

Proyecciones de clima regional sobre España: atmósfera.

Proyecciones de clima futuro

DOI: <https://doi.org/10.31978/639-18-002-5.09>

Jesús Fernández¹, Ana Casanueva^{1*}, Juan Pedro Montávez², Miguel Ángel Gaertner³,
María Jesús Casado⁴, Rodrigo Manzanas⁵, José Manuel Gutiérrez⁵

¹ Grupo de Meteorología, Dpto. Matemática Apl. y Ciencias de la Computación, Universidad de Cantabria, España

² Grupo de Modelización Atmosférica Regional, Departamento de Física, Universidad de Murcia, España

³ Facultad de Ciencias Ambientales y Bioquímica, Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), España

⁴ Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), España

⁵ Grupo de Meteorología, Instituto de Física de Cantabria (CSIC-UC), España

(*) Actualmente en la Oficina Federal de Meteorología y Climatología (MeteoSwiss), Suiza

Introducción

Las comunidades que investigan vulnerabilidades, impactos y adaptación (VIA) frente al cambio climático reclaman cada vez más información climática a escala regional y/o local. Esta información es necesaria para modelizar los impactos en sectores específicos (salud, energía, disponibilidad de alimentos, gestión de riesgos, recursos hídricos) y para los procesos de toma de decisiones a diferentes niveles. En las últimas décadas, una serie de iniciativas internacionales y nacionales han producido diferentes proyecciones globales y regionales de cambio climático para el siglo XXI, usando tanto modelos climáticos regionales (MCR), como métodos de regionalización estadísticos (MRE). Como resultado, se dispone de grandes bases de datos de simulaciones globales (por ejemplo, CMIP3, CMIP5) y regionales (p. ej., ENSEMBLES, CORDEX). Estas bases de datos abarcan la mayoría de las incertidumbres que afectan al cambio climático. Hoy en día, los usuarios se enfrentan al dilema técnico y ético de decidir qué información, de entre la gran cantidad de datos disponibles, es la más adecuada para su campo de trabajo, sin dejar de atender a las diferentes fuentes de incertidumbre para su región o problema específico (Hewitson, 2013).

Escenarios regionales de cambio climático para España

La infraestructura de la Federación *Earth System Grid* (ESGF, <https://esgf.llnl.gov>) proporciona acceso estandarizado a datos de salida de modelos de cambio climático de última generación (de las iniciativas CMIP5 y CORDEX). Sin embargo, el uso directo de ESGF es todavía complejo y lento para un usuario promedio y, por lo tanto, proliferan otros portales que proporcionan datos de escenarios (por ejemplo, para una región en particular), así como índices derivados para sectores específicos (Hewitson *et al.*, 2017).

En España, el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), a través de la iniciativa Escenarios-PNACC, recopila las principales fuentes de información

sobre el cambio climático regional. El primer conjunto de datos (Escenarios-PNACC, 2012) se basó en las proyecciones CMIP3, de modelos de circulación general (MCG; usando los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero B1, A1B y A2), y proporcionó resultados para temperatura, precipitación y varios índices derivados (por ejemplo, percentiles). Además de las proyecciones de cambio climático a escala europea mediante MCR proporcionadas por el proyecto ENSEMBLES (Déqué *et al.*, 2012) y la contribución de AEMET (con métodos de regionalización estadísticos), este primer conjunto de datos se nutrió de los resultados de dos acciones estratégicas en el marco del Plan Nacional de I+D+i 2008-2011 (ESCENA y ESTCENA, para regionalización dinámica y estadística, respectivamente) emprendidas por la comunidad investigadora española dedicada a la proyección regional del cambio climático. Las simulaciones dinámicas complementan las producidas en ENSEMBLES, pero se basan en un dominio centrado en la península ibérica (Fernández *et al.*, 2012; Jiménez, Guerrero *et al.*, 2013, Domínguez *et al.*, 2013). Los escenarios de regionalización estadísticos fueron producidos con diferentes técnicas basadas en análogos y métodos de regresión (Gutiérrez *et al.*, 2012). Las bases de datos observacionales consisten en una selección de estaciones proporcionadas por AEMET y las observaciones en rejilla proporcionadas por Spain02 v2.1 (malla regular a una resolución de 20 km; véase Herrera *et al.*, 2012). Se puede encontrar más información y enlaces para acceder a los datos en la referencia Escenarios-PNACC (2012).

Numerosos estudios han analizado estos resultados y evaluado las limitaciones de las diferentes bases de datos que forman Escenarios-PNACC 2012, centrándose principalmente en temperatura y precipitación. Por ejemplo, Turco *et al.* (2015) analizaron las proyecciones regionales de ENSEMBLES para la temperatura máxima diaria y precipitación en España, y encontraron cambios coherentes entre los diferentes modelos hasta 2050 (escenario A1B).

En líneas generales, estos cambios indican una disminución en la precipitación (entre -5 y -25 %) y un aumento en la temperatura máxima (entre 1 y $2,5$ °C, dependiendo de la estación del año y de la zona). Gutiérrez *et al.* (2013) encontraron limitaciones en los métodos de análogos a la hora de extrapolar las temperaturas futuras durante las últimas décadas del siglo. Por lo tanto, estos resultados deben usarse con precaución. Además, San-Martín *et al.* (2017) ponen de manifiesto un buen acuerdo entre las proyecciones regionales dinámicas (ENSEMBLES) y estadísticas (ESTCENA) para precipitación en España, aunque durante el verano y el otoño los métodos estadísticos muestran una gran incertidumbre entre diferentes familias (métodos de regresión frente a los de análogos).

Otros estudios analizan otras variables, como la nieve, la velocidad del viento o los periodos de sequía. Por ejemplo, Pons *et al.* (2016) encontraron una tendencia decreciente en la frecuencia anual de nevadas (número de días al año con nevadas) en las proyecciones regionales de ENSEMBLES, con valores que van desde $-3,7$ a $-0,5$ días/década ($-2,0$ días/década para la media del conjunto). Estas tendencias futuras son similares a las históricas observadas desde 1970 ($-2,2$ días/década) y vienen determinadas principalmente por el aumento de las temperaturas. Gómez *et al.* (2016) analizaron la velocidad del viento utilizando datos de ENSEMBLES obteniendo que la velocidad del viento para 2031-2050 se reduce hasta un 5 % en comparación con el periodo de control de 1980-1999 para todos los modelos. Los modelos también coinciden en la evolución de la velocidad del viento promediada espacialmente en cada región, mostrando una tendencia negativa para todos ellos. López-Franca (2015) analizó periodos de sequía en España y encontró un aumento de la probabilidad de periodos de sequía largos, junto con una disminución en los más cortos.

La incertidumbre en las proyecciones regionales del clima debida a las parametrizaciones físicas del modelo (que representan procesos de subrejilla como la convección o la turbulencia) también se ha abordado específicamente sobre la península ibérica. Por ejemplo, Jerez *et al.* (2013) mostraron que la incertidumbre asociada a las parametrizaciones físicas es del mismo orden de magnitud que la de conjuntos multimodelo, y que la magnitud de las proyecciones de los modelos no depende de su sesgo en las simulaciones de clima presente. Sin embargo, la incertidumbre podría depender de las condiciones sinópticas, que son diferentes en climas futuros. Además, Jerez *et al.* (2012) evaluaron la influencia de la simulación de procesos del subsuelo; en particular, la contribución de la modelización de la humedad del suelo en el clima futuro, y su gran importancia en las zonas transición entre climas secos y húmedos.

Estos estudios proporcionan abundante información sobre la base de datos de Escenarios-PNACC, aunque aún se necesita investigación para entender las limitaciones prácticas y metodológicas de las proyecciones regionales; en particular, la capacidad de extrapolación de los diferentes métodos, es decir, la robustez de la hipótesis de estacionariedad.

Además de las actividades del PNACC, ha habido también otra serie de estudios de proyecciones regionales de cambio climático en España, de gran valor para el estudio de climas regionales. Por ejemplo, Osca *et al.* (2013) aplicaron una técnica de clasificación de tipos de tiempo para la precipitación en España. Ribalaygua *et al.* (2013) describieron los resultados de un método de análogos de dos pasos para proyecciones regionales en Aragón. Respecto a resultados de proyecciones mediante regionalización dinámica, Gómez-Navarro *et al.* (2010) usaron el modelo MM5 para obtener proyecciones sobre España y Pérez (2014) y Gonçalves (2014) desarrollaron simulaciones con el modelo WRF en las islas Canarias y el Mediterráneo español, respectivamente. Ramos *et al.* (2013) analizaron las proyecciones de precipitación del CMIP3 con un modelo estadístico.

Actualmente, se está preparando una actualización de Escenarios-PNACC, basada en la nueva información derivada de las proyecciones globales del CMIP5 (usando los escenarios de concentraciones representativas RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5). La nueva edición (Escenarios-PNACC 2017) se basa en la investigación realizada por grupos españoles

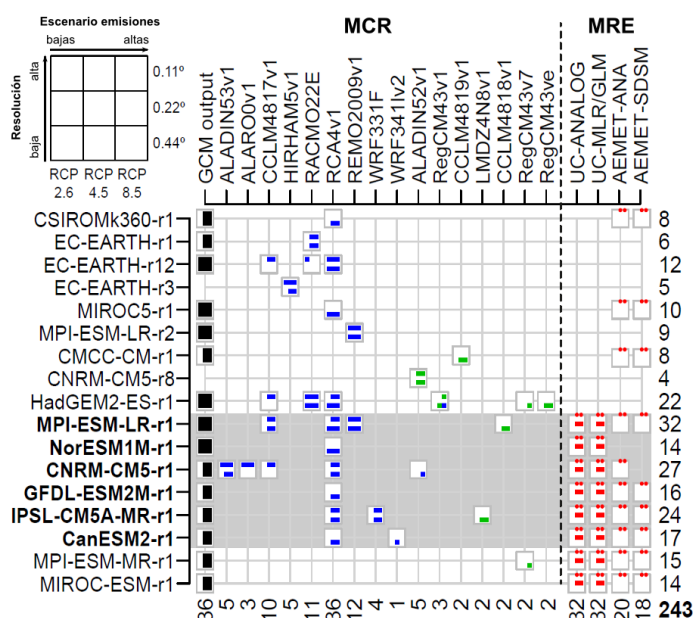


Figura 1. Matriz (a 30 de abril de 2017) de cruces MCG-MRC/MRE para los conjuntos de proyecciones regionales dinámicas (azul de EURO-CORDEX, verde de MED-CORDEX) y estadísticas (rojo), basadas en proyecciones globales del CMIP5. Los números muestran el número de miembros de cada conjunto (frecuencias marginales) para un MCG (filas) o MRC/MRE (columnas) dado. Las proyecciones disponibles comprenden simulaciones a tres resoluciones ($0,11^\circ$, $0,22^\circ$ y $0,44^\circ$) y para tres escenarios RCP (RCP 2.6, 4.5 y 8.5), como se muestra en la leyenda de la esquina superior izquierda. Nótese que los métodos estadísticos de regionalización proporcionan información puntual (basada en datos de estaciones meteorológicas, y representada en la figura mediante puntos) y, en algunos casos, también información promediada en una malla (usando Spain02 v5 como predictando). Además, aunque no se muestran en esta figura, AEMET dispone de estimaciones puntuales mediante métodos estadísticos para otros 14 MCG del CMIP5 para AEMET-ANA y otros 10 con el método AEMET-SDSM.

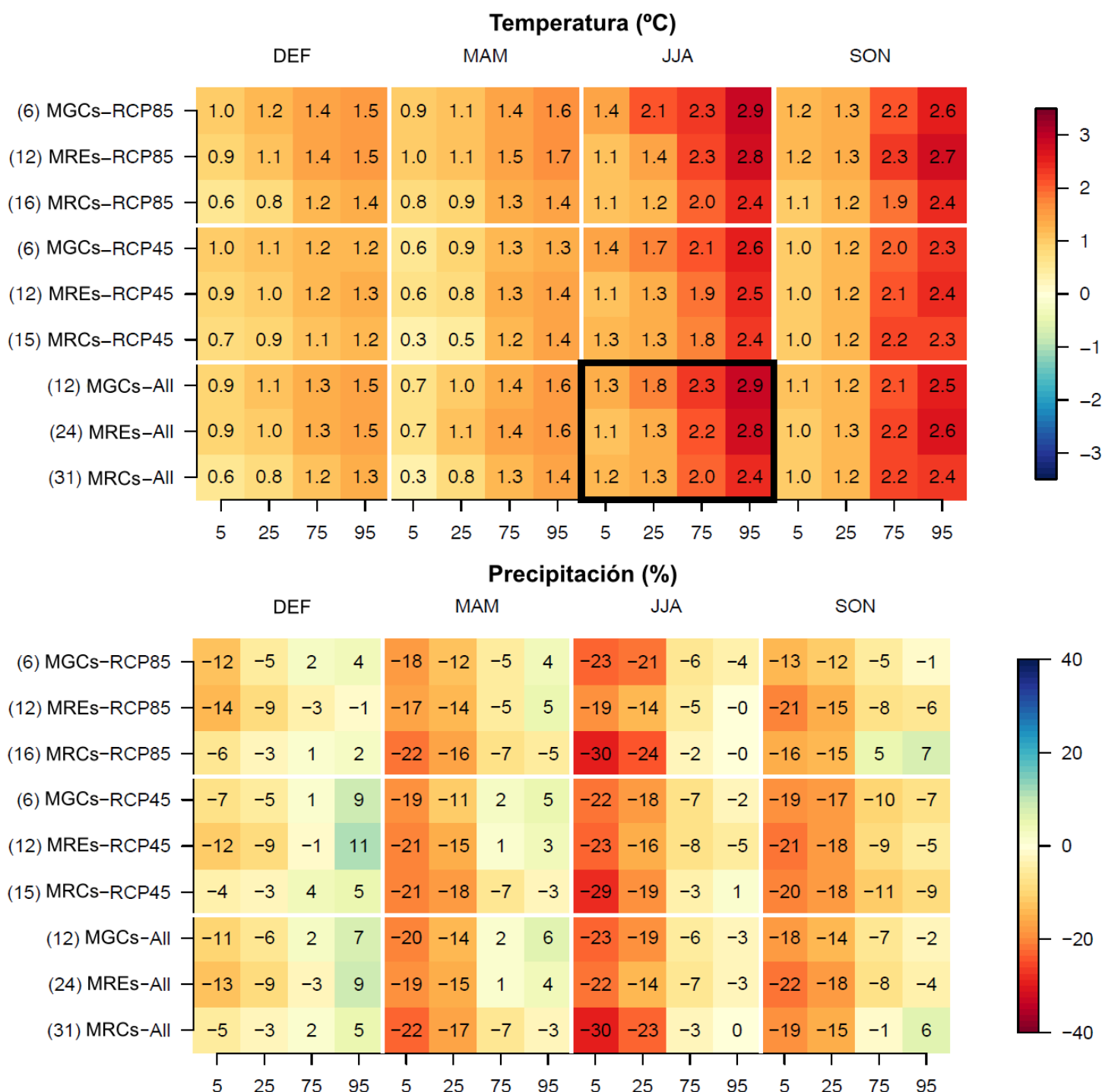


Figura 2. Cambios proyectados, por estaciones del año, para la temperatura en superficie (°C, panel superior) y la precipitación (%), panel inferior) para 2021-2050, respecto al promedio del periodo 1971-2000, en promedio para la España continental y las islas Baleares para dos escenarios de forzamiento diferentes (RCP8.5, RCP4.5 y ambos «All») teniendo en cuenta las proyecciones de los MCG, MRE o MRC (en filas diferentes para cada escenario). A fin de proporcionar información sobre la incertidumbre del conjunto en la señal de cambio climático, se dan diferentes percentiles (5, 25, 75 y 95) para cada caso. El rango 25-75 es un valor típico utilizado para caracterizar la dispersión del conjunto, mientras que los percentiles 5 y 95 caracterizan las señales más extremas dentro del conjunto.

en el marco de la iniciativa coordinada VALUE (Maraun *et al.*, 2015) y las proyecciones mediante modelos regionales producidas en el contexto de las iniciativas EURO-CORDEX (Jacob *et al.*, 2014) y MED-CORDEX (Ruti *et al.*, 2016). La versión actualizada del conjunto de datos observacionales es Spain02 v5 (a una resolución de 10 km, tanto en malla regular como rotada). La mayoría de esta información ya está disponible (con resolución temporal

diaria) en http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat y <http://www.meteo.unican.es/escenarios-pnacc>.

La Figura 1 muestra la información ya disponible de Escenarios-PNACC 2017 mediante la matriz de combinaciones MCG-MRC/MRE para el conjunto de proyecciones multiproyecto considerado en este estudio, según disponibilidad pública a fecha de 30 de abril de 2017. Los números muestran la

contribución marginal de cada MCG (en filas) y MRC/MRE (en columnas) al conjunto. Las proyecciones consideradas incluyen diferentes escenarios de forzamiento y resoluciones espaciales (véase la leyenda de la figura). Para cada combinación MCG-MRC/MRE, los recuadros indican las resoluciones espaciales disponibles (0,11°, 0,22° y 0,44°) y los escenarios RCP (RCP 2.6, 4.5 y 8.5). Téngase en cuenta que, además de las dos resoluciones espaciales, los modelos estadísticos también brindan proyecciones locales (basadas en estaciones) para una número elevado de estaciones (más de 2300 seleccionadas por AEMET). Todo ello hace un total de 255 proyecciones regionales disponibles, formando un gran conjunto multimétodo y multimodelo, que cubre las distintas fuentes de incertidumbre en las proyecciones de cambio climático regional en España. Este conjunto de datos será la base para futuros estudios regionales sobre cambio climático en España.

La Figura 2 muestra los cambios proyectados en la temperatura y la precipitación para 2021-2050 promediados en la España continental y las islas Baleares. Incluye solo el conjunto de MCG regionalizado por modelos dinámicos y estadísticos para el mismo RCP y resolución espacial, formando así un conjunto equilibrado, representativo de las incertidumbres regionales (sombra gris en la Figura 1). Se presentan los cambios proyectados como los rangos centrales aglutinando el 50 % y el 90 % de las estimaciones (obtenidos con los percentiles 25-75 y 5-95) para diferentes métodos, y para diferentes estaciones del año. Para la precipitación, hay una tendencia general a disminuir en promedio en todas las estaciones, aunque el rango esperado de cambio solo es negativo en su totalidad durante el verano, alcanzando una disminución promedio de -30 % para las estimaciones con modelos dinámicos regionales. En cuanto a la temperatura, se esperan los mayores aumentos en verano y otoño, alcanzando cerca de 3 °C con respecto a 1971-2000 en el caso más extremo, y no menos de 1 °C en las estimaciones más conservadoras. Los MCG tienden a proporcionar estimaciones más cálidas, que coinciden en el extremo superior por MRE. Estos, sin embargo, muestran una mayor dispersión y menos calentamiento en el extremo inferior. Los MCR proporcionan, en general, proyecciones con menor calentamiento.

Jacob *et al.* (2014) presentan una descripción de las proyecciones de EURO-CORDEX a escala europea, comparando también los resultados con los escenarios anteriores del proyecto ENSEMBLES. Hay publicaciones recientes, también, de estudios basados en la regionalización estadística de datos CMIP5, analizando diferentes aspectos de las proyecciones de cambio climático en España. Sobre extremos, Monjo *et al.* (2016) aplicaron un método de regionalización estadística en dos pasos (análogos/regresión) usando predictores CMIP5 sobre España, y analizaron los valores de retorno de precipitación a 50 y 100 años. Revelaron cambios proyectados, en general, más pequeños que la variabilidad natural. También se han estudiado cambios futuros en extremos tales como ciclones con características tropicales (conocidos como «medicane» cuando se desarrollan en el mar Mediterráneo) en regiones oceánicas próximas a la península ibérica; por ejemplo, usando modelos CMIP5 (Romero y Emanuel, 2017) o MRC de ENSEMBLES (Romera *et al.*, 2017).

Estudios de impactos y corrección de sesgos

También se ha desarrollado una serie de estudios que analizan el impacto de las proyecciones de cambio climático en diferentes sectores socio-económicos utilizando índices relacionados con el clima a partir de información regionalizada. Por ejemplo, Bedia *et al.* (2013, 2014) analizaron las proyecciones de riesgo de incendio en España usando el *Fire Weather Index* (FWI) elaborando proyecciones estadísticas/dinámicas basadas en CMIP3/ENSEMBLES, respectivamente. Resco *et al.* (2015) y Lorenzo *et al.* (2016) analizaron el impacto sobre la viticultura en España con diferentes índices bioclimáticos y datos del proyecto ENSEMBLES. Jerez *et al.* (2015) se centraron en la generación de energía fotovoltaica en Europa utilizando datos de EURO-CORDEX. Esteve-Selma (2012) estudió la distribución futura de *Tetraclinis articulata* (una especie arbórea endémica del Mediterráneo). Bafaluy (2014) investigó una serie de índices climáticos relevantes para el turismo utilizando datos de ENSEMBLES. Casanueva *et al.* (2014) introdujeron la aplicación directa de la regionalización estadística a índices climáticos multivariable para índices de turismo y riesgo de incendios.

Uno de los principales problemas encontrados en los estudios de impactos cuando se analizan índices derivados de MRC es el efecto introducido por los sesgos del modelo. Casanueva *et al.* (2016) proporcionaron un análisis detallado de los sesgos de EURO-CORDEX sobre España. Los sesgos de los modelos han dado lugar a una intensa actividad investigadora en las últimas dos décadas con el fin de encontrar métodos adecuados para su ajuste, capaces de corregir los sesgos del modelo frente a una climatología de alta resolución de referencia. Dosio *et al.* (2012) realizaron una comparación de diferentes métodos de ajuste de sesgo en Europa, utilizando datos de ENSEMBLES. Varios estudios de impactos han explorado el uso de estas técnicas. Por ejemplo, Ruiz-Ramos *et al.* (2016) aplicaron varios métodos de corrección de sesgo para mejorar las proyecciones del impacto del cambio climático sobre los cultivos en la península ibérica para el siglo XXI. Gabaldón-Leal *et al.* (2015) utilizaron los datos de ENSEMBLES con el sesgo corregido para analizar cultivos de verano en el sur de la península ibérica, centrándose en los impactos del aumento de las temperaturas y de la mayor frecuencia de eventos extremos sobre el maíz de regadío, y para evaluar algunas estrategias de adaptación.

Otros estudios sobre métodos de corrección de sesgo son el trabajo de Romero *et al.* (2011), presentando un nuevo método paramétrico de corrección de sesgo que preserva la tendencia, y el de Turco *et al.* (2017), presentando una nueva metodología basada en análogos para corregir y regionalizar estadísticamente datos de MRC.

Destilación de resultados de escenarios globales y regionales

Se suele aconsejar a las comunidades que investigan VIA que consideren un conjunto de proyecciones de modelos o, al menos, una selección de miembros que abarquen la dispersión del conjunto, para así propagar adecuadamente la incertidumbre que surge de los diferentes escenarios de

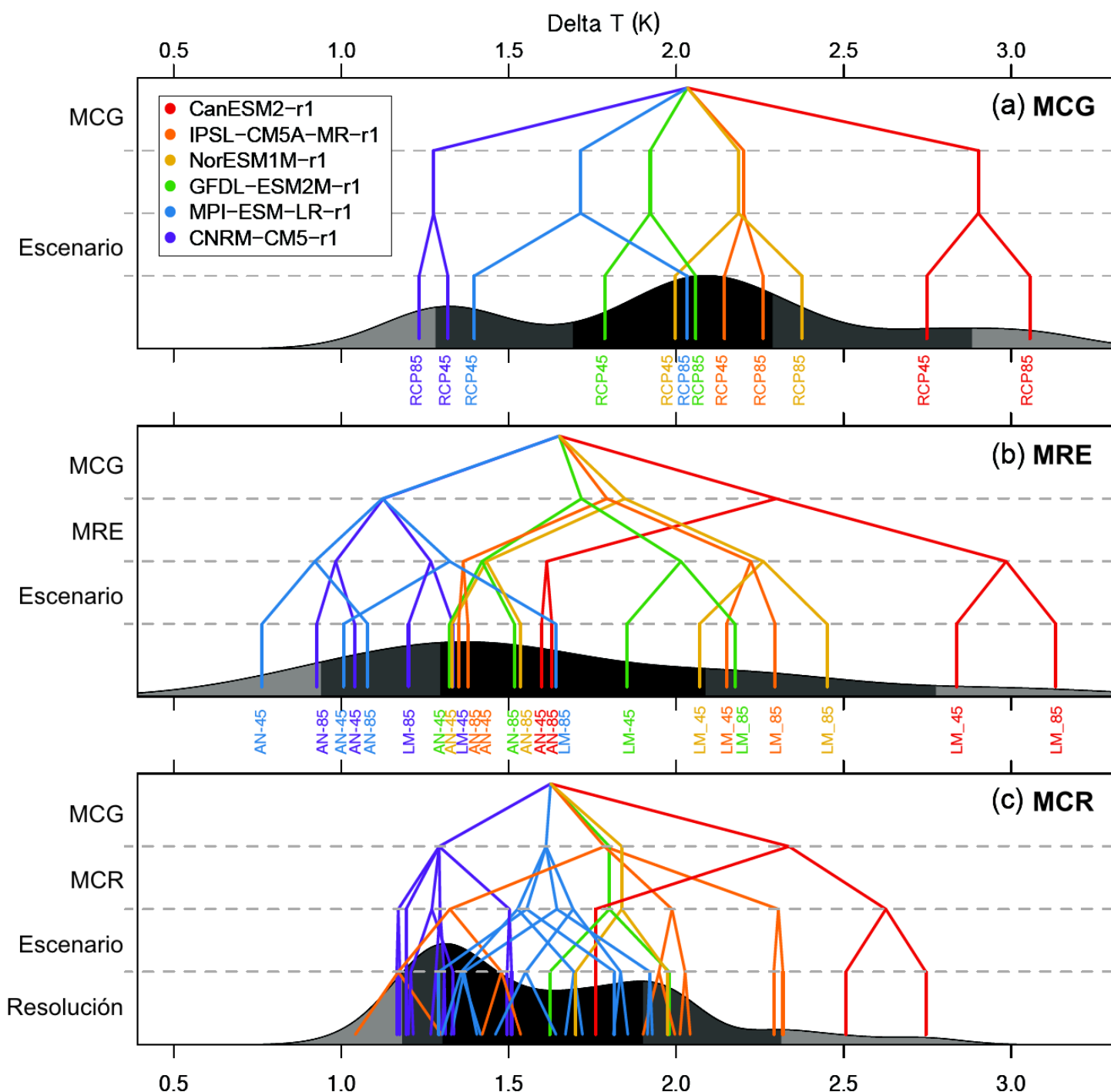


Figura 3. Cambios de temperatura proyectados (deltas) para verano (JJA) (2021-2050 respecto a 1971-2000) promediados para la España continental y las islas Baleares. Los 255 miembros del conjunto considerados en este trabajo se han dividido en subconjuntos considerando solo: a) MCG, b) MRE y c) MRC. En cada caso, las líneas en la parte inferior representan las deltas de todos los miembros del subconjunto y se promedian al unirse, a medida que se asciende en el gráfico hasta el vértice superior, que representa la media del subconjunto. Las funciones de densidad de probabilidad para cada subconjunto aparecen al pie, y los rangos centrales del 50 % y 90 % del subconjunto se representan mediante sombreados. Véase Fernández *et al.* (2018) para más información.

emisión de gases de efecto invernadero y de los modelos climáticos (globales y regionales). Sin embargo, la destilación de información útil a partir de la gran cantidad de datos disponibles es un desafío técnico y ético (Hewitson *et al.*, 2013). Todavía no está clara la mejor manera de proceder para seleccionar un subconjunto de datos representativos para un estudio en particular (Cannon, 2015). Además, diferentes conjuntos de datos podrían proporcionar información inconsistente o conflictiva, que hace este

proceso aún más difícil. Este es uno de los desafíos clave considerados en algunas iniciativas en marcha (por ejemplo, la «destilación de información climática» es uno de los pilares de EURO-CORDEX) y se esperan nuevos avances en los próximos años.

Para ilustrar este problema, veremos que el resumen sencillo de los miembros del conjunto en forma de percentiles (Figura 2) resulta engañoso. Los miembros de estos

conjuntos de simulaciones no son independientes y las características específicas de algunos métodos de regionalización, y la ausencia de diseño experimental alguno en el conjunto, están detrás de los diferentes rangos de cambio climático que se muestran. Como ejemplo, nos centramos en los cambios de temperatura proyectados en verano (recuadrados en la Figura 2) y mostramos resultados individuales (Figura 3) para las tres fuentes de proyecciones futuras (MCG, MRE y MRC). Las estimaciones individuales de los cambios se encuentran en la parte inferior de cada panel, coloreadas según el MCG utilizado, que es la mayor fuente de incertidumbre (dispersión). Existen MCG, como el CanESM2, que proyectan cambios localizados en el extremo superior del conjunto (Figura 3a), mientras que otros (por ejemplo, CNRM-CM5 o MPI-ESM) tienden a proyectar cambios menores. Los métodos de regionalización, en general, preservan esta tendencia (Figura 3b, c) con algunas particularidades. Para los MRE, el método estadístico utilizado (modelo lineal —LM— o análogos —AN—) es una gran fuente de incertidumbre, con los métodos de análogos colocados claramente en el extremo inferior del conjunto de proyecciones debido a su incapacidad de extrapolar temperaturas más allá del rango observado. Por otro lado, los MCR, que tienen una base más física, son computacionalmente muy costosos, y la enorme cantidad de MCG disponibles para regionalizar han sido muestreados de forma muy desigual. En este ejemplo, los MCR han favorecido dos de los MCG que proyectan los cambios de temperatura más moderados (los modelos del CNRM y MPI). Este hecho, junto con una tendencia genuina de los MCR para proyectar menores cambios de temperatura (valor añadido potencial) da lugar a un rango más estrecho y de menor cambio de temperatura media que el proyectado por los MCG.

Agradecimientos

Agradecemos a los grupos de modelización del clima que contribuyen a las iniciativas CORDEX y CMIP, que proporcionaron datos para este estudio a través de la infraestructura ESGF. Los autores también quieren agradecer, en particular, a Petra Ramos (AEMET), Emma Gaitán (FIC), Jesús Asín (Univ. Zaragoza), Romu Romero (Univ. Islas Baleares) y Carmen Llasat (Univ. Barcelona) por proporcionar una revisión de trabajos anteriores.

Referencias

Amengual, A., Homar, V., Romero, R., Alonso, S., Ramis, C., 2011: A Statistical Adjustment of Regional Climate Model Outputs to Local Scales: Application to Platja de Palma, Spain. *J. Climate*, 25 (3), 939-57. doi:10.1175/JCLI-D-10-05024.1.

Bafaluy, D., Amengual, A., Romero, R., Homar, V., 2014: Present and Future Climate Resources for Various Types of Tourism in the Bay of Palma, Spain. *Regional Environmental Change*, 14 (5), 1995-2006. doi:10.1007/s10113-013-0450-6.

Bedia, J., Herrera, S., Camia, A., Moreno, J. M., Gutiérrez, J. M., 2014: Forest Fire Danger Projections in the Mediterranean Using ENSEMBLES Regional Climate Change

Scenarios. *Climatic Change*, 122 (1-2), 185-199. doi:10.1007/s10584-013-1005-z.

Bedia, J., Herrera, S., San Martín, D., Koutsias, N., Gutiérrez, J. M., 2013: Robust Projections of Fire Weather Index in the Mediterranean Using Statistical Downscaling. *Climatic Change*, 120 (1-2), 229-247. doi:10.1007/s10584-013-0787-3.

Cannon, A. J., 2015: Selecting GCM Scenarios That Span the Range of Changes in a Multimodel Ensemble: Application to CMIP5 Climate Extremes Indices. *J. Climate*, 28 (3), 1260-1267. doi:10.1175/JCLI-D-14-00636.1.

Casanueva, A., Frías, M. D., Herrera, S., San-Martín, D., Zaninovic, K., Gutiérrez, J. M., 2014. Statistical Downscaling of Climate Impact Indices: Testing the Direct Approach. *Climatic Change*, 127 (3-4), 547-560. doi:10.1007/s10584-014-1270-5.

Casanueva, A., Kotlarski, S., Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J. M., Boberg, F., Colette, A., Christensen, O. B., Goergen, K., Jacob, D., Keuler, K., Nikulin, G., Teichmann, C., Vautard, R., 2016: Daily Precipitation Statistics in a EURO-CORDEX RCM Ensemble: Added Value of Raw and Bias Corrected High-Resolution Simulations. *Clim. Dyn.*, 47 (3-4), 719-37. doi:10.1007/s00382-015-2865-x.

Déqué, M., Somot, S., Sánchez-Gómez, E., Goodess, C. M., Jacob, D., Lenderink, G., Christensen, O. B., 2012: The Spread amongst ENSEMBLES Regional Scenarios: Regional Climate Models, Driving General Circulation Models and Interannual Variability. *Clim. Dyn.*, 38 (5-6), 951-964. doi:10.1007/s00382-011-1053-x.

Domínguez, M., Romera, R., Sánchez, E., Fita, L., Fernández, J., Jiménez-Guerrero, P., Montávez, J. P., Cabos, W. D., Liguori, G., Gaertner, M. Á., 2013: Present-climate precipitation and temperature extremes over Spain from a set of high resolution RCMs. *Clim. Res.*, 58 (2), 149-164.

Dosio, A., Paruolo, P., Rojas, R., 2012: Bias Correction of the ENSEMBLES High Resolution Climate Change Projections for Use by Impact Models: Analysis of the Climate Change Signal. *J. Geophys. Res.*, 117 (D17). doi:10.1029/2012JD017968.

Escenarios-PNACC (2012). Datos: [1] http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_mensuales/ayuda [2] <http://www.meteo.unican.es/escenarios-pnacc>

Esteve-Selma, M. A., Martínez-Fernández, J., Hernández-García, I., Montávez, J. P., López-Hernández, J. J., Calvo, J. F., 2012: Potential effects of climatic change on the distribution of *Tetraclinis articulata*, an endemic tree from arid Mediterranean ecosystems. *Climatic change*, 113 (3-4), 663-678.

Fernández, J., Fita, L., García-Díez, M., Montávez, J. P., Jiménez-Guerrero, P., Domínguez, M., Romera, R., López de la Franca, N., Sánchez, E., Liguori, G., Cabos, W. D., Gaertner, M. Á., 2012: Escenarios-PNACC 2012: Resultados de

regionalización dinámica. En «Cambio climático: Extremos e Impactos». Publicaciones de la AEC. Serie A, núm. 8.

Fernández, J., Frías, M. D., Cabos, W. D., Cofiño, A. S., Domínguez, M., Fita, L., Gaertner, M. Á., García-Díez, M., Gutiérrez, J. M., Jiménez-Guerrero, P., Liguori, G., Montávez, J. P., Romera, R., Sánchez, E., 2018: Consistency of climate change projections from multiple global and regional model intercomparison projects. *Climate Dynamics*. doi:10.1007/s00382-018-4181-8.

Frías, M. D., Mínguez, R., Gutiérrez, J. M., Méndez, F. J., 2012: Future Regional Projections of Extreme Temperatures in Europe: A Nonstationary Seasonal Approach. *Climatic Change*, 113 (2), 371-392. doi:10.1007/s10584-011-0351-y.

Gabaldón-Leal, C., Lorite, I. J., Mínguez Tudela, M. I., Lizaso Oñate, J. I., Dosio, A., Sánchez, E., Ruiz Ramos, M., 2015: Strategies for adapting maize to climate change and extreme temperatures in Andalusia, Spain. *Climate Research*, 65, 159-173.

Gómez, G., Cabos, W. D., Liguori, G., Sein, D., Lozano Galeana, S., Fita, L., Fernández, J., Magariño, M. E., Jiménez Guerrero, P., Montávez, J. P., Domínguez, M., 2016: Characterization of the wind speed variability and future change in the Iberian Peninsula and the Balearic Islands. *Wind Energy*, 19 (7), 1223-1237.

Gómez-Navarro, J. J., Montávez, J. P., Jiménez-Guerrero, P., Jerez, S., García-Valero, J. A., González-Rouco, J. F., 2010: Warming patterns in regional climate change projections over the Iberian Peninsula. *Meteorologische Zeitschrift*, 19 (3), 275-285.

Gonçalves, M., Barrera-Escoda, A., Guerreiro, D., Baldasano, J. M., Cunillera, J., 2014: Seasonal to Yearly Assessment of Temperature and Precipitation Trends in the North Western Mediterranean Basin by Dynamical Downscaling of Climate Scenarios at High Resolution (1971-2050). *Climatic Change*, 122 (1-2): 243-56. doi:10.1007/s10584-013-0994-y.

Gutiérrez, J. M., Ribalaygua, J., Llasat, C., Romero, R., Abaurrea, J., Rodríguez, E., 2012: Escenarios-PNACC 2012: Descripción y Análisis de los Resultados de Regionalización Estadística. En «Cambio climático: Extremos e Impactos». Publicaciones de la AEC. Serie A, núm. 8, 125-134. ISBN: 978-84-695-4331-3.

Gutiérrez, J. M., San-Martín, D., Brands, S., Manzanar, R., Herrera, S., 2013: Reassessing Statistical Downscaling Techniques for Their Robust Application under Climate Change Conditions. *J. Climate*, 26 (1): 171-188. doi:10.1175/JCLI-D-11-00687.1.

Herrera, S., Gutiérrez, J. M., Ancell, R., Pons, M. R., Frías, M. D., Fernández, J., 2012: Development and Analysis of a 50-Year High-Resolution Daily Gridded Precipitation Dataset over Spain (Spain02). *Int. J. Climatol.*, 32 (1): 74-85. doi:10.1002/joc.2256.

Hewitson, B. C., Daron, J., Crane, R. G., Zermoglio, M. F., Jack, C., 2013: Interrogating Empirical-Statistical Downscaling. *Climatic Change*, 122 (4): 539-54. doi:10.1007/s10584-013-1021-z.

Hewitson, B., Waagsaether, K., Wohland, J., Kloppers, K., Kara, T., 2017: Climate Information Websites: An Evolving Landscape. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. doi:10.1002/wcc.470.

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A. *et al.*, 2014: EURO-CORDEX: New High-Resolution Climate Change Projections for European Impact Research. *Regional Environmental Change*, 14 (2), 563-78. doi:10.1007/s10113-013-0499-2.

Jerez, S., Montávez, J., Gómez-Navarro, J., Jiménez, P., Jiménez-Guerrero, P., Lorente, R., González-Rouco, J. F., 2012: The role of the land-surface model for climate change projections over the Iberian Peninsula. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 117(D1).

Jerez, S., Montávez, J. P., Gómez-Navarro, J. J., Lorente-Plazas, R., García-Valero, J. A., Jiménez-Guerrero, P., 2013: A multi-physics ensemble of regional climate change projections over the Iberian Peninsula. *Clim. Dyn.*, 41 (78), 1749-1768.

Jerez, S., Tobin, I., Vautard, R., Montávez, J. P., López Romero, J. M., Thais, F., Bartok, B., Christensen, O. B., Colette, A., Déqué, M., Nikulin, G., 2015: The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. *Nature communications*, 6, 10014.

Jiménez-Guerrero, P., Montávez, J., Domínguez, M., Romera, R., Fita, L., Fernández, J., Cabos, W., Liguori, G., Gaertner, M. Á., 2013: Mean fields and interannual variability in rcm simulations over Spain: the escena project. *Climate Research*, 57 (3), 201-220.

López-Franca, N., Sánchez, E., Losada, T., Domínguez, M., Romera, R., Gaertner, M. Á., 2015: Markovian Characteristics of Dry Spells over the Iberian Peninsula under Present and Future Conditions using ESCENA Ensemble of Regional Climate Models. *Clim. Dyn.*, 45 (3-4), 661-77. doi:10.1007/s00382-014-2280-8.

Maraun, D., Widmann, M., Gutiérrez, J. M., Kotlarski, S., Chandler, R. E., Hertig, E., Wibig, J., Huth, R., Wilcke, R. A. I., 2015: VALUE: A Framework to Validate Downscaling Approaches for Climate Change Studies. *Earth's Future*, 3 (1), 2014EF000259. doi:10.1002/2014EF000259.

Monjo, R., Gaitán, E., Pórtoles, J., Ribalaygua, J., Torres, L., 2016: Changes in extreme precipitation over Spain using statistical downscaling of CMIP5 projections. *Int. J. Climatol.*, 36: 757-769. doi:10.1002/joc.4380.

Osca, J., Romero, R., Alonso, S., 2013: Precipitation Projections for Spain by Means of a Weather Typing Statistical

Method. *Global and Planetary Change*, 109 (October), 46-63. doi:10.1016/j.gloplacha.2013.08.001.

Pérez, J. C., Díaz, J. P., González, A., Expósito, J., Rivera López, F., Taima, D., 2014: Evaluation of WRF Parameterizations for Dynamical Downscaling in the Canary Islands. *J. Climate*, 27 (14), 5611-31. doi:10.1175/JCLI-D-13-00458.1.

Pons, M. R., Herrera, S., Gutiérrez, J. M., 2016: Future Trends of Snowfall Days in Northern Spain from ENSEMBLES Regional Climate Projections. *Clim. Dyn.*, 46 (11-12): 3645-55. doi:10.1007/s00382-015-2793-9.

Resco, P., Iglesias, A., Bardají, I., Sotés, V., 2016: Exploring Adaptation Choices for Grapevine Regions in Spain. *Regional Environmental Change*, 16 (4), 979-93. doi:10.1007/s10113-015-0811-4.

Ramos, P., Petisco, E., Martín, J. M., Rodríguez, E., 2013: Downscaled climate change projections over Spain: application to water resources. *Int. J. Water Res. Devel.*, 29 (2), 201-218.

Ribalaygua, J., Pino, M. R., Pórtoles, J., Roldán, E., Gaitán, E., Chinarro, D., Torres, L., 2013: Climate Change Scenarios for Temperature and Precipitation in Aragón (Spain). *Science of The Total Environment*, 463 (October), 1015-30. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.06.089.

Romera, R., Gaertner, M. Á., Sánchez, E., Domínguez, M., González-Alemán, J. J., Miglietta, M. M., 2017: Climate change projections of medicanes with a large multi-model ensemble of regional climate models. *Glob. Planet. Change*, 151: 134-143, doi: 10.1016/j.gloplacha.2016.10.008.

Romero, R. y Emanuel, K., 2017: Climate Change and Hurricane-Like Extratropical Cyclones: Projections for North Atlantic Polar Lows and Medicanes Based on CMIP5 Models. *J. Climate*, 30 (1), 279-299.

Ruiz-Ramos, M., Rodríguez, A., Dosio, A., Goodess, C. M., Harpham, C., Mínguez, M. I., Sánchez, E., 2016: Comparing Correction Methods of RCM Outputs for Improving Crop Impact Projections in the Iberian Peninsula for 21st Century. *Climatic Change*, 134 (1-2), 283-97. doi:10.1007/s10584-015-1518-8.

Ruti, P., Ruti, P. M., Somot, S., Giorgi, F., Dubois, C., Flaounas, E., Obermann, A., Dell'Aquila, A., Pisacane, G., Harzallah, A., Lombardi, E., Ahrens, B., Akhtar, N., Alias, A., Arsouze, T., Aznar, R., Bastin, S., Bartholy, J., Béranger, K., Beuvier, J., Bouffies-Cloché, S., Brauch, J., Cabos, W., Calmanti, S., Calvet, J.-C., Carillo, A., Conte, D., Coppola, E., Djurdjevic, V., Drobinski, P., Elizalde-Arellano, A., Gaertner, M. Á., Galàn, P., Gallardo, C., Gualdi, S., Gonçalves, M., Jorba, O., Jordà, G., L'Heveder, B., Lebeaupin-Brossier, C., Li, L., Liguori, G., Lionello, P., Maciàs, D., Nabat, P., Öñol, B., Raikovic, B., Ramage, K., Sevault, F., Sannino, G., Struglia, M. V., Sanna, A., Torma, C., Vervatis, V., 2016: MED-CORDEX initiative for Mediterranean Climate studies. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 2016, 1187-1208.

Sánchez E. y Míguez-Macho, G., 2010: Regional climate projections over the Iberian Peninsula: climate change scenarios modeling. CLIVAR-Spain Regional climate change assessment report: Climate in Spain: Past, Present and Future (Editors: F. Pérez, Fiz y Boscolo, Roberta) pp. 69-80. Disponible en <http://www.clivar.org/documents/spain-2010>

San-Martín, D., Manzanar, R., Brands, S., Herrera, S., Gutiérrez, J. M., 2017: Reassessing Model Uncertainty for Regional Projections of Precipitation with an Ensemble of Statistical Downscaling Methods. *J. Climate*, 30 (1): 203-23. doi:10.1175/JCLI-D-16-0366.1.

Turco, M., Llasat, M. C., Herrera, S., Gutiérrez, J. M., 2017: Bias Correction and Downscaling of Future RCM Precipitation Projections Using a MOS Analog Technique. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 122 (5), 2631-48. doi:10.1002/2016JD025724.

Turco, M., Quintana-Seguí, P., Llasat, M. C., Herrera, S., Gutiérrez, J. M., 2011: Testing MOS Precipitation Downscaling for ENSEMBLES Regional Climate Models over Spain. *J. Geophys. Res.*, 116 (D18). doi:10.1029/2011JD016166.

Turco, M., Sanna, A., Herrera, S., Llasat, M. C., Gutiérrez, J. M., 2015: Evaluation of the ENSEMBLES Transient RCM Simulations Over Spain: Present Climate Performance and Future Projections. En: Engineering Geology for Society and Territory, Volume 1, edited by G. Lollino *et al.*, 199-203. Springer International Publishing.