

# EXTREMOS DE TEMPERATURAS Y PRECIPITACIÓN PARA EL SIGLO XXI EN ESPAÑA

Santos Eduardo PETISCO DE LARA<sup>1</sup>, Petra RAMOS CALZADO<sup>2</sup>, José María MARTÍN HERREROS<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Área de Evaluación y Modelización del Clima AEMET

<sup>2</sup>Delegación Territorial de AEMET en Andalucía, Ceuta y Melilla  
spetiscod@aemet.es, pramosc@aemet.es, jmartinh@aemet.es

## RESUMEN

Los fenómenos climáticos extremos tienen un marcado impacto sobre la vida y seguridad de las personas y, en general, sobre las actividades socioeconómicas.

En este trabajo, se presentan las evoluciones futuras de un conjunto de índices de extremos de temperatura y precipitación a lo largo del siglo XXI sobre España. Se ha puesto especial interés en evaluar las incertidumbres que proceden de diferentes fuentes. Para ello, se han utilizado proyecciones regionalizadas obtenidas bajo diferentes escenarios de emisiones, usando diferentes modelos globales y técnicas de regionalización tanto estadísticas como dinámicas.

**Palabras clave:** Regionalización Estadística, Regionalización Dinámica, Cambio climático, Extremos climáticos, Impactos.

## ABSTRACT

Extreme weather events have a marked impact on the lives and safety of people and, in general, on socio-economic activities. In this paper, we present the trends of temperature and precipitation extremes over Spain for the 21<sup>st</sup> century. Special emphasis has been put on the estimation of uncertainty coming from a variety of sources. We have made use of downscaled climate projections generated using different emissions scenarios, global model simulations and statistical and dynamics downscaling methods.

**Keywords:** Statistical Downscaling, Dynamic Downscaling, Climatic Change, Climatic Extremes, Impacts.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las catástrofes naturales relacionadas con el clima son las que se cobran el mayor número de vidas humanas, después de los terremotos, y producen las mayores pérdidas económicas según un estudio de la compañía de seguros Munich Reinsurance (Beniston *et al.*, 2007). Estas catástrofes están asociadas a fenómenos meteorológicos y climatológicos extremos. La sociedad europea y, en especial España, es especialmente vulnerable a estos fenómenos (sequía, precipitaciones intensa, olas de calor, etc.).

Según el último informe del IPCC, el sistema climático se está calentando (IPCC, 2007) y este calentamiento se manifestará en un cambio tanto en la frecuencia como en la intensidad de fenómenos extremos. Existen evidencias de que se ha producido un aumento de la actividad ciclónica tropical

intensa en el Atlántico Norte, así mismo, en las proximidades de la costa mediterránea se ha detectado desde el año 1973 un aumento drástico en el número de días cálidos (IPCC, 2007).

Para conocer la evolución futura del sistema climático y de los fenómenos extremos se requiere el uso de modelos que representen adecuadamente este sistema. Hasta ahora, estos modelos tienen una escasa resolución espacial, siendo necesario el uso de técnicas de regionalización para poder proyectar la información a escalas locales. Además, hay que tener muy en cuenta que las proyecciones regionales del clima futuro obtenidas están afectadas por incertidumbres que proceden de distintas fuentes y que se propagan en cascada. Por ello, para cualquier estudio de evolución futura del clima es necesario contar con un conjunto de proyecciones obtenidas a partir de diferentes modelos climáticos globales, de diferentes técnicas de regionalización y que considere diferentes escenarios de emisiones.

En el presente trabajo, se va a analizar la evolución de varios índices de extremos climáticos a lo largo del siglo XXI para España. Para ello se han obtenido un conjunto de proyecciones regionalizadas a partir de técnicas de regionalización estadística y dinámica, usando datos procedentes de los modelos climáticos globales utilizados en el proyecto europeo FP6 EU ENSEMBLES y el proyecto de intercomparación de modelos acoplados CMIP3 bajo cuatro escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (SRESA2, SRESA1B, SRESB1 y E1), uno de los cuales tiene en cuenta las medidas de mitigación (E1), y bajo el escenario 20C3M representativo del clima actual.

De los diferentes índices de extremos climáticos publicados (STARDEX, 2004), se han seleccionado cuatro relacionados con la temperatura y tres relacionados con la precipitación y cuya descripción se recoge en la Tabla 1. Los percentiles de los datos diarios se han calculado siguiendo la metodología de Zhang *et al.* (Zhang *et al.*, 2005):

Índice	Descripción
Días cálidos (TX90p)	Porcentaje de tiempo en que la temperatura máxima es superior al percentil 90 de la temperatura máxima diaria del periodo de referencia
Duración de las olas de calor (WSD)	El número máximo de días consecutivos, superior a cinco, con temperatura máxima superior al percentil 90 de la temperatura máxima diaria del periodo de referencia.
Noches cálidas (TN90p)	Porcentaje de tiempo en que la temperatura mínima es superior al percentil 90 de la temperatura mínima diaria del periodo de referencia.
Días de helada (FD)	Número de días en que la temperatura mínima es inferior a 0° C
Días de lluvia (R1)	Número de días con precipitación total igual o superior a 1mm.
Duración del periodo seco (CDD)	Número máximo de días consecutivos sin precipitación o con precipitación inferior a 1mm.
Precipitaciones intensas (R95T)	Fracción de la precipitación total anual debida a eventos que superan el percentil 95 del periodo de referencia.

TABLA 1: Descripción de los índices de extremos climáticos utilizados.

La estructura de esta contribución es la siguiente: en la sección 2 se describen los datos utilizados, en la sección 3 se expone la metodología seguida, en la sección 4 se muestran los resultados obtenidos y, finalmente, en la sección 5 se incluyen las conclusiones de este trabajo.

## 2. DATOS UTILIZADOS

### 2.1. Regionalización estadística

Se utilizan por un lado datos de referencia observados, del periodo 1951-2005, para establecer las relaciones entre predictandos y predictores, y por otro lado datos de simulaciones de modelos globales para el periodo 1961-2000 y para el siglo XXI cuyas proyecciones serán regionalizadas utilizando las relaciones obtenidas en la base de datos de referencia.

#### 2.1.A. DATOS DE REFERENCIA

- Campos medios diarios de reanálisis de NCEP/NCAR para la búsqueda de análogos y predictores.
- Datos de precipitación y de temperaturas máximas y mínimas diarias sobre 2324 puntos de observación para la precipitación y 374 puntos de observación para las temperaturas. Estos datos proceden de la base de datos de AEMET.

#### 2.2.B. SIMULACIONES DE MODELOS GLOBALES

- Son campos, con resolución temporal diaria, de modelos globales cuyas proyecciones se van a regionalizar sobre los puntos de observación anteriormente citados, y que son los siguientes:
  - CMIP3 (AR4 IPCC): 9 modelos, escenarios 20C3M, SRESA2, A1B, B1.
  - Proyecto ENSEMBLES (flujo 1): 6 modelos, escenarios 20C3M, SRESA2, A1B, B1.
  - Proyecto ENSEMBLES (flujo 2): 6 modelos, escenarios 20C3M, SRESA1B, E1.

### 2.2. Regionalización Dinámica

Los datos de proyecciones de temperatura y precipitación obtenidas mediante técnicas de regionalización dinámica proceden del proyecto europeo FP6 EU ENSEMBLES (Linden y Mitchell, 2009) y se han obtenido de la página web (<http://ensemblesrt3.dmi.dk>). En este trabajo se han analizado los datos procedentes de quince integraciones obtenidas a partir de ocho modelos climáticos regionales (algunos de ellos en versiones distintas) y siete modelos climáticos globales (tres de ellos son perturbaciones de un único modelo). Todas las integraciones se han realizado bajo las condiciones del escenario SRESA1B (Nakicenovic y Swart, 2000) y la mayoría de ellas se extienden hasta finales de siglo XXI (solo cinco integraciones se han realizado hasta el año 2050).

## 3. METODOLOGÍA

Para obtener los datos de proyecciones regionalizadas se han utilizado, como ya se ha dicho, métodos de regionalización estadística y métodos de regionalización dinámica aplicados a las proyecciones de diversos modelos climáticos globales con los escenarios de emisión mencionados. Sobre estos datos regionalizados, se calculan los índices de valores extremos tanto para el siglo XXI bajo los distintos escenarios de emisiones, como para el periodo de referencia 1961-2000 para el escenario de referencia 20C3M representativo del clima actual, y se determinan los cambios de los índices, para los distintos escenarios y periodos considerados, respecto al clima y periodo de referencia. A continuación se explican someramente los procedimientos de regionalización utilizados.

### 3.1. Metodología de Regionalización estadística

Se basa en la selección de análogos sinópticos al campo simulado por el modelo global; estos análogos se buscan en la base de referencia de reanálisis analizando la similitud de los campos de presión a nivel del mar y de componentes de viento a 500 hPa.

- La estimación de temperaturas máximas y mínimas se realiza mediante ecuación de regresión lineal construida por el método paso a paso en base a los datos de predictores, y los correspondientes predictandos (temperatura máxima o mínima), tomados en los análogos seleccionados; los predictores entre los que el método seleccionaría los que son significativos en cada caso son: Insolación teórica del día, Temperatura a 2 metros, Componentes de viento geostrófico a nivel del mar, Presión a nivel del mar, Temperaturas a 850, 700 y 500 hPa. y Humedad específica a 700 hPa.
- En el caso de la precipitación se toman predictores seleccionados dependiendo del tipo sinóptico y del punto en el que se regionaliza; el objetivo de ello es mejorar la similitud y escoger los análogos más similares considerando tanto los campos sinópticos como los valores de los predictores; la precipitación se calcula como la media ponderada de las correspondientes a los análogos seleccionados siendo las ponderaciones los valores de similitud (inversas de distancias euclídeas) entre los campos simulados y sus correspondientes análogos. Los predictores posibles son: presión, componentes de viento geostrófico y vorticidad a nivel del mar, componentes de viento y vorticidad a 500 hPa., gradiente vertical de temperatura entre 850 y 500 hPa. y humedad específica en 700 hPa.

### 3.2. Metodología de Regionalización Dinámica

Las integraciones de los modelos se han realizado, principalmente, sobre una rejilla latitud-longitud rotada de  $0,22^\circ \times 0,22^\circ$  que debe cubrir un área mínima determinada. Esta área se centra en Europa y la Península Ibérica se sitúa al suroeste de este dominio mínimo.

Como todas las integraciones no han utilizado la misma rejilla y con objeto de facilitar la comparación y exploración de estos datos, se han emigrado todos los datos a una rejilla única. El cambio de rejilla se ha realizado mediante el método de interpolación del vecino más próximo pero teniendo en cuenta la proporción de la celda que está cubierta por agua. Para ello, se han clasificado las celdas en dos tipos: celdas de tierra y celdas de mar. Se ha considerado que una celda es de tierra si más de la mitad de su superficie está cubierta por tierra y de mar si esta superficie cubre menos de la mitad de su área.

## 4. RESULTADOS

La evolución de los índices extremos analizados se ha obtenido a partir de 72 proyecciones regionalizadas obtenidas para cada una de las variables usadas (temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación). Estas proyecciones se han agrupado por técnicas de regionalización y escenarios de emisiones y se ha obtenido la evolución media de cada índice como promedios de sus valores (línea continua en figuras 1-3-6) y una estimación de su incertidumbre a partir de su desviación tipo (área sombreada en figuras 1-3-6). A continuación se describen los resultados obtenidos agrupando los índices por la variable con la que se han obtenido.

### 4.1. Días cálidos y duración de las olas de calor.

Puede observarse, en general, una tendencia de aumento en la proporción de días cálidos manifestándose a final de siglo un mayor incremento con los escenarios más emisivos (SRESA2 y

SRESA1B) (ver figura 1). Este incremento general se manifiesta en todas las zonas geográficas, siendo menor en las zonas situadas más al norte, especialmente en la zona cantábrica, y mayor en zonas del sur peninsular, costa mediterránea, Baleares y Canarias (figura 2). Estacionalmente este incremento es bastante acusado en verano en todo el territorio aunque algo menor en la zona cantábrica; en invierno también se registra un incremento significativo aunque menor (figuras no mostradas).

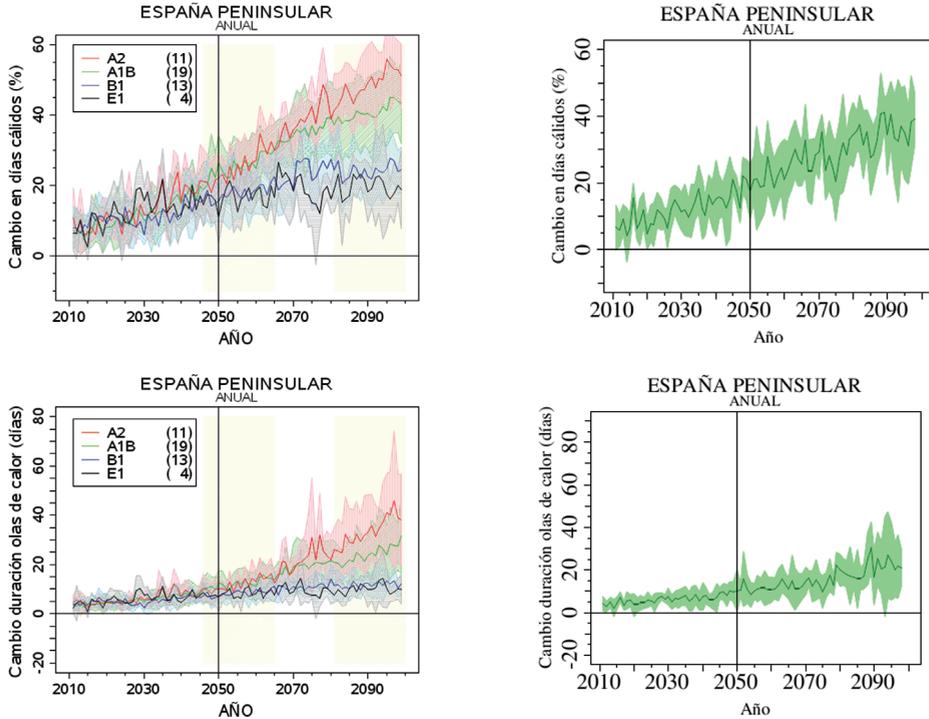


FIG. 1: Evolución media e incertidumbre del cambio anual en los días cálidos (superior) y en la duración máxima de la ola de calor (inferior) en España Peninsular a lo largo del siglo XXI obtenida mediante técnicas de regionalización estadísticas (izquierda) y dinámicas (derecha). Las zonas sombreadas expresan los márgenes de incertidumbre y corresponden a +/- una desviación típica en torno al valor medio.

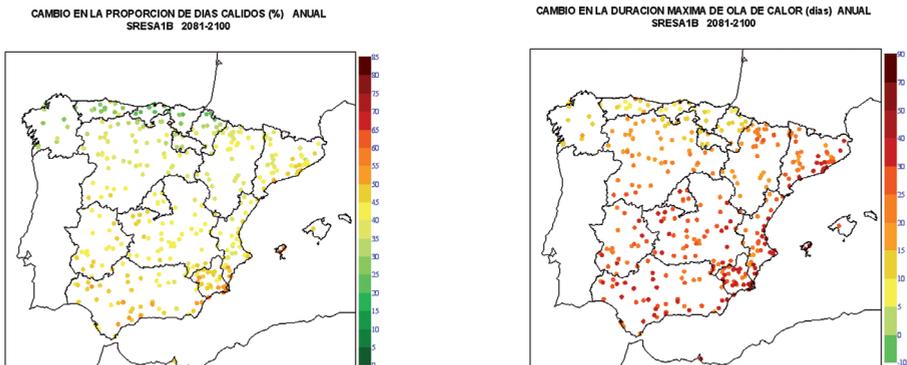


FIG. 2: Distribución geográfica del incremento medio de la proporción de días cálidos (izquierda) y de la duración máxima de la ola de calor (derecha) para el periodo 2081-2100 y bajo las condiciones del escenario SRESA1B. Las proyecciones regionalizadas se han obtenido mediante la técnica estadística.

Así mismo se manifiesta un aumento en el promedio de la duración máxima de las olas de calor con similares rasgos geográficos y estacionales.

Respecto a las incertidumbres de estos índices, se puede observar que la incertidumbre introducida por los escenarios de emisiones es mayor que la introducida por los modelos globales y ésta es mayor que la debida a las técnicas de regionalización.

#### 4.2. Noches cálidas y días de helada

En paralelo al incremento de días cálidos, se produce un incremento en el número de noches cálidas, mayor con los escenarios más emisivos, como se observa en la figura 3. El comportamiento sigue la pauta general ya comentada con los anteriores índices de temperatura extrema, con incrementos mayores en zonas del sur, zonas mediterráneas, especialmente en el sureste, Baleares y Canarias (figura 4) y mayores también en verano que en invierno. Paralelamente se produce una disminución general del número de heladas que es más marcada en las zonas de heladas más habituales.

A diferencia de los tres índices analizados, la incertidumbre introducida en el número de días de heladas por los escenarios de emisiones es menor que la introducida por los modelos globales.

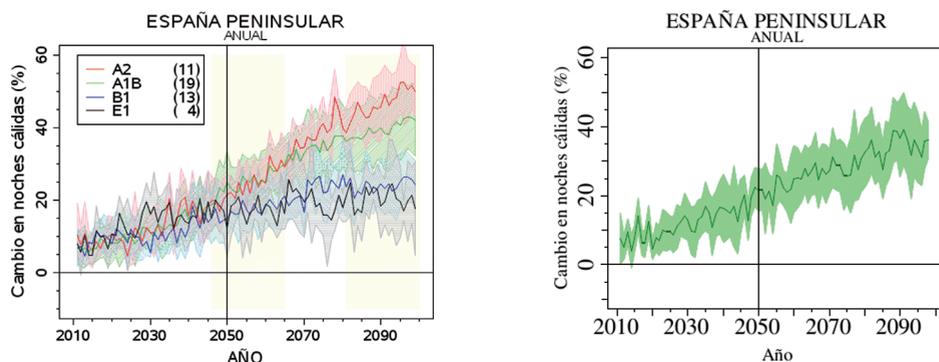


FIG. 3: Evolución media e incertidumbre del cambio anual en las noches cálidas (superior) y en el número de días de heladas (inferior) en España Peninsular a lo largo del siglo XXI obtenida mediante técnicas de regionalización estadísticas (izquierda) y dinámicas (derecha). Las zonas sombreadas expresan los márgenes de incertidumbre y corresponden a  $\pm$  una desviación típica en torno al valor medio.

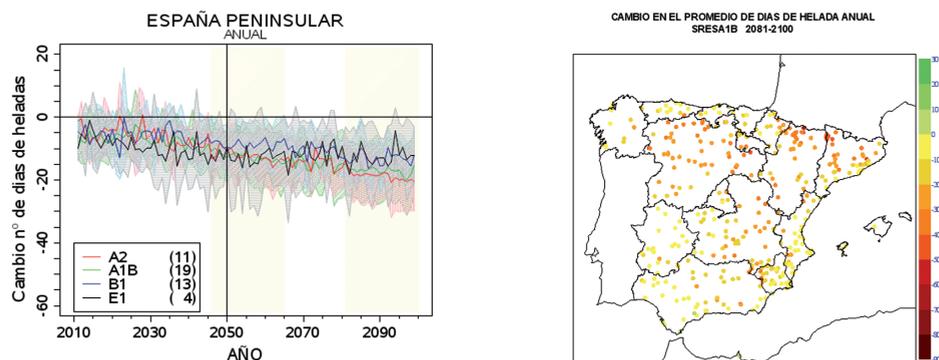


FIG. 4: Distribución geográfica de la variación del valor medio, respecto al periodo de referencia, de la proporción de noches cálidas (izquierda) y del número de días de helada (derecha) para el periodo 2081-2100 y escenario SRESA1B. Las proyecciones regionalizadas se han obtenido mediante la técnica estadística.

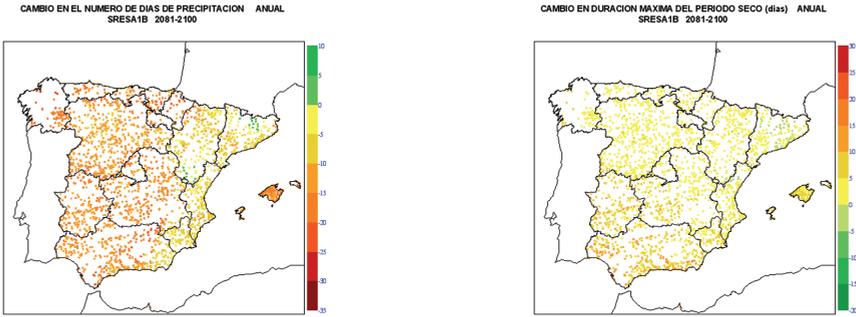


FIG. 5: Distribución geográfica de la variación del valor medio, respecto al periodo de referencia, del número de días de precipitación (izquierda) y de la duración máxima del periodo seco (derecha) para el periodo 2081-2100 y escenario SRESA1B. Las proyecciones regionalizadas se han obtenido mediante la técnica estadística.

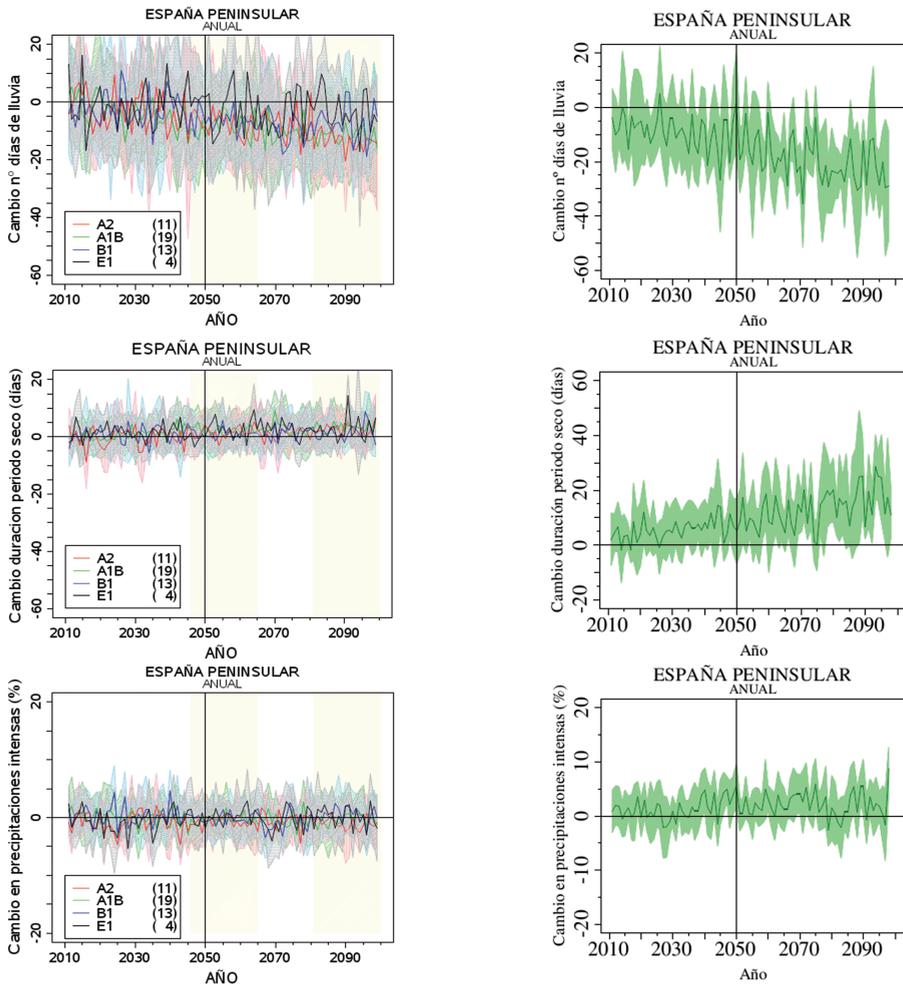


FIG. 6: Evolución media e incertidumbre del cambio anual en el número de días de lluvia (superior), en la duración máxima del periodo seco (central) y en las precipitaciones intensas (inferior) en España Peninsular a lo largo del siglo XXI obtenida mediante técnicas de regionalización estadísticas (izquierda) y dinámicas (derecha). Las zonas sombreadas expresan los márgenes de incertidumbre y corresponden a +/- una desviación típica en torno al valor medio.

### 4.3. Días de lluvia, duración del periodo seco y precipitaciones intensas

Como se observa en la figura 6, en líneas generales el número medio de días de precipitación anual presenta una ligera tendencia a la disminución tanto en la España Peninsular como en la Insular, manifestándose más claramente hacia el final del siglo y especialmente con los escenarios más emisivos. La disminución es menos marcada en las regiones más orientales, como se observa en la figura 5. El comportamiento estacional es menos claro y más diverso dependiendo de los escenarios y estaciones.

Los resultados sobre la variación en el periodo seco parecen mostrar un aumento muy ligero de su duración, algo mayor en las Canarias y en el Sur Peninsular, sin presentar diferencias importantes entre los resultados de distintos escenarios.

Sin embargo, para las precipitaciones intensas no se aprecia una tendencia clara para ninguno de los escenarios de emisiones analizados. Tampoco se observa un comportamiento definido ni regional ni estacional.

## 5. CONCLUSIONES

Del análisis realizado de los índices extremos de temperatura y precipitación obtenidos a partir de un amplio conjunto de proyecciones regionalizadas de temperaturas máximas, mínimas y precipitación, se obtiene que, en general, existe un aumento en el número de días cálidos y noches cálidas para finales de siglo en todos los escenarios analizados y una disminución en el número de días de heladas para la zona de España. Para los escenarios más emisivos se aprecia un aumento en la duración máxima de las olas de calor. La incertidumbre procedente de los escenarios de emisiones es mayor que la atribuible a los modelos globales y técnicas de regionalización para los índices ligados a temperatura, menos para el número de días de heladas. La incertidumbre ligada a la técnica de regionalización es la menor de las tres analizadas, especialmente en el caso de los índices ligados con la temperatura máxima.

Las variaciones para los índices de precipitación son menos claras que las obtenidas para los índices de temperatura, con una ligera tendencia al aumento en la duración del periodo seco y una tendencia a la disminución del número de días de lluvia. A diferencia de lo obtenido para los índices extremos ligados a la temperatura, la incertidumbre de los índices extremos ligados a la precipitación atribuible a los escenarios de emisiones es menor que la inducida por los modelos globales y adquiere algo más de importancia la debida a las técnicas de regionalización. Las diferencias entre las metodologías dinámica y estadística, fundamentalmente en el caso de la precipitación, pueden deberse a que la metodología estadística no puede contemplar algunos detalles influyentes de escala local o regional, ni tampoco puede disponerse siempre de los análogos más adecuados. Por otra parte, la regionalización estadística tiende a suavizar los resultados lo que influye sobre la estimación de valores extremos.

## REFERENCIAS

- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Salomon, S. D.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M. y Miller, H.L. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom y New York, NY, USA.
- Beniston, M. et al. (2007). "Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections". *Climatic Change*, 81, pp. 71-95.

- Nakicenovic, N. y Swart, R. (eds) (2000). *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press; Cambridge, UK and New York. 570 pp.
- Petisco de Lara, S.E. (2008 a). *Método de regionalización de precipitación basado en análogos. Explicación y Validación*. Nota Técnica 3A, Área de Evaluación y Modelización del Cambio Climático. AEMET.
- Petisco de Lara, S.E. (2008 b). *Método de regionalización de temperatura basado en análogos. Explicación y Validación*. Nota Técnica 3B, Área de Evaluación y Modelización del Cambio Climático. AEMET.
- STARDEX, 2004. STARDEX Diagnostic Extremes Indices Software. User Information. On-Line: [http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/deis/Diagnostic\\_tool.pdf](http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/deis/Diagnostic_tool.pdf).
- Van der Linden P. and Mitchell, J.F.B. (eds) (2009). *ENSEMBLES: Climate Change and its impacts: Summary of research and results from ENSEMBLES project*. MetOffice Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1, 3PB, UK. 160 pp.
- Zhang, X.; Hegerl, G.; Zwiers, F. W. y Kenyon, J. (2005). Avoiding Inhomogeneity in Percentile-Based indices of Temperature Extremes. *J. Climate*, 18, pp. 1641-1651.

