

TENDENCIAS EN ÍNDICES DE TEMPERATURAS DIARIAS EXTREMAS EN ESPAÑA, 1951-2002

María Ángeles FERNÁNDEZ DE SEVILLA y Fernando S. RODRIGO
Departamento de Física Aplicada, Universidad de Almería.

RESUMEN

En este trabajo se analizan los cambios en los percentiles 10 y 90 de las series de temperaturas máximas y mínimas diarias de 15 localidades españolas. Las tendencias de estas variables se analizan usando el test de Mann-Kendall, un modelo de regresión lineal, y el t-test de diferencia entre las medias de dos subperiodos dentro del periodo completo: 1951-1976 y 1977-2002. El estudio se realiza para las estaciones de invierno y verano. Los principales resultados indican una tendencia creciente de todas las variables, especialmente del percentil 10 de las temperaturas máximas en invierno, y del percentil 90 de las mínimas en verano. Se discuten algunos posibles mecanismos causales relacionados con estos cambios.

Palabras clave: Temperaturas diarias extremas, test de Mann-Kendall, regresión lineal, test-t

ABSTRACT

Changes in the percentiles 10 and 90 of daily maximum and minimum temperatures in 15 Spanish localities are investigated in this work. The trends for these variables are analysed using the Mann-Kendall statistic, a linear regression model, and the t-test of difference between the means of two subperiods within the complete period: 1951-1976 and 1977-2002. The study is made for winter and summer. Main results indicate an increasing trend for all the variables, in particular for the percentile 10 of maximum temperature in winter, and the percentile 90 of minimum temperature in summer. Some causal mechanisms possibly related with these changes are discussed.

Key words: Extreme daily temperatures, Mann-Kendall test, linear regression, t-test.

1. INTRODUCCIÓN

La temperatura superficial global ha crecido en unos 0.6°C desde finales del siglo XIX (IPCC, 2001). Este incremento de la temperatura global no está homogéneamente distribuido por la superficie terrestre, cambiando entre diferentes regiones y localizaciones. Este cambio también se ha reflejado en el comportamiento de los valores extremos, que muestran tendencias significativas en muchas regiones del globo, mientras que en otras áreas no se detectan cambios significativos. EASTERLING *et al.* (1997) han demostrado que a escala global las temperaturas mínimas han aumentado más que las máximas, aunque un comportamiento común en las temperaturas mínimas extremas no ha sido detectado. En Europa la existencia de este tipo de tendencia no se ha investigado sistemáticamente (PRIETO *et al.*, 2004). El comportamiento de las temperaturas extremas y sus impactos

depende fuertemente de las condiciones locales. Por tanto, son necesarios más análisis a nivel local para obtener resultados fiables del impacto de los valores extremos.

Diversos trabajos analizan la evolución de la temperatura diaria en España tanto a nivel local (SERRA *et al.*, 2001; BURGUEÑO *et al.*, 2002) como para diferentes regiones dentro de la Península Ibérica (DE CASTRO *et al.*, 2005). Son pocos los trabajos que intentan un análisis detallado de un conjunto de estaciones que cubra todo el país (PRIETO *et al.*, 2004), quizás como consecuencia de la falta de series largas de calidad contrastada.

El principal objetivo de este trabajo es el análisis del comportamiento de los valores extremos de temperatura en varias localidades repartidas por toda la geografía peninsular. El interés en los valores extremos se debe a que los cambios en las colas cálida y fría de la distribución de temperatura pueden ser notablemente diferentes de los cambios en el valor medio (MOBERG y JONES, 2005). Aunque muchos estudios estudian cambios en los extremos climáticos, pocos de ellos tratan con sucesos que son propiamente extremos en el sentido de ser altamente inusuales. Los índices que se analizan se basan frecuentemente en los percentiles 10/90 y 5/95 de los datos diarios, que representan sucesos moderadamente inusuales. Una razón para no estudiar sucesos “demasiado extremos” es que las tendencias pueden ser difíciles de detectar, ya que se basan en muy pocos datos en comparación con “extremos moderados” (FREI y SCHÄR, 2001). Por tanto, para evitar estas dificultades, nuestro estudio se centrará específicamente en los extremos moderados, en concreto, en los percentiles 10 y 90 de las series de temperaturas máximas y mínimas diarias, correspondientes a las estaciones de invierno y verano, cuando se espera que se alcancen los mayores valores extremos. El periodo de análisis es el 1951-2002. Se utilizan tres métodos para la detección de tendencias: el test no paramétrico de Mann-Kendall, para asegurar el grado de significación de la tendencia, la regresión lineal, para obtener el ritmo de cambio de las variables en estudio, y la comparación de los valores medios correspondientes a dos subperiodos dentro del periodo total, para intentar confirmar el mayor calentamiento detectado en el último tercio del siglo XX en el continente europeo (KLEIN-TANK *et al.*, 2005). Finalmente, se discuten algunos posibles mecanismos causales.

2. DATOS Y MÉTODOS

Los datos de temperatura máxima diaria (T_{max}) y mínima diaria (T_{min}) fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología. Inicialmente, se analizaron las condiciones de calidad de una base de datos que comprendía 28 estaciones distribuidas por toda la Península. Al objeto de trabajar con series homogéneas de longitud similar y escaso número de lagunas, esta base de datos se redujo a un total de 15 estaciones (Tabla 1).

De las 15 estaciones estudiadas, 8 de ellas no tenían huecos, y para el resto el porcentaje de datos perdidos era inferior al 3%. Los huecos inferiores a 3 días de duración fueron rellenados por interpolación lineal entre los datos correspondientes al día previo y posterior a la laguna (en otro caso, se consideraron como datos perdidos). Los datos se estudiaron estacionalmente, considerando como invierno los meses de Diciembre, Enero y Febrero, y para el verano los meses de Junio, Julio y Agosto. En lo que sigue, el invierno se designa por el año al que corresponden los meses de Enero y Febrero (así, por ejemplo, el invierno de 1963 comprende los meses de Diciembre de 1962 y Enero y Febrero de 1963).

Para cada localidad y estación del año se estudiaron cuatro índices basados en los percentiles 10 y 90 de la distribución de temperaturas diarias máximas y mínimas. Estos índices fueron designados como Tmax10, Tmax90, Tmin10 y Tmin90. Así, por ejemplo, el valor de Tmax90 para un verano concreto es simplemente el percentil 90 empíricamente determinado a partir de los 92 valores de la temperatura máxima diaria comprendidos entre el 1 de Junio y el 31 de Agosto. La serie temporal resultante muestra cómo varía de un año para otro el percentil 90 de la serie de temperaturas máximas diarias. Los otros índices se calcularon de forma análoga.

Estación	Altitud (m)	Latitud	Longitud
Alicante	82	38°22'N	00°29'W
Barcelona	37	41°22'N	02°10'E
Bilbao	35	43°18'N	02°55'W
Burgos	891	42°22'N	03°38'W
Granada	705	37°08'N	03°37'W
La Coruña	67	43°22'N	08°25'W
León	911	42°35'N	05°39'W
Madrid	666	40°24'N	03°40'W
Málaga	7	36°39'N	04°28'W
Murcia	75	37°57'N	01°14'W
Salamanca	795	40°56'N	05°29'W
Sevilla	27	37°25'N	05°53'W
Soria	1083	41°46'N	02°28'W
Valencia	11	39°28'N	00°22'W
Zaragoza	245	41°39'N	01°00'W

Tabla 1: SERIES DE DATOS DE TEMPERATURA DIARIA, 1951-2002.

La búsqueda de tendencias significativas en las series estacionales de Tmax10, Tmax90, Tmin10 y Tmin90 fue realizada mediante el test no-paramétrico de Mann-Kendall, con un nivel de confianza del 95%. Para analizar el ritmo de cambio de las variables en estudio, se recurrió a modelos lineales de regresión frente al tiempo mediante ajuste de mínimos cuadrados. El ajuste lineal de una serie de observaciones por el método de mínimos cuadrados implica aceptar la hipótesis subyacente de que los residuos del modelo constituyen una muestra aleatoria de media nula y normalmente distribuida (SNEYERS, 1992). En consecuencia, los residuos de los modelos fueron analizados para comprobar la hipótesis nula de media nula (mediante la determinación del intervalo de confianza al 95% para la media), normalidad (mediante el test de Kolmogorov-Smirnov) y aleatoriedad (mediante los tests no paramétricos de rachas por encima y por debajo de la mediana y de rachas crecientes y decrecientes). Sólo en aquellos casos en que el coeficiente de correlación era significativo al 95% y se verificaba la hipótesis nula de los residuos, el modelo lineal fue aceptado. Finalmente, el periodo total 1951-2002 fue dividido en dos subperiodos: 1951-1976 y 1977-2002, y los valores de las variables en estudio correspondientes a ambos subperiodos fueron comparados mediante un test-t de diferencia entre las medias, con un nivel de confianza del 95%. El primer subperiodo coincide con un episodio de pequeños cambios de la temperatura en Europa, mientras que el segundo corresponde con un episodio de pronunciado

calentamiento en el continente (KLEIN-TANK *et al.*, 2005). El propósito aquí es explorar si estos cambios detectados a nivel continental se encuentran también en las series españolas.

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

La Tabla 2 recoge los resultados del análisis de tendencias para las 4 variables de estudio en las 15 localidades analizadas correspondientes al invierno. La regresión lineal y el t-test de diferencias entre las medias sólo se analizaron cuando el correspondiente estadístico de Mann-Kendall fue significativo a un nivel de confianza del 95%. Los resultados muestran la aparición de tendencias crecientes, especialmente en el caso de Tmax10, en el que sólo Bilbao encuentra un valor del estadístico no significativo. En Coruña las cuatro variables muestran tendencias crecientes, y en la mayoría de las estaciones se da un aumento de los percentiles correspondientes a las temperaturas máximas. Para el caso de Tmax10 (cola fría de la distribución de temperaturas máximas) la pendiente de la regresión lineal indica un cambio del orden de 0.3-0.7 °C/10 años. La Figura 1 muestra, a título de ejemplo, la evolución temporal de esta variable en Burgos y Soria. En cuanto a la comparación entre los dos subperiodos, los resultados muestran una diferencia positiva, con incrementos del orden de 0.6 a 1.5 °C.

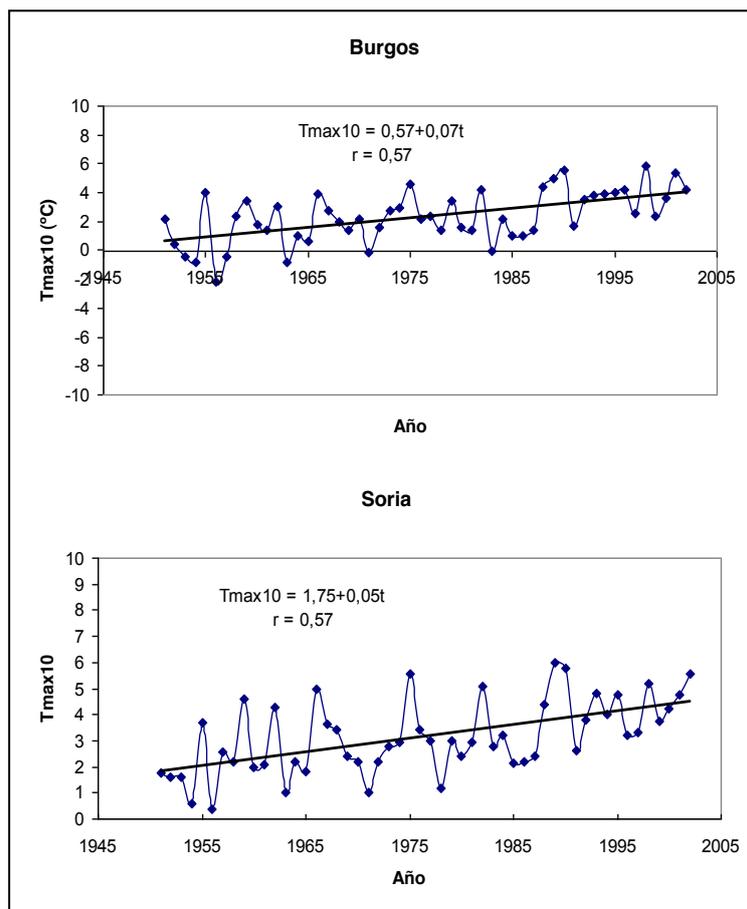


Fig. 1: Regresión lineal de Tmax10 de invierno en Burgos y Soria

ESTACIÓN	TMax10	TMax90	TMin10	TMin90
ALICANTE	2,81 S=0,03±0,01 D=0,68	0,36	1,83	0,42
BARCELONA	2,47 S=0,03±0,02 D=0,65	0,11	0,91	-0,33
BILBAO	1,58	2,75 S=0,04±0,01 D=1,31	0,44	-0,29
BURGOS	2,87 S=0,07±0,01 D=1,47	2,48 S=0,04±0,01 D=1,19	-0,25	1,31
CORUÑA	3,43 S=0,04±0,01 D=0,86	2,51 S=0,02±0,01 D=0,93	4,40 S=0,04±0,01 D=1,18	2,81 S=0,02±0,01 D=0,86
GRANADA	3,66 S=0,05±0,01 D=0,99	1,94	1,31	-0,21
LEÓN	3,18 S=0,04±0,01 D=0,91	2,07 S=0,02±0,01 D=0,63	2,10 S=0,03±0,01 D=0,91	0,71
MADRID	3,54 S=0,07±0,03 D=1,06	3,31 S=0,01±0,03 D=1,00	2,43 S=0,07±0,04 D=0,77	0,44
MÁLAGA	4,11 S=0,06±0,03 D=0,90	1,99 S=-0,04±0,03 D=0,88	-0,01	-0,70
MURCIA	2,14 S=0,03±0,01 D=0,69	1,79	1,90	-0,59
SALAMANCA	3,31 S=0,04±0,01 D=1,00	2,84 S=0,04±0,01 D=0,99	0,42	-0,14
SEVILLA	3,60 S=0,03±0,01 D=0,62	3,18 S=0,03±0,01 D=0,71	2,92 S=0,05±0,02 D=1,39	0,29
SORIA	4,39 S=0,05±0,01 D=1,14	1,86	2,56 S=0,03±0,01 D=0,94	1,79
VALENCIA	3,04 S=0,04±0,01 D=0,76	2,58 S=0,03±0,01 D=1,09	3,53 S=0,05±0,01 D=1,25	1,53
ZARAGOZA	2,13 S=0,04±0,01 D=0,90	1,78	1,84	2,03 S=0,004±0,009 D=0,19

Tabla 2. ESTADÍSTICO DE MANN-KENDALL, PENDIENTE DE LA REGRESIÓN LINEAL ± ERROR STANDARD (S) Y DIFERENCIA ENTRE LAS MEDIAS DE LOS DOS SUBPERIODOS (D), CORRESPONDIENTE AL INVIERNO. EN NEGRITA, ESTADÍSTICOS SIGNIFICATIVOS A UN NIVEL DE CONFIANZA DEL 95%.

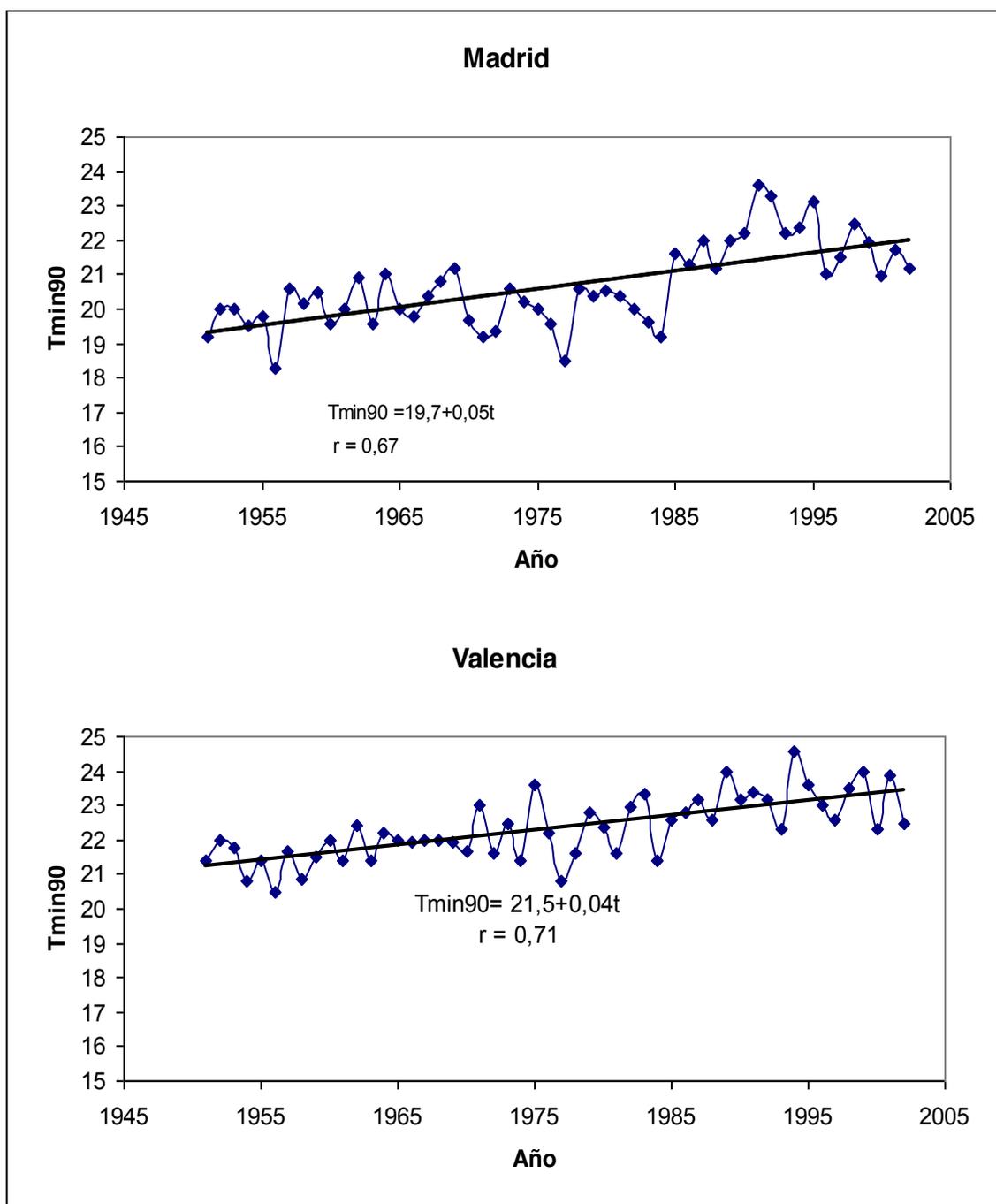


Fig. 2: Regresión lineal de Tmin90 de verano en Madrid y Valencia.

Para el verano los resultados (Tabla 3) ofrecen también la aparición de tendencias crecientes, excepto en el caso de Alicante y las máximas. Para algunas estaciones, como Madrid, Valencia y Zaragoza, el aumento se detecta en las 4 variables. Este aumento es más generalizado en el caso de Tmin90, donde el estadístico de Mann-Kendall es significativo en 13 de las 15 estaciones. El ritmo de cambio es del orden de 0.3-0.5 °C/10 años. La Figura 2 muestra los ejemplos de regresión lineal para esta variable en las estaciones de Madrid y Valencia. La comparación de los subperiodos muestra aumentos del orden de 0.4-1.4 °C.

ESTACIÓN	TMax10	TMax90	TMin10	TMin90
ALICANTE	-3,06 S=-0,04±0,01 D=-1,35	-4,26 S=-0,06±0,01 D=-1,93	2,86 S=0,02±0,02 D=0,32	4,15 S=0,02±0,02 D=0,24
BARCELONA	1,72	2,59 S=0,02±0,01 D=0,55	1,26	2,54 S=0,03±0,01 D=0,54
BILBAO	1,52	2,25 S=0,02±0,02 D=0,51	3,26 S=0,03±0,02 D=0,57	2,36 S=0,01±0,02 D=0,09
BURGOS	2,60 S=0,04±0,01 D=0,75	4,17 S=0,05±0,01 D=1,23	0,62	2,08 S=0,01±0,02 D=-0,35
CORUÑA	2,08 S=0,015±0,007 D=0,28	1,03	4,88 S=0,04±0,01 D=0,74	4,43 S=0,022±0,004 D=0,51
GRANADA	0,93	0,95	3,06 S=0,02±0,02 D=0,13	2,38 S=0,02±0,01 D=-0,30
LEÓN	-0,54	0,58	1,45	3,03 S=0,03±0,01 D=0,67
MADRID	2,63 S=0,04±0,02 D=1,01	5,81 S=0,06±0,01 D=1,68	2,28 S=0,02±0,01 D=0,18	4,82 S=0,05±0,02 D=1,35
MÁLAGA	2,28 S=0,021±0,008 D=0,54	0,66	1,24	-0,29
MURCIA	1,44	2,36 S=0,02±0,01 D=0,56	3,00 S=0,02±0,02 D=0,10	4,40 S=0,03±0,01 D=0,74
SALAMANCA	0,78	1,54	1,28	0,32
SEVILLA	0,61	1,12	4,61 S=0,05±0,02 D=0,96	4,36 S=0,05±0,01 D=1,14
SORIA	0,36	3,16 S=0,02±0,01 D=0,57	1,97 S=0,01±0,02 D=0,13	2,99 S=0,02±0,01 D=0,46
VALENCIA	2,60 S=0,03±0,01 D=0,64	3,38 S=0,03±0,01 D=0,60	4,00 S=0,04±0,02 D=0,73	5,39 S=0,04±0,01 D=1,04
ZARAGOZA	2,31 S=0,03±0,01 D=0,59	2,80 S=0,03±0,01 D=0,75	3,32 S=0,02±0,02 D=0,36	5,54 S=0,04±0,01 D=1,19

Tabla 3. ESTADÍSTICO DE MANN-KENDALL, PENDIENTE DE LA REGRESIÓN LINEAL ± ERROR STANDARD (S) Y DIFERENCIA ENTRE LAS MEDIAS DE LOS DOS SUBPERIODOS (D), CORRESPONDIENTE AL VERANO. EN NEGRITA, ESTADÍSTICOS SIGNIFICATIVOS A UN NIVEL DE CONFIANZA DEL 95%.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos coinciden, en líneas generales, con otros resultados descritos en la bibliografía especializada. Todos los trabajos consultados registran un aumento de las temperaturas a lo largo del siglo XX, con especial incidencia en las últimas décadas del siglo, a un ritmo en torno a los 0.5°C/década. Así ocurre para el análisis de las temperaturas máximas y mínimas en toda España desde 1869 (STAUDT, 2004), para la temperatura media anual durante el periodo 1976-1999 (KLEIN-TANK *et al.*, 2002), o para diversos análisis a escala regional, centrados en áreas específicas, como la Meseta Norte (LABAJO Y PIORNO, 2001), o la Meseta Sur (GALÁN *et al.*, 2001). El mayor aumento en las temperaturas máximas, en comparación con las mínimas, también ha sido detectado en estudios centrados en Cataluña (BRUNET *et al.*, 2001) o en estaciones individuales, como el observatorio de Fabra en Barcelona (BURGUEÑO *et al.*, 2002).

El aumento de las temperaturas máximas de invierno ha sido relacionado con el predominio de valores positivos del índice NAO en las últimas décadas del siglo (SERRA *et al.*, 2001; TRIGO *et al.*, 2002). Así, las condiciones anticiclónicas y de cielos despejados asociadas a esta fase de la oscilación provocarían un aumento de las temperaturas máximas. Este aumento, según nuestros resultados, influiría principalmente en la cola fría de la distribución, a través del comportamiento del percentil 10.

Un factor importante a considerar es el efecto isla urbana de calor. Aunque puede influir a escala local, según el IPCC (2001), este efecto no ha influido de manera significativa en las temperaturas superficiales, al menos desde 1979. Por otra parte, su mayor influencia se detectaría en las temperaturas mínimas, antes que en las máximas. Sin embargo, se ha encontrado un incremento en los percentiles de las temperaturas mínimas en localidades de desarrollo urbano muy diferente, como Madrid y Soria, con sustanciales diferencias tanto en el número de habitantes como en el desarrollo industrial y urbanístico.

El análisis de los posibles mecanismos causales de estas tendencias, así como la ampliación de la base de datos, y la extensión del análisis a la primavera y el otoño, serán objeto de un futuro trabajo, ahora en preparación.

5. AGRADECIMIENTOS

La base de datos utilizada en este estudio fue proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología. Este trabajo fue financiado por el proyecto de investigación CGL2004-05340-C02-02/CLI (Ministerio de Educación y Ciencia)

6. REFERENCIAS

- BRUNET, M.; AGUILAR, E.; SALADIE, O.; SIGRÓ, J. y LÓPEZ, D. (2001). The variations and trends of the surface air temperature in the Northeastern of Spain from middle Nineteenth century onwards. En: BRUNET, M., AND D. LÓPEZ (eds) *Detecting and modelling regional climate change*, Springer, Berlin, pp. 95-107.
- BURGUEÑO, A.; LANA, X. y SERRA, C. (2002). "Significant hot and cold events at the Fabra Observatory, Barcelona (NE Spain)". *Theoretical and Applied Climatology*, 71, pp.141-156.

- DE CASTRO, M.; MARTÍN-VIDE, J.; ALONSO, S.; ABAURREA, J.; ASÍN, J.; BARRIENDOS, M.; BRUNET, M.; CREUS, J.; GALÁN, E.; GAERTNER, M.A.; GALLARDO, C.; GONZÁLEZ-HIDALGO, J.C.; GUIJARRO, J.A.; LUNA, Y.; POZO-VÁZQUEZ, A.D.; QUEREDA, J.; RODRIGO, F.S.; RODRÍGUEZ-PUEBLA, C.y ROSELL-MELÉ, A. (2005). El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI. En: MORENO RODRÍGUEZ, J.M. (coord.) *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, pp. 1-64.
- EASTERLING, D.R.; HORTON, B.; JONES, P.D.; PETERSON, T.C.; KARL, T.R.; PARKER, D.E.; SALINGER, M.J.; RAZUVAYEV, V.; PLUMMER, N.; ROSNER, S.y FOLLAND, C.K. (1997). "Maximum and minimum temperature trends for the globe", *Science*, 277, pp. 364-366.
- FREI, C.y SCHÄR, C. (2001). "Detection probability of trends in rare events: theory and application to heavy precipitation in the alpine region". *Journal of Climate*, 14, pp.1568-1584.
- GALÁN, E.; CAÑADA, R.; FERNÁNDEZ, F.y CERVERA, B. (2001). Annual temperature evolution in the southern Plateau of Spain from the construction of regional climatic time series. En: BRUNET, M. y LÓPEZ, D. (eds) *Detecting and modelling regional climate change*, Springer, Berlin, pp.119-131.
- IPCC (2001). *Climatic Change 2001. The scientific basis*. HOUGHTON, J.T., DING, Y.; GRIGGS, D.J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P.J. y XIASOU, F. (eds.). Cambridge University Press, 994 pp.
- KLEIN-TANK, A.; WIJNGAARD, J.y VAN ENGELEN, A. (2002). *Climate of Europe. Assessment of observed daily temperature and precipitation extremes*. De Bilt ECA and KNMI, 36 pp.
- KLEIN-TANK, A.; KÖNNEN, G.P.y SELTEN, F.M. (2005). "Signals of anthropogenic influence on European warming as seen in the trend patterns of daily temperature variance". *International Journal of Climatology*, 25, pp. 1-16.
- LABAJO, J.L.y PIORNO, A. (2001). Regionalization of precipitation in Castilla and León Spain. Analysis of its temporal behaviour. En: BRUNET, M. AND LÓPEZ, D. (eds) *Detecting and modelling regional climate change*, Springer, Berlin, pp. 163-173.
- MOBERG, A. y JONES, P.D. (2005). "Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation in central and western Europe, 1901-99". *International Journal of Climatology*, 25, pp. 1149-1171.
- PRIETO, L.; GARCÍA HERRERA, R.; DÍAZ, J.; HERNÁNDEZ, E.y DEL TESO, T. (2004). "Minimum extremes temperatures over Peninsular Spain". *Global and planetary change*, 44, pp. 59-71.
- SERRA, C.; BURGUEÑO, A.y LANA, X. (2001). "Analysis of maximum and minimum daily temperatures recorded at Fabra Observatory (Barcelona, NE Spain) in the period 1917-1998". *International Journal of Climatology*, 21, pp. 617-636.
- SNEYERS, R. (1992). "On the use of statistical analysis for the objective determination of climatic change". *Meteorol. Zeitschrift*, 1, pp. 247-256.
- STAUDT, M. (2004). *Detección de cambios térmicos en la Península Ibérica con datos homogéneos regionales*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 559 p.
- TRIGO, R.M.; OSBORN, T.J.y CORTE-REAL, J. (2002). "The North Atlantic Oscillation influence on Europe: climate impacts and associated physical mechanisms". *Climate Research*, 20, 9-17.