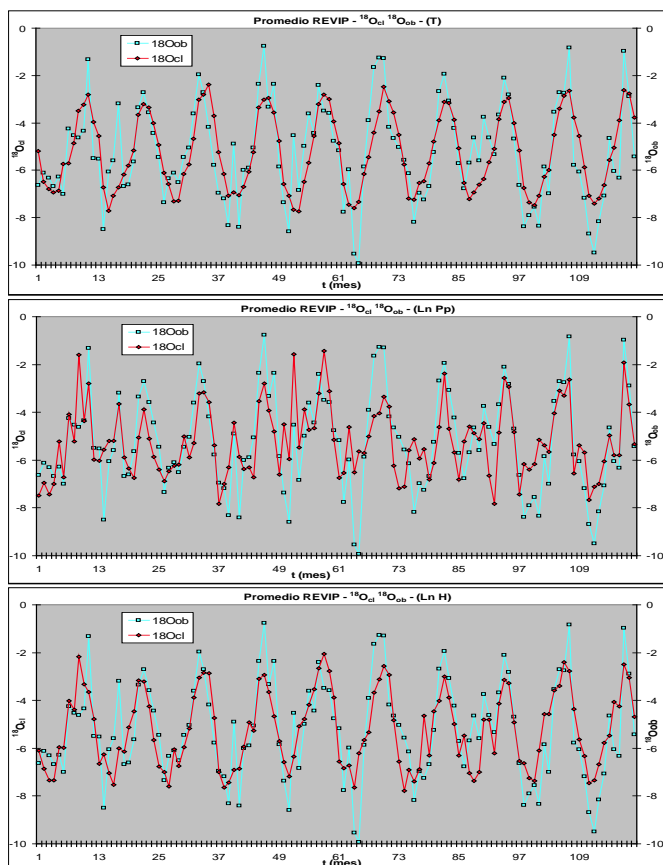


Figura 6 - Modelos de regresión simple: series calculadas vs observadas. Estación promedio (Simple regression models: calculated vs observed series. Average station)

En el caso de modelos de parámetros simples, al modelo básico (T, ln P) se le sumó el término del logaritmo de la humedad (ln H). Las covarianzas de T, lnP y lnH son del mismo orden, al igual que las covarianzas con $\delta^{18}O$. Por ello, siempre que se agregó el tercer parámetro simple de modelo, d_k lo penalizó. Al incorporarse el cuarto término, V, este presenta unas covarianzas algo más bajas que los restantes parámetros climáticos. Debido a ello, a los modelos de cuatro parámetros simples en algunas estaciones, d_k los valora peor y en otras mejor que a los de tres. Sin embargo, en todos los casos, las estructuras de tres y cuatro parámetros fueron peor valoradas por d_k que el esquema básico. Los parámetros compuestos del modelo fueron conformados por 3 ó 2 parámetros climáticos (T, V y lnH o T y lnH o V y lnH). El valor de los términos de la covarianza, C, correspondientes al parámetro compuesto se incrementaban acorde aumentaba el número de parámetros climáticos que lo componían. Debido a ello, casi en la totalidad de los casos, d_k valoró mejor las estructuras con un parámetro compuesto que las formadas sólo por parámetros simples. En todas las estaciones, la estructura mejor valorada por d_k fue la que contaba con un parámetro compuesto por tres parámetros climáticos.

Las rectas de correlación entre los valores de $\delta^{18}O$ calculados y medidos de todos los modelos tienen, aproximadamente, pendiente unitaria y son pasantes por el origen. Ello señala que, en principio, los modelos tienden globalmente a representar el adecuadamente el valor de $\delta^{18}O$.

CMC y R indican la calidad del ajuste entre valores calculados y observados en el marco del problema en sí mismo y en términos absolutos, respectivamente. Al analizar los modelos se desestimaron las estructuras de cuatro parámetros, que no siempre son las que mejor ajuste obtienen, pues la mejora que aportan en los ajustes no es acorde con el incremento de parámetros, ni con disminución de la dependencia de estos respecto a los datos, según indican BIC y d_k .

Entre las 16 estaciones, en 7 el mejor ajuste lo obtuvo una estructura en la que el parámetro compuesto lo definían V y ln H, en 6 lo definieron T y ln H y en 3 fueron V, T y ln H (ver CMC y R, Tabla 5). En la evaporación, la humedad es un factor determinante y la velocidad del viento y la temperatura son factores reguladores. Por lo que este parámetro compuesto podría responder a la evaporación, mecanismo que contribuye al fraccionamiento isotópico. Ello sugeriría que la temperatura es un proxy que describe de forma incompleta al fraccionamiento isotópico, contribuyendo el parámetro compuesto a completar esta descripción. Se debe observar que la reducción media de CMC de estos modelos respecto al modelo básico es del 4 % y sólo 3 estaciones superan el 5% de reducción: Santander (13%), Morón (12%) y Cáceres (6%). Ello sugeriría lo ya señalado por los resultados de BIC, que la mejora en el ajuste que indica CMC podría no justificar el incremento de parámetros del modelo. Sin embargo, en general, d_k identifica a los modelos con estos parámetros compuestos como los óptimos para cada estación.

Los modelos óptimos de tres parámetros presentan coeficientes de correlación, R, que varían entre 0.76 a 0.66, exceptuando a Valencia (0.58), Cáceres (0.61) y Almería (0.64). En la estación promedio el valor de R es 0.86. La dispersión que señala R está ligada a la dificultad de modelar valores extremos, en particular los valores de $\delta^{18}O$ más bajos (aguas más ligeras) y a decalajes de un mes.

Tabla 4 - Criterios de identificación de parámetros y estructuras de modelos: estación media y REVIP (Identification criteria of model parameters and model structures: Average station and REVIP)

ESTACIÓN	MODELO	N	np	1/N*Σ res	CMC	MVAR	BIC	d_k	R
PROMEDIO	T, LP	120	2	-7.6E-04	1.1172	0.8524	10.69	-4.953	0.856
	T, LP, LH, V	120	4	-3.3E-03	1.0764	0.8308	20.23	-0.028	0.862
	T, LP, VLH	120	3	-7.6E-04	1.0840	0.8310	15.45	-7.425	0.861
VALLADOLID	T, LP	108	2	-2.0E-03	5.0758	1.6339	14.44	-4.897	0.750
	T, LP, LH, V	108	4	-7.2E-03	4.9329	1.5826	23.66	-2.138	0.758
	T, LP, TLH	108	3	-3.4E-03	4.8501	1.6018	18.90	-7.547	0.762
PALMA DE MAYORCA	T, LP	104	2	-8.7E-03	3.5925	1.4218	12.88	-6.531	0.747
	T, LP, LH, V	104	4	-1.2E-02	3.4147	1.3667	21.99	-2.049	0.762
	T, LP, VLH	104	3	-5.8E-03	3.4606	1.3804	17.39	-8.932	0.758
VALENCIA	T, LP	102	2	-8.3E-03	6.0905	1.8865	15.34	-3.731	0.556
	T, LP, LH, V	88	4	5.6E-01	6.3156	1.8265	24.22	0.727	0.577
	T, LP, TLH	88	3	-8.5E-03	5.9818	1.8248	19.41	-8.964	0.579
ACORUÑA	T, LP	119	2	-2.3E-03	1.7567	1.0801	11.31	-4.178	0.642
	T, LP, LH, V	119	4	-1.3E-02	1.7908	1.0924	20.91	-0.191	0.633
	T, LP, TVLH	119	3	-2.3E-03	1.6984	1.0700	16.04	-13.824	0.657
SANTANDER	T, LP	120	2	-8.1E-03	1.6111	1.0071	11.19	-4.052	0.663
	T, LP, LH, V	120	4	-8.7E-03	1.3762	0.9217	20.53	-1.717	0.722
	T, LP, TLH	120	3	-8.1E-03	1.3991	0.9279	15.76	-5.544	0.717
MORÓN	T, LP	91	2	-7.5E-03	2.3798	1.2669	11.40	-8.608	0.663
	T, LP, LH, V	91	4	-8.2E-03	2.0716	1.1781	20.12	-7.328	0.716
	T, LP, VLH	91	3	-7.5E-03	2.0889	1.1777	15.62	-12.970	0.713
CÁCERES	T, LP	105	2	-1.4E-03	4.0270	1.5101	13.33	-6.427	0.582
	T, LP, LH, V	105	4	-4.7E-02	4.6498	1.7382	23.27	-1.824	0.516
	T, LP, TLH	105	3	-1.4E-03	3.7985	1.4485	17.76	-12.090	0.614
CIUDAD REAL	T, LP	110	2	-2.7E-03	5.2698	1.7267	14.67	-6.210	0.694
	T, LP, LH, V	110	4	-2.8E-03	5.2525	1.7356	24.05	-2.549	0.696
	T, LP, TLH	110	3	-2.7E-03	5.2506	1.7293	19.35	-8.497	0.696
MURCIA	T, LP	102	2	-5.8E-03	6.8647	1.8266	16.11	-3.850	0.695
	T, LP, LH, V	102	4	-5.1E-03	6.3436	1.7692	24.84	-1.576	0.722
	T, LP, TLH	102	3	-5.8E-03	6.5338	1.7916	20.41	-7.648	0.712
MADRID	T, LP	97	2	-1.6E-04	7.1935	2.0669	16.34	-2.940	0.723
	T, LP, LH, V	89	4	1.1E-03	7.0383	2.0538	24.99	0.565	0.730
	T, LP, VLH	89	3	-1.7E-04	7.0497	2.0547	20.52	-5.319	0.729
LEÓN	T, LP	114	2	-7.3E-02	6.3323	1.8695	15.80	-2.909	0.661
	T, LP, LH, V	114	4	-6.7E-02	6.1723	1.8244	25.12	-1.001	0.671
	T, LP, VLH	114	3	-6.9E-02	6.2145	1.8244	20.42	-6.976	0.670
ALMERÍA	T, LP	88	2	1.8E-04	5.2103	1.6341	14.17	-4.796	0.634
	T, LP, LH, V	88	4	1.1E-04	5.0717	1.6229	22.98	-2.247	0.647
	T, LP, TVLH	88	3	1.8E-04	5.1008	1.6299	18.53	-14.191	0.644
TORTOSA	T, LP	116	2	-5.2E-05	3.4132	1.4117	12.92	-5.741	0.683
	T, LP, LH, V	116	4	-2.0E-04	3.2867	1.4110	22.30	-2.387	0.697
	T, LP, TVLH	116	3	-5.2E-05	3.3769	1.4008	17.64	-14.278	0.687
ZARAGOZA	T, LP	117	2	-2.1E-05	4.6448	1.6899	14.17	-4.768	0.719
	T, LP, LH, V	117	4	1.2E-04	4.6061	1.6770	23.65	-3.124	0.722
	T, LP, VLH	117	3	-2.1E-05	4.6106	1.6785	18.90	-9.148	0.722
GIRONA	T, LP	99	2	-1.8E-05	3.1725	1.3439	12.36	-5.535	0.671
	T, LP, LH, V	93	4	-5.2E-04	3.0726	1.2938	21.20	-2.593	0.676
	T, LP, VLH	93	3	-2.0E-05	3.1004	1.2968	16.70	-8.724	0.672

En la Figura 7 se presentan las series de valores de $\delta^{18}O$ calculadas versus medidas correspondientes a la estructura de modelo óptima de tres parámetros para la estación promedio y las estaciones de REVIP que alcanzan el mejor y el peor resultado, Valladolid y Valencia, respectivamente. En las series se puede apreciar la capacidad de los modelos de reproducir la evolución estacional del $\delta^{18}O$ y, en particular, los picos observados en primavera. Los tres modelos representan mejor todos los picos que los modelos básicos de dos parámetros (T, LnP). Aún así, se aprecia la limitación ya comentada para reproducir adecuadamente algunas observaciones extremas; destacando entre estas las caídas invernales del valor de $\delta^{18}O$.

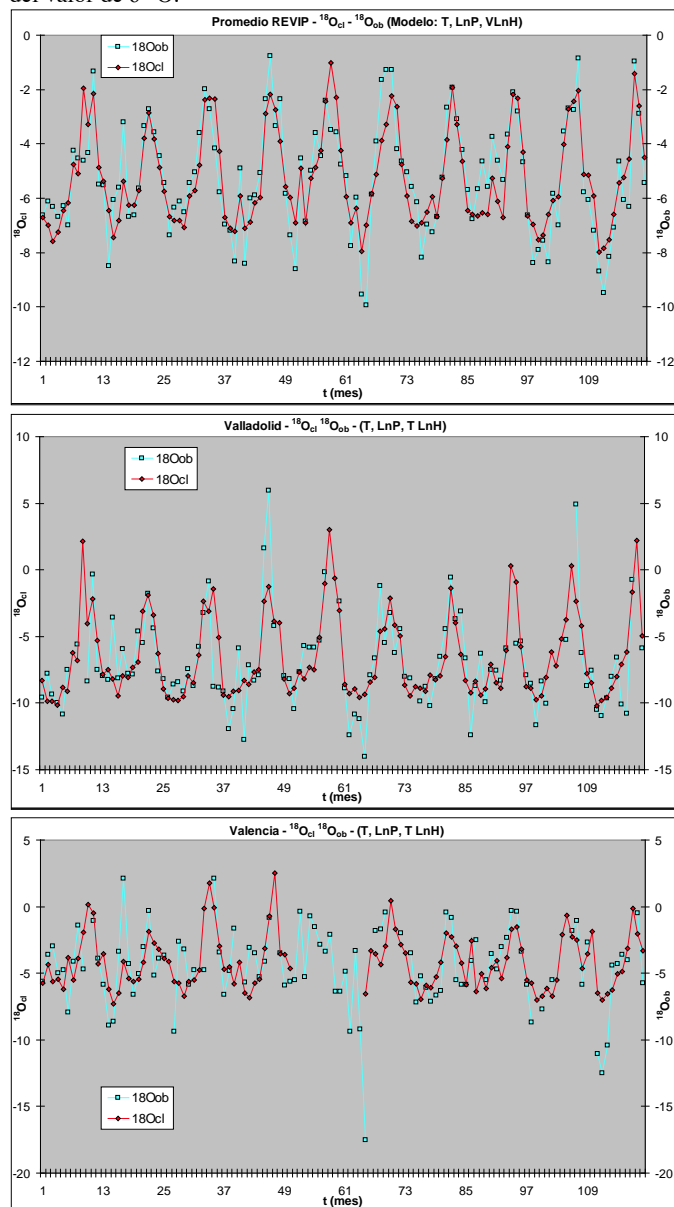


Figura 7 - Modelos de regresión múltiples de tres parámetros: series calculadas vs observadas. Estación promedio, Valladolid y Valencia (Multiple regression models of three parameters: calculated vs observed series. Average station and Valladolid and Valencia stations)

Estudio de la correlación $\delta^{18}O$ -Parámetros climáticos en su evolución temporal a escala anual

Abordar un estudio de la correlación entre los valores de $\delta^{18}O$ y parámetros climáticos en su evolución temporal a escala anual, demandaría series anuales más extensas. Así los resultados que se presentan se consideran estrictamente una primera aproximación. Se correlacionaron las series anuales de las estaciones REVIP y la estación promedio con el fin de contrastar los resultados con lo observado en el estudio a escala mensual. Los coeficientes de

correlación de los parámetros climáticos respecto al $\delta^{18}O$ para todas las estaciones se presentan en la Tabla 5. Estas correlaciones ofrecen un claro contraste con las de escala mensual (Tabla 1):

- La temperatura, la precipitación y la humedad tienen una baja notoria de sus correlaciones, R, con $\delta^{18}O$ respecto a las correspondientes de las series mensuales. La humedad y la temperatura se pueden considerar no correlacionadas en todas las estaciones con la excepción de Girona.
- La presión atmosférica y el índice NAO son los parámetros que presentan las correlaciones mayores respecto a $\delta^{18}O$. Si bien en el caso NAO esto dista de ser homogéneo para todas las estaciones, igualmente el incremento es notorio respecto a las series mensuales.
- La velocidad del viento mantiene valores de correlación en el mismo orden que los correspondientes a las series mensuales.
- NAO y la presión atmosférica cuyo R en todas las estaciones para las series mensuales variaba entre 0.40 y 0.50, en las series anuales pasa a un rango entre 0.70 y 0.82. Ello es coherente dado el vínculo entre ambos parámetros que se evidencia más al ampliar la escala temporal.
- La correlación precipitación- $\delta^{18}O$ pasa a ser aritmética y no logarítmica como lo era para las series mensuales. Ello refleja del menor rango de variación interanual respecto al mensual

Tabla 5 - Coeficientes de correlación: parámetros climáticos- $\delta^{18}O$. Escala temporal: anual (Correlation coefficients: climatic parameter- $\delta^{18}O$. Time scale: annual)

Corr OXIG-18	Tº	Pp	Ln Pp	H	Ln H	V	LnV	Hg	NAO
PROMEDIO REVIP	-0.108	-0.396	-0.363	0.097	0.094	-0.134	-0.148	0.776	0.593
A CORUÑA	-0.028	-0.835	-0.701	-0.025	-0.036	0.249	0.210	0.440	-0.124
SANTANDER	-0.093	-0.208	-0.312	0.307	0.334	-0.128	-0.149	0.352	-0.042
MORON	-0.072	-0.165	-0.380	-0.264	-0.234	0.882	0.868	0.356	0.113
CACERES	0.059	-0.432	-0.166	-0.103	-0.071	0.282	0.216	0.446	0.142
CIUDAD REAL	-0.252	-0.349	-0.151	0.028	0.032	0.087	0.141	0.645	0.455
MADRID-REIRO	0.466	0.192	-0.086	0.323	0.276	0.063	-0.037	-0.109	-0.172
VALLADOLID	-0.414	-0.720	-0.469	-0.413	-0.424	0.353	0.306	0.737	0.801
LEON	0.074	-0.216	0.495	0.019	0.047	-0.632	-0.700	0.737	0.634
PALMA	0.223	-0.470	-0.153	0.028	0.034	-0.412	-0.447	0.751	0.463
ALMERIA	0.236	-0.622	-0.604	0.297	0.361	-0.026	-0.012	0.451	0.273
VALENCIA	0.232	0.107	-0.239	-0.340	-0.357	0.204	0.157	0.501	0.536
TORTOSA	-0.089	0.634	0.050	0.380	0.318	0.450	0.466	0.501	0.477
MURCIA	0.206	-0.503	-0.386	0.181	0.163	-0.222	-0.258	0.372	0.114
ZARAGOZA	-0.228	0.371	-0.049	0.435	0.398	-0.794	-0.785	0.512	0.489
GERONA	-0.726	0.237	0.009	0.688	0.701	-0.762	-0.769	0.595	0.716

5. CONCLUSIONES

Se procuró identificar el modelo de regresión múltiple óptimo que describiese la evolución temporal a escala mensual del valor de $\delta^{18}O$ en precipitación en las 15 estaciones de la Red Española de Vigilancia de Isótopos en Precipitación en la Península Ibérica e Islas Baleares y en una estación sintética que representa la media de estas. Para ello se investigaron 26 estructuras de modelo. Dada la heterogeneidad de los modelos, tanto en el número de parámetros como en la conformación de estos (al parámetro de modelo simple lo define un parámetro climático y al compuesto lo conforman varios climáticos) y el interés de evitar la sobreparametrización se utilizaron dos criterios de comparación de modelos: BIC que penaliza el incremento del número de parámetros del modelo y d_k que, además de valorar el principio de parsimonia, penaliza la dependencia de los parámetros del modelo respecto a los datos.

Metodológicamente se pudo observar que el uso de los criterios BIC y d_k ha sido útil, si bien este último reveló alguna limitación relacionada con la definición misma del criterio y el problema tratado.

Los parámetros con los que se modeló la evolución temporal a escala mensual del valor de $\delta^{18}O$ en la precipitación han sido:

- Temperatura (T): es el parámetro principal, que atiende a la condensación y que, como proxy, se considera que describe de forma incompleta el fenómeno de fraccionamiento isotópico.
- Precipitación (LnP): describe el “efecto cantidad”.

- Humedad (lnH) y Viento (V) o/y Temperatura (T): atienden al proceso de evaporación, en el que la humedad es un factor determinante y la velocidad del viento y la temperatura son factores reguladores.

El parámetro simple y el parámetro compuesto que atenderían a la condensación y a la evaporación, respectivamente, ambos de forma conjunta estarían describiendo el proceso de fraccionamiento isotópico.

Los cuatro parámetros climáticos son locales. Se desestimó trabajar con la presión atmosférica, parámetro local, y el índice NAO, parámetro regional, dadas sus bajas correlaciones.

El modelo básico es definido por dos parámetros simples, temperatura y logaritmo de la precipitación, y alcanza ajustes aceptables con las series observadas, valorándose como óptimos si se juzgan por su simplicidad (*BIC*). Sin embargo, el incorporar a estos modelos un término con un parámetro compuesto definido por el logaritmo de la humedad y la velocidad del viento y/o la temperatura mejora la representación de detalle. Estos modelos de tres parámetros se consideran óptimos desde una perspectiva más amplia de valoración (d_k). Aún así, los modelos tienen dificultades al representar valores extremos. Se identifican como parámetros de los modelos óptimos los siguientes:

- T, lnP, V lnH, en las estaciones de: Palma de Mallorca, Morón, Madrid-Retiro, León, Zaragoza, Girona y la estación sintética media.
- T, lnP, T lnH, en las estaciones de: Valladolid, Valencia, Santander, Cáceres, Ciudad Real y Murcia.
- T, lnP, VT lnH, en las estaciones de A Coruña, Tortosa y Almería.

El estudio en primera aproximación sobre la evolución temporal a escala anual del valor de $\delta^{18}\text{O}$, en lo referente a la correlación ofreció un claro contraste respecto a lo obtenido a escala mensual. La presión atmosférica, parámetro local aunque correlacionado a escala anual con el índice NAO, y este mismo índice, parámetro regional, incrementaron notablemente su correlación con el $\delta^{18}\text{O}$. Por el contrario la temperatura y la humedad, parámetros locales muy relevantes a escala mensual, mostraron una clara falta de correlación con el $\delta^{18}\text{O}$. Ello podría estar sugiriendo que a mayor escala temporal irían cobrando influencia las condiciones climatológicas regionales en detrimento de las locales respecto a condicionar el valor de $\delta^{18}\text{O}$ en precipitación en un sitio dado.

Finalmente, en el estudio presentado, como en los antecedentes referenciados, se continúa desestimando por desconocerse la situación en origen: esto es las condiciones de evaporación que rigen el valor de $\delta^{18}\text{O}$ en el vapor que se incorpora a las nubes que dan lugar a las precipitaciones estudiadas. Poder identificar las condiciones climáticas en origen, caracterizarlas de forma accesible y evaluar su incorporación al proceso de modelación es una de líneas de trabajo de mayor desafío entre las que ofrece este campo.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la labor de revisión por su contribución en la mejora del trabajo presentado.

7. REFERENCIAS

- Bowen, G.J. and B. Wilkinson, B. (2002) "Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in meteoric precipitation". *Geology*, **30**(4), 315-318.
- Capilla, J., J. Rodríguez Arevalo, S. Castaño, M.F. Díaz Teijeiro, J. Heredia, and R. Sanchez del Moral (2011): "Mapping Oxygen-18 in Meteoric Precipitation over Peninsular Spain using Geostatistical Tools". 2011 AGU Fall Meeting San Francisco, California. USA
- Díaz-Teijeiro, M.F., J. Rodríguez-Arévalo, y S.Castaño, (2009): "La Red Española de Vigilancia de Isótopos en la Precipitación (REVIP): distribución isotópica espacial y aportación al conocimiento del ciclo hidrológico". *Ingeniería Civil*, **155**, 87-97.
- Heredia, J. (1994): "Determinación automática de la geometría de las formaciones hidrogeológicas". Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Inédita.
- Kendall, C. and J. Mc Donnell (2003): "Isotope tracers in catchment hydrology". 3th Ed. ELSEVIER. Netherlands. 839 pp.
- Liebinger, A., G. Haberhauer, K. Varmuza, W. Papesch and, G. Heiss (2006): "Modeling the oxygen 18 concentration in precipitation with ambient climatic and geographic parameters". *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L05808. doi:10.1029/2005GL025049.
- Liebinger, A., W. Papesch, K. Varmuza, G. Haberhauer (2007): "Multivariate models for the concentration of oxygen-18 in precipitation based on meteorological and geographical features". *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **89**, 1-8.
- Lykoudis, S.P., A.A. Argiriou and E. Dotsika (2010): "Spatially interpolated time series of $\delta^{18}\text{O}$ in Eastern Mediterranean precipitation". *Global and Planetary Change*, **71**, 150-159.
- Rodríguez Arévalo, J., S. Castaño, and M.F. Díaz-Teijeiro (2010): "Contribution of the Spanish Network for Isotopes in Precipitation and related modeling activities to characterize water bodies and their evolution". European Groundwater Conference. Madrid. Spain.
- Rodríguez Arévalo, J., M.F. Díaz-Teijeiro, and S. Castaño (2011): "Modelling and mapping oxygen-18 isotope composition of precipitation in Spain for hydrologic and climatic applications". International Symposium on Isotopes in Hydrology, Marine Ecosystems and Climate Change Studies, Monaco
- Rozanski, K., L. Araguas-Araguas, and R. Gonfiantini (1993): Isotopic patterns in modern global precipitation. *Geophysical Monograph* 78. American Geophysical Union. 36 pp.

Antolatzaileak / Organizan / Organizado



ARANZADI

zientzia elkartea . sociedad de ciencias
society of sciences . société de sciences



S.P.U.I.A.G.G.

eman ta zabal zazu



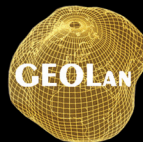
Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

Laguntzailea / Colabora / Collaborator



Beta Analytic
Datación por Radio carbono
Desde 1979



EUSKO JAURLARITZA



GOBIERNO VASCO

HEZKUNTZA SAILA

DEPARTAMENTO DE EDUCACIÓN