

## PROYECCIONES REGIONALES DE VARIABLES HIDROLÓGICAS PARA LA PENÍNSULA IBÉRICA

Matilde GARCÍA-VALDECASAS OJEDA, Patricio YESTE DONAIRE, Emilio ROMERO JIMÉNEZ, Trinidad M. GÓNGORA GARCÍA, Sonia R. GÁMIZ-FORTIS, Yolanda CASTRO-DÍEZ y María Jesús ESTEBAN-PARRA  
*Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada*  
**mgvaldecasas@ugr.es**

### RESUMEN

El cambio climático está considerado como una de las mayores amenazas del siglo XXI, especialmente en regiones como la Península Ibérica (PI) donde las proyecciones globales indican cambios sustanciales en precipitación y temperatura. Se espera, por tanto, un efecto significativo sobre el ciclo hidrológico, aunque aún existe cierta incertidumbre en su magnitud a escala regional.

Este estudio examina proyecciones regionales de cambio climático para la PI a partir de un conjunto de simulaciones realizadas con el modelo Weather Research & Forecasting (WRF). El modelo WRF fue conducido por las salidas corregidas en sesgo de dos modelos climáticos globales, el CCSM4 y el MPI-ESM-LR, y para dos escenarios de emisión (el RCP4.5 y el RCP8.5), con el objetivo de analizar tendencias en el siglo XXI a largo plazo, de distintas variables relacionadas con el ciclo del agua, como son temperatura, precipitación, evapotranspiración real y humedad del suelo.

**Palabras clave:** el modelo WRF, RCM, *downscaling* dinámico, proyecciones de cambio climático, Península Ibérica.

### ABSTRACT

The climate change has already been considered one of the major threats for the Earth for the 21<sup>st</sup> century, especially in regions such as the Iberian Peninsula (IP) where global future projections reveal substantial changes in precipitation and temperature. In this context, significant changes in the hydrological cycle are expected, although substantial uncertainty persists concerning the magnitude at regional scale.

This work examines regional projections of climate change over the IP using the Weather Research & Forecasting (WRF) model. For this, the WRF was conducted by the bias-corrected outputs from two different global climate models (GCMs), the CCSM4 and the MPI-ESM-LR, and under two representative concentration pathways (the RCP4.5 and the RCP8.5). Thus, we analyzed the long-term trends throughout the 21<sup>th</sup> century for different variables evolved in the hydrological cycle, such as temperature, precipitation, surface evapotranspiration and soil-moisture content.

**Key Words:** the WRF model, RCM, dynamical downscaling, climate-change projections, Iberian Peninsula.

## 1. INTRODUCCIÓN

Como indica el 5º informe (AR5) del IPCC (IPCC, 2014), el sistema climático se está calentando probablemente debido a la acción del hombre. Dicho cambio es consecuencia del aumento de la concentración de gases de efecto invernadero (GHGs), la cual hoy día registra los valores más altos de la historia. Ante tal calentamiento es de esperar que el ciclo del agua se vea alterado pudiendo llegar a producir importantes efectos causando grandes pérdidas económicas e importante daños en gran cantidad de ecosistemas.

Para el estudio del impacto producido por el aumento de las emisiones de GHGs, los modelos climáticos globales (GCMs) son una importante fuente de información ya que a través de ellos se puede evaluar el efecto producido por el cambio climático. Sin embargo, debido al gran coste computacional que conlleva simular el clima a escala global, dichos modelos aún presentan ciertas limitaciones para representar el clima a escala regional. Por tanto, los GCMs no poseen la resolución espacial necesaria para evaluar adecuadamente el potencial impacto que podría producirse debido al cambio en las diferentes variables envueltas en el ciclo hidrológico. Esto es aún más importante en regiones como la Península Ibérica (PI), donde los GCMs no son capaces de capturar diferentes procesos que afectan a los patrones espacio-temporales de ciertas variables hidrológicas debido a su compleja orografía.

Este trabajo examina los cambios proyectados para el periodo 2071-2100 de variables de interés en el ciclo del agua para la PI, una región especialmente vulnerable al calentamiento climático, mediante el uso de técnicas de *downscaling* dinámico aplicando un modelo regional, el Weather Research & Forecasting.

## 2. DATOS Y MÉTODOS

### 2.1. Configuración del modelo WRF

El modelo WRF versión 3.6.1 (WRF, Skamarok et al., 2008) se ha utilizado para completar un conjunto de simulaciones regionales en el presente (1980-2014) y futuro (2071-2100), sobre un dominio centrado en la PI y anidado en un dominio más grande que corresponde a la región EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014). Más detalles de la configuración aplicada pueden encontrarse en García-Valdecasas Ojeda et al. (2017). Como condiciones laterales y de contorno (LBCs) se utilizaron dos GCMs, el CCSM4 (Gent et al., 2011) y el MPI-ESM-LR (Giorgeta et al., 2013), seleccionados debido a su habilidad para capturar las principales características climáticas en la región EURO-CORDEX (McSweeney et al., 2015). Sin embargo, los GCMs suelen estar afectados por sesgos sistemáticos, por lo que con el objetivo de reducir este tipo de errores se usaron los datos corregidos en sesgo del CCSM4 (Bruyère et al., 2015). De igual forma, y usando la misma metodología, las salidas del MPI-ESM-LR también fueron corregidas. Más detalles sobre dicha corrección de sesgos pueden encontrarse en Bruyère et al. (2014).

Debido a que las simulaciones históricas de los GCMs terminan en 2005, el periodo de tiempo presente (1980-2014) se completó a partir de las salidas de los GCMs bajo el RCP8.5 (Granier et al., 2011). En cuanto a las simulaciones en el futuro, éstas se realizaron bajo dos escenarios de emisión, el RCP4.5, el cual es un escenario de estabilización que supone aumentos de temperatura global de alrededor de 1.8°C para

finales de siglo, y el RCP8.5, que contempla un aumento progresivo de GHGs con un incremento global de la temperatura de 4°C para 2100 (Moss et al., 2010).

## 2.2. Métodos Estadísticos.

Los cambios proyectados de las distintas variables hidrológicas se examinaron mediante un estudio punto a punto evitándose así posibles errores de compensación por agregación de los datos espacialmente. De esta forma las distintas salidas del modelo se utilizaron en su resolución original aplicando el método *Delta-Change* (Hay et al., 2000). Dicho método se basa en el cálculo de las diferencias entre los valores proyectados para el futuro y aquellos obtenidos en el presente, reduciendo así posibles errores sistemáticos del modelo.

El análisis se centró en cambios en los valores medios, pues estos tienen un efecto directo en la adaptación de los diferentes ecosistemas, pudiendo generar importantes daños (Röckström et al., 2009). Las variables de estudio fueron la precipitación ( $pr$ ), la temperatura máxima ( $T_{max}$ ) y mínima ( $T_{min}$ ), la evapotranspiración superficial (SFCEVP) y el contenido de humedad en el suelo en la zona de raíces, o primer metro de suelo (SMroot).

Con el objetivo de evaluar si los cambios proyectados eran significativos con respecto a los valores en el presente, se utilizaron diferentes pruebas estadísticas: el test t de Student para las variables  $pr$ ,  $T_{max}$  y  $T_{min}$  pues éstas presentaron un comportamiento cercano a la normalidad, y el test no paramétrico de Kolmogorov-Smirnov para SFCEVP y SMroot, los cuales se aplicaron al 95% de nivel de confianza.

En este estudio se representan sólo las proyecciones para invierno y verano por ser las estaciones del año donde las diferencias con respecto al presente mostraron valores más dispares. Para primavera y otoño los resultados mostraron un comportamiento intermedio entre invierno y verano para todas las variables analizadas y por ello no se muestran los resultados.

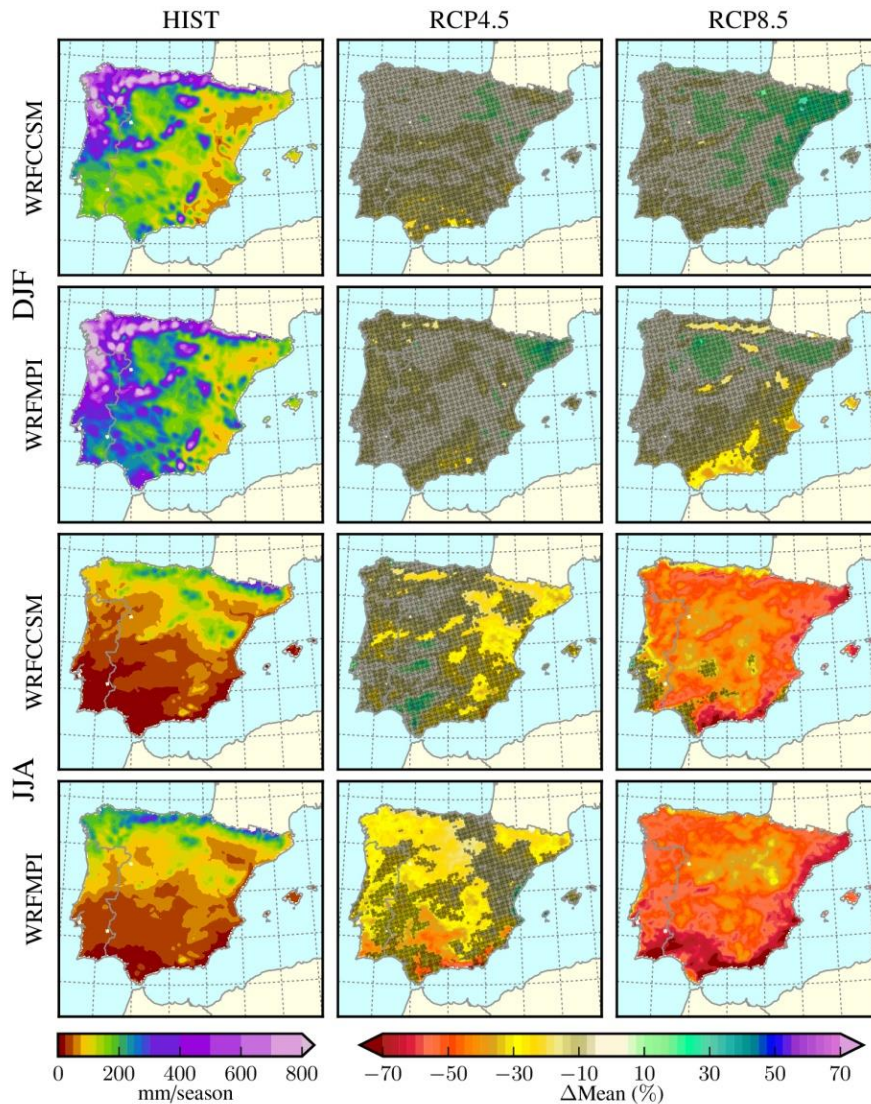
## 3. RESULTADOS

### 3.1. Cambios en la precipitación

La Fig. 1 muestra los cambios relativos con respecto al presente en la precipitación media para invierno (DJF) y verano (JJA) expresados en porcentaje. Dichos cambios se representan para las salidas del modelo WRF conducidas por el CCSM4 (WRFCCSM) y el MPI-ESM-LR (WRFMPI) bajo los dos escenarios de emisión analizados (el RCP4.5 y el RCP8.5). Adicionalmente, con el fin de mostrar la magnitud de dichos cambios, se representan las precipitaciones medias en el presente (HIST, primera columna).

En general, las simulaciones proyectan tanto aumentos como disminuciones de la precipitación en invierno aunque estos, en general, son poco significativos. Aquí, las salidas del WRFMPI bajo el RCP8.5 fueron las que indicaron mayores cambios significativos con disminuciones de alrededor del 30% en ciertas regiones del sur, este y norte peninsular. Sin embargo, para verano, los resultados sugieren que probablemente la PI sufrirá importantes reducciones en sus precipitaciones medias, especialmente bajo el escenario RCP8.5. Bajo tal escenario las disminuciones pueden ser de en torno a un 50% para casi toda la PI, especialmente en zonas costeras como

la costa mediterránea (disminuciones superiores a un 70%). En esta estación, además, los resultados parecen indicar que la mayor incertidumbre se encuentra asociada al RCP analizado, siendo los resultados entre las salidas conducidas por ambos GCMs más similares entre sí.



*Fig. 1: Cambios relativos de la precipitación media para WRFCCSM y WRFMPI, en invierno (DJF) y verano (JJA). En columnas, se representan tanto los valores del presente (HIST, primera columna) así como las diferencias bajo el RCP4.5 (2ª columna) y RCP8.5 (3ª columna). Mediante puntos se indica que no hay cambios significativos según un test t de Student al 95% de confianza.*

### 3.2. Cambios en las temperaturas

Las Figuras 2 y 3 representan la variación media de la  $T_{\max}$  y  $T_{\min}$ , respectivamente con respecto al presente expresado en valores absolutos. En general, en ambos casos, los resultados revelaron un aumento significativo en las temperatura al 95% de confianza para toda la península, los cuales parecen ser marcados en zonas del interior peninsular y especialmente en alta montaña (véase los cambios proyectados en la Cordillera Cantábrica, Sistema Central o Sistema Bético en la Fig. 2 y Fig. 3). Además, al compararse las salidas de WRFCCSM y WRFMPI puede verse que ambos modelos presentaron cambios con similar distribución espacial aunque éstos son ligeramente más marcados en magnitud para las salidas de WRFMPI.

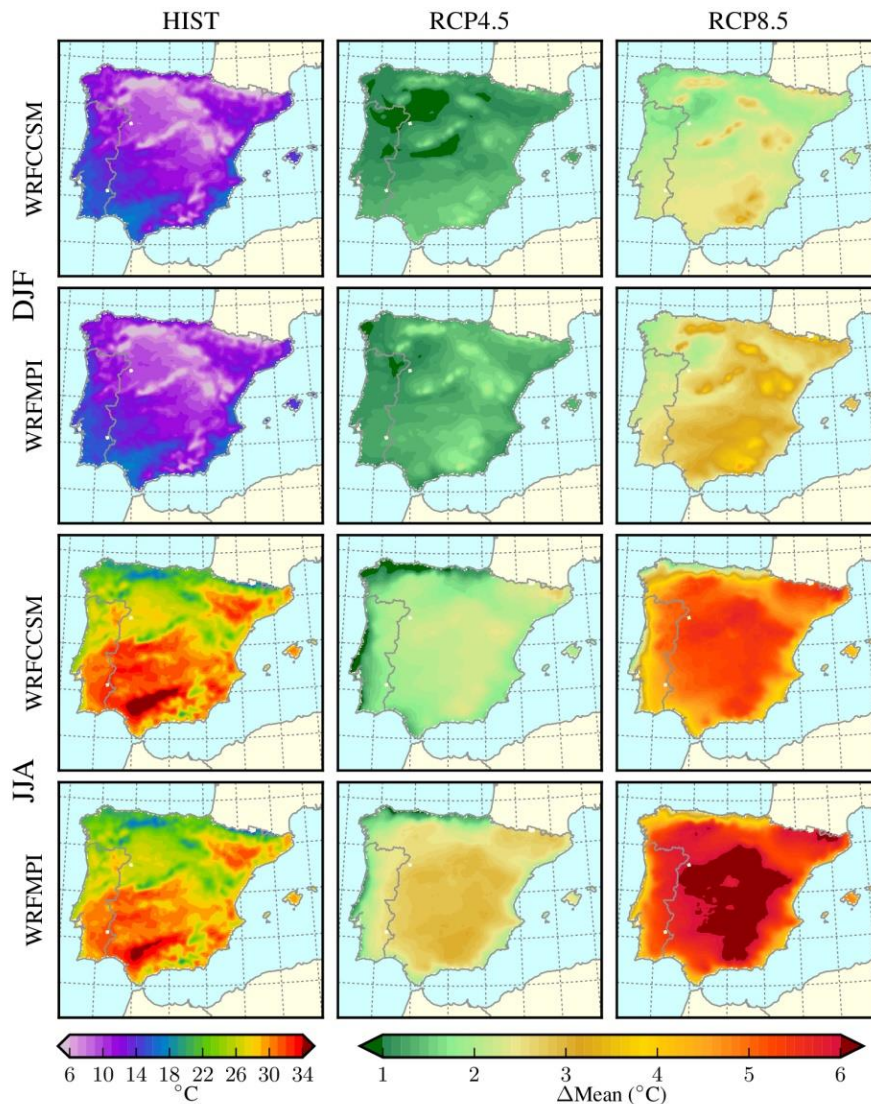


Fig. 2: Cambios en valores medios de  $T_{\max}$  para WRFCCSM y WRFMPI en invierno (DJF) y verano (JJA). La significación fue evaluada según un test *t* de Student al 95% de confianza.

En términos de  $T_{\max}$  (Fig. 2) las simulaciones presentaron aumentos moderados en invierno (de alrededor de  $2^{\circ}\text{C}$  o incluso inferiores) en gran parte de la PI bajo el RCP4.5, mientras que el RCP8.5 dichos aumentos fueron superiores a  $3^{\circ}\text{C}$  en muchas regiones (sur peninsular y en regiones de alta montaña). En verano, sin embargo, los resultados muestran que la PI probablemente se verá afectada por aumento de alrededor de  $2^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}$  bajo el RCP4.5 y el RCP8.5, respectivamente, alcanzándose incrementos de  $T_{\max}$  por encima de  $6^{\circ}\text{C}$  en una extensa región ubicada en el interior peninsular bajo el escenario RCP8.5. En referencia a la  $T_{\min}$  (Fig. 3), los resultados también muestran aumentos con patrones espaciales similares a la  $T_{\max}$  aunque éstos parece que serán de menor magnitud. En este caso, el efecto orográfico parece ser más notorio, siendo mayores los aumentos en regiones de alta montaña. Como ocurría en  $T_{\max}$ , los cambios más marcados se producen en verano (aumentos entre  $1^{\circ}\text{C}$  y  $6^{\circ}\text{C}$  frente a aumentos entre  $1^{\circ}\text{C}$  y  $3^{\circ}\text{C}$  para invierno) y especialmente bajo el RCP8.5.

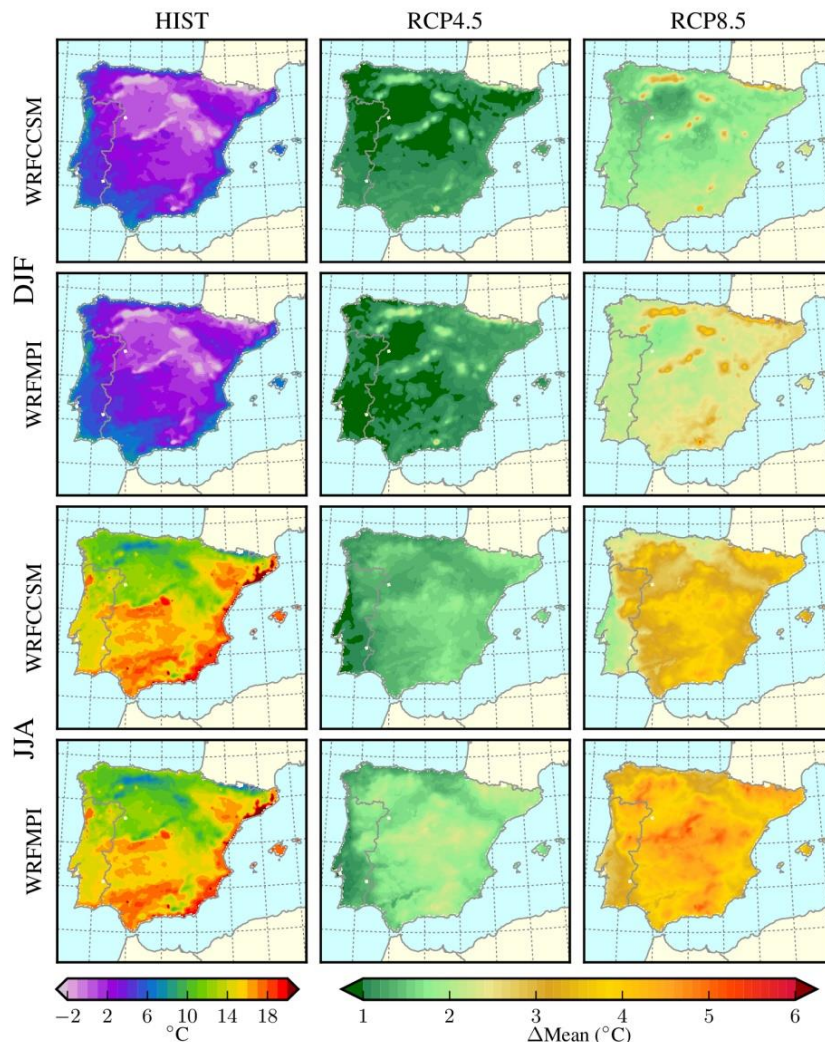


Fig. 3: Igual que la Fig. 2, pero para  $T_{\min}$ .

### 3.3. Cambios en la evapotranspiración superficial

Las proyecciones de las simulaciones de WRF revelan tanto aumentos como disminuciones significativas en los valores relativos de SFCEVP (Fig. 4). En invierno, los resultados sugieren disminuciones de en torno a un 20% en el sur y este peninsular, mientras que para ciertas regiones del norte los aumentos pueden alcanzar valores superiores al 60% (Cordillera Cantábrica). En verano, la tendencia hacia la disminución de la SFCEVP es más marcada, alcanzándose disminuciones superiores al 70% en ciertas zonas del sur para el RCP8.5. De nuevo los resultados sugieren una importante influencia de la concentración de GHGs en la variación de la SFCEVP, proyectándose cambios más notorios bajo el RCP8.5.

### 3.4. Cambios en el contenido de humedad del suelo

En cuanto a la humedad del suelo en la zona de raíces (0-100 cm), los resultados muestran que dicha variable probablemente experimentará una reducción con respecto al presente (Fig. 5), siendo ésta más relevante durante el verano. De nuevo dichos cambios están influenciados por el escenario de emisión analizado (disminuciones con respecto al presente de alrededor de un 15% y un 45% en gran parte de la IP para DJF y JJA respectivamente bajo el RCP8.5) por lo que la variación en la SMroot también está claramente influenciada por la concentración de GHGs en la atmósfera.

En regiones como la PI donde una gran parte de su área presenta un clima semiárido, la disminución de la precipitación probablemente dé lugar a una disminución de la evapotranspiración superficial. Ante tal perspectiva el acoplamiento tierra-atmósfera será más fuerte, dando lugar a un aumento de la aridez, generándose así probablemente un aumento de fenómenos extremos tales como la sequía y las olas de calor. Los resultados también muestran un aumento asimétrico entre las máximas y las mínimas, lo que podría ser debido a dicho fortalecimiento del acoplamiento tierra-atmósfera provocado por la disminución en la disponibilidad de agua en el suelo, lo cual ya fue sugerido por otros autores (Jerez et al., 2012).

Las proyecciones en SFCEVP indican un comportamiento diferente entre ciertas regiones del norte y sur peninsular para invierno. Así, para el norte peninsular los resultados muestran un aumento de la SFCEVP, posiblemente asociado al aumento de la temperatura (véase Fig. 2 y Fig. 3), es decir, un aumento de la temperatura del suelo favorecerá el flujo de calor latente al no haber una restricción del contenido de humedad en el suelo. Sin embargo, en aquellas zonas donde se proyectan disminuciones de la SFCEVP, éstas muestran valores de cambio similares a los de la precipitación (véase Fig. 1), sugiriendo que el principal factor que induce los cambios de la SFCEVP es la propia disminución de la precipitación, como es de esperar en zonas semiáridas. En verano, el comportamiento es más similar para toda la península con la consiguiente disminución de humedad del suelo (véase Fig. 5), lo cual corrobora la importancia de un adecuado estudio de los procesos en superficie puesto que estos tienen un papel fundamental en la evolución del clima ante un contexto de cambio climático en regiones como la PI.

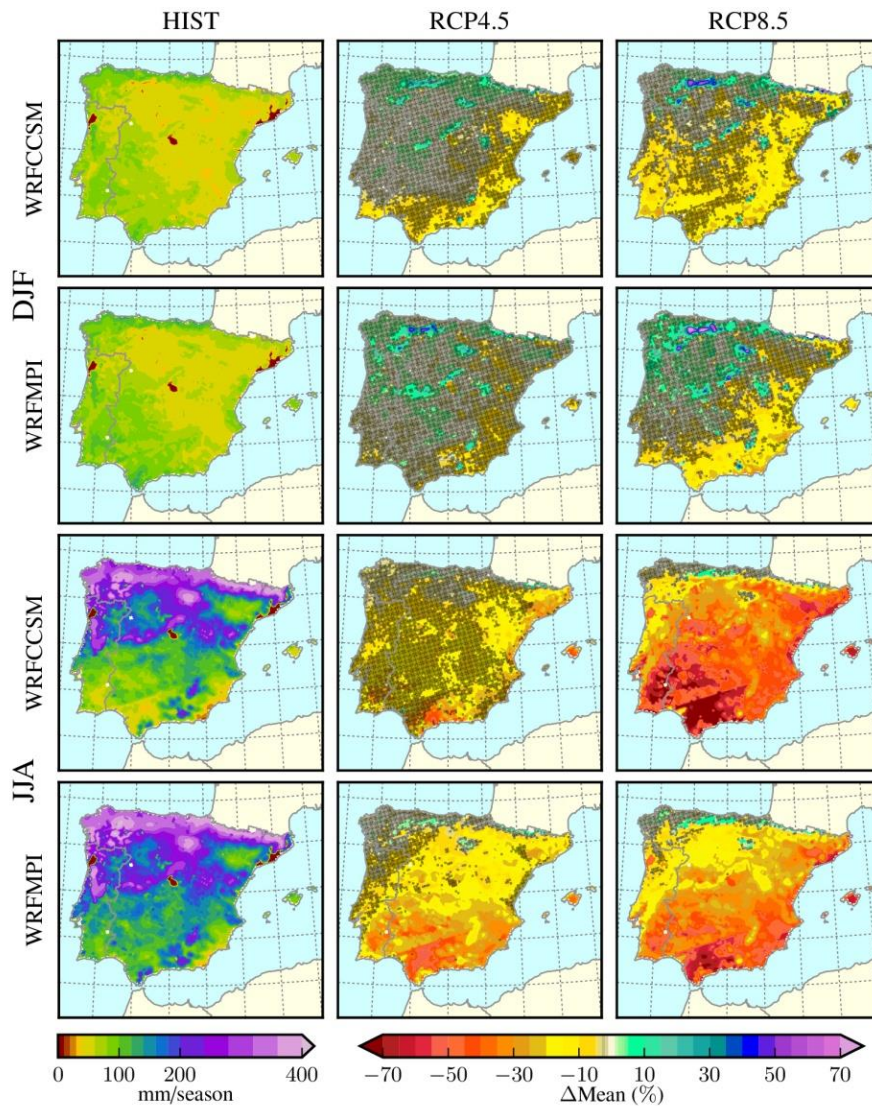


Fig. 4: Cambios relativos en la evapotranspiración superficial (SFCEVP) para WRFCCSM y el WRFMPI, en invierno (DJF) y verano (JJA). Con puntos se indican los cambios no significativos según una prueba de Kolmogorov-Smirnov al 95% de confianza.



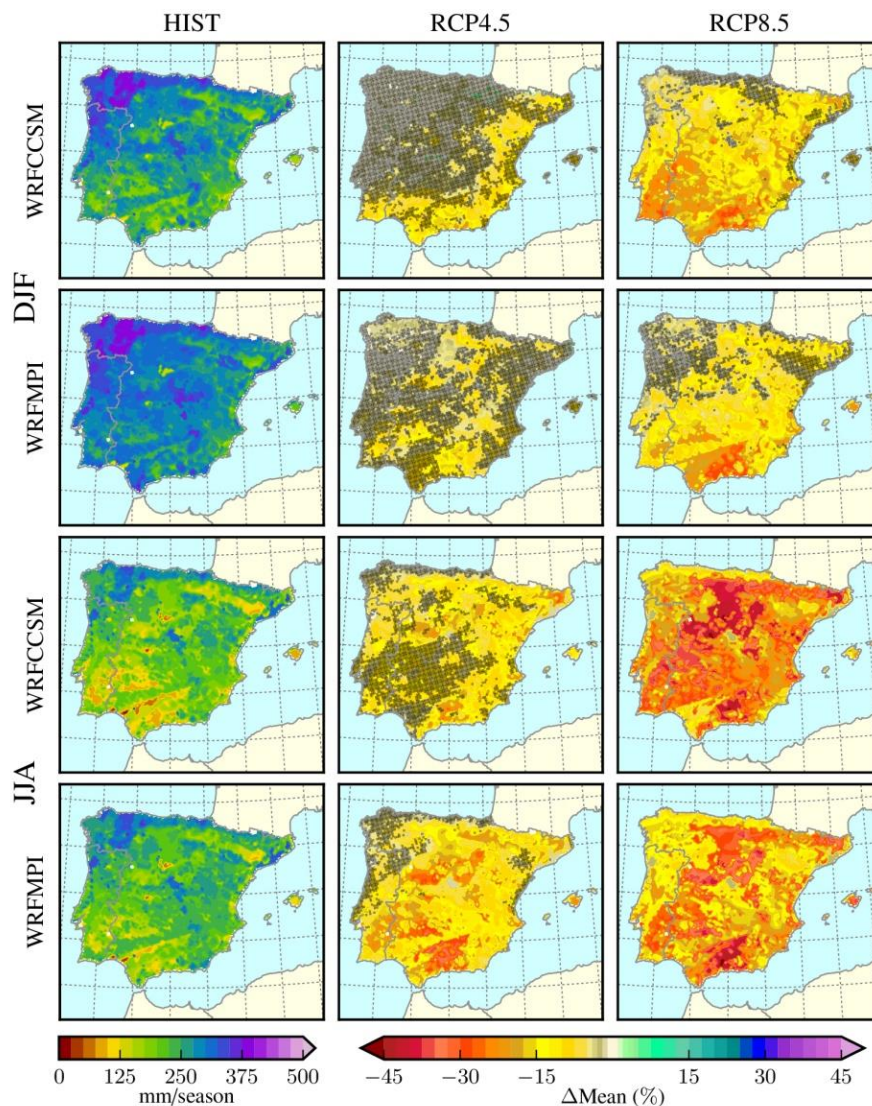


Fig. 5: Cambios relativos en la la humedad del suelo en la zona de raíces ( $SM_{root}$ ) para WRFCCSM y el WRFMPI, en invierno (DJF) y verano (JJA). Con puntos se indican los cambios no significativos según una prueba de Kolmogorov-Smirnov al 95% de confianza.

#### 4. DISCUSIÓN

En este estudio se han analizado los cambios proyectados en diferentes variables envueltas en el ciclo hidrológico mediante el uso de un modelo climático regional, el modelo WRF. Los resultados aquí obtenidos indican que probablemente la PI se verá afectada por cambios sustanciales en las distintas variables analizadas para finales del siglo XXI sugiriendo una tendencia generalizada hacia la sequedad, especialmente en verano y en regiones ubicadas en la mitad sur peninsular.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado con fondos financiados a los proyectos P11-RNM-7941 (Junta de Andalucía), CGL2013-48539-R y CGL2017-89836-R (MINECO-España, FEDER). Las simulaciones del modelo WRF que se utilizan en este estudio se completaron en el clúster ALHAMBRA (<https://alhambra.ugr.es>) de la Universidad de Granada.

### REFERENCIAS

- Bruyère, C. L., Done, J. M., Holland, G. J., & Fredrick, S. (2014). Bias correction of global models for regional climate simulations of high-impact weather. *Clim. Dyn.*, 43(7), 1847-1856. <http://doi.org/10.1007/s00382-013-2011-6>
- Bruyère, C. L., Monaghan, A. J., Steinhoff, D. F., & Yates, D. (2015). Bias-Corrected CMIP5 CESM Data in WRF/MPAS Intermediate File Format. NCAR Technical Note, NCAR/TN-515+STR(7):27. <http://dx.doi.org/10.5065/D6445JJ7>
- García-Valdecasas Ojeda, M., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., & Esteban-Parra, M. J. (2017). Evaluation of WRF capability to detect dry and wet periods in Spain using drought indices. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 1569–1594. <https://doi.org/10.1002/2016JD025683>
- Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., ..., & Zhang, M. (2011). The Community Climate System Model Version 4. *J. Climate*, 24(19), 4973–4991. <http://doi.org/10.1175/2011JCLI4083.1>
- Giorgetta, M. A., Jungelaus, J., Reick, C. H., Legutcke, S., Bader, J., Böttiger, M., ..., & Stevens, B. (2013). Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 5(3), 572–597. <http://doi.org/10.1002/jame.20038>
- Granier, C., Bessagnet, B., Bond, T. T., D'Angiola, A., van der Gon, H. D., Frost, G. J., ..., & van Vuuren, D. P. (2011). Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980–2010 period. *Clim. Change*, 109(1), 163. <http://doi.org/10.1007/s10584-011-0154-1>
- Hay, L. E., Wilby, R. L. and G. H. Leavesley (2000). A Comparison of Delta Change and Downscaled GCM Scenarios For Three Mountainous Basins in the United States. *JAWRA*, 36, 387–397. <http://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2000.tb04276.x>
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., ..., & Yiou, P (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Change*, 14(2), 563–578. <http://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>

- Jerez, S., Montavez, J. P., Gomez-Navarro, J. J., Jimenez, Jimenez-Guerrero, P., . . . , & Gonzalez-Rouco, J. F. (2012). The role of the land-surface model for climate change projections over the Iberian Peninsula, *J. Geophys. Res.*, 117, D01109. <http://doi.org/10.1029/2011JD016576>
- McSweeney, C. F., Jones R. G., Lee, R. W., & Rowell D. P. (2015). Selecting CMIP5 GCMs for downscaling over multiple regions. *Clim. Dyn.*, 44(11), 3237-3260. <http://doi.org/10.1007/s00382-014-2418-8>
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, T. R., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463,747-756. <http://doi.org/10.1038/nature08823>
- Rökstom, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin III, F. S., Lambin, E. F., . . . , & Fabry, V. J. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472-475. <http://doi.org/10.1038/461472a>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., . . . , & Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Technical report. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR. <http://doi.org/10.5065/D68S4MVH>