

Sobre el uso de observaciones en altura para la modelización espacial de variables climáticas en entornos de montaña

P. Clavel Muro¹, S. Buisán Sanz², R. Serrano Notivoli³, J.M Cuadrat Prats¹, M.A. Saz Sánchez¹

¹ Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50018 Zaragoza.

² Departamento de Sistemas Básicos y Estudios y Desarrollos. Agencia Estatal de Meteorología. Paseo el Canal 17, 50007 Zaragoza.

³ Estación experimental de Aula Dei. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Avd. de Montañana s/n. Zaragoza.

pclavm@gmail.com, masaz@unizar.es

RESUMEN: Muchos de los procesos que se desarrollan en entornos de montaña están condicionados por el clima, desde el funcionamiento de los sistemas naturales hasta las actividades antrópicas, pasando por la disponibilidad de recursos hídricos superficiales. En España son sin embargo muy pocos los observatorios disponibles por encima de los 1.000 m.s.n.m en las bases de datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y muchos menos los que se localizan por encima de los 1.500. En el último año AEMET ha desarrollado acciones para la recuperación de los datos existentes en distintos refugios de montaña y su digitalización en el Banco Nacional de Datos Climatológicos. Para evaluar la importancia de disponer de observaciones climatológicas en altura y tras desarrollar un exhaustivo control de calidad de los datos instrumentales, se han generado mediante modelos de regresión y corrección por residuales cartografías de la temperatura y la precipitación estacional en el Pirineo Central español utilizando dos subconjuntos de datos: el primero con 117 observatorios localizados por debajo de los 1.500 m.s.n.m y el segundo añadiendo los datos de la serie de los 16 refugios localizados entre los 1.500 y los 2.195 m.s.n.m. Los datos obtenidos muestran la existencia de diferencias importantes en el resultado de la modelización espacial de las variables climáticas en altura cuando integramos las observaciones por encima de los 1.500 m, señalando el interés que tiene la recuperación de estas series para la adecuada reconstrucción del clima en entornos de montaña.

Palabras-clave: Pirineo Central, Temperatura, Precipitación, Gradientes Altitudinales.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos dos decenios se ha convertido en habitual el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en los estudios sobre el clima de carácter regional. Los SIG permiten modelizar la distribución espacial de las variables climáticas en cualquier entorno geográfico creando superficies continuas que nos ayudan a comprender y analizar las características climatológicas de una zona. En ocasiones se consiguen buenos resultados y con valores de error pequeños (Vicente et al., 2003). Pero esa precisión está condicionada por la calidad de los datos de partida y la densidad de observatorios.

En relación a la calidad de las series, se han confeccionado bases de datos de gran calidad y longitud temporal de ámbito mundial (Mitchell y Jones, 2005; Beck et al., 2005), ámbito Europeo (Klok y Klein Tank, 2009), y nacional (Brunetti et al., 2006; Begert et al., 2005; González Hidalgo et al., 2011), pero en todos los casos, se hace evidente la escasa representación de observaciones en áreas de montaña, a causa de la dificultad de disponer largas series de datos con un limitado número de observatorios en esas zonas. En este sentido, en Europa es destacable el ejemplo de la cordillera de los Alpes donde el proyecto HISTALP trabaja desde hace años en la recuperación de series climáticas (Böhm et al., 2009), y el proyecto CARPATCLIM, en los Cárpatos, en el que participan los diferentes países de la región (JCR, 2010). En los Pirineos muchos proyectos han iniciado trabajos de recuperación y control de datos (Soubeyroux et al., 2011; Esteban, et al., 2012; Espejo et al., 2008), pero estas series climáticas son parciales y de calidad muy variable; además, están limitadas por los enfoques estrictamente nacionales, reduciendo la capacidad de análisis global de las variaciones climáticas.

En las cordilleras más elevadas de la Península Ibérica existen pocos observatorios por encima de los 1.000 msnm, apenas por encima de 2.000 msnm, y prácticamente ninguno por encima de 2500 msnm. Disponer información en altura, resulta a priori fundamental para los estudios sobre el clima en entornos de montaña, pero también para cualquier estudio donde el clima aparezca como variable explicativa. El propio IPCC incluye dentro de sus líneas prioritarias disponer de ese tipo de información ya que las zonas de montaña están identificadas como sensibles para observar efectos del cambio climático.

Partiendo de la hipótesis de que una mayor densidad de observaciones en altura podría mejorar la calidad de la modelización espacial de variables climáticas en entornos de topografía compleja, se comparan los resultados obtenidos de la modelización espacial de la temperatura y la precipitación en el Pirineo Central Español con la red de observatorios disponible de AEMET considerando sólo los observatorios disponibles por debajo de los 1.500 msnm o introduciendo datos de observatorios localizados a altitudes superiores, en general observatorios localizados en estaciones meteorológicas de montaña, cuya recuperación en integración en el Banco Nacional de Datos se está considerando como estratégica por parte de AEMET y del *International Panel on Climate Change (IPCC-AR5)*.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es el de evaluar los cambios producidos en el resultado de la modelización espacial de variables climáticas en el Pirineo Central tras utilizar en el proceso observatorios ubicados en refugios por encima de los 1.500 msnm.

Para conseguir este objetivo se han cubierto una serie de etapas que podríamos considerar como objetivos parciales de la investigación, como son:

El control de calidad (relleno de lagunas, identificación de extremos y evaluación de la homogeneidad) de los datos de los refugios.

La modelización espacial de las variables climáticas en entornos SIG de trabajo mediante modelos de regresión simple y corrección por residuales.

El análisis comparativo de los modelos y cartografías resultantes.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en el Pirineo Central, una zona con unas características climáticas complejas, condicionadas por la altitud (superior a los 3.000 msnm en algunos ámbitos), la orientación (si bien la mayor parte de los valles cortan perpendicularmente la cordillera) y la mayor o menor cercanía a los mares Cantábrico hacia el oeste y Mediterráneo hacia el este.



Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Base de datos

En la figura 1 aparecen representadas los observatorios utilizados en este trabajo, en gris aquellos puntos con información disponible por debajo de los 1.500 msnm y en rojo los 16 observatorios, localizados en refugios, que desde el año 2013 se está trabajando en la recuperación de sus registros y su digitalización en el Banco Nacional de Datos. El nombre, altitud y coordenadas de estas estaciones aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Observatorios a más de 1.500 msnm.

<i>Indicativo</i>	<i>Nombre</i>	<i>Altitud (msnm)</i>	<i>C_x</i>	<i>C_y</i>
9812E	Refugio de Goriz (Fanlo)	2.195	747095	4727839
9451D	Refugio de Bachimana	2.190	726772	4740083
9446I	Refugio de Respomuso (Sallent de Gállego)	2.145	721050	4744004
9834E	Renclusa	2.140	799158	4730575
9840D	Refugio Angel Orus (Eriste)	2.115	783505	4725218
9839O	Cerler	2.020	790922	4718665
9660	Sant maurici (Llac)	1.920	828668	4722101
9837E	Refugio de Estos (Benasque)	1.890	785267	4730637
9445E	Sallent de gallego (Furco)	1.855	713999	4737544
9452E	Panticosa Esquí	1.830	723046	4731469
9451A	Refugio Casa Piedra (Panticosa)	1.645	726380	4738155
9839T	Cerler	1.600	790873	4720919
9216D	El ferial (Isaba)	1.591	679444	4758506
9195E	Candanchu (Etuksa)	1.560	701341	4740158
9208H	Refugio de Lizarra (Aragües del puerto)	1.540	694118	4737450
9445	Sallent de gallego (Formigal)	1.500	715246	4739127

Para la preparación de la base de datos con la que generar las cartografías se han seguido cuatro fases.

Eliminación de observatorios localizados por debajo de los 400 msnm.

Eliminación de observatorios que como los de Cerler situado a 1.600 msnm, 2.020 msnm o Candanchú-Etuksa a 1.560 msnm no aportan series de datos fiables. Esta fase se desarrolló atendiendo las indicaciones del personal responsable de la gestión de los datos de esos observatorios

Identificación y eliminación de valores extremos y relleno de lagunas, haciendo uso del dato diario registrado en los observatorios cercanos.

Control de homogeneidad de las bases de datos rellenas.

4.2. Proceso cartográfico

Una vez depurada la base de datos, se ha realizado una cartografía de la temperatura y precipitación estacionales y anuales utilizando dos subconjuntos de datos: el primero con 117 observatorios localizados por debajo de los 1.500 m y el segundo añadiendo los datos de los 16 puntos señalados anteriormente.

Los resultados del proceso cartográfico son 40 cartografías, 20 teniendo en cuenta alturas superiores a 1.500 msnm y otros 20 mapas sin tener en cuenta estos datos. Para conseguir dichas cartografías se han realizado operaciones con herramientas SIG gracias a las capas disponibles. Se trata de 4 capas raster (MDE de 100, longitud, latitud y coseno de la orientación) y 3 capas vectoriales (Ríos, línea de costa del mar Cantábrico y línea de costa del mar Mediterráneo).

Para las capas raster se ha extraído la información únicamente de la zona de estudio y para las vectoriales se ha calculado la distancia medida desde cada celda hasta el origen más cercano en línea recta. El resultado han sido 7 capas raster, 3 de las cuales indican distancia. Estas 7 capas, son variables condicionantes de las 4 variables a analizar por lo que se combina la información geográfica con la

climatológica para realizar la técnica de interpolación. Se han utilizado técnicas de modelización espacial basadas en un análisis de regresión múltiple por pasos y corrección por residuales (Vicente Serrano et al, 2003). El análisis estadístico y la obtención de los parámetros de la regresión se ha desarrollado en SPSS. El cálculo de los modelos espaciales y la cartografía final en ArcMAP 10.2.2.

5. RESULTADOS

5.1. Análisis de los modelos

En primer lugar analizaremos la significación de las variables predictivas utilizadas en nuestra cartografía final e identificaremos aquellas que tienen más relevancia en la distribución de las variables. Tanto para los datos anuales como estacionales el Modelo Digital de Elevaciones ha intervenido en las ecuaciones en un 99% de los casos, remarcando la importancia que el relieve tiene en la plasmación espacial del clima en esta zona. El número de variables significativas para cada modelo varía, llegando a tener hasta 4 como la precipitación en otoño, aunque en general son 3 las variables que intervienen en el proceso de modelización (Tabla 2 y 3). En ningún caso ha sido necesario incluir variables compuestas para conseguir modelos con valores de R suficientes como para abordar la cartografía.

Tabla 2. Variables integradas en los modelos para los datos anuales.

	<i>Tª media</i>	<i>Tª máxima</i>	<i>Tª mínima</i>	<i>Precip Total acumulada</i>
Con obs >1500 msnm	MDE Dist. Atlántico Dist. Ríos	MDE Longitud Latitud	MDE Dist. Ríos Dist. mediterráneo	MDE Dist. Atlántico Longitud Dist. mediterráneo
Sin obs >1500 msnm	MDE Dist. Atlántico Dist. Ríos	MDE Latitud Longitud	MDE Dist. Ríos Dist. mediterráneo	MDE Dist. Atlántico Longitud Dist. mediterráneo

Tabla 3. Variables integradas en los modelos para los datos estacionales.

	<i>Tª media</i>	<i>Tª máxima</i>	<i>Tª mínima</i>	<i>Precip Total acumulada</i>
Invierno Con obs >1500 msnm	MDE Latitud	MDE Dist. mediterráneo	MDE	Longitud MDE Dist. Ríos
Invierno Sin obs >1500 msnm	MDE Latitud	Dist. Mediterráneo MDE	MDE	Longitud MDE Dist. Ríos
Primavera Con obs >1500 msnm	MDE Dist. Atlántico Longitud Dist. Mediterráneo	MDE Longitud	MDE Longitud	MDE Dist. Atlántico Dist. Mediterráneo
Primavera Sin obs >1500 msnm	MDE Dist. Atlántico Longitud Dist. Ríos	MDE Longitud	MDE Longitud	MDE Dist. Atlántico Dist. Mediterráneo
Verano Con obs >1500 msnm	MDE Latitud	MDE Latitud	MDE Latitud Dist. Ríos	MDE Longitud Dist. Mediterráneo
Verano Sin obs >1500 msnm	Latitud MDE	MDE Latitud	MDE Latitud Dist. Ríos	MDE Longitud Dist. Mediterráneo
Otoño Con obs >1500 msnm	MDE Latitud	MDE Longitud	MDE Dist. Ríos Longitud	Latitud MDE Dist. Atlántico Dist. Mediterráneo
Otoño Sin obs >1500 msnm	MDE Latitud	MDE Longitud	MDE Longitud Dist. Ríos	Latitud MDE Dist. Atlántico Dist. Mediterráneo

Por otro lado, las variables significativas teniendo en cuenta observatorios a más y menos 1.500 msnm son prácticamente las mismas y no se encuentran diferencias significativas a la hora de explicar los modelos. Pero en cuanto al porcentaje de varianza explicada sí se observan cambios.

En el caso de la temperatura, los modelos que incluyen los datos recuperados en los observatorios de los refugios, son los que mayor valor de R ofrecen en sus modelos, hasta con un 96% de explicación del modelo (Tabla 4 y 5), siendo la temperatura media la que mejores resultados obtiene y la mínima los más bajos.

Tabla 4. Valor de R para los datos anuales.

	<i>T^a media</i>	<i>T^a máxima</i>	<i>T^a mínima</i>	<i>Precip acumulada</i>
Con obs >1500 msnm	0,95	0,94	0,85	0,82
Sin obs >1500 msnm	0,89	0,82	0,71	0,822

Tabla 5. Valor de R para los datos estacionales.

	<i>T^a media</i>	<i>T^a máxima</i>	<i>T^a mínima</i>	<i>Precip acumulada</i>
Invierno Con obs >1500 msnm	0,86	0,75	0,67	0,64
Invierno Sin obs >1500 msnm	0,65	0,59	0,31	0,65
Primavera Con obs >1500 msnm	0,96	0,94	0,86	0,81
Primavera Sin obs >1500 msnm	0,91	0,78	0,66	0,85
Verano Con obs >1500 msnm	0,97	0,95	0,81	0,81
Verano Sin obs >1500 msnm	0,93	0,85	0,73	0,76
Otoño Con obs >1500 msnm	0,96	0,92	0,86	0,80
Otoño Sin obs >1500 msnm	0,89	0,74	0,71	0,83

La precipitación sin embargo, tiene valores de R muy similares entre sí. A diferencia de la temperatura, en la precipitación no se puede asegurar que los modelos que tienen en cuenta valores de observatorios en altura son mejores. A pesar de eso, la precipitación acumulada anual, posee unos ajustes buenos ya se explica más de 70% del modelo en casi la totalidad de los modelos a excepción de invierno. La explicación puede estar relacionada con una atmosfera más libre sin superficie terrestre alrededor y con menos masa para ser calentada o enfriada, a medida que aumentamos en altura, debido a que el aire se empieza a calentar desde el suelo.

Los resultados obtenidos señalan que los valores de varianza explicada por los modelos son superiores cuando integramos la información de los observatorios en altura. Además, tanto en el caso de la precipitación como en la temperatura, al utilizar en el proceso de modelización las observaciones recuperadas en altura obtenemos valores estimados más bajos, lo que implica que en los procesos de modelización espacial hechos hasta ahora estaban sobreestimando los datos termopluviométricos por encima de los 1.500 m.

5.2. Análisis de las variaciones espaciales

El segundo análisis evalúa las tendencias comunes de manera anual y estacional, centrándonos en los patrones espaciales que se generan y las diferencias que se producen teniendo en cuenta los observatorios en zonas más elevadas que muestran las cartografías. Su diferencia se encuentra en los mapas de diferencias que ofrecen una comparación cuantificada entre los mapas obtenidos sin y con observatorios en altura.

5.2.1. Temperatura

Teniendo en cuenta observatorios en altura, se ha encontrado un patrón claro tanto de manera anual como estacional, donde las temperaturas suelen ser más frías en las zonas montañosas a excepción de la temperatura máxima en invierno donde se vuelve hasta 4°C más cálida en altura. En la mayoría de las ocasiones los colores en las zonas montañosas tienden a tonalidades azuladas denotando temperaturas más frías cuando se incluyen observatorios a más de 1.500 msnm, lo que implica que su no inclusión está sobreestimando los valores térmicos de estas zonas.

De manera anual, los valores obtenidos incluyendo dichos observatorios tienden a ser 1 o 2 °C inferiores en las zonas montañosas, pero de manera estacional se acentúa aún más como se observa en las

máximas en primavera (Figura 2) donde son hasta 5 °C más frías que cuando no se tienen en cuenta dichos observatorios.

5.2.2. Precipitación

En el caso de la precipitación se ha encontrado otro patrón claro, donde la cantidad de precipitación detectada es menor tanto a nivel anual como estacional al introducir información en altura, siendo además menor su error residual. A nivel anual, la mayoría de los observatorios en altura tienden a tonalidades azuladas, denotando una menor precipitación en esa zona entorno a unos 200 mm de diferencia. A nivel estacional, sigue la misma tendencia que varía según la estación pero que de media se encuentra en torno a unos 75 mm de diferencia como representa la precipitación total acumulada de verano. (Figura 3).

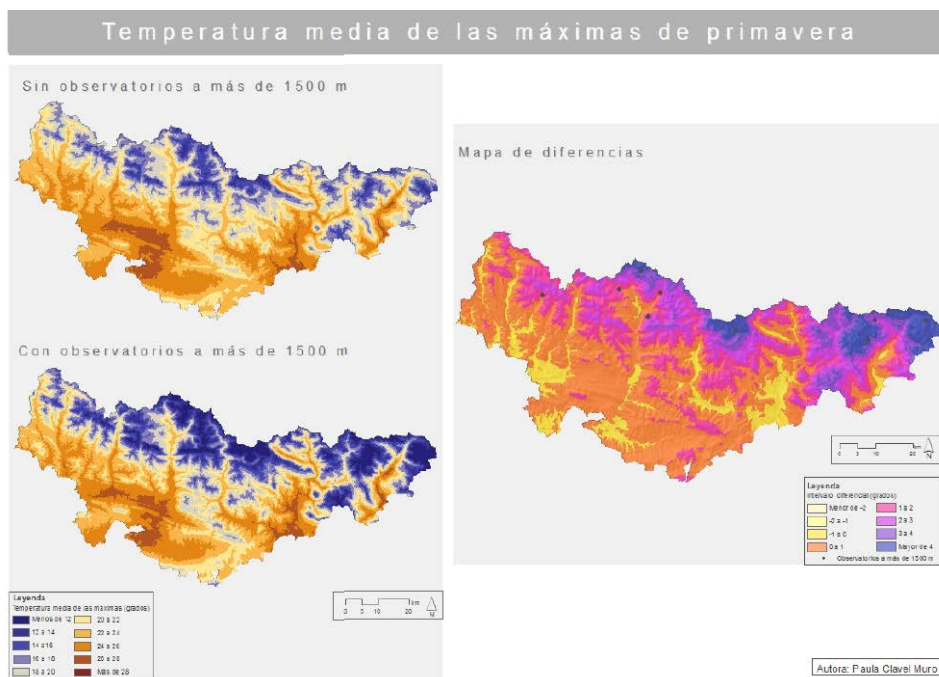


Figura 2. Temperatura media de las máximas de primavera.

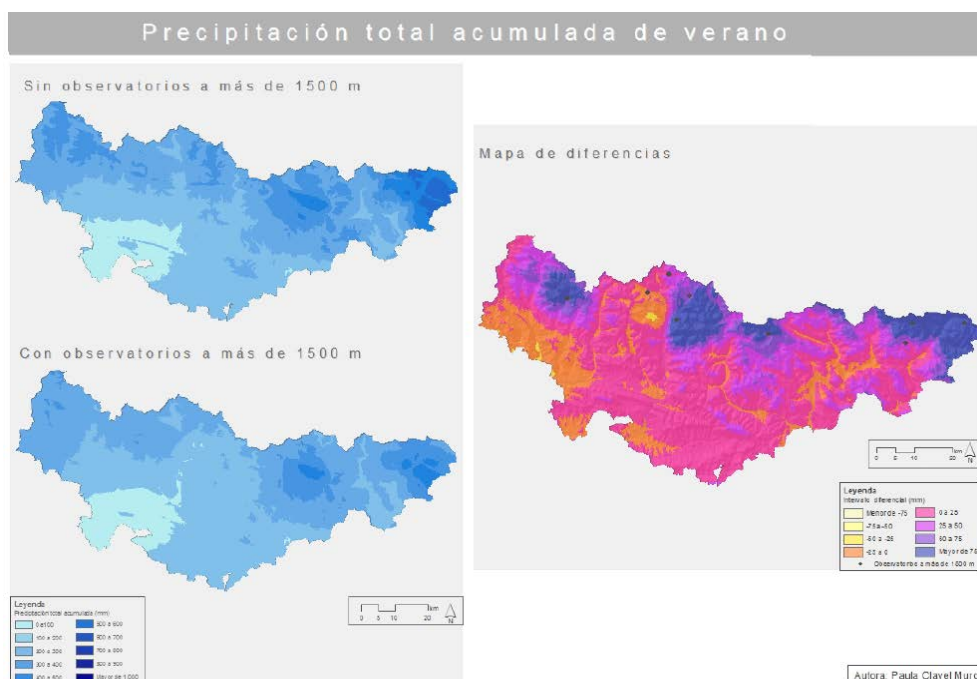


Figura 3. Precipitación total acumulada de verano.

6. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos, se pueden hacer las siguientes afirmaciones:

- Incluyendo observatorios con alturas superiores a 1500 msnm en la modelización espacial, el ajuste y el porcentaje de varianza explicada de los modelos es superior, lo cual indica una mejora de los resultados con este tipo de información.
- Cuando usamos información en altura los modelos resultantes suelen dar tanto para la precipitación como para la temperatura valores estimados más bajos. Es decir, sin información en altura estamos sobrestimando el valor de estas variables climáticas.
- Esta información en altura puede resultar también fundamental a la hora de caracterizar anomalías locales del clima como son las inversiones térmicas.

Estos resultados resaltarían la importancia de disponer de una buena red de observaciones en altura y lo fundamental de la recuperación de las posibles bases de datos disponibles, en especial los procedentes de la red de refugios.

AGRADECIMIENTOS

Un trabajo de investigación es siempre fruto de ideas, proyectos y esfuerzos previos. Por su orientación y atención a las consultas sobre metodología, mi agradecimiento al Dr. Miguel Ángel Saz Sánchez del departamento de geografía y ordenación del territorio área de análisis geográfico regional y al responsable del Departamento de Sistemas Básicos y Estudios y Desarrollos de AEMET, Samuel Buisán Sanz, por ceder los datos para el estudio.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Beck C, Grieser J y Rudolf B (2005): A new monthly precipitation climatology for the global land areas for the period 1951 to 2000. *Climate Status Report, 2004*. German Meteorological Service: 181-190.
- Begert M, Schlegel T y Kirchhofer W (2005): Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *International Journal of Climatology*, 25: 65-80.
- Böhm R, Auer I, Schöner W, Ganekind M, Gruber C, Jurkovic C, Orlik A y Ungersböck M (2009): Eine neue Webseite mit instrumentellen Qualitäts Klimadaten für den Grossraum Alpen zurück bis 1760. *Wiener Mitteilungen Band 216: Hochwässer: Bmessung, Risikoanalyse und Vorhersage*.
- Brunetti M, Buffoni L, Maugueri M y Nanni T (2006): Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. *International Journal of Climatology*, 26: 345-381.
- Espejo F, Ferraz J y Palomo M (2008): Tendencias recientes en las series de temperatura del Pirineo Central y Occidental. VI Congreso Internacional de la AEC, serie A, 6: 99-108.
- Esteban P, Prohom M y Aguilar E (2012): Tendencias recientes e índices de cambio climático de la temperatura y la precipitación en Andorra (1935-2008). *Pirineos*, 167: 71-88.
- González Hidalgo C, Brunetti M y de Luís M (2011): A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (monthly precipitation trends December 1945-November 2005). *International Journal of Climatology*, 31: 715-731.
- JCR (2010): *Climate of the Carpathian Region*. European Commission Joint Research Centre. <http://desert.jcr.ec.europa.eu/action/php/index.php>
- Klok, E.J. y Klein Tank, A. (2009): Updated and extended European dataset of daily climate observations. *International Journal of Climatology*, 29: 1182-1191.
- Mitchell TD y Jones PD (2005). An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology* 25, 693-712.
- Soubeyroux JM, Jourdain S, Grimal D, Espejo F, Esteban P y Merz T (2011): Approche trans-frontalière pour l'inventaire et la valorisation des données climatologiques sur le Massif des Pyrénées. Colloque SHF "Eaux en montagne". Lyon.

Vicente Serrano SM, Saz Sánchez MA y Cuadrat JM (2003): Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate research*. Vol. 24:161-189.