

# Cambios de tendencias de la evapotranspiración potencial en la primavera y verano de la Cuenca del Duero

M<sup>a</sup> Dolores Manso<sup>(1)</sup>, Ana Rodrigues<sup>(2)</sup>, Guilherme Chagas<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad de Aveiro, Departamento de Física, [maria.dolores@ua.pt](mailto:maria.dolores@ua.pt)

<sup>(2)</sup> Universidad de Aveiro, Departamento de Física, [ana.rodrigues@ua.pt](mailto:ana.rodrigues@ua.pt)

<sup>(3)</sup> Universidad de Aveiro, Departamento de Física, [goc@ua.pt](mailto:goc@ua.pt)

## Resumen

En este trabajo se analiza la tendencia: de la evapotranspiración potencial (EP), acumulada durante los meses de marzo a agosto, inclusive, por el método de Thornthwaite, y la precipitación acumulada en los mismos meses, a través de 15 estaciones meteorológicas para la Cuenca del Duero de España y Portugal (cinto en el entorno a la Cuenca del Duero (CD), en el periodo de 1970-2010. Los resultados muestran que en media la EP de estos seis meses, juntos, está aumentando al ritmo de 16.1 mm/semestre/década. Esta tendencia es significativa (al nivel de 95%), en 95 % de la estaciones de la CD. En cuanto que, la precipitación acumulada en los mismos meses disminuye, al ritmo de 6.2 mm/semestre/década. El índice hídrico anual también está disminuyendo lo que nos indica que existe una disminución media de la humedad en la CD y cambios en la clasificación climática.

## Introducción

Por un lado, en el contexto climático y fisiográfico de la Península Ibérica, los recursos hídricos superficiales, su cuantificación, disponibilidad y uso plantean una cuestión medio ambiental de primer orden. Por otro lado, grandes y relativamente rápidos cambios en el ciclo hidrológico puede dar lugar a de consecuencias catastróficas. Esto es cierto tanto para regiones demasiado pobladas, como Europa donde la temperatura es probable que aumente más rápido que la media mundial, Un análisis reciente sugiere que los cambios globales y regionales en el ciclo hidrológico se estén realizando (por ejemplo: (Wentz y otros, 2007); (Allan y Soden 2007); (Yu y Weller 2007); (Lenderink y Van Meijgaard 2008).

La EP, es el elemento climático más importante junto a la temperatura, T; y la precipitación, P, Juegan un papel crucial en los flujos de calor y de masa del sistema atmosférico global y es un tema de investigación clave en los programas científicos

internacionales (Ehlers y Krafft, 1996). Los cambios en la EP y P, y los regímenes hidrológicos tienen, un impacto directo en la producción de cultivos a través de cambios en el balance hídrico agroecológica.

El cálculo de Thornthwaite 1948, está basado en determinar la evapotranspiración en función de la temperatura media, con corrección sobre la duración de astronómica del día y el número de días del mes y es muy utilizado en Hidrología y para estimar el balance hídrico en climatología de Cuencas hidrográficas. Más tarde, en la década de los años noventa fue creada por países de la Unión Europea el Método modificado, para obtener mayor información sobre el impacto del cambio climático en sus regiones, para medir en todo el mundo las zonas áridas y semiáridas.

En este trabajo se aplica esta metodología para determinar la EP e se analizan los cambios históricos en la evapotranspiración potencial y la precipitación.

## Datos y Metodologías

Fueron usados las series mensuales de temperatura y precipitación de 20 estaciones de España y Portugal en el periodo de 1970-2010, procedentes de los Institutos Meteorológicos de ambos países y el almacenamiento máximo fue de 100 mm. Para análisis de tendencia, fue usado el test no paramétrico de Kendall.

Para el estudio de la variabilidad espacial, fue usado el análisis de componentes principales, Técnica utilizada para la precipitación en la CD por (Caramelo, y Manso Orgaz, 2007). Este método permite que un campo pueda ser descompuesto en Patrones espacio-temporales. Los patrones espaciales, también llamado funciones ortogonales empíricos (EOF), permiten obtener una regionalización e identificar zonas homogéneas con los patrones de variación similares. La Técnica de ACP (Análisis de Componentes Principales), es útil

porque permite la reducción de la dimensión de los datos, en cuanto, mantiene la mayor parte de la varianza. En la figura 1. Mostramos la distribución de las estaciones meteorológicas usadas para este estudio

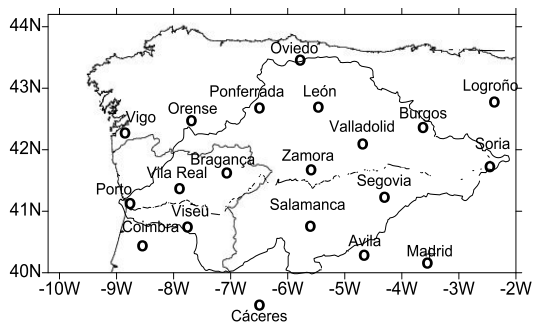


Fig. 1.- Distribución espacial de las estaciones de la Cuenca del Duero y su entorno

## Resultados

### Regionalización de la EP

Una distribución espacial de la EP media de 41 años, del semestre de primavera y verano (SPV), nos muestra que los valores máximos de EP acumulada se concentran en el sur y al este de la CD y los mínimos en el norte y al oeste Fig. 2-a. La variabilidad temporal (figura2-b), muestra el comportamiento temporal de la media, en la CD y nos da una idea de la tendencia, que en este caso es positiva con un ciclo de máximos de PET en los años 2004 a 2007. Significa que la EP durante el SPV en la CD, está aumentando y excedió a la tendencia normal durante estos años.

Los análisis de funciones ortogonales empíricas (EOF) / componentes principales (PC) se llevan a cabo para identificar los principales modos de variabilidad de las EP, por ahora, vamos a centrarnos primero, en la EP, donde la primera EOF que resulta de las series estimadas de SPV representan, en particular, la región oriental de la CD, con el 79%, de la varianza total explicada con cargas significativas  $\geq 0.7$  (Fig. 2-b). La variabilidad temporal asociada a esta región, también, demuestra que la EP está aumentando en esta región y también, que el año 2004, la EP fue superior a los SPV, (Fig. 2-d).

La segunda EOF2 de la Fig. 2e, representa la región occidental de la CD con una varianza total explicada del 8% y su serie temporal asociada a esta región, destaca un ciclo de picos máximos alrededor de la década de los 90, la tendencia aquí, también es positiva aunque menor que en la EOF1.

Como se deduce de todas las figuras temporales de la EP, todas son crecientes, después analizaremos cual es el porcentaje de estaciones que mantienen estas tendencias crecientes y significativas al 95%.

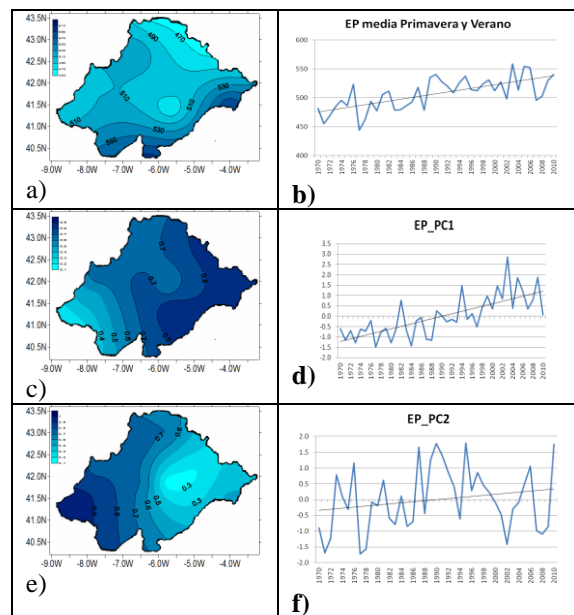


Fig. 2.- Distribución espacio-temporal de la EP en la CD:

Espacial: a) Media, c) EOF1, e) EOF2; Variabilidad temporal: b) Media, d) PC1 y f) PC2

### Regionalización de la P

Vamos hacer un análisis similar con la P, con el objetivo saber cuál es el comportamiento espacio-temporal, una vez que esta variable meteorológica, influencia en el ciclo hidrológico y en consecuencia, en la E, usando las mismas estaciones que para la EP. Los resultados están representados en las figuras 3-a a 3-f.

La distribución de la precipitación acumulada durante el SPV en la CD, ahora es diferente pues los mayores valores de precipitación se concentran en el norte y al oeste, la justificación de esta distribución es obvia, pues el oeste recibe las masas de aire del atlántico y en su entrada para la CD va encontrando cordilleras de montañas y por lo tanto van perdiendo humedad, lo mismo acontece con las masas de aire que entran por el Cantábrico.

En cambio el análisis de componentes principales, encontramos las mismas regiones que en la EP, ahora la primera EOF, representa la región más occidental de la CD con el 55% del varianza total explicada y la serie temporal asociada a esta región muestra una ligera tendencia a disminuir en esta región, La región sureste, está representada por la segunda EOF con el 11 % de la varianza total

explicada, con la variación temporal casi sin cambio en la tendencia. Figuras 3-e y 3-f, respectivamente. Estos cambios de tendencia nos conducen a analizar las tendencias al nivel global de toda la CD, y a nivel regional y así, saber hasta qué punto podemos considerar que estos cambios a nivel regional, son significativas y cuál es la región más afectada por estos cambios.

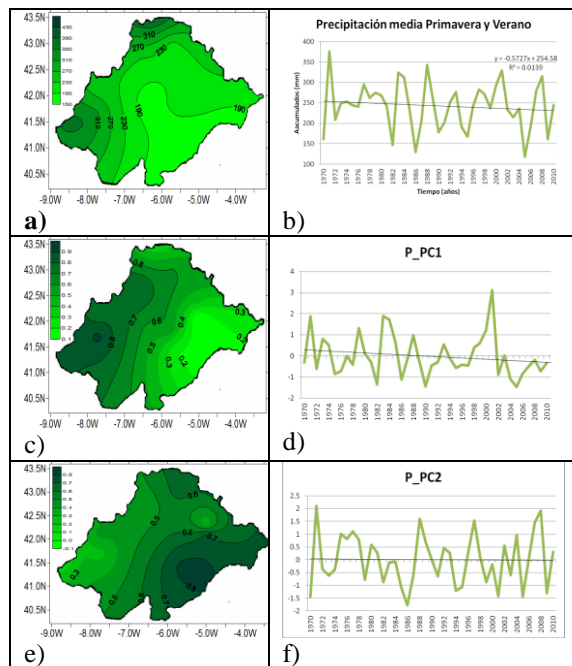


Fig. 3.- Distribución espacio-temporal de la P en la CD:

Espacial: a) Media, c) EOF1, e) EOF2; Variabilidad temporal: b) Media, d) PC1 y f) PC2

### Análisis de tendencia en los diferentes parámetros de la CD

Con el objetivo de investigar los cambios históricos del balance Hídrico de Thornthwaite 1948, sobre la CD, optamos por analizar las series de: EP, P, temperatura, T, índice hídrico y Evaporación real. Estos cinco parámetros son el resultados del balance hídrico para todas y cada una de las 19, estaciones y para todos y cada uno de los años desde 1970 a 2010.

La tabla 1, resume en las filas: EP, P, T y ER, los valores de la tasa de cambios, en general, para el conjunto de todas las estaciones. En la columna de SPV, y para los meses de: marzo, abril, mayo, junio, julio y agosto. También resume, el porcentaje de estaciones con tendencia positiva (+) y negativa (-), significativas al nivel de 95%. Las celdas en blanco, no son significativas. Así tendremos una visión completa de los cambios de la EP en su globalidad de la CD, donde la tendencia está aumentando a un

ritmo de +16, 9 mm/SPV/década, siendo el 95%, y el Porcentaje de estaciones con tendencia creciente, significativa en el SPV. Por meses se observa que el porcentaje de estaciones es menor en Abril (26%), y el mayor es junio con el 89%.

La T tiene un comportamiento semejante al de la EP, solo que ahora en la T, en los meses de junio y marzo, el número de estaciones que confirman el cambio de tendencia positiva es el 100%. La tasa de temperatura de SPV está aumentando a razón de 0.57 °C/SPV/década

La P de toda la CD, es decreciente en casi todos los meses, es mayor en junio con -4.5 mm/mes/década, agosto, -2.2 mm/mes/década, en el semestre de primavera y veranos juntos la disminución es de -6.2 mm semestre/década, en el mes de marzo la tendencia disminuye con una tasa de -0.7 mm/mes/década. El porcentaje de estaciones con esta tendencia negativa (significativa), del 16% de las estaciones en junio y en el 11 % en Julio y de 5% en todos los meses de primavera y verano. Estos resultados coinciden con los trabajos de González-Hidalgo et al, 2010, analizado las tendencias de precipitación en las diez cuencas hidrográficas de España entre 1946 y 2005, llegando a la conclusión que durante los meses de marzo y junio las precipitaciones

La T, en toda la CD está aumentado en el SPV, a una tasa de +0.57 °C/SPV/década, siendo estas dos tendencias significativas al nivel del 95% en el 95% de las estaciones de la CD. Este valor de la temperatura es algo más alto que los que resultados de la media anual encontrados por otros autores como por Ceballos et al 2008, +0.53°, por década en el periodo de 1972-2003 y superior al encontrado por (Jones et al., 2006) para el mismo periodo que es de +0.17°C a escala mundial y parecido al detectado por (Castro et al., 2005) y (Morales et al., 2005) para España +0.58°C y Castilla y León +0.49 °C, respectivamente.

La ER tiene un comportamiento diferente pues siendo en su globalidad decreciente con una tasa de -2.6 mm/SPV/década confirmado por el 10% de las estaciones con tendencia negativa significativa, se distribuye mensualmente de la siguiente forma: con tendencia positiva: marzo con 63%, abril con el 42 % y mayo con el 26%, con tendencia negativa el mayor porcentaje lo encontramos en julio con el 32% , mientras que junio ±5%, e agosto -5%, de las estaciones. Sintetizando, es creciente en la primavera y decreciente en el verano. El porcentaje de estaciones con estas tendencias es menor que en la EP.

De mayor importancia es el efecto que los cambios en las tasas de EP tendrán sobre los ecosistemas terrestres en general, y en la agricultura en particular. Este, se determina, principalmente, por el cambio asociado a la precipitación: en función de la distribución espacial y temporal de ambas tendencias, pues la disponibilidad de agua, regionalmente, podría variar en cualquier dirección pues, como demuestran los trabajos de (Axel, T., 2000). Por eso, nos vamos a centrar en los registros históricos de precipitación, para todas y cada una de las estaciones de la CD, los cuales demuestran una tendencia decreciente en las precipitaciones durante los meses de marzo, al mismo tiempo que las temperaturas, la evapotranspiración potencial y real aumenta sobre la CD. Estos cambios en la tendencia representan una amenaza para la agricultura, particularmente en el centro y este que tendría que hacer frente a la disminución de la disponibilidad de agua en la estación de crecimiento y florecimiento de las plantas.

### Cambios de Tendencia de la PET, P, T, ER

En esta sección vamos a analizar los cambios de tendencia mensual y del semestre de primavera y veranos para las cuatro variables que resultan del balance hídrico de todos los 41 años en cada una de las 20 estaciones y cuyos resultados están resumidos en la Tabla 1. En la primera columna esta representada la Evapotranspiración potencias (EP); . Los porcentajes crecientes designados por (Cre.); Los porcentajes decrecientes, designados por (Dec); Precipitación (P); Temperatura (T); Evapotranspiración Real (ER). La primera fila son los meses analizados en abreviatura y el Semestre de Primavera y Verano (SPV).

	Mr.	Ab.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	SPV
<b>EP</b>	+2	+3.6	+3.5	<b>+5.1</b>	+2.6	+3.3	<b>+16.9</b>
<b>Crec.</b>	63	26	79	<b>89</b>	42	53	<b>95</b>
<b>P</b>	<b>-0.7</b>	+2.4	<b>-1.3</b>	<b>-4.5</b>	<b>-2.2</b>	+0.2	<b>-6.2</b>
<b>Dec.</b>	<b>5</b>			<b>16</b>	<b>11</b>		<b>5</b>
<b>T</b>	<b>+0.7</b>	+0.5	+0.6	<b>+0.8</b>	+0.4	<b>+0.5</b>	<b>+0.57</b>
<b>Cre.</b>	<b>100</b>	84	95	<b>100</b>	47	<b>95</b>	<b>95</b>
<b>ER</b>	<b>+1.2</b>	+2	+1.4	<b>-1.3</b>	<b>-4.4</b>	<b>-1.4</b>	<b>-2.8</b>
<b>Crec</b>							
<b>Dec.</b>	<b>63</b>	42	37	<b>±5</b>	<b>32</b>	<b>5</b>	<b>10</b>

Tabla I. Tendencia media de 41 años (1970–2010) EP, T, P, ER mensual y semestral en (mm o °C/década y cambios de la tendencia relativa en (%) con respecto a los 41 años de las 20 estaciones en la CD

### Variación espacial de la tendencia

El análisis de las tendencias mensuales revela que la fuerza de las tendencias de primavera y verano, juntas, en la mayoría de las regiones depende principalmente de las tendencias individuales. Hay, sin embargo, un patrón consistente espacial que subyace a la contribución individual de las tendencias mensuales a la tendencia de los seis meses juntos. En este sentido mostramos la distribución espacial de los Tau de Kendall en cada una de las cuatros variables que intervienen para el ciclo hidrológico y son mostradas en la figura 4-a), a 4-d) donde se puede observar que la precipitación y la temperatura tienen patrones parecidos con mayor tendencia positiva en la región este, que es precisamente la región representada por la EOF2 tanto de la temperatura como de la Evapotranspiración potencial. Por lo tanto, es aquí que estas dos variables están aumentando en primavera y verano. Si nos fijamos en los otros dos patrones, vemos que la precipitación modera un poco las tendencias, pero se mantiene la región SE de la CD como una región de riesgo, sobretodo, en la agricultura, que precisa de alguna precipitación en el momento de crecimiento

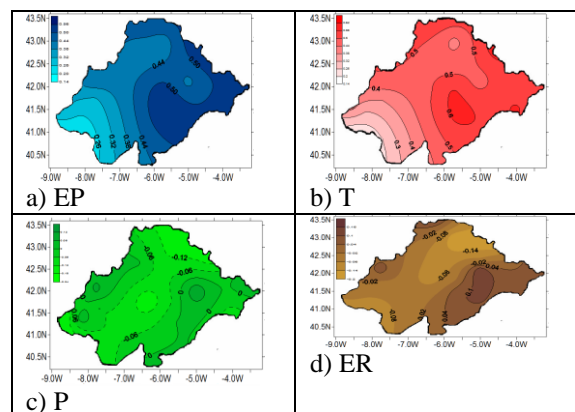


Fig. 4.- Distribución espacial de las tendencias de la: a) EP; b) T; c) P; d) ER, en la Cuenca del Duero

### Variabilidad del Índice anual

A la luz de la naturaleza de integración del ciclo hidrológico que contiene la influencia de variables meteorológicas importantes, debemos de dar más énfasis al grado de humedad y en consecuencia a las clasificaciones del clima, en particular aquellos que tratan de evaluar la agroclimática potencial de de la CD y así el análisis de Componentes principales muestra una vez más, los apatrones semejantes a los de la precipitación, donde s la EOF1 del IH explica el 55% de la variancia total corresponde a la zona húmeda y Húmedo-Sub-Húmedo del Norte y del oeste y la variabilidad temporal asociada a esta región presenta una tendencia negativa más

pronunciada que en la precipitación de primavera y verano, por lo que la humedad en la parte occidental y del norte, anual está disminuyendo mas que en los meses de primavera y verano. La EOF2 corresponde a las regiones semiárido y seca sub húmeda correspondiente a la parte oriental de la CD, aplicada con el 15% de la varianza total, cuya variabilidad temporal no muestra tendencia, lo que significa que en el transcurso anual en la región oriental no existen cambios de humedad, luego la mayor variabilidad esta en los meses de primavera y verano. En la Fig. 5 mostramos el porcentaje de variabilidad climática medio que resulta de los 41 años en las 19 estaciones consideradas en este estudio Distribuidas según la figura 5.

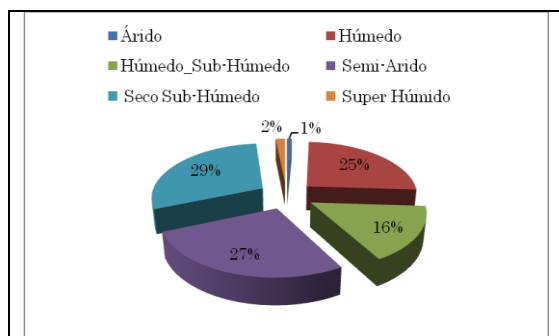


Fig. 5.- Distribución de los porcentajes que resultan de las clasificaciones climáticas por el método de Thotnthowate, 1948

Fig. 1.- Variación temporal de la EP y de la precipitación en (SPV) média la CD de 1970-2010

Los resultados de la análisis de la variación temporal del índice hídrico anual en CD, muestran una tendencia negativa significativa (95%), que oscila entre -25 (Clima Semiárido), a 35(Clima Húmedo). El comportamiento por estaciones es bien diferente aunque se detecta un aumento claro de IH negativo en los últimos años e positivo en los primeros años

## Conclusiones

A escala, global, de toda la CD, fue mostrado que existe una tendencia positiva de la EP con una tasa de 17 mm/semestre/ década y a nivel regional esta tendencia es significativa en el 95% de las estaciones, lo mismo sucede con las temperaturas, en cambio las precipitaciones no muestran una tendencia significativa.

En la distribución espacial de la EP sobre la CD se observan dos regiones bien marcadas una al Este que explica el 79% de la varianza total y la componente principal asociada a esta región con tendencia positiva este patrón es semejante al de la temperatura. La segunda EOF representa la región

Oeste y parte del Norte, es explicada por el 8 % de la Varianza.

La distribución espacial de la precipitación sobre la CD muestra una distribución parecida con la EP, solo que la mayor parte de la varianza explicada (55%), por la primera EOF corresponde a la zona occidental de la CD. La variación temporal, es decreciente (-6.2 mm/SPV/década), aunque solo lo confirma el 5% de las estaciones, está muy próxima a cero.

El patrón espacial de la tendencia de la ER es semejante al de la P, solo que en las regiones donde la precipitación es cero, la ER es máxima

En el semestre estudiado, es el mes de Junio, que presenta tendencia significativa y positiva en la EP, en 89 % de las estaciones. Es negativa en -16% de la estaciones en la precipitación y en la totalidad de las estaciones en la Temperatura. El patrón es diferente de cuando se considera el total de todos los meses pues en Junio es el centro y norte donde la EP y al T aumentan y la P disminuye.

La relación EP & Altura y P & Altura, muestran mayores cambios cuando se consideran la los valores semestrales que cuando se considera solo el mes de Junio. Se nota alguna semejanza y también parece que os valores más altos se encuentran a mayor altura

La distribución del IH muestra la región Norte y Oeste con mayores valores y los menores al SE y centro. El porcentaje de estaciones proporcionó la siguiente clasificación dentro de la CD durante todos los 41 años: 29% es Seco Sub-Húmedo el 25 % es Húmedo, el 16 % fue Húmedo Sub-Húmedo el 27 % es Semiárido, Árido y Súper-húmedo el 1%, respectivamente, A nivel anual fue demostrado una tendencia negativa del IH en la región occidental y norte y una estabilización de la tendencia anual del IH en la región oriental de la CD.

## 6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Allan, R. P., Soden, B. J. (2007). "Large discrepancy between observed and simulated precipitation in the ascending and descending branches of the tropical circulation". En: *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, LI8705, doi:10.1029/2007/GL031460, 2007.

Axel, T. (2000). Spatial And Temporal Characteristics Of Potential Evapotranspiration Trends Over China *Int. J. Climatol.* **27**: 327-339.



- Caramelo, L. y Manso Orgaz, M.D (2007). A Study of Precipitation Variability In The Duero Basin (Iberian Peninsula) .*Int. J. Climatol.* **27**: 327–339.
- Ceballos, A., Morán T.E.; Llorente, P.J.M. . Aportaciones Hídricas en la Cabeza fluvial del río Duero: Relación con la Variabilidad climática y cambios en la Cubierta vegetal. Departamento de Geografía de la Universidad de Salamanca. territorium 15. Pp.15-28.
- González-Hidalgo, J. C. Brunetti, M., Martín L, (2010). “Precipitation trends in Spanish hydrological divisions, 1946–2005”. Climate Research, November de 2010. Doi: 10.3354/cr00937
- Dutra, E., P. Viterbo, and P. M. A. Miranda, (2008): ERA-40 reanalysis hydrological applications in the characterization of regional drought, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L19402, doi:10.1029/2008GL035381.
- Ehlers, E. and Krafft, T. (eds) (1996). *German Global Change Research*, National Committee on Global Change Research, Bonn, p. 128.
- Hollander, M. y D. Wolf. (1999). *Non-parametric Statistical Methods*. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Lenderink G, Van Meijgaard E. 2008. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience* **1**: 511–514, DOI:10.1038/ngeo262.
- Machina, J. Navas, A. Domenech, S y Lopez-Vicente M. (2005). El Río Arlanza en cabecera: Evolución reciente y tendencias en condiciones de cambio global. Cuadernos de la Investigación Geográfica 2005 n° 31 pp. 77-95 ISSN 0211-6820. Universidad e la Rioja.
- Manso Orgaz, M.D. (1991) *Contribuição para o estudo hidrográfico da Bacia do Douro*. Tese de Doutoramento em Física da Atmosfera. Universidade de Aveiro. 300 pp.
- Peterson, T. Easterling, DR. (1994). Creation of homogeneous composite climatological referencies series. *International Journal of Climatology* **14**: 671–679.
- Serrano, V. (2004) *Evolución espacio temporal de las sequías en el sector en el sector central del valle del Ebro: Caudales y consecuencias ambientales*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza 1258 pp.
- Stephen B., Shaw, A. Alisa, Royem, and Susan J. Riha (2011). The Relationship between Extreme Hourly Precipitation and Surface Temperature in Different Hydroclimatic Regions of the United States . doi: 10.1175/2011JHM1364.1
- Stanhill, G. and Møller, M. (2008) Evaporative climate change in the British Isles *Int. J. Climatol.* **28**: 1127–1137 DOI: 10. 1002 / joc.1619. On-Line: [www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)
- Thornthwaite, C.W. An approach toward a rational classification toward a rational classification climate. *Geogr.Rev.*, 38:55-94, 1948
- Thornthwaite, C.W. & Mather, J.R. The water balance. Publications in climatology. Laboratory of Climatology, *New Jersey*, v.8, 1955, 104p.
- Wentz FJ, Ricciardulli L, Hilburn K, Mears C. 2007. How much more rain will global warming bring? *Science* **317**: 233–235.