

## EMERGENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CUENCAS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

Matilde GARCÍA-VALDECASAS OJEDA<sup>1,2</sup>, Juan José ROSA CÁNOVAS<sup>1,2</sup>,  
Emilio ROMERO JIMÉNEZ<sup>1</sup>, Patricio YESTE<sup>1,2</sup>, Yolanda CASTRO DÍEZ<sup>1,2</sup>,  
María Jesús ESTEBAN PARRA<sup>1,2</sup>, Sonia Raquel GÁMIZ FORTIS<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada, Granada, España*

<sup>2</sup>*Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía.  
Granada, España.*

[mgvaldecasas@ugr.com](mailto:mgvaldecasas@ugr.com), [jjrc@ugr.com](mailto:jjrc@ugr.com), [emiliorj@ugr.es](mailto:emiliorj@ugr.es), [pyeste@ugr.es](mailto:pyeste@ugr.es),  
[ycastro@ugr.es](mailto:ycastro@ugr.es), [esteban@ugr.es](mailto:esteban@ugr.es), [srgamiz@ugr.es](mailto:srgamiz@ugr.es)

### RESUMEN

Se espera que el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera cause importantes cambios en el sistema climático. Sin embargo, cómo será dicho efecto en el comportamiento de las diferentes variables climáticas es aún incierto a escala regional. Este estudio investiga la potencial emergencia de la señal de cambio climático antropogénico para las diferentes cuencas hidrográficas de la Península Ibérica (PI), una región especialmente vulnerable a los efectos del cambio climático. Para ello se analizan proyecciones de cambio climático regional de temperatura y precipitación a partir de la relación señal/ruido (S/N) calculada a escala estacional. Dichas proyecciones se obtuvieron con el modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) el cual fue conducido por el modelo climático global (GCM) MPI-ESM-LR. MPI-ESM-LR fue previamente corregido en sesgo para simular el clima en la PI en el periodo de 1980 a 2100 bajo dos escenarios de emisión, el RCP4.5 y el RCP8.5. En general, los resultados mostraron que la señal de cambio climático antropogénico es probable que emerja durante el siglo XXI, al menos para la temperatura, siendo dicha señal más fuerte bajo el escenario RCP8.5 durante el otoño y verano. Bajo este mismo escenario, la precipitación muestra una señal de cambio más fuerte en primavera y verano. Determinar cómo evolucionará la señal de cambio antropogénica y cuando emergerá es de vital importancia, por lo que estos resultados pueden ayudar a la toma de decisiones y a la implementación de políticas de prevención y adaptación al cambio climático adecuadas.

**Palabras clave:** Proyecciones regionales de cambio climático, emergencia del cambio climático, precipitación, temperatura, Península Ibérica, modelo *Weather Research and Forecasting*.

### ABSTRACT

The rising concentration of greenhouse gases (GHGs) to the atmosphere is expected to cause significant changes in the climate system. However, it is still uncertain how this factor would affect the behavior of different climatic variables on a regional scale.

This study explores the potential emergence of the signal of anthropogenic climate change for the different river basins in the Iberian Peninsula (IP), a region that is especially vulnerable to the effects of climate change. For this purpose, regional climate change projections of precipitation and temperature were analyzed by means of the signal-to-noise (S/N) ratio at a seasonal scale. These projections were achieved with the Weather Research and Forecasting (WRF) model, which was driven by the MPI-ESM-LR global climate model (GCM). MPI-ESM-LR was previously corrected in bias to simulate the climate in the IP for the period 1979 to 2100 under two emission scenarios, RCP4.5 and RCP8.5. Overall, the results indicated that the anthropogenic climate change signal is likely to emerge over the twenty-first century, at least for temperature, with this signal being stronger under the RCP8.5 scenario during autumn and summer. Under this same scenario, precipitation shows a stronger signal in summer and spring. Determining how the anthropogenic change signal will evolve and when it will emerge is critical; as a result, these findings can assist decision makers in developing appropriate adaptation and mitigation policies to climate change.

**Key words:** Regional projections of climate change, emergence of climate change, precipitation, temperature, Iberian Peninsula, Weather Research and Forecasting model.

## 1. INTRODUCCIÓN

Se espera que el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera aumente los riesgos relacionados con el clima, creando nuevas amenazas para el ser humano y los ecosistemas (Gaetani et al., 2020). Sin embargo atribuir la ocurrencia de fenómenos climáticos a la acción del hombre puede llegar a ser un gran desafío debido, en gran parte, a la propia variabilidad inherente del sistema climático. Por tanto, detectar el tiempo de emergencia (*ToE*), es decir, el momento en el cual la señal de cambio climático antropogénico supera a la variabilidad natural y permanece a lo largo del tiempo, es un aspecto de gran relevancia a la hora de desarrollar políticas de mitigación y adaptación al cambio climático (Giorgi y Bi, 2009, Hawkins y Sutton, 2012). Este aspecto es incluso más relevante a una escala regional o local, y en particular para aquellas regiones del planeta caracterizadas por una gran variabilidad natural donde aumenta la incertidumbre en la detección de la señal de cambio antropogénica. A esta escala, además, la atribución de los efectos del cambio climático antropogénico es más relevante, pues es a nivel local o regional donde deben ser desarrolladas las políticas de actuación para la mitigación y adaptación del cambio climático.

La Península Ibérica (PI), al ser parte de la región mediterránea ha sido considerada una región vulnerable a los efectos del cambio climático (Giorgi y Bi, 1999). Además, esta región, por su localización y características topográficas, se caracteriza por poseer una alta variabilidad espaciotemporal en sus patrones de precipitaciones, haciendo que la detección de la emergencia del cambio climático antropogénico no sea una tarea trivial. En este contexto, este trabajo analiza cambios en la señal climática así como su potencial emergencia en relación a la variabilidad natural para la precipitación (pr),

temperatura máxima (Tmax) y temperatura mínima (Tmin) para diferentes cuencas en la PI, haciendo uso de proyecciones regionales del clima usando como modelo climático regional (RCM) el modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF, Skamarock et al., 2008), bajo dos escenarios de emisión, el RCP4.5 y RCP8.5, con el objetivo de comparar el efecto de diferentes concentraciones de GEI.

## **2. DATOS Y METODOLOGÍA**

### **2.1. Simulaciones regionales de cambio climático: configuración del modelo**

El modelo WRF en su versión 3.6.1 ha sido usado para simular el clima de la PI en el periodo comprendido entre diciembre de 1979 y noviembre de 2100.

La configuración espacial del modelo se basó en dos dominios anidados usando una estrategia *one-way* (Fig. 1a); un primer dominio (d01) que corresponde al dominio de EURO-CORDEX a 50 km de resolución espacial (Jacob et al., 2014), y un segundo dominio centrado en la PI con una resolución de 10 km. En la vertical, ambos dominios fueron configurados con 41 niveles, con el tope de la atmósfera fijado a 10 hPa. Más detalles de la configuración pueden encontrarse en García-Valdecasas Ojeda et al. 2017, 2020a y 2020b.

Como condiciones iniciales y de contorno se usaron las salidas del modelo climático global (GCM) MPI-ESM-LR (Giorgetta et al., 2013), el cual fue previamente corregido en sesgo siguiendo la metodología propuesta por Bruyère et al. (2014). Para las simulaciones en el futuro (desde 2006 a 2100) se usaron dos escenarios de emisión: el RCP4.5 que es un escenario de emisiones intermedio con un pico de emisiones de GEI alrededor del 2040, y el RCP8.5, un escenario más pesimista que supone un aumento progresivo de las emisiones de GEI hasta finales del siglo XXI.

### **2.2. Análisis de la emergencia de la señal climática**

La potencial emergencia de la señal de cambio climático antropogénica en la precipitación (pr), temperatura máxima (Tmax) y temperatura mínima (Tmin) estacional se analizó a través de la evolución temporal de la relación señal/ruido (*signal-to-noise*, S/N). Esta medida nos indica el número de veces que la señal de cambio antropogénico supera a la variabilidad climática natural o ruido.

Para dicho cálculo, las salidas diarias de cada una de las variables consideradas en cada punto de grid fueron agregadas espaciotemporalmente, obteniéndose así series estacionales de precipitación acumulada y de temperatura promedio para cada una de las cuencas hidrográficas de la PI (Fig. 1b). Este análisis se realizó para ambos RCPs entendiéndose como cambio en la señal climática (S) la tendencia a largo plazo o diferencias entre la media móvil de 19 años de cada año en cuestión y la media en el periodo de referencia (1980-2010). Usando medias móviles de 19 años se evitan fluctuaciones en las series temporales asociadas a la variabilidad interanual, amplificándose la variabilidad multidecadal (Giorgi y Bi, 2009; Sui et al., 2014).

Como medida de incertidumbre o ruido (N) se utilizó la desviación estándar de las series de precipitación y temperatura estacional en el periodo de referencia, a las cuales se les eliminó la tendencia lineal previamente (de Elía et al., 2013).

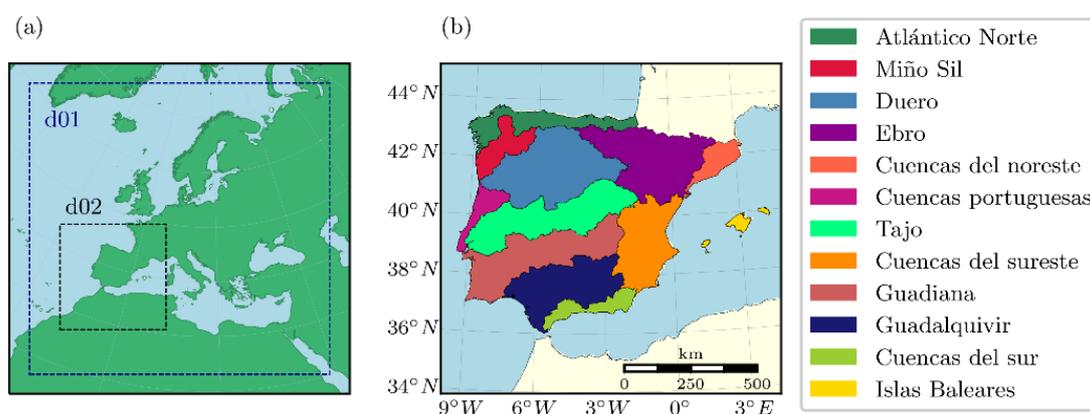


Fig. 1: (a) Dominios de las simulaciones WRF; (d01) dominio padre que corresponde a la región EURO-CORDEX a una resolución espacial de 50 km, y (d02) dominio anidado el cual está centrado en la PI a 10 km de resolución espacial. (b) Principales cuencas hidrográficas de la PI.

En este contexto podría entenderse que existe una potencial emergencia de la señal de cambio climático cuando la relación S/N sobrepasa el umbral de  $\pm 1$  permaneciendo además por encima (debajo) de dicho umbral hasta el final del periodo (Giorgi y Bi, 1999).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Precipitación

La Fig. 2 muestra la evolución de la relación señal/ruido para la precipitación estacional (invierno: DJF, primavera: MAM, verano: JJA y otoño: SON) en las distintas cuencas hidrográficas de la PI. Los resultados en general sugieren que la señal de cambio antropogénica podría emerger durante parte del año bajo el escenario de emisión RCP8.5, siendo dicha emergencia visible sólo en alguna de las cuencas.

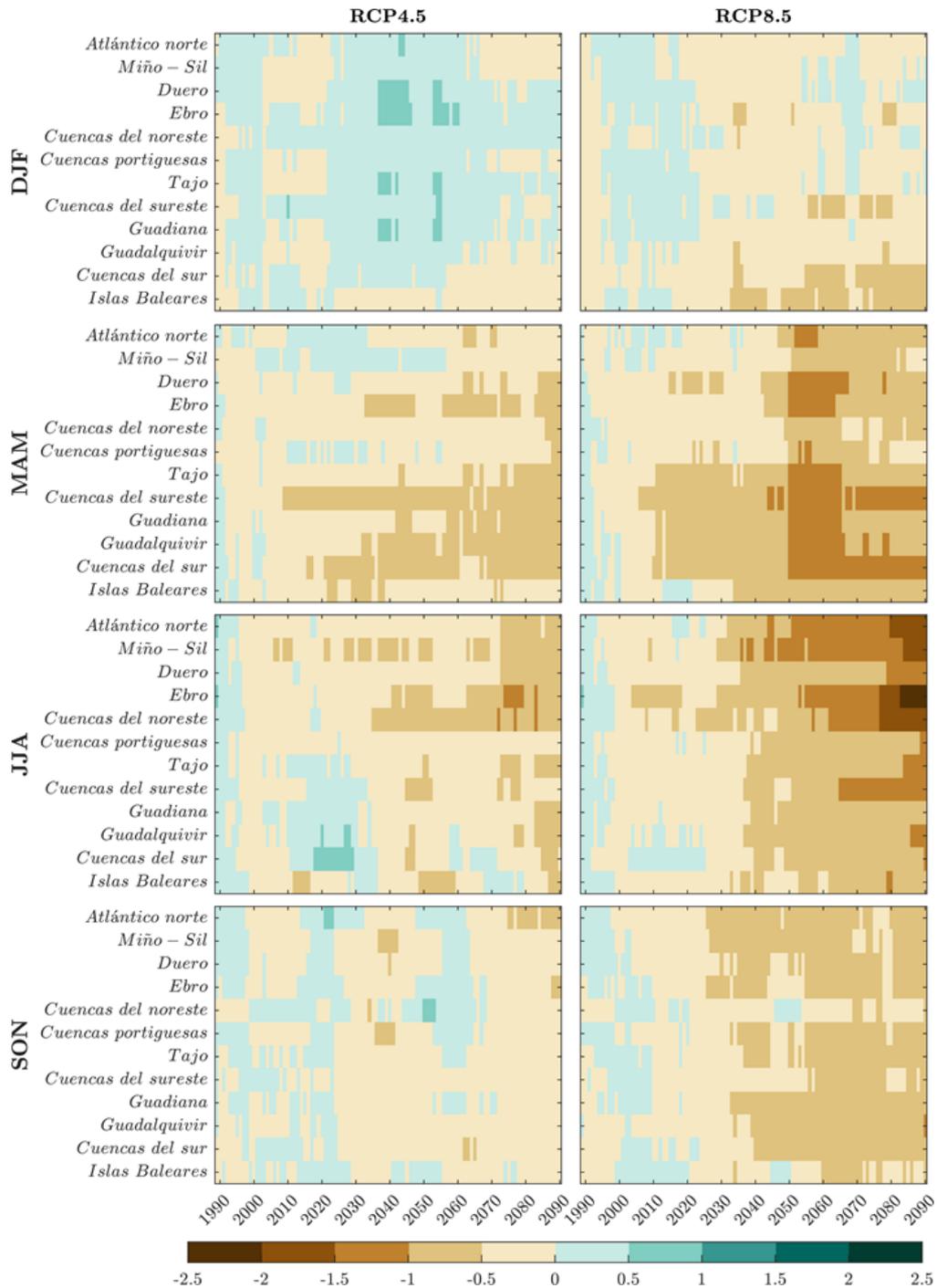
Para el invierno ninguno de los dos escenarios muestran valores S/N que superen el umbral de  $\pm 1$  siendo la señal de aumento (más presente en el RCP4.5) o disminución (principalmente en el RCP8.5) menor a la propia variabilidad natural.

Para la primavera ambos escenarios indican señales de cambio más fuertes. Sin embargo, sólo el escenario RCP8.5 muestra valores S/N por debajo de -1. Para las cuencas del sur y sureste los valores S/N superan dicho umbral alrededor del año 2050 permaneciendo hasta el final del periodo, al menos en la Cuenca del sur. Valores por debajo de -1 también se dan en otras cuencas (Atlántico norte, Duero, Ebro, Tajo, Guadiana y Guadalquivir) pero dichos valores aumentan entre las décadas 2060-2070 manteniéndose entre -0.5 y -1 hasta final del periodo.

El verano es la estación que indica una tendencia de reducción de las precipitaciones más acusada. Para el RCP8.5, son las cuencas del norte peninsular (Atlántico norte, Miño Sil, y Ebro) las que parecen más afectadas, alcanzando valores por debajo de -1 en torno a las décadas 2040-2050. Dichos valores disminuyen a lo largo de la serie hasta alcanzar valores por debajo de -2 en el Ebro a final del periodo. Las cuencas del noreste, sureste, Duero, Tajo, y Guadalquivir alcanzan valores por debajo de -1 a partir

de 2060 hasta el final del periodo. Para el RCP4.5 también se alcanzan valores por debajo de -1 pero éstos se recuperan rápidamente.

En otoño ambos escenarios indican un comportamiento similar a la primavera, con disminuciones generalizadas, más marcadas bajo el RCP8.5. Sin embargo, en esta estación valores S/N por debajo de -1 no llegan a alcanzarse bajo ninguno de los dos escenarios.



*Fig. 2: Evolución temporal de la relación señal-ruido (S/N) para la precipitación (pr) estacional (DJF, MAM, JJA y SON) en las diferentes cuencas de la PI bajo ambos escenarios de emisión, el RCP4.5 y el RCP8.5.*

### **3.2. Temperatura**

Las Figs. 3 y 4 muestran la evolución de la relación S/N estacional en cada una de las cuencas para la Tmax y Tmin, respectivamente. Los resultados, en general, sugieren una emergencia de la señal de cambio climático antropogénica en ambos escenarios, claramente visible para ambas temperaturas con valores S/N por encima de 1 desde comienzos del siglo XXI. Sin embargo, existen diferencias entre la Tmax y la Tmin a lo largo del año.

De manera general, bajo el RCP4.5 la Tmax invernal (Fig. 3) presenta una emergencia más tardía que en otras estaciones del año, alcanzando valores S/N superiores a 1 alrededor de 2060. Como excepción, en las Cuencas del sur e Islas Baleares dicho umbral se supera entre la década de 2030 a 2040. Para la primavera y el verano el comportamiento cuenca a cuenca es más heterogéneo, mostrando en las cuencas del norte como la del Atlántico Norte, Miño-Sil y portuguesas una emergencia de la señal a finales del siglo XXI, e incluso no llegando a alcanzarla en el caso del Atlántico norte o Miño-Sil en primavera. Sin embargo cuencas del sur de la península, como las cuencas del sureste, sur e Islas Baleares parecen superar el umbral de 1 a mitad del siglo XXI, tanto en primavera como en verano. Para el otoño, la emergencia ocurre la entre la década de 2030 y 2040, excepto en las cuencas portuguesas, Miño-Sil y Atlánticas, donde ésta se produce alrededor de 2060. El escenario RCP8.5 presenta un comportamiento más homogéneo con la mayoría de las cuencas presentando valores S/N por encima de 1 a partir de 2030. Este escenario además presenta una tendencia de aumento más acusada, especialmente en el otoño, cuando la mayoría de las cuencas alcanzan valores S/N por encima de 3.5 entre 2060 y 2070. En verano, las tendencias también son muy marcadas con valores S/N por encima de 3.5 a partir de 2080.

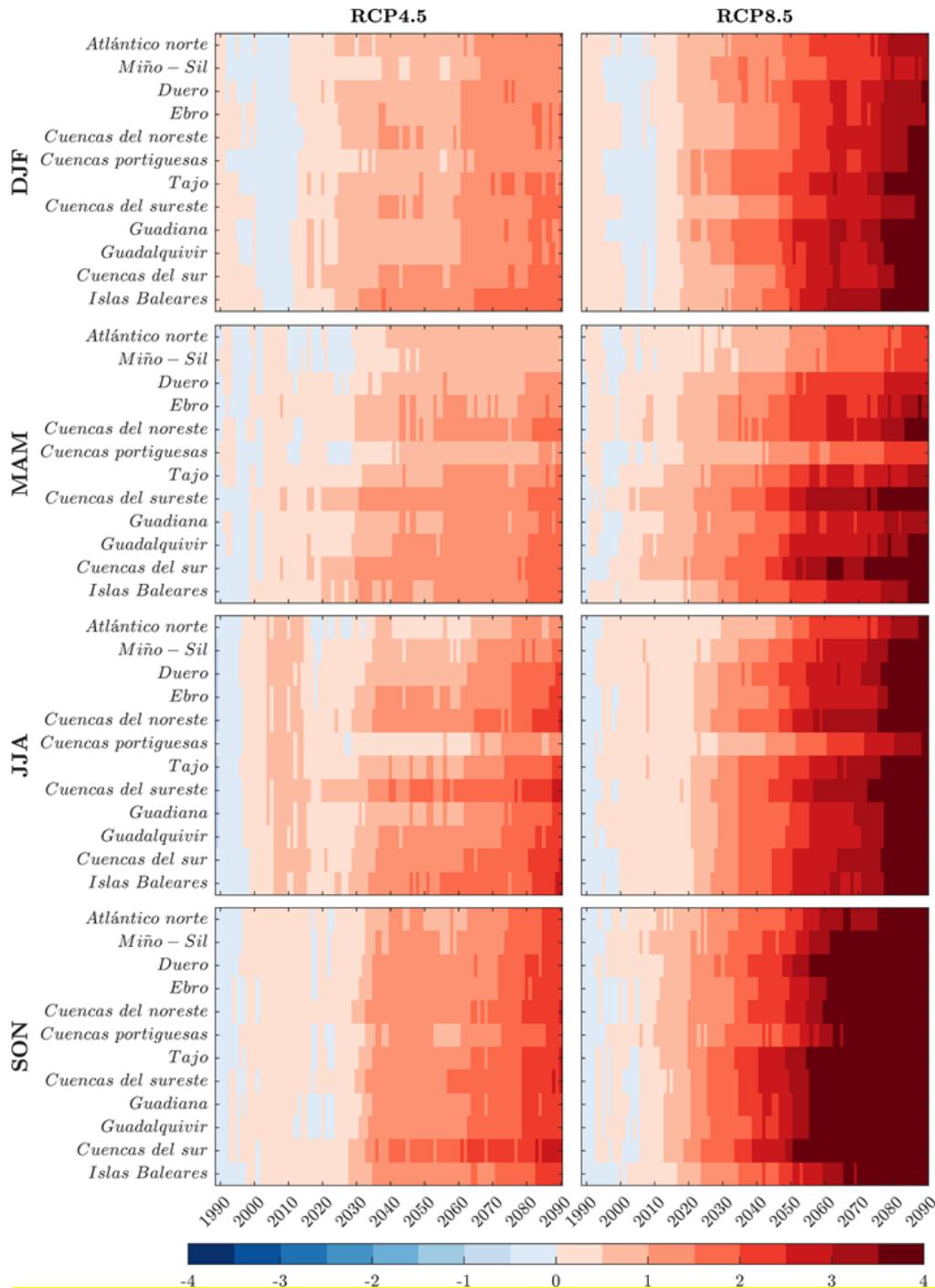
La Tmin (Fig. 4) presenta un comportamiento similar a la Tmax aunque en este caso la señal de cambio parece ser ligeramente más débil. Como excepción, la Tmin invernal muestra una emergencia de la señal bajo el escenario RCP4.5 más fuerte que la Tmax, cuando todas las cuencas presentan valores por debajo del umbral ya en 2040.

## **4. DISCUSIÓN**

Este estudio analiza la potencial emergencia de la señal de cambio climático antropogénico en la precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en las diferentes cuencas hidrográficas de la Península Ibérica. Para ello se hace uso del concepto de tiempo de emergencia, introducido para conocer cuando se dará la emergencia de la señal así como para discernir si estos cambios podrían dar lugar a una adaptabilidad de los ecosistemas (Giorgi y Bi, 2009).

Para la precipitación, los resultados, en general, muestran que la señal podría emerger al final del siglo XXI en caso de que se den concentraciones de gases de efecto invernadero similares a las establecidas bajo el escenario RCP8.5. Dicha emergencia, sin embargo, no es clara pues el umbral aquí adoptado ( $S/N < -1$ ) se alcanza únicamente en primavera y verano, y en ocasiones sólo al final del periodo. La

interpretación de estos resultados, además, debe hacerse con cautela ya que la detección del tiempo de emergencia está sujeta a una gran fuente de incertidumbre. Hay que tener en cuenta que este análisis se basa en los resultados de un solo RCM, conducido por un único GCM, por lo que en un futuro sería conveniente ampliar dicho análisis haciendo uso de un *ensemble* de simulaciones con distintas combinaciones RCM-GCM.



*Fig. 3: Como la Fig.2, pero para la temperatura máxima (Tmax).*

La emergencia de la señal para la temperatura parece ser más clara ya que ambos escenarios muestran una tendencia unánime hacia el aumento, alcanzando valores en la señal que pueden llegar a ser hasta más de 2 o 3.5 veces superiores a la variabilidad natural para el RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente.

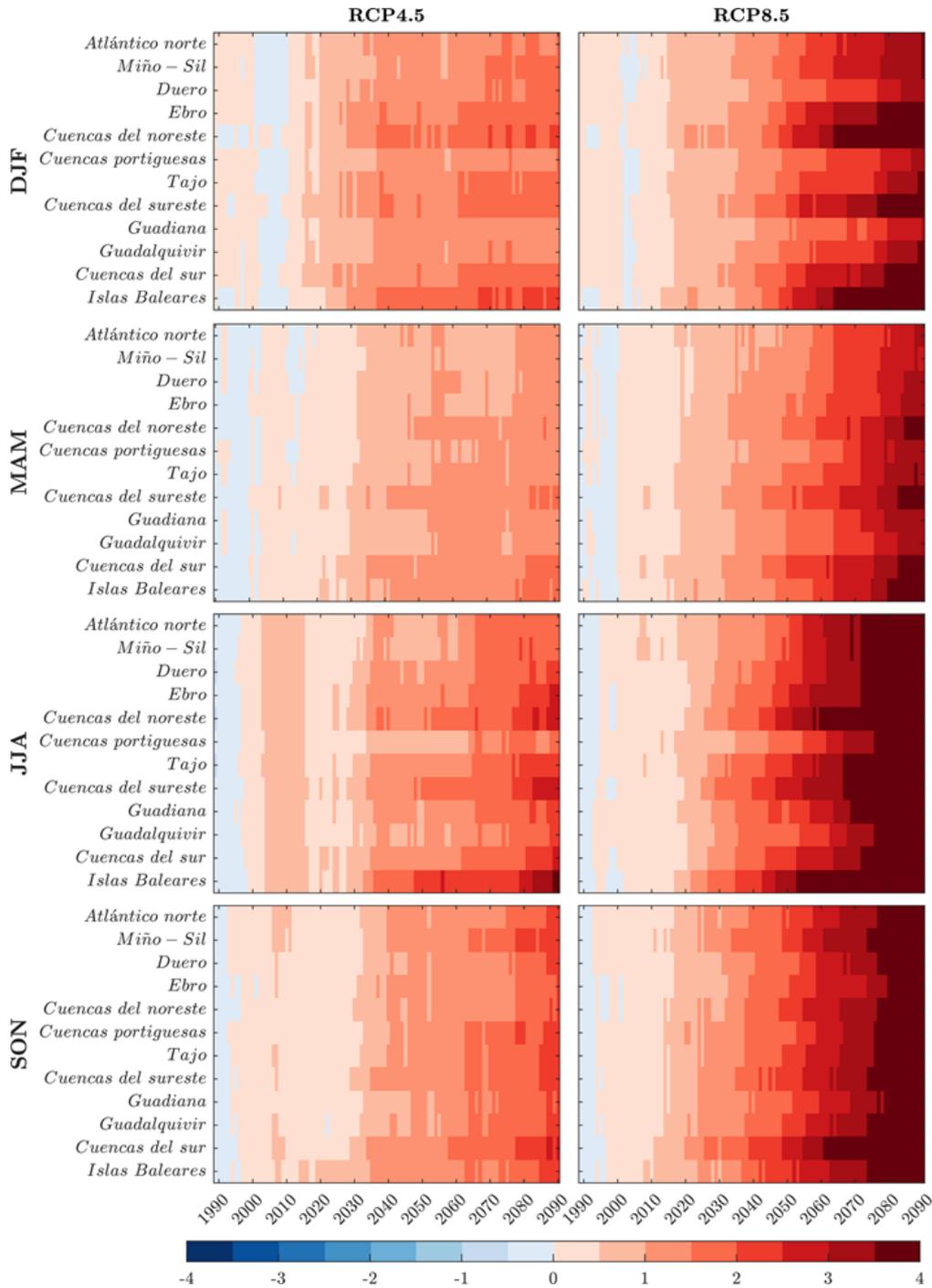


Fig.4: Como la Fig.3, pero para la temperatura mínima (Tmin).

De hecho, podría entenderse que existe una emergencia cuando el sistema se desvía substancialmente del estado de referencia durante un tiempo prolongado, aspecto que queda claramente evidenciado en los resultados de Tmax y Tmin. Dichos cambios resultan más evidentes durante el verano y otoño, y sobre todo en términos de temperatura máxima. Sin embargo, a este respecto, es importante considerar que en este estudio se determinó la variabilidad natural a partir de un método estadístico (es decir usando la desviación estándar interanual). En este sentido, autores como Deser et al. (2012) y Chen y Yuan (2022) evidenciaron que la estimación de la variabilidad natural del sistema climático mediante métodos estadísticos en vez de usando un *ensemble* de simulaciones de un único modelo bajo diferentes condiciones iniciales (*Single Model Initial-Condition Large Ensembles*, SMILEs), podría generar una subestimación de la variabilidad natural, especialmente a comienzos del siglo XXI. Este hecho puede dar lugar a una detección temprana en el tiempo de emergencia de la señal climática antropogénica, teniendo un efecto más notorio en la temperatura que en la precipitación.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Este estudio ha sido financiado por FEDER/Junta de Andalucía-Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades (proyecto P20\_00035), Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto LifeWatch-2019-10-UGR-01), FEDER/Junta de Andalucía-Consejería de Economía y Conocimiento (proyecto B-RNM-336-UGR18), y Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (proyecto CGL2017-89836-R).

#### **REFERENCIAS**

- Bruyère, C. L., Done, J. M., Holland, G. J., Fredrick, S. (2014). Bias corrections of global models for regional climate simulations of high-impact weather. *Climate Dynamics*, 43(7–8), 1847–1856. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-013-2011-6>
- Chen, S., Yuan, X. (2022). Quantifying the uncertainty of internal variability in future projections of seasonal soil moisture droughts over China. *Science of The Total Environment*, 824, 153871. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153817>
- de Elía, R., Biner, S., Frigon, A. (2013). Interannual variability and expected regional climate change over North America. *Climate Dynamics*, 41(5-6), 1245–1267. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1717-9>
- Deser, C., Phillips, A., Bourdette, V., Teng, H. (2012). Uncertainty in climate change projections: The role of internal variability. *Climate Dynamics*, 38, 527–546. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0977-x>
- Gaetani, M., Janicot, S., Vrac, M., Famien, A. M., Sultan, B. (2020). Robust assessment of the time of emergence of precipitation change in West Africa. *Scientific Reports*, 10(1), 7670. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63782-2>
- 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. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(3), 1569–1594. doi: <https://doi.org/10.1002/2016JD025683>

- García-Valdecasas Ojeda, M., Rosa-Cánovas, J. J., Romero-Jiménez, E., Yeste, P., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., Esteban-Parra, M. J. (2020). The role of the surface evapotranspiration in regional climate modelling: Evaluation and near-term future changes. *Atmospheric Research*, 237, 104867. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104867>
- García-Valdecasas Ojeda, M., Yeste, P., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., Esteban-Parra, M. J. (2020). Future changes in land and atmospheric variables: An analysis of their couplings in the Iberian Peninsula. *Science of The Total Environment*, 722, 137902. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137902>
- Giorgetta, M. A., Jungclaus, J., Reick, C. H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, 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. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(3), 572–597. doi: <https://doi.org/10.1002/jame.20038>
- Giorgi, F., Bi, X. (2009). Time of emergence (TOE) of GHG-forced precipitation change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 36(6), L06709. doi: <https://doi.org/10.1029/2009GL037593>
- Hawkins, E., Sutton, R. (2012). Time of emergence of climate signals. *Geophysical Research Letters*, 39(1), L01702. doi: <https://doi.org/10.1029/2011GL050087>
- 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. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563–578. doi: <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M., ... Powers, J. G. (2008). A description of the advanced research WRF version 3. *NCAR Technical Note, NCAR/TN-47*, 113 pp. doi: <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- Sui, Y., Lang, X., Jiang, D. (2014). Time of emergence of climate signals over China under the RCP4.5 scenario. *Climatic Change*, 125(2), 265–276. doi: <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1151-y>