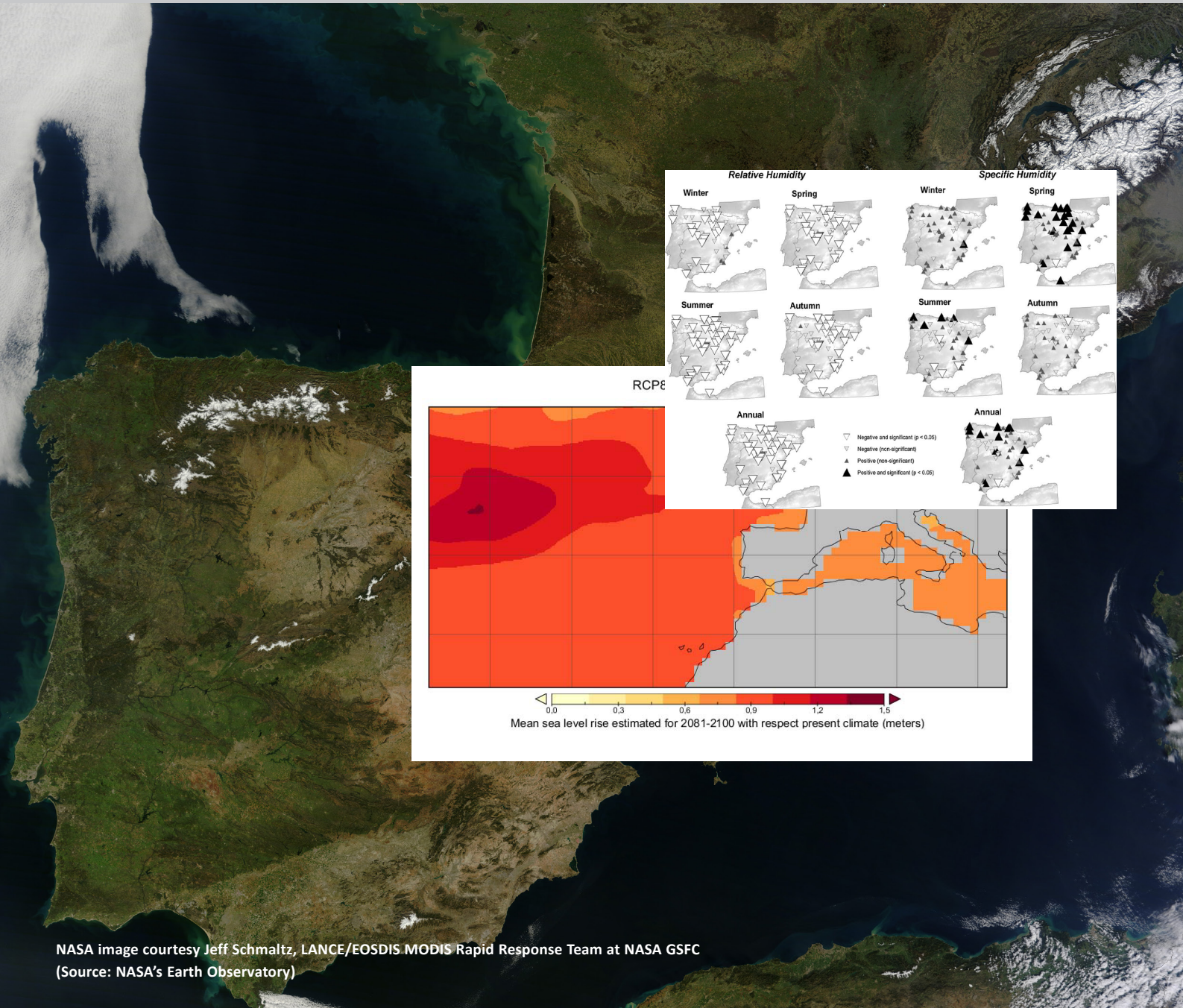




# CLIVAR Exchanges

Volumen especial sobre el clima en la Península Ibérica:  
una visión científica global y coordinada por el Comité CLIVAR-España



NASA image courtesy Jeff Schmaltz, LANCE/EOSDIS MODIS Rapid Response Team at NASA GSFC  
(Source: NASA's Earth Observatory)

CLIVAR Océano y Clima: Variabilidad, Predictibilidad y Cambio es el proyecto fundamental del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas con respecto al estudio del Sistema Océano-Atmósfera





Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización

**Edita:**

© Ministerio para la Transición Ecológica  
Agencia Estatal de Meteorología  
Madrid, 2018

Versión en español publicada por AEMET, con autorización de CLIVAR.

Publicación incluida en el programa editorial del suprimido Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente y editada por el Ministerio para la Transición Ecológica (de acuerdo con la reestructuración ministerial establecida por Real Decreto 355/2018, de 6 de junio).

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:

<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

NIPO: 639-18-002-5

DOI: <https://doi.org/10.31978/639-18-002-5>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)

C/ Leonardo Prieto Castro, 8

28040 Madrid

<http://www.aemet.es/>



@Aemet\_Esp



<https://www.facebook.com/AgenciaEstatalMeteorologia>

# Progresos en la detección y proyecciones de cambio climático en España desde el informe 2010 de evaluación regional del clima pasado, presente y futuro del Comité CLIVAR-España

DOI: <https://doi.org/10.31978/639-18-002-5.01>

**Enrique Sánchez<sup>1</sup>, Belén Rodríguez-Fonseca<sup>2,3</sup>, Ileana Bladé<sup>4</sup>, Manola Brunet<sup>5</sup>, Roland Aznar<sup>6</sup>, Isabel Cacho<sup>7</sup>, María Jesús Casado<sup>8</sup>, Luis Gimeno<sup>9</sup>, José Manuel Gutiérrez<sup>10</sup>, Gabriel Jordá<sup>11</sup>, Alicia Lavín<sup>12</sup>, José Antonio López<sup>8</sup>, Jordi Salat<sup>13</sup>, Blas Valero<sup>14</sup>**

<sup>1</sup> UCLM: Universidad de Castilla-La Mancha, Facultad CC Ambientales y Bioquímica, Toledo

<sup>2</sup> UCM: Universidad Complutense de Madrid, Dept. Física de la Tierra y Astrofísica, Facultad CC Físicas, Madrid

<sup>3</sup> IGEO: Instituto de Geociencias, UCM, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España

<sup>4</sup> UB: Universitat de Barcelona, Dept. Física Aplicada, Facultat Física, Barcelona

<sup>5</sup> URV-C3: Universitat Rovira i Virgili, Centre for Climate Change, Dept. Geografia, Tarragona

<sup>6</sup> Puertos del Estado, Madrid

<sup>7</sup> UB-GRC: Universitat de Barcelona, Geociències Marines, Dept. de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Barcelona

<sup>8</sup> AEMET: Agencia Estatal de Meteorología, Madrid

<sup>9</sup> UVIGO: Universidad de Vigo, Laboratorio de Física Ambiental, Vigo

<sup>10</sup> UC-CSIC: Universidad de Cantabria, Grupo de Meteorología. Instituto de Física de Cantabria, Santander

<sup>11</sup> UIB-IMEDEA: Universitat de les Illes Balears, Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, Palma de Mallorca

<sup>12</sup> IEO: Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico Santander

<sup>13</sup> ICM-CSIC: Instituto de Ciencias Marinas, Barcelona

<sup>14</sup> IPE-CSIC: Instituto Pirenaico de Ecología, Zaragoza

## Introducción

La península ibérica ofrece un marco apasionante para los estudios de variabilidad climática por varias razones. Tiene una amplia variedad de regímenes climáticos, que van desde condiciones atlánticas húmedas, con precipitaciones anuales de más de 2000 mm, a zonas amplias semiáridas, con estreses hidrológicos severos, e incluso climas fríos alpinos en algunas zonas aisladas. Esta diversidad climática es el resultado de su localización latitudinal en el borde norte de la franja subtropical, su compleja orografía salpicada por importantes cadenas montañosas, su naturaleza peninsular, y la presencia de dos masas de agua que la rodean con características muy diferentes: el océano Atlántico y el mar Mediterráneo. La variabilidad climática queda reflejada en importantes heterogeneidades en los balances de energía y humedad entre la superficie y la atmósfera, y los correspondientes intercambios. Además, eventos extremos como periodos prolongados sin lluvias, olas de calor, o precipitaciones convectivas severas e inundaciones son fenómenos recurrentes. Todos estos factores hacen que un entendimiento completo del clima ibérico, y su modelización sea un trabajo particularmente desafiante.

Como el resto de la región mediterránea, y como ha sido indicado en el último informe del IPCC de 2013 (WG1AR5,

Capítulo 14, Christensen et al., 2013), las proyecciones futuras sobre la PI indican que puede ser severamente afectada por importantes incrementos de temperatura y reducciones de precipitación, especialmente en verano, una alta probabilidad de mayor frecuencia de olas de calor. Esta perspectiva de importantes impactos negativos en una zona ya de por sí de alta vulnerabilidad refuerza la necesidad de una exhaustiva evaluación del clima actual de la región, para una mejor interpretación de las proyecciones climáticas, de forma que podamos mejorar nuestra fiabilidad sobre ellas.

La ciencia del clima se ha desarrollado más lentamente en España cuando se compara con otras regiones europeas, pero en la actualidad existe una gran comunidad nacional de investigadores en clima, involucrados en la evaluación del papel de los múltiples procesos relevantes, como la topografía, los modos de variabilidad, las teleconexiones con las zonas tropicales, las interacciones atmósfera-suelo y atmósfera-océano, para conocer mejor los diferentes climas regionales y entender mejor cómo pueden cambiar bajo las condiciones de cambio climático global. Este objetivo es posible por la existencia de series meteorológicas relativamente largas, y una densa red de estaciones, aunque por desgracia no todos los datos son accesibles de manera pública para los investigadores.



Puesto que muchos de los estudios llevados a cabo por la comunidad científica de clima en España ajustan muy bien con los principales objetivos científicos del proyecto internacional CLIVAR (<http://www.clivar.org/about/about-clivar#Objective>), hace ya 15 años se creó una red de científicos, con el objetivo de coordinar la ciencia climática en España, y mejorar su visibilidad interna. Roberta Boscolo, en ese momento trabajando en la Oficina Internacional de CLIVAR, fue clave para promover este esfuerzo conjunto. Esto llevó a la creación de una red temática, que fue el embrión del actual Comité Científico CLIVAR-ESPAÑA (<http://www.clivar.es/>), que incluye representación de todos los diferentes campos relacionados con la ciencia de CLIVAR (meteorólogos, físicos de la atmósfera, oceanógrafos, paleocientíficos...). El Comité, sin casi soporte económico por parte del gobierno central, también se ha esforzado para servir de referencia para la comunidad científica del clima en España, y un punto de contacto con la sociedad y los políticos y legisladores, un enlace con el programa internacional CLIVAR.

Los primeros logros objetivos de este Comité fueron la organización de dos workshops nacionales, en 2005 y 2009, ambos seguidos de la publicación de informes de evaluación, disponibles en la web nacional de CLIVAR, y el segundo, en inglés también, en la web de CLIVAR internacional. El primero, titulado «Estado de la investigación del Clima en España», pretendía servir como una visión general de los grupos de investigación españoles que trabajaban en la ciencia del clima, el segundo, titulado «Clima en España: pasado, presente y futuro. Informe de evaluación del cambio climático regional» (Pérez y Boscolo, 2010) se planteó como un informe exhaustivo de evaluación del clima regional, con revisión por pares, en el que más de cien investigadores contribuyeron a su redacción. Fue el primer esfuerzo coordinado que involucró a toda la comunidad climática española en un empeño científico para mostrar, tanto nacional como internacionalmente su trabajo, como evidencia de la vitalidad y relevancia de la ciencia climática en España. Este trabajo fue presentado oralmente en la 18.ª sesión del comité de coordinación científica de CLIVAR en París (2011), y en la conferencia WCRP-OSC que tuvo lugar en Denver ese mismo año, a través de un conjunto de pósters.

Después de la publicación del informe IPCC 2013, el Comité CLIVAR-ESPAÑA pensó que era oportuno actualizar ese primer informe de evaluación. Con esa idea en mente, se llevó a cabo un simposio en Tortosa en 2015, titulado «Simposio internacional CLIMATE-ES 2015: Avances en la detección y proyecciones del cambio climático en España a la luz del 5.º informe del IPCC-AR5» (<http://www.climaes2015.urv.cat>), con el soporte de varias instituciones de investigación, incluyendo AEMET. El principal objetivo de este simposio era servir de punto de partida para la actualización del informe de 2010. Sin embargo, debido a la falta de financiación institucional, se pensó que una opción más viable, y más efectiva sería presentar los resultados del simposio a través de un número especial de la revista CLIVAR Exchanges, que coordina la oficina internacional de CLIVAR (<http://www.clivar.org/publications/exchanges>).

Los siguientes nueve artículos resumen los principales resultados presentados en el simposio de Tortosa. Cada artículo se concentra en uno de los aspectos del mismo, que fueron los siguientes: paleoclima, series temporales climáticas, bases de datos observacionales en malla, tendencias atmosféricas, teleconexiones, variabilidad oceánica observada, evaluación de la modelización climática regional tanto atmosférica como oceánica, y proyecciones climáticas regionales oceánicas (sobre el Atlántico y el Mediterráneo de manera diferenciada) y atmosféricas. La estructura es similar a la del primer informe, pero con un énfasis claro en la actualización de los resultados obtenidos en este periodo, avances en el entendimiento de procesos, y nuevos desarrollos, con el foco en nuevas investigaciones. El objetivo de esa publicación ha sido, pues, resaltar la amplitud de objetivos y estudios que lleva a cabo la comunidad científica nacional que en España trabaja en la ciencia del clima. Por ello, este volumen especial ha intentado incluir la mayor cantidad de grupos de investigación posibles, con la esperanza de que pueda servir de base para cualquier investigador español especializado en aspectos particulares.

Aunque el continuo crecimiento de la ciencia climática en España en estos últimos años es evidente, con un incremento constante de contribuciones en revistas internacionales y participación individual en proyectos internacionales e informes de IPCC, en el contexto no despreciable de la crisis económica y una reducción drástica de los presupuestos para ciencia de estos últimos años, el volumen especial pretendía servir como muestra de la capacidad de la comunidad climática española para trabajar junta y de manera coordinada, reconociendo que este volumen especial es solo una parte, inevitablemente incompleta, de todo el esfuerzo y logros de la comunidad nacional de estos últimos años.

Como comité nacional CLIVAR al mostrar este trabajo, queremos también agradecer y rendir tributo y reconocimiento a todos los investigadores que han contribuido directa o indirectamente a él, esperando que pueda ayudar a aumentar la visibilidad internacional y crear conciencia y reconocimiento sobre su trabajo. Por supuesto, también expresar gratitud a todos los miembros anteriores del comité, que con su ejemplo y entusiasmo abrieron camino y nos mostraron que iniciativas como esta son posibles incluso sin soporte institucional.

Lo que sigue es un breve resumen de los principales logros de cada uno de los artículos:

### 1. Paleoclima

Las reconstrucciones disponibles terrestres y marinas en la península ibérica en los últimos 2000 años muestran la evidencia de una compleja evolución espacial y temporal de la precipitación y temperatura.

Estos resultados replican de alguna manera la variabilidad climática actual en la península ibérica, con una compleja orografía, que da lugar a una gran presencia de microclimas. La evolución climática de la península ibérica en los últimos dos milenios puede ser dividida en cuatro periodos climáticos principales: el periodo Romano, la primera edad medieval, la anomalía climática medieval y la pequeña edad



de hielo, caracterizadas por patrones distintivos de temperatura y precipitación. Un gran esfuerzo debe ser llevado a cabo para obtener reconstrucciones climáticas más robustas y multiproxies en áreas donde la cobertura geográfica es todavía baja, como en el centro de la península ibérica y en el área marina del norte. Además, un mejor entendimiento de la evolución de los principales modos climáticos en escalas decadales a siglos, especialmente los conocidos como EA (Eastern Atlantic, Atlántico Este) o SCAND (Escandinavo) es de enorme importancia, así como las interacciones temporales entre ellas, y con la irradiancia solar total.

### **2-3: Reconstrucciones instrumentales**

En los últimos años, se ha llevado a cabo un gran esfuerzo para mejorar la calidad de las herramientas y las observaciones atmosféricas, incluyendo bases de datos en malla, que se usan para analizar el sistema climático desde diferentes puntos de vista. En este sentido, diferentes iniciativas y proyectos se han llevado a cabo con el objetivo de rescatar y digitalizar los datos observacionales existentes, con especial atención a regiones con una pobre cobertura espacial y/o temporal, y desarrollar métodos y herramientas adecuados para elaborar bases de datos de alta calidad para el análisis climático. Diversos productos a escala regional y nacional en malla regular se han desarrollado en los últimos años con propósitos investigadores, cubriendo un amplio rango de aplicaciones, resoluciones, variables y periodos temporales. No obstante, la principal limitación que debe ser indicada es que la mayor parte de las bases de datos de alta calidad desarrolladas a escala local, regional o nacional en España son raramente compartidas en la comunidad climática, dando lugar a análisis redundantes en muchos casos. Por otro lado, no existen análisis de intercomparación adecuados entre las diferentes bases de datos desarrolladas.

### **4-5: Tendencias. Variabilidad atmosférica**

Observaciones durante las últimas décadas revelan que hay un escenario más cálido y seco en comparación con las décadas anteriores, un descubrimiento que es compatible con las observaciones de otras áreas mediterráneas. En particular, ha habido un fuerte incremento en la radiación solar en la década de 1980, en acuerdo con un incremento de la demanda evaporativa atmosférica, especialmente en los meses de verano. Las temperaturas han mostrado fuertes incrementos desde la década de 1960. Sin embargo, la velocidad del viento en superficie no ha mostrado cambios perceptibles. Un fuerte descenso en la humedad relativa, sin cambios significativos identificables en la humedad absoluta. Aunque se han encontrado fuertes tendencias en la variabilidad espacial y estacional de la precipitación, puede estar en relación con cambios en las teleconexiones globales. La precipitación media anual sobre España ha mostrado un descenso moderado en las últimas cinco décadas. En relación con las teleconexiones, se han llevado a cabo investigaciones relevantes en las últimas décadas relacionadas con la predictibilidad de la NAO (North Atlantic Oscillation, Oscilación del Atlántico Norte), mostrando cómo los trópicos y la estratosfera ayudan a mejorar dicha predictibilidad. Los escenarios de clima futuro proyectan un incremento de la NAO a lo largo del ciclo estacional, con impactos también en el nivel del mar y en los afloramientos (véanse artículos sobre regionalización oceánica en este volumen). No obstante, el patrón espacial de la NAO

se ha visto que es no estacionario, y dependiente de la influencia de fondo que el ENSO (El Niño-Southern Oscillation, El Niño-Oscilación del Sur) y las variaciones lentas del océano ejercen sobre la variabilidad atmosférica. Los océanos Atlántico y Pacífico, y el Mediterráneo, la estratosfera, y la convección tropical se ha encontrado que modulan los patrones de teleconexión que afectan Europa. Teniendo en cuenta esta información, un enorme progreso se ha llevado a cabo en las décadas recientes en el desarrollo de aplicaciones para predicción en escalas entre estacionales y decadales (s2d) y entre subestacional y estacional (s2s).

La disponibilidad de resultados por parte del proyecto sobre predicción histórica del sistema climático (CHFP, Climate system Historical Forecasting), y el proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5, Coupled Model Intercomparison Project), junto con las investigaciones muy activas en las comunidades tanto de grupos operativos como de investigadores, ha mejorado nuestras capacidades para obtener predicciones y proyecciones futuras de gran calidad y fiabilidad. El Centro de Supercomputación de Barcelona (BSC, Barcelona Supercomputing Center) y AEMET son las instituciones más importantes que lideran estos progresos, siendo un paso adelante muy significativo hecho por la comunidad investigadora española en el contexto de los servicios climáticos.

### **6: Observaciones oceánicas**

Los resultados confirman los impactos del calentamiento global en el océano en las escalas regionales en torno a la península ibérica.

Este informe resalta la importancia de la monitorización regular de las zonas marinas. Por desgracia, muchas fuentes de financiación cuentan con una duración limitada, típicamente 3-4 años. También es cierto que muchos esfuerzos de monitorización en los que se basa este informe, y que actualmente están mantenidos por el IEO (Instituto Español de Oceanografía) y otras instituciones (Puertos, Universidades, etc.) se iniciaron a través de proyectos científicos específicos. Es el caso del sistema de observación IEO (IEO Observing system), y la estación de monitorización de Espartel. Otras estaciones de monitorización empezaron como iniciativas voluntarias a muy bajo coste, como por ejemplo, la red de Hidrocambios, o algunas de las estaciones más antiguas de registros costeros (Aquarium en San Sebastián, o la estación de L' Estartit). En todos los casos, su utilidad para seguir la evolución del cambio climático en los años pasados ha sido probada, así como el estudio de fuentes biológicas y su dependencia de variables físico-químicas, todas ellas aspectos cruciales en la implementación de la estrategia marco marina de la UE. No obstante, una estrategia más coordinada que considere la capacidad global del sistema de observaciones para detectar señales de cambio climático sería muy bienvenida.

### **7-8: Regionalización atmosférica: descripción de clima presente y proyecciones climáticas futuras**

Desde 2010 se han publicado múltiples estudios analizando el clima regional mediante modelos (RCMs) para condiciones de clima presente. Euro y Med-CORDEX o los proyectos ENSEMBLES y ESCENA (nacional) han sido las principales iniciativas durante este periodo. La

principal conclusión de estos estudios es que los RCM sobre la península ibérica proporcionan una información muy valiosa, mostrando la distribución local espacial de variables climáticas, principalmente debido a una mejor representación de la orografía y los aspectos de la superficie. Los RCM son claramente capaces de capturar los regímenes de precipitación, temperatura y variabilidad del viento, así como los eventos extremos. No obstante, todavía se obtienen importantes sesgos, dificultando la aplicación directa de las salidas de los RCM en aplicaciones sectoriales (hidrología, agricultura, y energía, por ejemplo). Este aspecto abre un tema controvertido sobre la corrección o ajuste de sesgos de los RCM y su impacto en la señal de cambio climático. En relación con los procedimientos de regionalización estadística (SDM), estos métodos se han mostrado como una alternativa espacialmente consistente a los métodos estándar de corrección de sesgos, aunque la limitación para ser usados con valores extremos debe ser tenida en cuenta cuidadosamente en aplicaciones donde este aspecto sea relevante. Entre los beneficios de los SDM, puede ser resaltado el que son menos costosos computacionalmente que los RCM y permiten la regionalización de variables no meteorológicas.

Respecto a las proyecciones de cambio climático regional atmosférico, a partir del gran conjunto de métodos de regionalización mostrado en este volumen de Exchanges, y teniendo en cuenta las diversas incertidumbres indicadas, algunas conclusiones globales se pueden indicar. Para la precipitación, hay una tendencia general hacia el descenso en la precipitación promedio en todas las estacionales, con un descenso promedio del 30 % según las estimaciones de los RCM. Respecto a la temperatura, los incrementos mayores se proyectan en verano y otoño, alcanzando cerca de 3 °C respecto a la climatología de 1971-2000 en el final del periodo del siglo XXI, y no menos de 1 °C en las estimaciones más conservadoras. Algunos aspectos relevantes deben ser mencionados para la aplicación del cambio climático regional en aplicaciones a estudios de impactos: diversos métodos de corrección/ajuste de sesgos se han desarrollado en estos años, y se muestran múltiples ejemplos de uso específico y sus limitaciones. Un foco principal de los estudios de proyecciones de cambio climático es la aplicación de la información relevante sobre cambio climático a la investigación sobre vulnerabilidad, impactos y adaptación. No obstante, no está claro todavía cuál es el mejor procedimiento para seleccionar un subconjunto de datos representativo para cada estudio particular, pues se ha visto que puede encontrarse información inconsistente e incluso contradictoria. Es este un aspecto clave a ser

considerado en las iniciativas actuales en marcha en los grupos científicos de investigación en cambio climático.

### **9: Regionalización oceánica: descripción de clima presente y proyecciones climáticas futuras**

Una pequeña reducción en la altura de la ola y su periodo medio se ha encontrado a lo largo de las costas atlánticas y mediterráneas. En el Atlántico noreste, el nivel del mar se prevé que se incremente a un ritmo mayor que el valor global medio, aunque la incertidumbre es grande. Se prevé un aumento de temperatura en el Atlántico en todos los modelos aunque la desaceleración del AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation), también descrito en el capítulo de observaciones oceánicas, puede reducir la advección de calor hacia el noroeste, y modular dicho calentamiento. El aumento de la cantidad de aguas afloradas puede (al menos parcialmente) contrarrestar el calentamiento del mar abierto en una banda estrecha a lo largo de la costa occidental ibérica.

En cuanto a la salinidad, el aumento de los flujos de agua dulce en latitudes altas del Atlántico Norte y/o el aumento de la fusión del hielo en Groenlandia traería aguas más dulces hacia las costas del Atlántico Nororiental. Por otro lado, se espera que la pérdida de agua dulce aumente en el Mediterráneo induciendo un aumento en la salinidad de la cuenca, aunque la advección de aguas menos saladas provenientes del Atlántico puede contrarrestar parcialmente este proceso.

En cuanto a los eventos extremos, está claro que el impacto de las futuras tormentas marinas aumentará debido al aumento del nivel medio del mar, pero no está claro si el número e intensidad de tormentas cambiará en el futuro. Algunos resultados apuntan a una disminución en el número de tormentas pero también a un aumento de los eventos más intensos, aunque la significación estadística de esos resultados es débil. El último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) afirma que existe una gran incertidumbre asociada con vientos y tormentas futuras.

En cuanto a las fuentes de incertidumbre de las proyecciones regionales, el factor más determinante en general es el GCM utilizado para forzar los modelos regionales (atmosféricos y oceánicos). En cuanto al escenario de emisión, los resultados apuntan a mostrar cambios más fuertes en los escenarios más pesimistas. Esto está claro para el nivel del mar y la temperatura. Sin embargo, para la salinidad y el oleaje, la relación no es tan robusta.

# Una breve síntesis de la evolución climática de la península ibérica durante los últimos 2000 años

DOI: <https://doi.org/10.31978/639-18-002-5.02>

Santiago Giralt<sup>1</sup>, Ana Moreno<sup>2</sup>, Isabel Cacho<sup>3</sup>, Blas Valero-Garcés<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera (ICTJA-CSIC), Barcelona

<sup>2</sup> Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC), Zaragoza

<sup>3</sup> GRC Geociències Marines, Dept. de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Universitat de Barcelona, Barcelona

## Introducción

El único modo de conseguir una comprensión detallada de la variabilidad climática del pasado, y de la evolución a largo plazo de los modos climáticos a escala plurianual-pluridecadal es a través de las reconstrucciones precisas de precipitación y de temperatura en el pasado. Estas reconstrucciones se pueden obtener a partir de un gran número de indicadores (en inglés, proxies) que se pueden medir en diferentes archivos naturales, tales como anillos de los árboles, secuencias sedimentarias marinas y lacustres, y registros de turberas y espeleotemas de cuevas, entre otros. Estas reconstrucciones permiten caracterizar las principales condiciones climáticas predominantes a diferentes escalas temporales y espaciales e identificar el comportamiento (estacionario o no estacionario) entre las diferentes variables climáticas.

La península ibérica está situada entre dos regiones climáticas: la Eurosiberiana (en el norte y noroeste) que se caracteriza por un clima frío y húmedo sin un marcado estiaje, y la Mediterránea, con una sequía estival muy marcada e inviernos relativamente frescos y húmedos. La geografía compleja que presenta la península ibérica, con un altiplano central segmentado y bordeado por una serie de cadenas montañosas que exceden los 2000 m de altitud, y su relativa extensa área costera, se traduce en la presencia de gradientes norte-sur y oeste-este decrecientes en precipitación y crecientes en temperatura. Debido a estas interacciones, existen en la península ibérica multitud de regímenes microclimáticos con una variada sensibilidad temporal y espacial a los principales modos climáticos que controlan la variabilidad climática de este territorio.

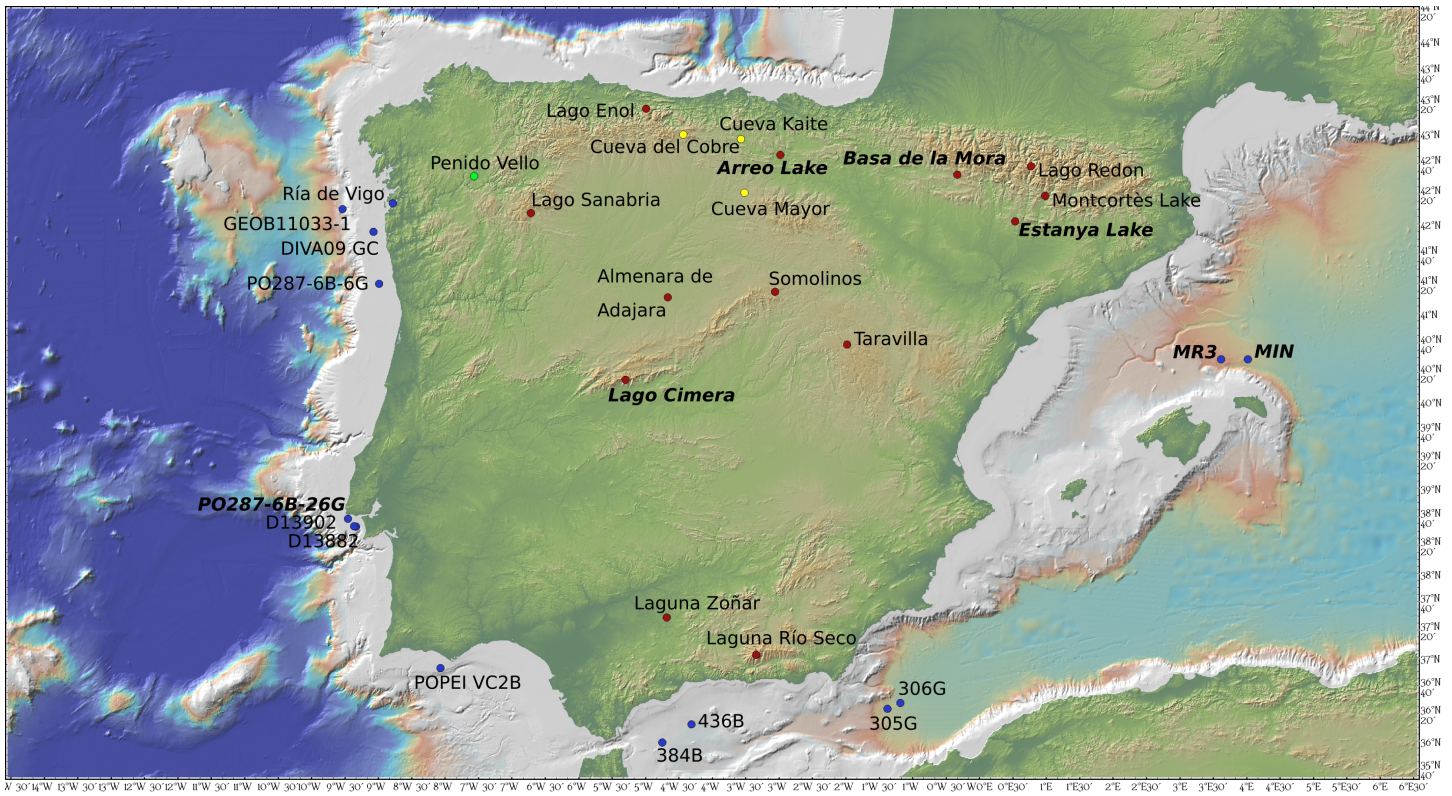
Es fundamental conocer la evolución plurianual-decadal de los principales modos climáticos del hemisferio norte, tales como la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), el Atlántico Oriental (EA) y la Escandinava (SCAND) ya que controlan el clima de la península ibérica. Sin embargo, la falta de un conocimiento de su evolución a largo plazo limita nuestra capacidad de predecir su evolución futura, más aún en el actual contexto de calentamiento global. Para poder adquirir dicho conocimiento necesitamos datos robustos y fiables, ya sea procedentes de mediciones instrumentales o de modelos globales climáticos (GCM, en inglés), pero hay que tener en cuenta que solo las reconstrucciones procedentes de los archivos naturales del clima pasado nos dan esa perspectiva temporal a largo plazo. En

este artículo presentamos un breve resumen de la evolución climática de la península ibérica de los últimos 2000 años obtenido a partir de la integración de diferentes conjuntos de datos de reconstrucciones climáticas mediante archivos marinos y continentales. La Figura 1 muestra la localización de las principales reconstrucciones paleoclimáticas disponibles en la península ibérica para este periodo de tiempo y las destacadas en la Figura 2 corresponden a un ejemplo del tipo de reconstrucciones paleoclimáticas disponibles en la actualidad. Las fluctuaciones climáticas de estos dos últimos milenios muestran la variabilidad reciente del Holoceno antes del Calentamiento Global (CG) y que incluye principalmente cuatro periodos: el Periodo Romano (PR, ca. 250 AC-500 AD), la Alta Edad Media (AEM, 500-900 AD), la Anomalía Climática Medieval (ACM, 900-1300 AD) y la Pequeña Edad de Hielo (PEH, 1300-1850 AD). La comparación de periodos cálidos en el pasado como el PR y ACM con el CG actual permitiría evaluar con más precisión los impactos relativos de las actividades antrópicas y de la variabilidad climática natural en el cambio climático actual y la evolución de los principales modos climáticos para finales del siglo XXI. La información relevante del clima en el pasado solo se obtiene a partir de registros bien datados con una elevada resolución temporal y una aproximación multiparamétrica robusta. En el caso de la península ibérica, además, estos registros tienen que cubrir transectos latitudinales y longitudinales para, así, capturar en su totalidad la historia de las múltiples regiones microclimáticas de la península ibérica. En la actualidad existen un gran número de reconstrucciones tanto marinas como continentales y se han llevado a cabo varios esfuerzos para sintetizar la evolución climática y sus principales tendencias en la península ibérica durante los últimos 2000 años, a varias escalas temporales y en diferentes ámbitos geográficos (Morellón *et al.*, 2012; Moreno *et al.*, 2012; Cisneros *et al.*, 2016; Sánchez-López *et al.*, 2016; Abrantes *et al.*, 2017). A pesar de ello, aún existen lagunas geográficas significativas, tales como la zona central de la península ibérica o las zonas de alta montaña, lo que limita la obtención de una imagen más precisa de la evolución climática de la península ibérica para estos dos últimos milenios.

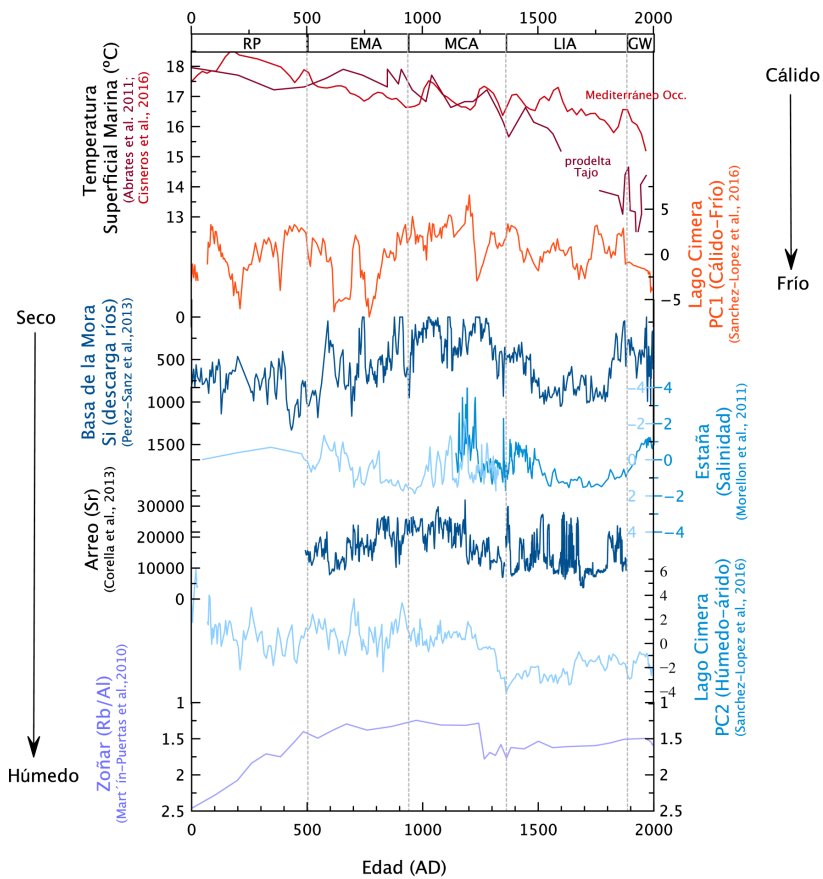
## El Periodo Romano (ca. 250 AC-500 AD)

Las reconstrucciones climáticas marinas y continentales disponibles sugieren que, durante este periodo, las condiciones climáticas eran relativamente cálidas. Los registros





**Figura 1.** Mapa de la península ibérica con la localización de los principales registros actualmente disponibles para los últimos 2000 años. Los puntos azules marcan la posición de los registros marinos, los rojos representan las secuencias lacustres, los amarillos corresponden a los registros de espeleotemas en cuevas y los puntos verdes marcan las turberas. Los nombres en negrita y cursiva corresponden a los registros usados en la figura 2.



**Figura 2.** Selección de algunos de los registros que muestran los cambios de temperatura y humedad en la Península. La fuente de los datos se indica en la figura.

de la temperatura superficial del mar de ambos lados de la península ibérica, tanto en el margen atlántico como en el sector baleárico, muestran que este periodo fue el más cálido de los últimos 2000 años (Abrantes *et al.*, 2011; Cisneros *et al.*, 2016). En el ámbito continental, se documenta un calentamiento a largo plazo en los Pirineos (Pla and Catalán, 2005) mientras que en la zona central de la península ibérica este periodo se caracterizó por una alternancia a escala de centenares de años y de décadas de fases frías y cálidas (Sánchez-López *et al.*, 2016). En cuanto a la humedad, los registros disponibles muestran una distribución espacial relativamente compleja: mientras en el norte de la península ibérica dominaban condiciones áridas, la zona central de la península presentaba una alternancia de fases húmedas y áridas y en el sur predominaban condiciones más húmedas (Martín-Puertas *et al.*, 2008; Morellón *et al.*, 2012; Sánchez-López *et al.*, 2016). Además, la comparación entre zonas de alta y baja montaña también pone de manifiesto un patrón hidrológico complejo. Así, mientras los registros situados en las localidades de alta montaña en los Pirineos orientales reflejan condiciones húmedas, los localizados en zonas de baja montaña más occidentales indican que prevalecieron condiciones de aridez (Morellón *et al.*, 2011). Estos gradientes latitudinales y altitudinales podrían estar relacionados con la variabilidad regional pluviométrica, aunque la escasez de registros disponibles no permite realizar una evaluación de los posibles procesos climáticos responsables.

#### **La Alta Edad Media (500-900 AD)**

Este periodo también se caracteriza por un patrón espacial climático complejo. El noroeste de la península ibérica estuvo dominado por condiciones climáticas frías y húmedas (Jambrina-Enríquez *et al.*, 2014) mientras que la zona oriental presentó condiciones más áridas de modo dominante, aunque con una heterogeneidad hidrológica mucho mayor. El balance entre evaporación y precipitación (E-P) disminuyó en el área mediterránea de Menorca (Cisneros *et al.*, 2016) de forma consistente con la tendencia a la aridez presente en los Pirineos centrales (Morellón *et al.*, 2011; Pérez-Sanz *et al.*, 2013), aunque se ha identificado una gran variabilidad en las zonas centrales y meridionales de la península ibérica (Nieto-Moreno *et al.*, 2011; Sánchez-López *et al.*, 2016). De todas formas, algunas localidades situadas en los Pirineos sugerirían una mayor precipitación durante la AEM que en el periodo previo (Corella *et al.*, 2013). Por tanto, en términos de humedad, el gradiente atlántico-mediterráneo se mantendría aunque la falta de reconstrucciones climáticas robustas distribuidas a lo largo de la geografía peninsular impediría una caracterización más detallada de estos gradientes. Por otra parte, las condiciones térmicas de este periodo para toda la península ibérica serían más homogéneas, con un predominio de las condiciones climáticas más frías que durante el periodo anterior. Por ejemplo, en la zona mediterránea de Menorca se ha reconstruido un descenso térmico de entre 1 y 2 °C (Cisneros *et al.*, 2016).

#### **La Anomalía Climática Medieval (900-1300 AD)**

La mayor disponibilidad de registros climáticos que cubren este periodo así como su mejor distribución espacial ha permitido una reconstrucción más precisa de sus condiciones climáticas (Moreno *et al.*, 2012). Los registros marinos

situados en el noroeste peninsular sugieren que la primera mitad de la ACM estuvo dominada por inviernos cálidos y primaveras y otoños frescos con grandes tormentas mientras que la segunda mitad de este periodo estuvo marcada por primaveras y otoños más cálidos y áridos (Abrantes *et al.*, 2017). Por otro lado, en la zona mediterránea de Menorca (Cisneros *et al.*, 2016) y del mar de Alborán (Nieto-Moreno *et al.*, 2011) imperaron condiciones más áridas. En los registros continentales, se han documentado condiciones áridas en el norte (Martín-Chivelet *et al.*, 2011; Morellón *et al.*, 2012), centro (Sánchez-López *et al.*, 2016) y sur de la península ibérica (Martín-Puertas *et al.*, 2008). Algunas reconstrucciones climáticas llevadas a cabo en los Pirineos muestran condiciones más húmedas (Pla-Rabes and Catalán, 2011) o con un incremento en la frecuencia de tormentas (Corella *et al.*, 2014), posiblemente relacionadas con factores locales, tales como la situación geográfica. Así, en cuanto a condiciones térmicas, casi todas las reconstrucciones climáticas realizadas a partir de registros continentales sugieren que toda la península ibérica estuvo dominada por condiciones cálidas.

#### **La Pequeña Edad de Hielo (1300-1850 AD)**

La LIA representa la última fase fría que tuvo lugar antes del calentamiento reciente de origen antropogénico. Las reconstrucciones climáticas marinas y continentales muestran condiciones más frías y húmedas pero con una estructura doble. Los registros del área de Menorca sugieren que la primera fase térmica se caracterizó por temperaturas superficiales marinas promedio más cálidas aunque con grandes oscilaciones, mientras que la segunda fase estuvo dominada por temperaturas más frescas y con oscilaciones de más alta frecuencia (Cisneros *et al.*, 2016). Los registros marinos situados en la zona septentrional y central del océano Atlántico también muestran esta transición que se produce a lo largo de la PEH de condiciones cálidas a más frescas, pero con una tendencia sobreimpuesta de un enfriamiento intenso de cerca de unos 3 °C (Abrantes *et al.*, 2017). Las secuencias del mar de Alborán indican un dominio de las condiciones húmedas con un patrón de oscilación a escala de décadas (Martín-Puertas *et al.*, 2010; Nieto-Moreno *et al.*, 2011). Por otra parte, los registros continentales del noroeste peninsular sugieren que la PEH se caracterizó por condiciones climáticas más húmedas y frescas con respecto a los periodos anteriores. El inicio de este periodo así como la intensidad de los cambios evidencian que existen claras diferencias regionales (Morellón *et al.*, 2012; Corella *et al.*, 2013; Pérez-Sanz *et al.*, 2013; Oliva *et al.*, 2018). Algunas reconstrucciones sugieren niveles de la lámina de agua de los lagos más elevados, especialmente durante la mitad y final del siglo XIX (Morellón *et al.*, 2011). El inicio de la PEH en el registro del lago Montcortès se caracteriza por un incremento significativo de las lluvias de finales de primavera-verano entre 1372 y 1452 AD, lo que sugeriría una frecuencia anómala de llegadas de frentes fríos de origen septentrional hacia latitudes más meridionales durante la estación cálida (Corella *et al.*, 2016). Teniendo en cuenta la diferente resolución temporal de los modelos de edad de los registros, la coherencia entre los periodos de nivel del lago alto y la baja actividad solar indicaría que el control paleohidrológico de los lagos a escala de centenares de años se debería a causas climáticas. Las condiciones climáticas reconstruidas



durante la PEH en el sistema Central (Sánchez-López *et al.*, 2016) y en la cordillera Ibérica (Barreiro-Lostres *et al.*, 2015) muestran que estarían dominadas por condiciones frías y húmedas con un incremento de eventos extremos (Moreno *et al.*, 2008). El hecho de que estas oscilaciones decadales no aparezcan en todos los registros y cuando lo hacen la intensidad es variable refleja la diferente resolución temporal de los registros y/o sensibilidad del indicador empleado en la reconstrucción paleoclimática.

### **Calentamiento Global (1850 AD-actualidad)**

Los registros meteorológicos instrumentales muestran de una forma clara que los últimos 150 años se han caracterizado por un progresivo incremento en la temperatura y una disminución en la precipitación como consecuencia de las actividades antropogénicas (Bladé *et al.*, 2010). El incremento progresivo en la aridez se puede observar en la mayor parte de los registros continentales de la península ibérica, mientras que los registros marinos, especialmente en aquellos situados en el sureste peninsular, muestran un incremento en humedad (Nieto-Moreno *et al.*, 2011). Con respecto a la temperatura, los registros continentales situados a baja altitud muestran una concordancia con los registros meteorológicos instrumentales, en los que se observa frecuentemente una tendencia hacia condiciones cada vez más cálidas y áridas. En cambio, algunos lagos de alta montaña (Sánchez-López *et al.*, 2016) y varios registros marinos (Cisneros *et al.*, 2016) registran un marcado descenso térmico, aunque los registros marinos situados en el golfo de León sí que capturan el calentamiento global (Sicre *et al.*, 2016). La falta de registros con reconstrucciones robustas así como la aparición de diferentes interferencias de las actividades humanas con la evolución de los indicadores estudiados durante este periodo provoca que aún no exista una comparación robusta entre datos de indicadores y mediciones instrumentales. Existen varias iniciativas al respecto que permitirán obtener dichas comparaciones robustas en un futuro próximo.

### **Mecanismos de forzamiento climático**

La variabilidad climática de la península ibérica reconstruida para los últimos 2000 años se ha explicado básicamente a partir de fluctuaciones en los modos climáticos y en la actividad solar y volcánica. La variabilidad de los principales modos climáticos, como la NAO, así como las variaciones en la insolación estival e invernal, se citan frecuentemente como los principales forzamientos para explicar tanto las tendencias climáticas a escala de miles y centenares de años como los cambios climáticos abruptos. Sin embargo, Comas-Bru y McDermott (2014) señalaron que, aparte del rol de un determinado modo climático, las interacciones entre ellos y la evolución espacio-temporal de dichas interacciones, son de vital importancia para explicar la variabilidad climática existente. El acople y desacople de la NAO con otros modos climáticos, como la EA y la SCAND, pueden traer como consecuencia cambios en los patrones espaciales de la temperatura y de la precipitación de invierno (Comas-Bru and McDermott, 2014). Además, estas interacciones también pueden tener como efecto que las distribuciones espaciales de los indicadores climáticos sean homogéneas o heterogéneas debido a la interacción de la NAO y la EA con el mismo u opuesto signo (Comas-Bru and McDermott, 2014; Bastos *et al.*, 2016).

Estas interacciones climáticas también afectan a la península ibérica. Hernández *et al.* (2015) pusieron de manifiesto que la precipitación invernal de la península está básicamente controlada por la NAO, mientras que la EA es la principal responsable de la variabilidad térmica estival e invernal. El dominio de la fase positiva (negativa) de la NAO comporta el descenso (aumento) en la precipitación de invierno, mientras que la fase positiva (negativa) de la EA puede causar un aumento (disminución) en las temperaturas de invierno y verano. Así, los periodos con cambios en temperatura y precipitación con tendencias opuestas podrían estar causados por la interacción de estos dos modos climáticos durante periodos de mismo signo u opuesto.

Sánchez-López *et al.* (2016) propusieron que el signo de estos modos climáticos así como su interacción podría explicar la variabilidad espacio-temporal observada en la península ibérica para los últimos 2000 años. Los gradientes de humedad presentes durante los periodos PR y AEM serían, por tanto, la consecuencia de la interacción predominante de los modos climáticos de la NAO y EA durante las fases de signo opuesto (NAO<sup>+</sup>-EA<sup>-</sup> y NAO<sup>-</sup>-EA<sup>+</sup>) mientras que la distribución homogénea de la precipitación que sucedió durante los periodos de la ACM y la PEH se debería a la interacción de ambos modos climáticos durante la fase de mismo signo (NAO<sup>+</sup>-EA<sup>+</sup> y NAO<sup>-</sup>-EA<sup>-</sup>). Por tanto, las principales condiciones climáticas durante el PR se corresponderían con un dominio de la interacción NAO<sup>-</sup>-EA<sup>+</sup> que se tradujo en inviernos cálidos y húmedos y veranos cálidos mientras que la climatología de la AEM estuvo controlada por el predominio de la interacción NAO<sup>+</sup>-EA<sup>-</sup>, con inviernos fríos y secos y veranos fríos. Por otra parte, el periodo de la ACM se asociaría a la interacción NAO<sup>+</sup>-EA<sup>+</sup>, con inviernos cálidos y secos y veranos cálidos mientras las condiciones climáticas de la PEH se debieron a la interacción NAO<sup>-</sup>-EA<sup>-</sup>, con inviernos húmedos y fríos y veranos fríos. Los registros marinos situados mar adentro de la costa portuguesa sugieren que las condiciones climáticas de la ACM también vendrían marcadas por cambios en la irradiancia solar total y que, por tanto, el modo climático SCAND podría ser el responsable del descenso significativo en la precipitación del norte de Portugal y de las bajas temperaturas de la superficie del mar en el sur (Abrantes *et al.*, 2017).

### **Conclusiones**

Las reconstrucciones climáticas continentales y marinas disponibles en la península ibérica para los últimos 2000 años muestran una evolución espacio-temporal de la precipitación y la temperatura compleja. Estas reconstrucciones ponen de manifiesto la presencia de microclimas, replicando hasta cierto punto la variabilidad climática actual peninsular, con una geografía compleja que condiciona una variabilidad espacial significativa. En general, la evolución climática de la península ibérica durante estos 2000 últimos años se puede subdividir en cuatro periodos climáticos: el Periodo Romano, la Alta Edad Media, la Anomalía Climática Medieval y la Pequeña Edad de Hielo, los cuales se caracterizan por patrones de precipitación y temperatura específicos. Las condiciones climáticas dominantes serían el resultado de la interacción de los principales modos climáticos (NAO, EA y SCAND), así como de fluctuaciones a largo y corto plazo de la insolación total de invierno y



verano. Es necesario un mayor esfuerzo para poder obtener reconstrucciones climáticas multiparamétricas más robustas en zonas donde la cobertura geográfica es baja, como en la zona central peninsular y áreas de la costa septentrional de la Península. Además, es fundamental mejorar el conocimiento en la evolución a nivel decadal y de centenares de años de los principales modos climáticos, con especial énfasis en la EA y el SCAND, así como la evolución de la interacción entre ellos y con la irradiancia solar total.

## Bibliografía

Abrantes, F., Rodrigues, T., Rufino, M., Salgueiro, E., Oliveira, D., Gomes, S., Oliveira, P., Costa, A., Mil-Homens, M., Drago, T., Naughton, F., 2017: The climate of the Common Era off the Iberian Peninsula. *Clim. Past*, 13, 1901-1918. doi:10.5194/cp-13-1901-2017.

Barreiro-Lostres, F., Brown, E., Moreno, A., Morellón, M., Abbott, M., Hillman, A., Giralt, S., Valero-Garcés, B., 2015: Sediment delivery and lake dynamics in a Mediterranean mountain watershed: Human-climate interactions during the last millennium (El Tobar Lake record, Iberian Range, Spain). *Science of The Total Environment*, 533, 506-519. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.06.123.

Bastos, A., Janssens, I. A., Gouveia, C. M., Trigo, R. M., Ciais, P., Chevallier, F., Peñuelas, J., Rödenbeck, C., Piao, S., Friedlingstein, P., Running, S. W., 2016: European land CO<sub>2</sub> sink influenced by NAO and East-Atlantic Pattern coupling. *Nature Comms*, 7, ncomms10315. doi:10.1038/ncomms10315.

Blade, I., Castro, Y., Altava-Ortiz, V., Ancell, R., Argüeso, D., Barrera-Escoda, A., Brunet, M., Calvo, N., Errasti, I., Esteban-Parra, M. J., Fernández, J., Fortuny, D., Frías, M. D., Gallego, M. C., Gallego, D., Gámiz-Fortis, S. R., García-Herrer, R., Guijarro, J. A., Gutiérrez, J. M., Herrera, S., Izaguirre, C., Hidalgo-Muñoz, J. M., López-Moreno, J. I., Martín, M. L., Pons, M. R., Rasilla, D., Ribera, P., Rodrigo, F. S., Rodríguez-Puebla, C., Vicente-Serrano, S. M., 2010: Atmospheric trends in the Iberian Peninsula during the instrumental period in the context of natural variability. In F. Perez and R. Boscolo (eds.): Climate in Spain: Past, present and future. Regional climate change assessment report. 25-42 pp.

Cisneros, M., Cacho, I., Frigola, J., Canals, M., Masqué, P., Martrat, B., Casado, M., Grimalt, J. O., Pena, L. D., Margaritelli, G., Lirer, F., 2016: Sea surface temperature variability in the central-western Mediterranean Sea during the last 2700 years: a multi-proxy and multi-record approach. *Clim. Past*, 12, 849-869. doi:10.5194/cp-12-849-2016.

Comas-Bru, L., McDermott, F., 2014: Impacts of the EA and SCA patterns on the European twentieth century NAO-winter climate relationship. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 140, 354-363. doi:10.1002/qj.2158.

Corella, J. P., Benito, G., Rodríguez-Lloveras, X., Brauer, A., Valero-Garcés, B. L., 2014: Annually-resolved lake record of extreme hydro-meteorological events since AD 1347 in NE Iberian Peninsula. *Quaternary Science Reviews*, 93, 77-90. doi:10.1016/j.quascirev.2014.03.020.

Corella, J. P., Stefanova, V., El Anjoumi, A., Rico, E., Giralt, S., Moreno, A., Plata-Montero, A., Valero-Garcés, B. L., 2013: A 2500-year multi-proxy reconstruction of climate change and human activities in northern Spain: The Lake Arreo record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386, 555-568. doi:10.1016/j.palaeo.2013.06.022.

Corella, J. P., Valero-Garcés, B. L., Vicente-Serrano, S. M., Brauer, A., Benito, G., 2016: Three millennia of heavy rainfalls in Western Mediterranean: frequency, seasonality and atmospheric drivers. *Scientific Reports*, 6. doi:10.1038/srep38206.

Hernández, A., Trigo, R. M., Pla-Rabes, S., Valero-Garcés, B. L., Jerez, S., Rico-Herrero, M., Vega, J. C., Jambrina-Enríquez, M., Giralt, S., 2015: Sensitivity of two Iberian lakes to North Atlantic atmospheric circulation modes. *Clim. Dyn.*, 45, 3403-3417. doi:10.1007/s00382-015-2547-8.

Jambrina-Enríquez, M., Rico, M., Moreno, A., Leira, M., Bernárdez, P., Prego, R., Recio, C., Valero-Garcés, B. L., 2014: Timing of deglaciation and postglacial environmental dynamics in NW Iberia: the Sanabria Lake record. *Quaternary Science Reviews* 94, 136-158. doi:10.1016/j.quascirev.2014.04.018.

Martín-Chivelet, J., Muñoz-García, M. B., Edwards, R. L., Turrero, M. J., Ortega, A. I., 2011: Land surface temperature changes in Northern Iberia since 4000 yr BP, based on  $\delta^{13}C$  of speleothems. *Global Planet. Change*. doi:10.1016/j.gloplacha.2011.02.002.

Martín-Puertas, C., Jiménez-Espejo, F., Martínez-Ruiz, F., Nieto-Moreno, V., Rodrigo, M., Mata, M. P., Valero-Garcés, B. L., 2010: Late Holocene climate variability in the southwestern Mediterranean region: an integrated marine and terrestrial geochemical approach. *Clim. Past*, 6, 807-816. doi:10.5194/cp-6-807-2010.

Martín-Puertas, C., Valero-Garcés, B. L., Mata, P., González-Sampériz, P., Bao, R., Moreno, A., Stefanova, V., 2008: Arid and Humid Phases in Southern Spain during the last 4000 Years: The Zoñar Lake Record, Córdoba. *The Holocene*, 40, 195-215.

Morellón, M., Pérez-Sanz, A., Corella, J. P., Büntgen, U., Catalán, J., González-Sampériz, P., González-Trueba, J. J., López-Sáez, J. A., Moreno, A., Pla-Rabes, S., Saz-Sánchez, M. Á., Scussolini, P., Serrano, E., Steinhilber, F., Stefanova, V., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B., 2012: A multi-proxy perspective on millennium-long climate variability in the Southern Pyrenees. *Clim. Past*, 8, 683-700. doi:10.5194/cp-8-683-2012.

Morellón, M., Valero-Garcés, B., González-Sampériz, P., Vegas-Vilarrúbia, T., Rubio, E., Rieradevall, M., Delgado-Huertas, A., Mata, P., Romero, Ó., Engstrom, D. R., López-Vicente, M., Navas, A., Soto, J., 2011: Climate changes and human activities recorded in the sediments of Lake Estanya (NE Spain) during the Medieval Warm Period and Little Ice Age. *Journal of Paleolimnology*, 46, 423-452. doi:10.1007/s10933-009-9346-3.

- Morellón, M., Valero-Garcés, B., Vegas-Vilarrúbia, T., González-Sampérez, P., Romero, Ó., Delgado-Huertas, A., Mata, P., Moreno, A., Rico, M., Corella, J. P., 2009: Lateglacial and Holocene palaeohydrology in the western Mediterranean region: The Lake Estanya record (NE Spain). *Quaternary Science Reviews*, 28, 2582-2599.
- Moreno, A., Pérez, A., Frigola, J., Nieto-Moreno, V., Rodrigo-Gámiz, M., Martrat, B., González-Sampérez, P., Morellón, M., Martín-Puertas, C., Corella, J. P., Belmonte, Á., Sancho, C., Cacho, I., Herrera, G., Canals, M., Grimalt, J. O., Jiménez-Espejo, F., Martínez-Ruiz, F., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B. L., 2012: The Medieval Climate Anomaly in the Iberian Peninsula reconstructed from marine and lake records. *Quat. Sci. Rev.*, 43, 16-32. doi:10.1016/j.quascirev.2012.04.007.
- Moreno, A., Valero-Garcés, B. L., González-Sampérez, P., Rico, M., 2008: Flood response to rainfall variability during the last 2000 years inferred from the Taravilla Lake record (Central Iberian Range, Spain). *Journal of Paleolimnology*, 40, 943-961.
- Nieto-Moreno, V., Martínez-Ruiz, F., Giralt, S., Jiménez-Espejo, F., Gallego-Torres, D., Rodrigo-Gámiz, M., García-Orellana, J., Ortega-Huertas, M., de Lange, G. J., 2011: Tracking climate variability in the western Mediterranean during the Late Holocene: a multiproxy approach. *Clim. Past Discuss.*, 7, 635-675. doi: 10.5194/cpd-7-635-2011.
- Oliva, M., Ruiz-Fernández, J., Barriendos, M., Benito, G., Cuadrat, J. M., Domínguez-Castro, F., García-Ruiz, J. M., Giralt, S., Gómez-Ortiz, A., Hernández, A., López-Costas, O., López-Moreno, J. I., López-Sáez, J. A., Martínez-Cortizas, A., Moreno, A., Prohom, M., Saz, M. A., Serrano, E., Tejedor, E., Trigo, R., Valero-Garcés, B., Vicente-Serrano, S., 2018: The Little Ice Age in Iberian mountains. *Earth Science Reviews*, 177, 175-208. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.11.010.
- Pérez-Sanz, A., González-Sampérez, P., Moreno, A., Valero-Garcés, B., Gil-Romera, G., Rieradevall, M., Tarrats, P., Lasheras-Álvarez, L., Morellón, M., Belmonte, A., Sancho, C., Sevilla-Callejo, M., Navas, A., 2013: Holocene climate variability, vegetation dynamics and fire regime in the central Pyrenees: the Basa de la Mora sequence (NE Spain). *Quaternary Science Reviews*, 73, 149-169. doi:10.1016/j.quascirev.2013.05.010.
- Pla, S., & Catalán, J., 2005: Chrysophyte cysts from lake sediments reveal the submillennial winter/spring climate variability in the northwestern Mediterranean region throughout the Holocene. *Clim. Dyn.*, 24 (2), 263. doi: 10.1007/s00382-004-0482-1.
- Pla-Rabes, S., Catalán, J., 2011: Deciphering chrysophyte responses to climate seasonality. *J. Paleolimnol.*, 46, 139. doi: 10.1007/s10933-011-9529-6.
- Rodrigues, T., Grimalt, J. O., Abrantes, F. G., Flores, J. A., & Lebreiro, S. M., 2009: Holocene interdependences of changes in sea surface temperature, productivity, and fluvial inputs in the Iberian continental shelf (Tagus mud patch). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10 (7), doi: 10.1029/2008GC002367.
- Sánchez-López, G., Hernández, A., Pla-Rabes, S., Trigo, R. M., Toro, M., Granados, I., Sáez, A., Masqué, P., Pueyo, J. J., Rubio-Inglés, M. J., Giralt, S., 2016: Climate reconstruction for the last two millennia in central Iberia: The role of East Atlantic (EA), North Atlantic Oscillation (NAO) and their interplay over the Iberian Peninsula. *Quaternary Science Reviews*, 149, 135-150. doi:10.1016/j.quascirev.2016.07.021.
- Sicre, M.-A., Jalali, B., Martrat, B., Schmidt, S., Bassetti, M.-A., Kallel, N., 2016: Sea surface temperature variability in the North Western Mediterranean Sea (Gulf of Lion) during the Common Era. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 456, 124-133. doi: 10.1016/j.epsl.2016.09.032.

# Observaciones climáticas atmosféricas y reconstrucciones instrumentales sobre la península ibérica I. Obtención de series climáticas de alta calidad

DOI: <https://doi.org/10.31978/639-18-002-5.03>

José Antonio Guijarro<sup>1</sup>, César Azorín Molina<sup>3</sup>, José Carlos González-Hidalgo<sup>4</sup>,  
Arturo Sánchez-Lorenzo<sup>5</sup>, Sixto Herrera<sup>2</sup>, José Antonio López<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), España

<sup>2</sup> Grupo de Meteorología, Dpto. de Matemática Aplicada y Ciencias Computacionales,  
Universidad de Cantabria, España

<sup>3</sup> Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Gotemburgo, Suecia

<sup>4</sup> Dpto. de Geografía, Universidad de Zaragoza, España

<sup>5</sup> Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España

## Introducción

Las series observacionales son la base para los estudios de variabilidad climática, puesto que son la materia prima usada para analizar climas locales, generar productos en rejilla para evaluar climas regionales o globales y sus cambios, y calibrar modelos climáticos globales. Se han realizado grandes esfuerzos en las últimas décadas para aumentar el número y la calidad de las medidas climatológicas, pero las tecnologías y las prácticas de observación han sufrido cambios relevantes desde el comienzo de la era instrumental (mediados del siglo XIX) que, junto con cambios de emplazamiento y en el entorno de los observatorios, han alterado las propiedades de los registros observacionales. Por lo tanto es necesario aplicar metodologías estadísticas a las series en bruto para homogeneizarlas, es decir, para identificar y eliminar de la señal climática real los mencionados sesgos artificiales. En las últimas décadas ha habido varias iniciativas internacionales destinadas a mejorar los métodos de homogeneización, desarrollar nuevas técnicas o adaptar las existentes a nuevas variables. Por ejemplo, en los años 2007-2011 la acción COST ES0601 «Advances in homogenisation methods of climate series: an integrated approach (HOME)» reunió a los principales grupos de investigación europeos para lograr un método para homogeneizar bases de datos climáticos y medioambientales (Venema *et al.*, 2012). Desde entonces estas técnicas han mejorado lo suficiente como para eliminar con elevada fiabilidad los sesgos más significativos en las series mensuales.

Sin embargo, las series diarias tienen mucha más variabilidad que sus agregados mensuales, lo que limita el poder de detección de inhomogeneidades. Por lo tanto, se requieren métodos estadísticos más refinados, incluido el uso de medidas paralelas para proporcionar correcciones basadas en estudios metrológicos (proyecto MeteoMet: Merlone *et al.*, 2015) o en modelos que simulen la física de los fenómenos que producen los sesgos (Auchmann y Brönnimann, 2012).

## Obtención de series climáticas de alta calidad

Para estudiar la variabilidad climática, los climatólogos precisan largas series de observación, libres de errores e inhomogeneidades. Por tanto, es necesario trabajar para obtener series temporales más largas, especialmente a través de la digitalización de cuadernos meteorológicos (rescate de datos) y controlando cuidadosamente su calidad y homogeneidad.

### Rescate de datos

El rescate de datos implica una gran cantidad de trabajo: descubrir documentos antiguos (cuadernos de observación, registros analógicos en papel y resúmenes climáticos), escanearlos o fotografiarlos, inventariarlos y digitalizarlos. Sin embargo, la escasez de personal de muchos Servicios Meteorológicos Nacionales no permite que estas tareas avancen a la velocidad deseada. De entre las actividades de rescate de datos llevadas a cabo en universidades e instituciones gubernamentales vale la pena mencionar los esfuerzos en la recuperación de antiguos datos instrumentales realizados en el marco del proyecto Salvà-Sinobas (Domínguez-Castro *et al.*, 2014), que está digitalizando más de 100 000 observaciones meteorológicas realizadas entre 1780 y 1850, un periodo en el que previamente solo había dos series disponibles. Este conjunto de datos contiene medidas de la temperatura del aire, dirección del viento y estado del tiempo de 16 lugares de España continental e islas Baleares, la mayoría de ellos con una resolución diaria. También García *et al.* (2014) reconstruyeron series de radiación solar global del Observatorio Atmosférico de Izaña (Tenerife, islas Canarias) del periodo 1933-2013.

Otros proyectos actualmente en curso están recuperando y digitalizando valores mensuales de precipitación y valores medios de temperaturas extremas anteriores a 1950, como los que completan las series de Mahón (Carreras, 2009), Barcelona (Prohom *et al.*, 2016) y Oviedo (Mora y González, 2017).



### Control de calidad y homogeneización

El control de calidad de las observaciones es una tarea con múltiples fases, ya que debe realizarse desde el momento en que se registran por primera vez hasta su almacenamiento final en la base de datos operativa. Además, los climatólogos normalmente aplican controles de calidad adicionales antes de analizar las series, comprobando su consistencia espacial e interna. Estos procedimientos se encuentran frecuentemente implementados en el mismo software usado para detectar y corregir inhomogeneidades.

Como tras la exitosa Acción COSTES0601, varios paquetes de homogeneización mejoraron su rendimiento y van apareciendo otros nuevos, se hacía necesario llevar a cabo nuevas comparaciones de su funcionamiento. Uno de estos esfuerzos ha sido financiado por el Ministerio español de Economía y Competitividad a través del proyecto MULTITEST, para mejorar las pruebas comparativas realizadas previamente por Guijarro (2011). Sus resultados están disponibles en <http://www.climatol.eu/MULTITEST/index.html>.

Por otra parte, algunos proyectos internacionales están tratando de aprovechar las actuales metodologías de homogeneización para construir un conjunto de datos global de temperatura del aire con una calidad y densidad de estaciones sin precedentes, especialmente el de la *International Surface Temperature Initiative* (<http://www.surface temperatures.org/>).

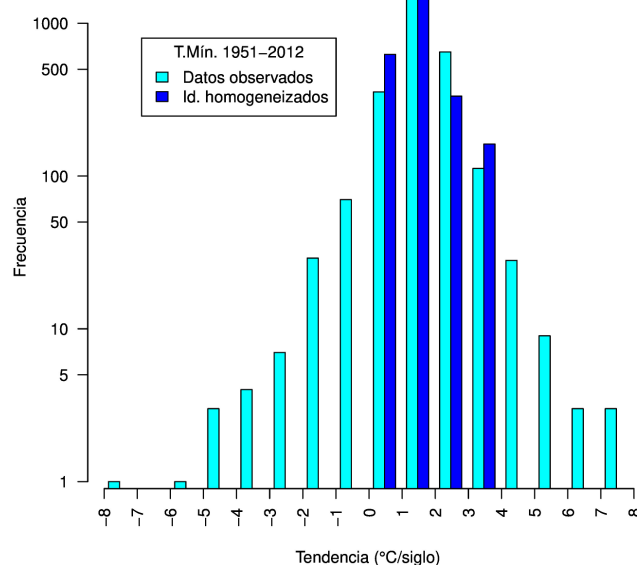
Una de las principales preocupaciones sobre la homogeneidad de las series está relacionada con los cambios de estaciones manuales a automáticas. Como estos son difíciles de detectar con métodos de homogeneización relativa cuando todos o la mayoría de los instrumentos en una red son reemplazados en un corto periodo de tiempo, el *Parallel Observations Science Team* (POST) está compilando una base de datos con medidas paralelas, para evaluar el impacto de este conjunto de cambios instrumentales ([http://www.surface temperatures.org/databank/parallel\\_measurements](http://www.surface temperatures.org/databank/parallel_measurements)).

Entre los primeros esfuerzos para construir un conjunto de series largas homogéneas y con calidad controlada se encuentra la compilación de SDATS (Brunet *et al.*, 2006), que contiene 22 series españolas diarias de temperatura del aire (media, máxima y mínima) desde 1850 hasta 2005. Este conjunto de datos ha sido recientemente revaluado y actualizado hasta 2014. Además de para preparar conjuntos de datos en formato reticulado (véase Herrera *et al.* en este volumen), se han realizado tareas de control de calidad y homogeneización como paso previo en varios estudios de variabilidad climática:

- Vicente-Serrano *et al.* (2010) construyeron una base de datos de precipitaciones diarias para el noreste de España usando datos de 3106 estaciones a lo largo de 1901-2002. Las lagunas de datos se rellenaron utilizando valores de las estaciones más próximas, y la homogeneidad de las series se comprobó usando el Standard Normal Homogeneity Test (SNHT, Alexandersson, 1986) con la ayuda del paquete AnClim (Štěpánek, 2008a).
- En la misma zona, El Kenawy *et al.* (2011 y 2013) recopilaban datos diarios de temperaturas extremas del

aire de 1583 estaciones que abarcan partes del periodo 1900-2006. Después de completar los datos ausentes por regresión lineal, la homogeneidad de la serie se evaluó aplicando SNHT, regresión en dos fases y las pruebas de Vincent.

- González-Hidalgo *et al.* (2011 y 2015) construyeron bases de datos mensuales de precipitación (MOPREDAS, 1951-2010) y temperatura máxima y mínima (MOTEDAS, 1949-2005) utilizando todas las series disponibles (6821 y 1358 respectivamente) con un mínimo de 10 años de observaciones en la España peninsular. Su homogeneización se realizó por medio de los programas AnClim y ProclimDB (Štěpánek, 2008a, b).
- Luna *et al.* (2012) construyeron un conjunto de datos integrado por 66 series largas de precipitación mensual de la Península y Baleares, homogeneizadas con el paquete Climatol (Guijarro, 2013a) usando todas las series españolas de precipitación como referencia.
- Martín *et al.* (2012) estudiaron 36 estaciones seleccionadas de Tenerife (islas Canarias), utilizando AnClim para homogeneizarlas, mientras que Máyer *et al.* (2017) seleccionaron 23 series canarias de precipitación para estudiar las tendencias del índice de concentración.



**Figura 1.** Tendencias de las temperaturas mínimas del aire en España antes y después de la homogeneización de las series. Las inhomogeneidades de los datos brutos de observación dan como resultado una dispersión anormalmente alta de las tendencias calculadas.

- Guijarro (2013b) homogeneizó las temperaturas máximas y mínimas medias mensuales de 2856 series españolas (incluyendo los archipiélagos balear y canario) con un mínimo de 10 años de observación mediante el paquete Climatol. Un ejemplo ilustrativo de los beneficios de los procedimientos de homogeneización aplicados antes de realizar cualquier prueba de variabilidad puede verse en la Figura 1.
- Cuadrat *et al.* (2013) homogeneizaron 49 series largas de temperaturas extremas diarias usando SNHT mediante el software ProclimDB para estudiar el evolución de las olas de calor y frío en España.

- Sánchez-Lorenzo *et al.* (2013) desarrollaron un nuevo conjunto de datos de radiación solar superficial en España basada en las series más largas, con registros desde la década de 1980. Se seleccionaron trece series mensuales, y su homogeneidad se evaluó por medio del SNHT. Un enfoque similar se aplicó al estudio de cambios en la nubosidad desde mediados del siglo XIX considerando 39 series largas españolas (Sánchez-Lorenzo *et al.*, 2012).
- Sánchez-Lorenzo *et al.* (2014) construyeron un conjunto de datos de evaporación en España basado en series largas de medidas de evaporímetro Piché y de tanque. Los datos de Piché fueron recolectados de 58 estaciones, comenzando en la década de 1960, mientras que los datos de tanque evaporimétrico de 21 observatorios comenzaban en 1984. Este conjunto de datos fue homogeneizado mediante el software HOMER.
- Azorín-Molina *et al.* (2014) compilaron series mensuales de velocidad del viento registradas en 67 estaciones en España y Portugal durante 1961-2011, y aplicaron el SNHT usando el paquete AnClim y series simuladas con el modelo MM5 como referencia.
- Azorín-Molina *et al.* (2016) evaluaron la variabilidad de las rachas máximas diarias de 80 series de España y Portugal de 1961-2014, usando también las salidas de MM5 como referencia para homogeneizarlas, esta vez aplicando el paquete Climatol (Guijarro, 2013a).
- Una reciente tesis de doctorado (Serrano, 2017) compila una nueva reconstrucción de las precipitaciones diarias españolas para el periodo 1951-2015.

Actualmente se están llevando a cabo investigaciones dentro del proyecto MeteoMet, y la red española IMPACTRON está trabajando para mejorar la comprensión del impacto en las series de temperatura del aire de las transiciones: 1) de observación manual a automática; 2) cambios de ubicación de ciudades a aeropuertos; y 3) cambios en los tipos de refugio termométrico.

## Conclusión

Los estudios climatológicos desarrollados en España a lo largo de los últimos años han mejorado los trabajos anteriores de producción de conjuntos de datos homogéneos y con calidad controlada, y han abordado otras variables climáticas. Estos estudios deberán extenderse a más variables y actualizarse regularmente para incluir los nuevos datos que se van generando. Al mismo tiempo, los próximos esfuerzos deberán enfocarse a la homogeneización de series diarias, que permitirá una evaluación más precisa de la variabilidad climática pasada y presente, al tiempo que será de gran utilidad para proporcionar mejores proyecciones del clima futuro mediante técnicas de reducción de escala de las salidas de los Modelos Climáticos Regionales.

## Referencias

Alexandersson, H., 1986: A homogeneity test applied to precipitation data. *Jour. of Climatol.*, 6, 661-675.

Auchmann, R. and Brönnimann, S., 2012: A physics-based correction model for homogenizing sub-daily temperature series, *J. Geophys. Res.*, 117, D17119, doi:10.1029/2012JD018067.

Azorín-Molina, C. *et al.*, 2014: Homogenization and Assessment of Observed Near-Surface Wind Speed Trends over Spain and Portugal, 1961-2011. *J. of Climate*, 27, 3692-3712.

Azorín-Molina, C. *et al.*, 2016: Trends of daily peak wind gusts in Spain and Portugal, 1961-2014. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, doi:10.1002/2015JD024485, 20 pp.

Brunet, M. *et al.*, 2006: The development of a new dataset of Spanish daily adjusted temperature series (SDATS) (1850-2003). *Int. J. Climatol.*, 26, 1777-1802.

Carreras, P., 2009: Sèrie de pluja de Maó del 1864 al 1932 gràcies a Joaquim Carreras i Maurici Hernández. *Actes d'Història de la Ciència i de la Tècnica*, segona època, 2, 70-78.

Cuadrat, J. M. *et al.*, 2013: Heat and cold waves in Spain. In: *Adverse weather in Spain* (García-Legaz, C. and Valero, F., Eds.), AMV Ediciones, Madrid, ISBN 978-84-96709-43-0, pp. 307-322.

Domínguez-Castro, F. *et al.*, 2014: Early Spanish meteorological records (1780-1850). *Int. J. Climatol.*, 34, 593-603.

El Kenawy, A. *et al.*, 2011: Recent trends in daily temperature extremes over northeastern Spain (1960-2006). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 2583-2603.

El Kenawy, A. *et al.*, 2013: An assessment of the role of homogenization protocol in the performance of daily temperature series and trends: application to northeastern Spain. *Int. J. Climatol.*, 33, 87-108.

García, R. D. *et al.*, 2014: Reconstruction of global solar radiation time series from 1933 to 2013 at the Izaña Atmospheric Observatory, *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 3139-3150, doi:10.5194/amt-7-3139-2014.

Gilabert, A. *et al.*, 2015: Exploratory statistical analysis of combined metrological and homogenisation procedures to ensure enhanced temperature series traceability to international standards. *Int. J. Climatol.* (en imprenta).

González-Hidalgo, J. C. *et al.*, 2011: A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (monthly precipitation trends December 1945-November 2005). *Int. J. Climatol.*, 31, 715-731.

González-Hidalgo, J. C. *et al.*, 2015: MOTEDAS: a new monthly temperature database for mainland Spain and the trend in temperature (1951-2010). *Int. J. Climatol.*, 35, 4444-4463, doi: 10.1002/joc.4298.

Guijarro, J. A., 2011: Influence of network density on homogenization performance. Seventh Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases jointly organized with the Meeting of COST ES0601 (HOME) Action MC Meeting, Budapest, 24-27/October, WMO WCDMP-No. 78, pp. 11-18.

Guijarro, J. A., 2013a: User's Guide to Climatol, 40 pp. <http://www.climatol.eu/climatol-guide.pdf>

- Guijarro, J. A., 2013b: Temperature trends. En: Adverse weather in Spain (García-Legaz, C. and Valero, F., Eds.), AMV Ediciones, Madrid, ISBN 978-84-96709-43-0, pp. 297-306.
- Luna, M. L. *et al.*, 2012: A monthly precipitation database for Spain (1851-2008): reconstruction, homogeneity and trends. *Adv. Sci. Res.*, 8, 1-4.
- Máyer, P. *et al.*, 2017: Precipitation trends and a daily precipitation concentration index for the mid-eastern Atlantic (Canary Islands, Spain). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, doi:10.18172/cig.3095.
- Martín, J. L. *et al.*, 2012: Assessment of global warming on the island of Tenerife, Canary Islands (Spain). Trends in minimum, maximum and mean temperatures since 1944. *Climatic Change*, 114, 343-355.
- Merlone, A. *et al.*, 2015: The MeteoMet project - metrology for meteorology: challenges and results, *Meteorol. Appl.* 22, 820-829, doi:10.1002/met.1528.
- Mora, M. A. and González, V. M., 2017: La serie histórica de la Universidad de Oviedo - Proyecto REDASHO. *Calendario meteorológico 2017*, MAPAMA-AEMET, pp. 309-317.
- Peña-Angulo, D. *et al.*, 2016: A new climatology of maximum and minimum temperature (1951-2010) in the Spanish mainland: a comparison between three different interpolation methods. *Int. Jour. of Geographical Information Sci.*, 30, 2109-2132. DOI 10.1080/13658816.2016.1155712.
- Sánchez-Lorenzo, A. *et al.*, 2012: Increasing cloud cover in the 20th century: review and new findings in Spain. *Clim. Past*, 8, 1199-1212, doi:10.5194/cp-8-1199-2012.
- Sánchez-Lorenzo, A. *et al.*, 2013: Global and diffuse solar radiation in Spain: Building a homogeneous dataset and assessing their trends. *Global and Planetary Change*, 100, 343-352.
- Sánchez-Lorenzo, A. *et al.*, 2014: Evaporation trends in Spain: a comparison of Class A pan and Piché atmometer measurements. *Clim. Res.*, 61, 269-280.
- Serrano-Notivoli, R., 2017: Reconstrucción climática instrumental de la precipitación diaria en España. Ensayo metodológico y aplicaciones. Tesis doctoral, Univ. de Zaragoza.
- Štěpánek, P., 2008a: AnClim – software for time series analysis (for Windows 95/NT). Department of Geography, Faculty of Natural Sciences, MU, Brno, Czech Republic.
- Štěpánek, P., 2008b: ProClimDB – software for processing climatological datasets. CHMI, Regional Office: Brno, Czech Republic.
- Venema, V. *et al.*, 2012: Benchmarking homogenization algorithms for monthly data. *Clim. Past*, 8, 89-115.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno J., García-Vera, M. A., Štěpánek, P., 2010: A complete daily precipitation database for northeast Spain: reconstruction, quality control, and homogeneity. *Int. J. Climatol.*, 30, 1146-1163.



# Observaciones climáticas y reconstrucción instrumental. Desarrollo de productos climáticos interpolados de alta calidad

DOI: <https://doi.org/10.31978/639-18-002-5.04>

Sixto Herrera<sup>2</sup>, Juan Javier Miró Pérez<sup>4</sup>, Pere Quintana Seguí<sup>5</sup>, Julián Gonzalo<sup>6</sup>,  
José Antonio Ruiz-Arias<sup>7</sup>, José Carlos González-Hidalgo<sup>8</sup>,  
José Antonio Guijarro<sup>3</sup>, José Antonio López<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), España

<sup>2</sup> Grupo de Meteorología, Dpto. de Matemática Aplicada y Ciencias Computacionales,  
Universidad de Cantabria, España

<sup>3</sup> Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Delegación Territorial en Baleares, España

<sup>4</sup> Departament de Física de la Terra i Termodinàmica, Facultat de Física, Universitat de València, España

<sup>5</sup> Observatori de l'Ebre (OE), Universitat Ramon Llull – CSIC, Roquetes, España

<sup>6</sup> Grupo SECF Fitoclimatología y Cambio Climático, Instituto Universitario de Investigación en Gestión  
Forestal Sostenible – Universidad de Valladolid, Palencia, España

<sup>7</sup> Grupo de Modelización de la Atmósfera y Radiación Solar, Departamento de Física,  
y Centro de Estudios Avanzados en Energía y Medio Ambiente, Universidad de Jaén, España

<sup>8</sup> Dpto. de Geografía, Universidad de Zaragoza, España

## Introducción

Como ha sido reflejado por el Grupo de Trabajo 1 del IPCC (IPCC, 2013) en el 5.º Informe de Evaluación, las observaciones, las simulaciones con modelos y el análisis de los procesos de retroalimentación son la base para comprender y conocer el sistema climático. Con el objetivo de mejorar los datos observacionales de modo que resuelvan los requerimientos de las comunidades científica y de impactos, así como las necesidades de los responsables de las políticas de adaptación, se han desarrollado diferentes iniciativas internacionales para recolectar datos e información para los estudios climáticos (p. ej. Copernicus, previamente GMES: Global Monitoring for Environment and Security), y para proveer servicios climáticos (p. ej. Copernicus y GFCS: Global Framework for Climate Services). El principal objetivo de algunos de estos proyectos es preparar y generar información climática que englobe las necesidades de los usuarios (WMO, 2011). Dentro de estas iniciativas se han identificado un conjunto de Variables Climáticas Esenciales (ECV) (GCOS, 2010a; Bojinski et al. 2014), basadas en su relevancia para caracterizar el sistema climático y sus cambios, factibilidad y coste. También han sido generadas guías y prácticas de buen uso para obtener y dar soporte a la generación de bases de datos largas, trazables y de alta calidad de las ECV (GCOS, 2010b).

En este marco, varios proyectos han surgido en la última década para mejorar la cobertura temporal y espacial de las redes de observaciones (p. ej. proyectos EURO4M o UERRA), procesar las medidas obtenidas para aislar la señal climática (p. ej. Action Cost HOME o MeteoMet), desarrollar productos derivados (p. ej. datos interpolados en rejilla) adecuados para diferentes comunidades, e

incluirlas en los procesos de asimilación de los reanálisis (p. ej. proyecto UERRA). A pesar de la mejoría de las redes de observación y del desarrollo de bases de datos de gran calidad (véase Guijarro *et al.*, en este volumen, para más detalles), los productos interpolados de alta resolución basados en datos observacionales son cada vez más requeridos por las comunidades de impacto y de análisis climático. Varios productos han sido desarrollados dentro de las actividades de diferentes proyectos nacionales (p. ej. Portugal: Belo-Pereira *et al.*, 2011; Rumania: Birsan and Dumitrescu, 2014; Dumitrescu and Birsan, 2015; la región alpina: Isotta *et al.*, 2014; o Alemania: base de datos de precipitación HYRAS, Rauthe, 2013) o internacionales (p. ej. E-OBS, Haylock *et al.*, 2008; van den Besselaar *et al.*, 2011) aplicando diferentes métodos de interpolación a las observaciones.

Este trabajo describe los principales avances e iniciativas surgidas desde el anterior informe de CLIVAR-Spain sobre el desarrollo de productos climáticos interpolados, haciendo énfasis en aquellos estudios desarrollados para la península ibérica.

## Desarrollo de bases de datos en rejilla

Como se ha descrito en la sección anterior, las bases de datos observacionales de calidad alta constan habitualmente de un número limitado de series temporales distribuidas de forma heterogénea, con representatividad local y, en la mayoría de los casos, cubriendo diferentes periodos temporales. Sin embargo, bases de datos con diferentes propiedades son necesarias para diferentes propósitos, y algún posproceso es necesario para construir productos adecuados. Bases de datos de alta resolución construidas a partir

de bases de datos observacionales de alta calidad son demandadas por los analistas del clima y las comunidades de impacto, habiéndose desarrollado varios productos en los últimos años en respuesta a esta demanda (p. ej. E-OBS en Europa o MOPREDAS, MOTEDAS, SAFRAN o Spain02, entre otros, en España).

Debido a la alta variabilidad climática y la orografía compleja de la península ibérica, los productos internacionales disponibles (p. ej. E-OBS, WATCH o WFDEI) no son capaces de reproducir adecuadamente los diferentes regímenes climáticos de la península ibérica (Herrera *et al.*, 2012, 2015; Bedia *et al.*, 2013). Varias bases de datos regionales y nacionales han sido desarrolladas en la última década usando diferentes aproximaciones de acuerdo a las necesidades de las comunidades científica y de impacto, dando lugar a un amplio rango de productos que introduciremos en esta sección.

En lo que respecta a bases de datos de muy alta resolución, Niyerola *et al.* (2007) desarrollaron una base de datos con una resolución espacial de 200 m para la península ibérica de climatologías mensuales y anual de precipitación, radiación y temperaturas, que ha sido muy utilizada en el estudio de modelos de nicho ecológico y de distribución de especies. Por su parte, Gonzalo *et al.* (2010) generaron una base de datos similar para el desarrollo de un diagnóstico fitoclimático de la península ibérica, pero usando un método diferente de interpolación (cokriging) y otras variables explicativas, y alcanzando una resolución inferior (1 km).

A escala regional, Vicente-Serrano *et al.* (2003, 2007 y 2010) han desarrollado mapas climáticos mensuales de precipitación, temperaturas y niebla en el Valle del Ebro y Aragón con una resolución de 1 km considerando varios métodos de interpolación; Garzón-Machado *et al.* (2014) construyeron un mapa de vegetación potencial natural del climatófilo en la isla de La Palma (Canarias) a una resolución espacial de 25 m; Ruiz-Arias *et al.* (2011, 2015 y 2016) desarrollaron dos bases de datos interpoladas de radiación solar para Andalucía (1 km) y la España peninsular y las islas Baleares (10 km), usando esta última para validar la radiación solar reflejada por el modelo regional del clima WRF. Sin embargo, uno de los objetivos de la mayoría de estos estudios era la intercomparación de los métodos de interpolación y, en consecuencia, la mayoría de estas bases de datos no está disponible o lo está previo requerimiento a los autores.

A pesar de la alta resolución espacial de las bases de datos descritas, en multitud de ocasiones se requiere de series temporales de dato mensual (p. ej. para realizar análisis de tendencias), diario o incluso intradiario. En esta línea, González-Hidalgo *et al.* (2011 y 2015) desarrollaron bases de datos mensuales de precipitación (MOPREDAS) y temperaturas (MOTEDAS) cubriendo los periodos 1945-2005 y 1951-2010, respectivamente, para realizar análisis de tendencias, validación de modelos y regionalización estadística en la España peninsular. Ambas bases de datos tienen una resolución espacial de 0,1° y han sido construidas considerando una red muy densa de observaciones, con 2670 estaciones para precipitación y 1358 para temperatura, pertenecientes a la red de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

A escala diaria, Herrera *et al.* (2011, 2012 y 2016) desarrollaron un conjunto de bases de datos interpolados de alta resolución de precipitación y temperaturas (Spain02) para la España peninsular y las islas Baleares. Para ello consideraron 2756 estaciones de precipitación y 250 estaciones de temperatura incluidas en la red secundaria de AEMET cumpliendo diferentes criterios de calidad. En particular, la versión v2 (rejilla regular de 0,2° de resolución) es una base de datos interpolados con representatividad local, apropiada para análisis locales y de eventos extremos (Herrera *et al.*, 2012), mientras que la versión v4 incluye tres resoluciones diferentes coincidiendo con las rejillas definidas en el marco de Euro-CORDEX (0,11°, 0,22° y 0,44° en coordenadas rotadas). Esta versión contiene valores representativos del promedio areal (AA, promediados de una rejilla auxiliar de 0,01° de resolución espacial) en los productos AA-2D, AA-3D y AA-OK, siguiendo la notación definida en Herrera *et al.* (2016), siendo un producto apropiado para la validación de modelos regionales del clima (RCM). En esta versión también se incluyen productos con representatividad local (OK, Kriging Ordinario) equivalentes a los desarrollados en la v2. Como complemento a la v2, se desarrolló una versión v3 considerando un subconjunto de estaciones con series largas de precipitación con muy pocas lagunas (al menos 40 años con a lo sumo el 10% de datos perdidos por año), siendo adecuada para el análisis de tendencias en el periodo considerado. Las diferentes versiones de Spain02 se distribuyen públicamente para investigación a través del [portal de servicios climáticos de AEMET](http://portal.serviciosclimaticos.aemet.es). La versión v2 fue la base de datos de referencia en el desarrollo de los escenarios regionalizados de cambio climático en el marco del programa nacional PNACC-2012. Por otra parte, la versión v4 fue una de las bases de datos interpoladas nacionales consideradas en el marco de la iniciativa COST Action VALUE (<http://www.value-cost.eu/>), usadas para validar los modelos regionales del clima de Euro-CORDEX, la rama Europea de la iniciativa CORDEX (<http://cordex.org>), y analizar la incertidumbre observacional asociada a la base de datos de referencia considerada en la evaluación del modelo.

Como complemento a las bases de datos interpoladas de España, Belo-Pereira *et al.* (2011) desarrollaron una base de datos de precipitación para Portugal (PT02) usando 400 estaciones de calidad y considerando la misma técnica de interpolación y rejilla usada en la versión v2 de Spain02. Por lo tanto, ambas bases de datos pueden considerarse equivalentes en el periodo común, 1951-2003, siendo combinadas en estudios recientes para obtener una base de datos de la península ibérica, IB02, de precipitación diaria (Ramos *et al.*, 2016; Sousa *et al.*, 2016).

Recientemente, los trabajos realizados en Francia para desarrollar la base de datos de análisis SAFRAN (Durand *et al.*, 1993; 1999) han sido aplicados para la España peninsular y las islas Baleares (Quintana-Seguí *et al.*, 2016; 2017), obteniendo una base de datos interpolada de alta resolución espacial (5 km) y temporal (horaria) basada en precipitación diaria y temperatura, viento, humedad relativa y nubosidad 6-horarias. SAFRAN también incluye la radiación recibida modelada, tanto visible como infrarroja. De este modo, SAFRAN incluye todas las variables necesarias para forzar un modelo de superficie (LSM, por sus

siglas en inglés, Land-Surface Model) o cualquier otro modelo hidrológico basado en las citadas variables. La cobertura temporal abarca el periodo 1979-2014, y está disponible para investigación a través de la base de datos Mistrals-HyMex (Quintana-Seguí, 2015).

A escala regional, varias bases de datos diarias de alta resolución espacial (~ 1 km) han sido generadas en los últimos años dentro de proyectos regionales o necesidades y/o análisis específicos de diferentes grupos de investigación. Militino *et al.* (2015) definieron y validaron un método de interpolación espacio-temporal para obtener una rejilla de precipitación de 1 km de resolución cubriendo la región de Navarra. Dentro del proyecto regional «Escenarios Regionales Probabilísticos de Cambio Climático en Cantabria: Termopluviometría», Gutiérrez *et al.* (2010) desarrollaron un producto similar para Cantabria, incluyendo precipitación y temperatura, el cual fue utilizado en el marco del proyecto para desarrollar los escenarios regionales de cambio climático para la región aplicando técnicas de regionalización estadística. Por su parte, Miró Pérez *et al.* (2015) combinaron métodos de regionalización estadística e interpolación espacial para obtener una base de datos diaria de muy alta resolución de temperaturas máxima y mínima para la región de Valencia considerando alrededor de 300 estaciones de diferentes instituciones (AEMET, CEAM, SIAR e IIG) cubriendo el periodo 1948-2011. Esta base de datos es referida como SDSITVC en Miró *et al.* (2016), donde es propuesta como una herramienta para estimar el cambio bioclimático ocurrido en las áreas de montaña de la región.

### Resumen y conclusiones

En los últimos años se ha realizado un gran esfuerzo para mejorar la calidad de las herramientas y productos usados para analizar el sistema climático desde diferentes puntos de vista. En esta línea, varias iniciativas y proyectos se han propuesto y llevado a cabo con el objetivo de rescatar y digitalizar datos observacionales existentes, con especial atención a regiones con cobertura espacial y/o temporal insuficiente, y desarrollar herramientas y métodos adecuados para elaborar bases de datos de alta calidad para el análisis del clima.

En este marco, la comunidad climática española está involucrada en la mayoría de los proyectos e iniciativas actuales relacionadas con el desarrollo de herramientas y productos (p. ej., librería Climatol para el análisis y homogenización de datos, o las bases de datos interpoladas MOPREDAS, SAFRAN o Spain02), los cuales son utilizados por la comunidad internacional en gran variedad de estudios, y con la extensión de los métodos de asimilación de datos a nuevos modelos, variables y procesos.

En particular, como se ha reflejado en este artículo, varios productos en rejilla regionales y nacionales han sido desarrollados en los últimos años abarcando un gran número de aplicaciones, resoluciones, variables y periodos temporales. Sin embargo, el principal inconveniente a señalar es que la mayoría de estas bases de datos raramente se ponen a disposición de la comunidad científica, dando lugar a análisis redundantes/replicados en muchos casos, y limitando el impacto y los análisis realizados sobre dichas bases

de datos. Por otro lado, no existe actualmente un análisis de intercomparación adecuado entre las diferentes bases de datos desarrolladas. Finalmente, los cambios en la política de distribución de datos de la Agencia Estatal de Meteorología, junto con los avances y desarrollo en las herramientas de análisis de datos permite la publicación futura de nuevos y actualizados productos interpolados para el análisis climático.

### Referencias

Bedia, J., Herrera, S., Gutiérrez, J. M., 2013: Dangers of using global bioclimatic datasets for ecological niche modeling. Limitations for future climate projections, *Global and Planetary Change*, 107, 1-12, doi: 10.1016/j.gloplacha.2013.04.005.

Belo-Pereira, M., Dutra, E. and Viterbo, P., 2011: Evaluation of global precipitation data sets over the Iberian Peninsula, *J. Geophys. Res.*, 116, D20101, doi:10.1029/2010JD015481.

Birsan, M. V., Dumitrescu, A., 2014: ROCADA: Romanian daily gridded climatic dataset (1961-2013) V1.0. Administratia Nationala de Meteorologie, Bucuresti, Romania, doi:10.1594/PANGAEA.833627.

Bojinski, S., Verstraete, M., Peterson, T. C., Richter, C., Simmons, A., Zemp, M., 2014: The concept of essential climate variables in support of climate research, applications, and policy. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95, 1431-1443, doi:10.1175/BAMS-D-13-00047.1.

Dumitrescu, A., Birsan, M. V., 2015: ROCADA: a gridded daily climatic dataset over Romania (1961-2013) for nine meteorological variables. *Natural Hazards*, 78 (2), 1045-1063, doi:10.1007/s11069-015-1757-z.

Durand, Y., Brun, E., Merindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B., Martin, E., 1993: A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, *Ann. Glaciol.*, 18, 65-71.

Durand, Y., Giraud, G., Brun, E., Merindol, L., Martin, E., 1999: A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting, *J. Glaciol.*, 45 (151), 469-484.

Garzón-Machado, V., Otto, R., del Arco Aguilar, M. J., 2014: Bioclimatic and vegetation mapping of a topographically complex oceanic island applying different interpolation techniques, *Int. J. Biometeorol.*, 58, 887-899, doi: DOI 10.1007/s00484-013-0670-y.

GCOS, 2010a: Implementation plan for the global observing system for climate in support of the UNFCCC (2010 update). GCOS Rep. 138, 186 pp. Disponible en línea en: [www.wmo.int/pages/prog/gcos/Publications/gcos-138.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/Publications/gcos-138.pdf).

GCOS, 2010b: Guideline for the generation of datasets and products meeting GCOS requirements. GCOS Rep. 143, 12 pp. Disponible en línea en: [www.wmo.int/pages/prog/gcos/Publications/gcos-143.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/Publications/gcos-143.pdf).



- Gonzalo, J., 2010: Diagnósis Fitoclimática de la España Peninsular. Hacia un modelo de clasificación funcional de la vegetación y de los ecosistemas peninsulares españoles. Organismo Autónomo de Parques Nacionales-Botánica General, ISBN: 978-84-8014-787-3.
- González-Hidalgo, J. C., Brunetti, M., de Luis, M., 2011: A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (monthly precipitation trends December 1945-November 2005). *Int. J. Climatol.*, 31, 715-731. doi:10.1002/joc.2115.
- González-Hidalgo, J. C., Peña-Angulo, D., Brunetti, M., Cortesi, N., 2015: MOTEDAS: a new monthly temperature database for mainland Spain and the trend in temperature (1951-2010). *Int. J. Climatol.*, 35, 4444-4463. doi:10.1002/joc.4298.
- Guijarro, J. A., Herrera, S., 2017: Climatic observations and instrumental reconstructions I: development of high-quality climatic time series.
- Gutiérrez, J. M., Herrera, S., San-Martín, D., Sordo, C., Rodríguez, J. J., Frochoso, M., Ancell, R., Fernández, J., Cofiño, A. S., Pons, M. R., Rodríguez, M. A., 2010: Escenarios Regionales Probabilísticos de cambio climático en Cantabria: Termoplumiometría, Gobierno de Cantabria-Consejería de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria, Santander, España.
- Haylock, M. R., Hofstra, N., Klein Tank, A. M. G., Klok, E. J., Jones, P. D., New, M., 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res. (Atmospheres)*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201.
- Herrera, S., 2011: Desarrollo, validación y aplicaciones de Spain02: Una rejilla de alta resolución de observaciones interpoladas para precipitación y temperatura en España. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria, Cantabria, Spain. <http://www.meteo.unican.es/tesis/herrera>.
- 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, 74-85, doi: 10.1002/joc.2256.
- Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J. M., 2016: Update of the Spain02 Gridded Observational Dataset for Euro-CORDEX evaluation: Assessing the Effect of the Interpolation Methodology, *Int. J. Climatol.*, 36, 900-908, doi: 10.1002/joc.4391.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Isotta, F. A., Frei, C., Weilguni, V., Perèc Tadià, M., Lassègues, P., Rudolf, B., Pavan, V., Cacciamani, C., Antolini, G., Ratto, S. M., Munari, M., Micheletti, S., Bonati, V., Lussana, C., Ronchi, C., Panettieri, E., Marigo, G., Vertaènik, G., 2014: The climate of daily precipitation in the Alps: development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data. *Int. J. Climatol.*, 34, 1657-1675. doi:10.1002/joc.3794.
- Militino, A. F., Ugarte, M. D., Goicoa, T., Genton, M., 2015: Interpolation of daily rainfall using spatiotemporal models and clustering, *International Journal of Climatology*, 35, 1453-1464, doi:10.1002/joc.4068.
- Miró Pérez, J. J., Estrela Navarro, M. J., Olcina-Cantos, J., 2015: Statistical downscaling and attribution of air temperature change patterns in the Valencia region (1948-2011), *Atmospheric Research*, 156, 189-212.
- Miró Pérez, J. J., Estrela Navarro, M. J., Caselles, V., Olcina-Cantos, J., 2016: Fine-scale estimations of bioclimatic change in the Valencia region, Spain. *Atmospheric Research*, 180, 150-164. doi:10.1016/j.atmosres.2016.05.020.
- Ninyerola, M., Pons, X., Roure, J. M., 2007: Monthly precipitation mapping of the Iberian Peninsula using spatial interpolation tools implemented in a Geographic Information System. *Theoretical and Applied Climatology*, 89, 195-209.
- Pérez, F. F., Boscolo, R., 2010: Climate in Spain: past, present and future. Regional climate change assessment report. Spanish CLIVAR Committee / Thematic network. [http://www.clivar.org/sites/default/files/documents/CLIVAR\\_Spain\\_2010\\_0.pdf](http://www.clivar.org/sites/default/files/documents/CLIVAR_Spain_2010_0.pdf).
- Quintana-Seguí, P., 2015: SAFRAN analysis over Spain, doi:10.14768/MISTRALS-HYMEX.1388.
- Quintana-Seguí, P., Peral, C., Turco, M., Llasat, M. C. and Martín, E., 2016: Meteorological Analysis Systems in North-East Spain: Validation of SAFRAN and SPAN, *Journal of Environmental Informatics*, 27 (2), 116-130, doi:10.3808/jei.201600335.
- Quintana-Seguí, P., Turco, M., Herrera, S., Miguez-Macho, G., 2017: Validation of a new SAFRAN-based gridded precipitation product for Spain and comparison to Spain02 and ERA-Interim. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 2187-2201, doi: 10.5194/hess-21-2187-2017.
- Ramos, A. M., Trigo, R. M. and Liberato, M. L. R., 2017, Ranking of multi-day extreme precipitation events over the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.*, 37, 607-620. doi:10.1002/joc.4726.
- Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A., Gratzki, A., 2013: A Central European precipitation climatology Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS), *Meteorologische Zeitschrift*, 22 (3), 235-256, doi: 10.1127/0941-2948/2013/0436.
- Ruiz-Arias, J. A., Pozo-Vázquez, D., Santos-Alamillos, F. J., Lara-Fanego, V., Tovar-Pescador, J., 2011: A topographic geostatistical approach for mapping monthly mean

values of daily global solar radiation: A case study in southern Spain, *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1812-1822.

Ruiz-Arias, J. A., Quesada-Ruiz, S., Fernández, E. F., Gueymard, A., 2015: Optimal combination of gridded and ground-observed solar radiation data for regional solar resource assessment, *Solar Energy*, 112, 411-424.

Ruiz-Arias, J. A., Arbizu-Barrena, C., Santos-Alamillos, F. J., Tovar-Pescador, J., Pozo-Vázquez, D., 2016: Assessing the surface solar radiation budget in the WRF Model: a spatiotemporal analysis of the bias and its causes, *Monthly Weather Review*, 144, 703-711.

Sousa, P. M., Barriopedro, D., Trigo, R. M., Ramos, A. M., Nieto, R., Gimeno, L., Turkman, K. F., Liberato, M. L. R., Impact of Euro-Atlantic blocking patterns in Iberia precipitation using a novel high resolution dataset, *Climate Dynamics*, 2016, 46, 7-8, 2573.

Van den Besselaar, E. J. M., Haylock, M. R., van der Schrier, G., Klein Tank, A. M. G., 2011: A European Daily High-resolution Observational Gridded Data set of Sea

Level Pressure. *J. Geophys. Res.*, 116, D11110, doi:10.1029/2010JD015468.

Vicente-Serrano, S. M., Saz-Sánchez, M. A., Cuadrat, J. M., 2003: Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature, *Climate Research*, 24 (2), 161-180, doi: 10.3354/cr024161.

Vicente-Serrano, S. M., Lanjeri, S., López-Moreno, J. I., 2007: Comparison of different procedures to map reference evapotranspiration using geographical information systems and regression-based techniques. *Int. J. Climatol.*, 27, 1103-1118. doi:10.1002/joc.1460.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., García-Vera, M. A., Štěpánek, P., 2010: A complete daily precipitation database for northeast Spain: reconstruction, quality control, and homogeneity. *Int. J. Climatol.*, 30, 1146-1163. doi:10.1002/joc.1850.

WMO, 2011: World Meteorological Organization, 2011: Guide to Climatological Practices, WMO-No. 100, ISBN 978-92-63-10100-6, Geneva.

Sergio M. Vicente Serrano<sup>1</sup> y Ernesto Rodríguez Camino<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), Zaragoza, España

<sup>2</sup> Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), España

## Estado de la cuestión

Bladé y Castro-Díez (2010) proporcionaron una revisión exhaustiva sobre las tendencias climáticas en la península ibérica durante el periodo instrumental, poniendo el foco fundamentalmente en la precipitación y la temperatura del aire. De acuerdo a dicha revisión, en España se produjo un aumento general de la temperatura del aire durante el siglo XX que fue más pronunciado durante las últimas décadas del siglo. Este proceso es consistente con lo observado en otras regiones de Europa. La revisión de Bladé y Castro-Díez indicó una fuerte variabilidad espacial, estacional e interanual de la precipitación en España, con una tendencia general negativa entre 1960 y 2010. Sin embargo, dicho estudio no incluyó información sobre la variabilidad y los cambios observados en otras variables atmosféricas esenciales (por ejemplo, la humedad relativa, la velocidad del viento, la sequía y la demanda de agua por parte de la atmósfera). Vicente-Serrano *et al.* (2017) publicaron una revisión actualizada de los últimos artículos publicados en revistas internacionales, mostrando los cambios en la temperatura y la precipitación, pero también en la radiación solar, la velocidad del viento de superficie, la humedad superficial y la evapotranspiración. Esta sección presenta un resumen de dicho estudio.

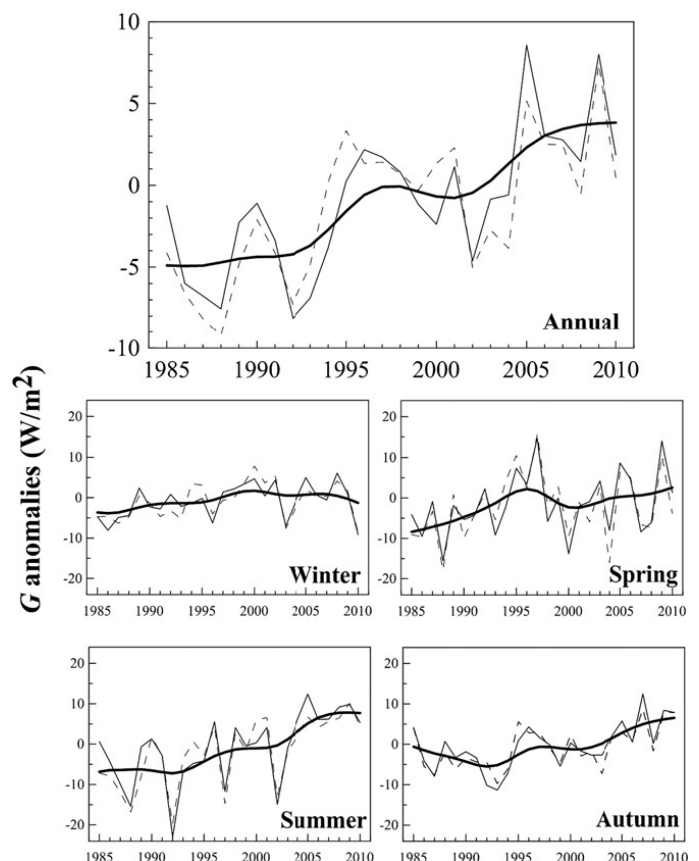
## Cambios en la radiación solar

Sánchez-Lorenzo *et al.* (2013) mostraron una tendencia ascendente significativa entre 1985 y 2010 del orden de  $3,9 \text{ W m}^{-2} \text{ década}^{-1}$ . Aumentos similares, igualmente significativos se observaron en las series estacionales medias, con la mayor tasa de aumento durante el verano ( $6,5 \text{ W m}^{-2} \text{ década}^{-1}$ ) (Figura 1). Mateos *et al.* (2014) cuantificaron la contribución de la nubosidad y de los aerosoles en el proceso, indicando que la nubosidad es el factor clave, explicando aproximadamente el 75 % de los cambios en la radiación solar.

## Cambio en la temperatura del aire

Del Río *et al.* (2011) analizaron la evolución de la temperatura media del aire utilizando 473 estaciones meteorológicas entre 1961 y 2006. Estos autores mostraron tendencias positivas dominantes, principalmente en los meses de primavera y verano, sugiriendo un aumento anual entre  $0,1$  y  $0,2 \text{ °C década}^{-1}$ , estadísticamente significativo en toda la España peninsular. Del Río *et al.* (2012) analizaron la evolución de las temperaturas máximas y mínimas para el mismo periodo y encontraron una tasa de aumento idéntica ( $0,3 \text{ °C década}^{-1}$ ), particularmente en los meses de verano y primavera. El promedio de aumento en la temperatura

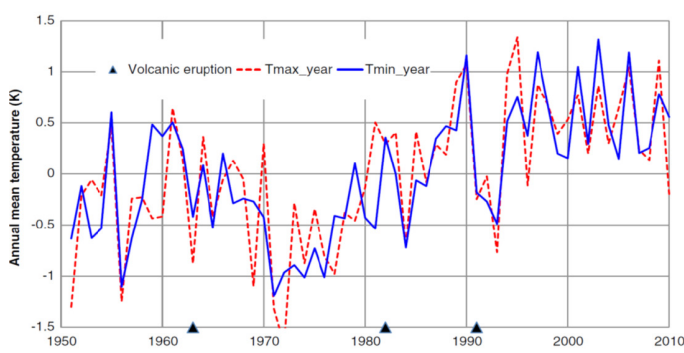
máxima fue de  $0,37 \text{ °C}$  y  $0,43 \text{ °C década}^{-1}$  durante el verano y la primavera, respectivamente. Para la temperatura mínima, la tasa de calentamiento fue de  $0,34 \text{ °C}$  (verano) y  $0,41 \text{ °C década}^{-1}$  (primavera). González-Hidalgo *et al.* (2015a y 2015b) mostraron que la temperatura máxima ha aumentado a finales de invierno y principio de primavera y verano, mientras que la temperatura mínima ha aumentado en verano, primavera y otoño, especialmente en las regiones del sur de España. Además, mostraron que las tendencias en el rango de temperatura diaria tenían un claro gradiente norte-sur durante el verano, con tendencias positivas en el



**Figura 1.** Series medias estacionales y anuales de radiación solar global (línea fina) entre 1985 y 2010. La línea gruesa muestra un filtro gaussiano de 13 años. Las series se expresan en forma de anomalías respecto a la media de 1991-2010. Las líneas discontinuas muestran la radiación media en las cinco series que miden radiación difusa en España. (Fuente: Sánchez-Lorenzo *et al.*, 2013).



norte y tendencias negativas en el sur. La señal general en la temperatura máxima mostró una tendencia positiva en más del 75 % de la superficie peninsular, y la señal más fuerte se detectó en junio, mes en el que el 87 % de la superficie exhibió una tendencia positiva estadísticamente significativa (Figura 2).



**Figura 2.** Media anual de las temperaturas máximas y mínimas (1951-2010). Los valores se expresan en anomalías respecto al periodo 1950-2010. (Fuente: González-Hidalgo *et al.*, 2015b).

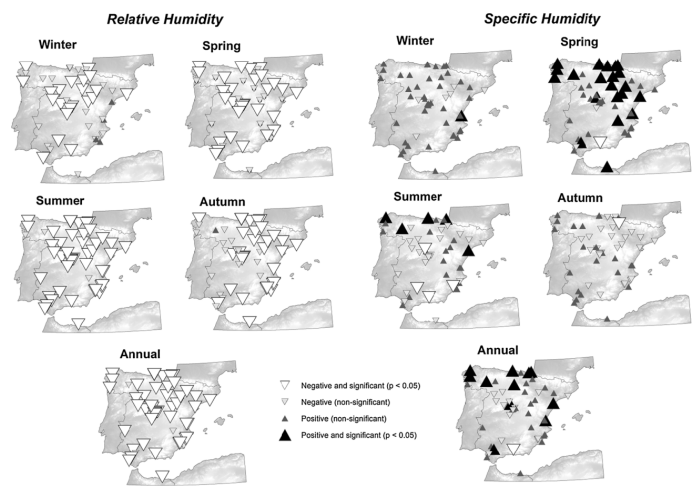
En cuanto a los cambios en las temperaturas diarias, Rodríguez-Puebla *et al.* (2010) analizaron los cambios en la frecuencia de días cálidos y noches frías, indicando que los días cálidos aumentaron en promedio un 1,1 % década<sup>-1</sup>, mientras que las noches frías exhibieron una disminución del orden de 1,3 % década<sup>-1</sup>. El aumento en la frecuencia de días con temperaturas cálidas extremas ha sido continuo durante las últimas dos décadas. Sánchez-Lorenzo *et al.* (2012) confirmaron que la frecuencia promedio de noches tropicales mostró un aumento continuo desde el comienzo de la década de 1970, registrándose los valores más extremos durante la década de 2000.

### Cambios en los vientos de superficie

Azorín-Molina *et al.* (2014) mostraron una tendencia ligeramente descendente en la velocidad del viento durante el periodo 1961-2011 ( $-0,016 \text{ m s}^{-1} \text{ década}^{-1}$ ). Sin embargo, encontraron diferencias estacionales, con una tendencia decreciente en invierno y primavera y una tendencia creciente en verano y otoño. En España, el descenso en la velocidad del viento afectó a casi el 77,8 % de las estaciones meteorológicas analizadas en invierno y al 66,7 % en primavera. No obstante, aproximadamente el 40 % de las tendencias negativas fueron estadísticamente significativas. Por el contrario, la tendencia creciente se observó en el 51,9 % de las estaciones en verano y en el 57,4 % en otoño.

### Cambios en la humedad atmosférica

Vicente-Serrano *et al.* (2014) mostraron una notable disminución de la humedad relativa en la España continental desde 1961 hasta 2011, más pronunciada en primavera y verano ( $-1,02 \%$  y  $-1,56 \%$  década<sup>-1</sup>, respectivamente). En promedio, la disminución fue del orden de  $-5,1 \%$  a escala anual entre 1961 y 2011. Por el contrario, no se registraron cambios generales en la humedad específica durante el mismo periodo, excepto en primavera (Figura 3).



**Figura 3.** Distribución espacial en las tendencias estacionales y anuales de la humedad relativa y específica (1961-2011). (Fuente: Vicente-Serrano *et al.*, 2014).

### Cambios en la precipitación

González-Hidalgo *et al.* (2011) mostraron una alta variabilidad mensual en las tendencias de precipitación, con patrones coherentes en marzo y junio (ambos meses con una tendencia negativa generalizada y estadísticamente significativa) y octubre (tendencias positivas generalizadas). También se señalaron patrones de tendencia más localizados espacialmente en julio, febrero y abril. Del Río *et al.* (2011b) indicaron una disminución de las precipitaciones en más del 28 % del territorio español durante el verano y el invierno entre 1961 y 2006. Aunque los patrones regionales de cambios en las precipitaciones son complejos, las series regionales en toda España mostraron una disminución de la precipitación en invierno y a escala anual (Rodríguez-Puebla y Nieto, 2010; Vicente-Serrano *et al.*, 2014). Gallego *et al.* (2011) analizaron las tendencias en los índices de frecuencia de precipitación diaria durante el último siglo (1903-2003), utilizando datos de 27 estaciones en Portugal y España. Estos autores mostraron que la frecuencia en el número total de días que registraron una precipitación escasa aumentó en muchos observatorios de la península ibérica durante todas las estaciones del año.

Acero *et al.* (2011) utilizaron un enfoque diferente, analizando la frecuencia de valores sobre un determinado umbral, y mostrando que para un periodo de retorno de 2 años se observa una gran proporción de tendencias negativas para las diferentes estaciones del año: 58 % en invierno, 63 % en primavera y 69 % en otoño. Sin embargo, el enfoque paramétrico también reveló un aumento en el área con tendencias positivas correspondientes a un periodo de retorno de 20 años. Estos resultados podrían indicar un cierto aumento en la frecuencia de eventos de precipitación intensa. Por el contrario, Rodrigo (2010) mostró que la tendencia en la probabilidad de ocurrencia de eventos de precipitación diaria inferiores al percentil 5 es positiva. Por el contrario, la probabilidad de una precipitación diaria superior al percentil 95 es negativa, lo que sugiere una disminución de la intensidad de la lluvia durante este periodo.

## La demanda de agua por parte de la atmósfera

Vicente-Serrano *et al.* (2014b) mostraron un fuerte aumento (24,4 mm década<sup>-1</sup>) en la magnitud de la demanda de agua atmosférica a escala anual, principalmente durante el verano (12 mm década<sup>-1</sup>). Este aumento se explica principalmente por la disminución en la humedad relativa y el aumento de la temperatura máxima.

## Observaciones finales

Aunque las tendencias climáticas recientes observadas en España están determinadas por los datos utilizados y principalmente por los periodos seleccionados en los análisis, es posible extraer algunas observaciones generales para las diferentes variables:

- 1) Existe un fuerte aumento de la radiación solar desde la década de 1980;
- 2) la temperatura mostró un fuerte aumento (alrededor de +0,3 °C década<sup>-1</sup>) desde la década de 1960, más fuerte en los meses de verano;
- 3) no hay cambios notables en la velocidad del viento de superficie; se ha registrado una ligera tendencia descendente pero no es estadísticamente significativa;
- 4) se registra una fuerte disminución de la humedad relativa (-5 % entre 1961 y 2011); por el contrario, no se identifican cambios notables en la humedad específica;
- 5) existe una fuerte variabilidad espacial y estacional en las tendencias de precipitación, aunque la precipitación media anual en España mostró una disminución moderada en las últimas cinco décadas;
- 6) la demanda evaporativa aumentó en las últimas cinco décadas (+24,4 mm década<sup>-1</sup>), principalmente en los meses de verano; en general, las recientes tendencias climáticas observadas en España sugieren claramente un escenario más cálido y seco en comparación con décadas pasadas; este hallazgo es compatible con las observaciones en otras áreas del Mediterráneo, donde se registra una tendencia hacia un escenario climático caracterizado por una menor disponibilidad de agua (García-Ruiz *et al.*, 2011).

## Referencias

Acero, F. J., García, J. A., Gallego, M. C., 2011: Peaks-over-threshold study of trends in extreme rainfall over the Iberian Peninsula. *Journal of Climate*, 24, 1089-1105. doi: 10.1175/2010JCLI3627.1.

Azorín-Molina, C., Vicente-Serrano, S. M., Mcvicar, T. R., Jerez, S., Sánchez-Lorenzo, A., López-Moreno, J.-I., Revuelto, J., Trigo, R. M., Lopez-Bustins, J. A., Espírito-Santo, F., 2014: Homogenization and assessment of observed near-surface wind speed trends over Spain and Portugal, 1961-2011. *Journal of Climate*, 27, 3692-3712. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00652.1.

Bladé I., Castro Díez, Y., 2010: Tendencias atmosféricas en la Península Ibérica durante el periodo instrumental en el contexto de la variabilidad natural. En: Clima en España: pasado, presente y futuro (Pérez F. Fiz y Boscolo Roberta, eds.), 25-42 pp.

Del Río, S., Herrero, L., Pinto-Gomes, C., Penas, A., 2011: Spatial analysis of mean temperature trends in Spain over the period 1961-2006. *Global and Planetary Change*, 78, 65-75. doi: 10.1016/j.gloplacha.2011.05.012.

Del Río, S., Herrero, L., Fraile, R., Penas, A., 2011b: Spatial distribution of recent rainfall trends in Spain (1961-2006). *International Journal of Climatology*, 31, 656-667. doi: 10.1002/joc.2111.

Del Río, S., Cano-Ortiz, A., Herrero, L., Penas, A., 2012: Recent trends in mean maximum and minimum air temperatures over Spain (1961-2006). *Theoretical and Applied Climatology*, 109, 605-626. doi: 10.1007/s00704-012-0593-2.

Gallego, M. C., Trigo, R. M., Vaquero, J. M., Brunet, M., García, J. A., Sigró, J., Valente, M. A., 2011: Trends in frequency indices of daily precipitation over the Iberian Peninsula during the last century. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116, D02109, 28. doi: 10.1029/2010JD014255.

García-Ruiz, J. M., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Lasanta, T., Beguería, S., 2011: Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth Sciences Review*, 105, 121-139. doi: 10.1016/j.earscirev.2011.01.006.

González-Hidalgo, J. C., Brunetti, M., de Luis, M., 2011: A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (monthly precipitation trends December 1945-November 2005). *International Journal of Climatology*, 31, 715-731. doi: 10.1002/joc.2115.

González-Hidalgo, J. C., Peña-Angulo, D., Brunetti, M., Cortesi, N., 2015: MOTEDAS: a new monthly temperature database of Spanish continental land and the temperature trend between 1951-2010. *International Journal of Climatology*, 35, 4444-4463. doi: 10.1002/joc.4298.

González-Hidalgo, J. C., Peña-Angulo, D., Brunetti, M., Cortesi, N., 2015b: Recent trend in temperature evolution in Spanish mainland (1951-2010): from warming to hiatus. *Int. J. Climatol.* doi: 10.1002/joc.4519.

Mateos, D., Sánchez-Lorenzo, A., Antón, M., Cachorro, V. E., Calbó, J., Costa, M. J., Torres, B., Wild, M., 2014: Quantifying the respective roles of aerosols and clouds in the strong brightening since the early 2000s over the Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 119, 10382-10393. doi: 10.1002/2014JD022076.

Rodrigo, F. S., 2010: Changes in the probability of extreme daily precipitation observed from 1951 to 2002 in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 30, 1512-1525. doi: 10.1002/joc.1987.

Rodríguez-Puebla, C., Encinas, A. H., García-Casado, L. A., Nieto, S., 2010: Trends in warm days and cold nights over the Iberian Peninsula: Relationships to large-scale variables. *Climatic Change*, 100, 667-684. doi: 10.1007/s10584-009-9721-0.

Rodríguez-Puebla, C., Nieto, S., 2010: Trends of precipitation over the Iberian Peninsula and the North Atlantic Oscillation under climate change conditions. *International Journal of Climatology*, 30, 1807-1815. doi: 10.1002/joc.2035.

Sánchez-Lorenzo, A., Pereira, P., Lopez-Bustins, J. A., Lolis, C. J., 2012: Summer night-time temperature trends on the Iberian Peninsula and their connection with large-scale atmospheric circulation patterns. *International Journal of Climatology*, 32, 1326-1335. doi: 10.1002/joc.2354.

Sánchez-Lorenzo, A., Calbó, J., Wild, M., 2013. Global and diffuse solar radiation in Spain: Building a homogeneous dataset and assessing their trends. *Global and Planetary Change*, 100, 343-352. doi: 10.1016/j.gloplacha.2012.11.010.

Vicente-Serrano, S. M., Azorín-Molina, C., Sánchez-Lorenzo, A., Morán-Tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., Revuelto, J., López-Moreno, J. I., Espejo, F., 2014: Temporal evolution of surface humidity in Spain: recent trends and possible physical

mechanisms. *Climate Dynamics*, 42, 2655-2674. doi: 10.1007/s00382-013-1885-7.

Vicente-Serrano, S. M., Azorín-Molina, C., Sánchez-Lorenzo, A., Revuelto, J., López-Moreno, J. I., González-Hidalgo, J. C., Morán-Tejeda, E., Espejo, F. 2014b: Reference evapotranspiration variability and trends in Spain, 1961-2011. *Global and Planetary Change*, 121, 26-40. doi: 10.1016/j.gloplacha.2014.06.005.

Vicente-Serrano, S. M., Rodríguez-Camino, E., Domínguez-Castro, F., El Kenawy, A., Azorín-Molina, C., 2017: An updated review on recent trends in observational surface atmospheric variables and their extremes over Spain. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 49, 209-232.



Belén Rodríguez-Fonseca<sup>1,2</sup>, María Jesús Casado<sup>3</sup>, David Barriopedro<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Facultad de Físicas,  
Universidad Complutense de Madrid (UCM), España

<sup>2</sup> Instituto de Geociencias (IGEO), UCM, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España

<sup>3</sup> Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Madrid, España

## Introducción

Las variaciones en la circulación atmosférica pueden resultar de cambios en los forzamientos externos pero también de forma natural a partir de interacciones internas entre componentes del sistema climático. Una inspección más detallada de la variabilidad atmosférica en escalas estacionales o mayores muestra que esta ocurre predominantemente organizada en estructuras espaciales preferentes conocidas como «Patrones de Teleconexión» (PT). Los PT pueden variar en intensidad y posición en escalas estacionales, interanuales y decadales (Wallace and Gutzler, 1981; Trenberth *et al.*, 1998; Quadrelli and Wallace, 2004). Los PT surgen de procesos ondulatorios, reflejando anomalías en el flujo medio, y conexiones con otros componentes del sistema climático, especialmente el océano (Liu and Alexander, 2007). Los PT están relacionados con tipos de circulación a escala diaria (Casado *et al.*, 2008) y tienen un impacto en otras variables atmosféricas como la temperatura y la precipitación. Por lo general, reflejan anomalías de centros de acción o sistemas de circulación climatológicos regionales.

Así, los PT que afectan al suroeste (SO) de Europa y, en particular, a la península ibérica, se relacionan con cambios interanuales en el sistema de presión anticiclónico de Azores. Desde un punto de vista climatológico, este anticiclón subtropical exhibe desplazamientos meridionales a lo largo del ciclo estacional, induciendo cambios en las condiciones medias climáticas de la región.

El PT más importante afectando al SO de Europa es la Oscilación del Atlántico Norte (NAO; Trigo *et al.*, 2002), que se asocia con cambios en el gradiente meridional entre los sistemas de baja presión subpolar y el anticiclón de Azores. La NAO explica una gran parte de la variabilidad de la precipitación en Europa, principalmente en invierno, de modo que las fases positivas de esta oscilación están asociadas con un aumento de la precipitación sobre el norte de Europa y una disminución hacia el SO del continente. La NAO afecta a los patrones de temperatura en superficie, vientos y otras variables con impactos en la sociedad. Aparte de la NAO, otros PT que afectan al clima de Europa son el patrón del Este Atlántico y el Oeste de Rusia, (EA/WR), el del Este Atlántico (EA) y el de Escandinavia (SCAND) (García-Herrera and Barriopedro, 2018).

La circulación atmosférica responde a otros componentes del sistema climático a través de la excitación de ondas de Rossby e interacción entre el flujo medio y las perturbaciones de origen sinóptico, que pueden resultar en patrones regionales de teleconexión (Liu and Alexander, 2007). Dada la gran capacidad calorífica del agua comparada con la de la atmósfera, la subsuperficie oceánica puede almacenar energía por varios meses y liberarla más tarde como flujo de calor sensible y latente que, a su vez, puede alterar la circulación global de la atmósfera, generando de este modo, patrones o vías de teleconexión. La temperatura de la superficie del mar es una variable que se asocia a la cantidad de energía que puede liberarse. Esta es la base de la predicción estacional a decadal (s2d). En particular, El Niño es el modo de variabilidad natural en escala global que determina la mayor parte de la variabilidad global año a año, incluyendo su impacto en el suroeste de Europa (Brönnimann *et al.*, 2007). Su homólogo atlántico, con dinámica similar, es el llamado Niño Atlántico, siendo la mayor fuente de variabilidad tropical en el Atlántico en escalas interanuales (Polo *et al.*, 2008). Los Niños del Atlántico y del Pacífico no pueden considerarse como modos independientes de variabilidad (Rodríguez-Fonseca *et al.*, 2009; Martín-Rey *et al.*, 2014; Martín-Rey *et al.*, 2015; Polo *et al.*, 2015). Además, la variabilidad del Atlántico Norte Tropical (TNA) no puede ser aislada de la variabilidad de ENSO (García-Serrano *et al.*, 2017) y tiene una influencia significativa en la circulación atmosférica del sector euro-atlántico y, en particular, en la península ibérica tanto a principios de invierno como en primavera (Rodríguez-Fonseca *et al.*, 2006).

Generalmente, los modelos climáticos son capaces de simular los modos de variabilidad, siendo herramientas muy útiles para entender sus cambios futuros (Müller and Roeckner, 2008; Handorf and Dethloff, 2009). El informe más reciente del IPCC incluye un capítulo dedicado al análisis de los fenómenos climáticos, en particular los principales modos de variabilidad y de su relación con el clima regional actual y futuro (IPCC, AR5, Christensen *et al.*, 2013).

En el anterior informe de CLIVAR-ES, Rodríguez-Fonseca and Rodríguez-Puebla (2010) revisaron los estudios sobre los PT que afectan a la península ibérica, incluyendo su

posible predictibilidad, con especial énfasis en la NAO y sus interacciones con el océano. Desde entonces, se ha hecho un gran progreso en el desarrollo de herramientas de predicción subestacional a estacional y de estacional a decadal (s2s y s2d, Vitart *et al.*, 2012). Los resultados del *Climate system Historical Forecasting Project* (CHFP; Tompkins *et al.*, 2017) y del *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5), junto con la activa investigación en comunidades operacionales y de investigación, han mejorado y permitirán incrementar nuestra capacidad de hacer predicciones y proyecciones cada vez más fiables en la región. El siguiente resumen intenta recolectar el mayor número posible de trabajos realizados desde 2010 en relación con los PT, incluyendo aspectos de variabilidad interna y forzada, predictibilidad a diferentes escalas y proyecciones futuras.

### **Patrones que afectan a la variabilidad atmosférica del suroeste de Europa y precursores potenciales**

Estudios recientes han relacionado la NAO con la precipitación de invierno, los vientos y la temperatura, incluyendo extremos sobre el oeste del Mediterráneo (Vicente-Serrano *et al.*, 2009; Lorenzo *et al.*, 2008; Jerez *et al.*, 2013; Casanueva *et al.*, 2014; Vicente-Serrano *et al.*, 2009; Lorenzo *et al.*, 2008). Además, durante el invierno, la fase positiva de la NAO podría actuar como precursora de las ciclogénesis explosivas que afectan a Europa (Gómara *et al.*, 2014).

Trabajos recientes sugieren combinaciones de la NAO con otros PT, como el patrón SCAND y EA, para explicar la variabilidad climática del SO de Europa (Comas-Bru and MacDermott, 2014). Desde una perspectiva más regional, patrones como la Oscilación del Mediterráneo (MO) y la Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO) (Martin Vide and López-Bustins, 2006; Vicente-Serrano *et al.*, 2009; Lana *et al.*, 2016) son también importantes a la hora de describir la variabilidad atmosférica de la región. Junto con la NAO, el índice del oeste (Barriopedro *et al.*, 2014), que proporciona una medida de la persistencia de vientos del oeste sobre el Canal de la Mancha es capaz de explicar gran parte de la variabilidad de las sequías en Europa (Vicente-Serrano *et al.*, 2016).

En otras estaciones distintas del invierno, la NAO presenta una estructura mucho menos zonal debido al debilitamiento del chorro extratropical, apareciendo otros PT dominantes de la variabilidad climática en Europa (García-Herrera and Barriopedro, 2018). Así, en otoño, los patrones atmosféricos globales proyectan mejor en un PT tipo EA, cuya estructura e impactos asociados dependen del flujo medio atmosférico, experimentando oscilaciones de baja frecuencia. Así, su estructura anular se ha intensificado en las últimas décadas, mientras que en las décadas anteriores exhibió un patrón de onda-4 (número de onda 4) (King *et al.*, 2017). En comparación con la NAO de invierno, el modo dominante de variabilidad en verano (julio-agosto), también conocido como NAO de verano (Summer NAO, SNAO), es más regional y está desplazado hacia el norte. A diferencia de la NAO de invierno, su impacto es mayor en las temperaturas máximas de la península ibérica (Favà *et al.*, 2016).

Hay una clara relación no estacionaria entre la NAO de invierno y la precipitación en Europa (Hertig *et al.*, 2015). Existen diversas hipótesis que la justifican, incluyendo modificaciones en los gradientes meridionales de presión (Zveryaev, 2006), interacciones aire-océano en el Atlántico Norte y en la Circulación Meridional Profunda en el Atlántico (AMOC) (Walter and Graf, 2002; Gómara *et al.*, 2016), pero también en la actividad solar (Gimeno *et al.*, 2003) y en la variabilidad de la localización de los centros de la NAO (Haylock *et al.*, 2007; Vicente-Serrano and López-Moreno, 2008).

En invierno, la NAO está modulada por ENSO, cuya teleconexión con Europa tiene lugar a través de la troposfera y de la estratosfera (Butler *et al.*, 2014). Estudios recientes han encontrado eventos de El Niño con una estructura espacial diferente a la de El Niño tradicional del Pacífico Este (EP), referidos como El Niño del Pacífico Central (CP), que implican diferentes teleconexiones en Europa (Calvo *et al.*, 2017). La persistencia de la respuesta estratosférica y las interacciones aire-océano en el Atlántico Norte permiten que la señal de invierno de ENSO persista en Europa hasta la primavera (Herceg-Bullick *et al.*, 2017). Aunque la influencia de El Niño sobre el Atlántico Norte en primavera se ha relacionado con una fase negativa de la NAO (Brönnimann *et al.*, 2007; Vicente Serrano *et al.*, 2008; García-Serrano *et al.*, 2011), su señal no es estacionaria y depende de cambios de baja frecuencia en el estado base del océano (Greatbach *et al.*, 2004; Zanchettin *et al.*, 2008; López-Parages and Rodríguez-Fonseca, 2012; López-Parages *et al.*, 2015; López-Parages *et al.*, 2016; King *et al.*, 2017). De este modo, la variabilidad multidecadal del Atlántico Norte, también conocida como AMO (Oscilación Multidecadal del Atlántico) determina la efectividad de la teleconexión ENSO. Más aún, se han encontrado dos estructuras espaciales de ENSO, referidas como *Eastern Pacific* (EP) y *Central Pacific* (CP), que se relacionan con diferentes teleconexiones sobre Europa (Calvo *et al.*, 2017). Su influencia sobre el SO de Europa ha cambiado en el tiempo, siendo los eventos EP durante fases negativas de la AMO aquellos con mayor impacto en la precipitación de primavera (López-Parages *et al.*, 2016). Asimismo, la región del TNA tiene una influencia significativa sobre la circulación atmosférica en el sector euro-atlántico y, en particular, la península ibérica a principios de invierno y primavera, también en relación con ENSO (Frankignoul *et al.*, 2003; Rodríguez-Fonseca *et al.*, 2016; King *et al.*, 2017).

Estudios recientes han encontrado que el Niño del Atlántico también afecta al SO de Europa durante su fase de decaimiento (otoño-invierno boreal). Este impacto está determinado por la posición e intensidad de la corriente en chorro, que muestra un patrón en arco sobre la región del Atlántico Norte durante verano-otoño y un tren de ondas orientado zonalmente durante otoño-invierno (García-Serrano, 2011). Por el contrario, el Niño Atlántico de verano presenta diferentes impactos en el Mediterráneo, dependiendo del estado del resto de los océanos tropicales, con marcadas modificaciones debidas a ENSO (Losada *et al.*, 2012). Las anomalías de la temperatura de la superficie

del mar en el Mediterráneo también influyen sobre la circulación atmosférica del hemisferio norte (García-Serrano *et al.*, 2013; Sahin *et al.*, 2015) afectando a las temperaturas de verano.

En escalas decadales, la AMO (Ortiz Bevia *et al.*, 2016; Zampieri *et al.*, 2017) influye en la duración del verano en el SO de Europa (Peña-Ortiz *et al.*, 2015) así como en los regímenes de tiempo de la región mediterránea en verano. Además, se ha encontrado como, desde finales de los años 70, existe un acoplamiento entre las anomalías de precipitación asociadas al monzón de la India y las del SO de Europa (Lin *et al.*, 2017).

Aparte de los predictores oceánicos, la variabilidad asociada a la estratosfera (Scaife, 2005; Palmeiro *et al.*, 2017), la Oscilación de Madden Julian (Cassou, 2008; Schwartz *et al.*, 2017), la cubierta de nieve sobre Eurasia (Orsollini *et al.*, 2016), y la extensión de hielo marino (García-Serrano *et al.*, 2015) aparecen como nuevos predictores a tener en cuenta para una correcta evaluación de la predictibilidad del clima en el sector euro-atlántico en escalas subestacionales.

### **Predicciones y proyecciones futuras**

En las últimas décadas han aumentado las evidencias de una posible predictibilidad de la NAO de invierno (Scaife *et al.*, 2014; Athanasiadis *et al.*, 2017), pero no se ha alcanzado un avance similar en otras estaciones ni para otros PT. Muchos estudios han mostrado mejoras en la predictibilidad estacional del Atlántico Norte basándose en dos predictores: ENSO y los calentamientos súbitos estratosféricos (SSW) (Barriopedro and Calvo, 2014; Domeisen *et al.*, 2015; Butler *et al.*, 2016).

En escalas temporales superiores (de un año en adelante), se han propuesto dos fuentes de predictibilidad de la NAO, asociadas al Pacífico y a la actividad solar y su efecto sobre la intensidad del vórtice polar estratosférico (Dunstone *et al.*, 2016).

Los ejercicios de predicción decadal multimodelo (Doblas-Reyes *et al.*, 2013) muestran un gran potencial en Europa (Guemas *et al.*, 2015; Lienert *et al.*, 2017). La información de la predicción proviene, principalmente, de la tendencia al calentamiento en el caso de la temperatura, pero también de la AMO.

El Mediterráneo se considera un «punto caliente» para las proyecciones de cambio climático, experimentando un calentamiento y una creciente desertificación. Aunque los cambios inducidos termodinámicamente a través del forzamiento de los gases de efecto invernadero (GHG) son robustos, hay considerables incertidumbres en las proyecciones futuras sobre cambios en la circulación atmosférica y en las variables relacionadas con procesos dinámicos, como por ejemplo la precipitación (Shepherd, 2014). Por ello, son esenciales las simulaciones en modo «ensemble» para estimar la distribución de probabilidad asociada. En relación con proyecciones futuras, Gonzalez-Reviriego *et al.* (2014) han encontrado una tendencia positiva de la NAO y una tendencia negativa del patrón SCAND bajo

escenarios futuros SRES A1B. Lo primero está de acuerdo con otros resultados multimodelo dados por Gillett y Fyfe (2013). La NAO continuará influyendo en la precipitación y la temperatura en las próximas décadas (López-Moreno *et al.*, 2011), y es esta tendencia positiva de la NAO de invierno la que llevará a un incremento en la frecuencia y/o severidad de sequías en la península ibérica. Más aún, como las simulaciones indican un incremento en las temperaturas (véase Serrano y Camino en este número de CE), los inviernos clasificados como «fríos» en el siglo XXI serán más «raros» que los de décadas recientes.

Respecto al verano, Bladé *et al.* (2012a, 2012b) examinaron las proyecciones de la SNAO en modelos del CMIP3, encontrando una tendencia positiva aunque con una gran dispersión. No obstante, esta tendencia es capaz de explicar una gran parte de la reducción en la precipitación media encontrada en la media multimodelo sobre el NO de Europa. Estos cambios deberían llevar a un incremento modesto de precipitación en la península ibérica, donde la correlación observada entre la SNAO y la precipitación de verano es positiva y débil, desplazando parcialmente las condiciones de sequía inducidas termodinámicamente sobre la región. No obstante, los modelos del CMIP3 no capturan este efecto porque no representan correctamente las señales en superficie de la SNAO.

Otros cambios medios en el clima proyectados en escenarios futuros incluyen un fortalecimiento y una extensión hacia el este de las trayectorias de las borrascas sobre el oeste de Europa (Feng *et al.*, 2014). El acoplamiento atmósfera-océano induce distintas respuestas atmosféricas del Niño Atlántico (Mohino and Losada, 2015). No obstante, existen incertidumbres en la circulación del océano, que a su vez explican mucha de la dispersión proyectada en las trayectorias de los ciclones extratropicales (Woollings *et al.*, 2012).

Respecto a los episodios extremos, las proyecciones futuras regionales indican un incremento generalizado de las olas de calor y las sequías en la región (Jacob *et al.*, 2014; Vicente-Serrano *et al.*, 2014). En contra, los cambios en ríos atmosféricos (AR), que causan precipitación intensa e inundaciones sobre áreas continentales, sugieren un aumento del transporte del vapor de agua integrado, produciendo precipitación extrema sobre Escandinavia (Ramos *et al.*, 2016). En relación con los ciclones de tipo explosivo, aunque la mayor parte de ellos tiene lugar en el norte de Europa, desplazamientos abruptos de la NAO hacia el sur, modulados por cambios en la AMOC, podrían causar un aumento de su frecuencia en regiones subtropicales europeas (Gómara *et al.*, 2016).

De forma similar a lo observado en las últimas décadas, se espera que la variabilidad multidecadal de los océanos en el siglo XXI actué como un interruptor de las teleconexiones globales, aumentando la predictibilidad en ciertas regiones (López-Parages *et al.*, 2015). De esta forma, los estudios futuros deberían considerar la variabilidad decadal que acompañará a los cambios forzados proyectados para la región mediterránea (Mariotti *et al.*, 2015).



## Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la comunidad española trabajando en teleconexiones sobre el suroeste de Europa por el esfuerzo hecho en los últimos años pese a la reducción severa en la financiación nacional. Asimismo, los autores quieren agradecer a Francisco Doblas-Reyes e Ileana Bladé por sus contribuciones en el texto.

## Referencias

- Athanasiadis, P. J., Bellucci, A., Scaife, A. A., Hermanson, L., Materia, S., Sanna, A., ... & Gualdi, S., 2017: A Multisystem View of Wintertime NAO Seasonal Predictions. *J. Climate*, 30 (4), 1461-1475.
- Barriopedro, D., Gallego, D., Álvarez-Castro, M. C., García-Herrera, R., Wheeler, D., Pena-Ortiz, C., and Barbosa, S. M., 2014: Witnessing North Atlantic westerlies variability from ships' logbooks (1685-2008). *Clim. Dyn.*, 43 (3-4), 939-955.
- Barriopedro, D., Calvo, N., 2014: On the relationship between ENSO, Stratospheric Sudden Warmings and Blocking. *J. Climate*, 27 (12), 4704-4720, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00770.1.
- Bladé, I., Fortuny, D., van Oldenborgh, G. J. and Liebmann, B., 2012a: The summer North Atlantic Oscillation in CMIP3 models and related uncertainties in projected summer drying in Europe. *J. Geophys. Res.: Atmospheres* (1984-2012), 117 (D16).
- Bladé, I., Liebmann, B., Fortuny, D. and van Oldenborgh, G. J., 2012b: Observed and simulated impacts of the summer NAO in Europe: implications for projected drying in the Mediterranean region. *Clim. Dyn.*, 39 (3-4), 709-727.
- Brönnimann, S., Xoplaki, E., Casty, C., Pauling, A., & Luterbacher, J., 2007: ENSO influence on Europe during the last centuries. *Clim. Dyn.*, 28 (2-3), 181-197.
- Butler, A. H., Arribas, A., Athanassiadou, M., Baehr, J., Calvo, N., Charlton-Perez, A., Déqué, M., Domeisen, D. I. V., Fröhlich, K., Hendon, H., Imada, Y., Ishii, M., Iza, M., Karpechko, A. Yu., Kumar, A., MacLachlan, C., Merryfield, W. J., Müller, W. A., O'Neill, A., Scaife, A. A., Scinocca, J., Sigmond, M., Stockdale, T. N. and Yasuda, T., 2016: The Climate-system Historical Forecast Project: do stratosphere-resolving models make better seasonal climate predictions in boreal winter? *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 142, 1413-1427, doi:10.1002/qj.2743.
- Calvo, M. Iza, M. M. Hurwitz, E. Manzini, C. Peña-Ortiz, A. H. Butler, C. Cagnazzo, S. Ineson, and C. I. Garfinkel, 2017: Northern Hemisphere Stratospheric Pathway of different El Niño flavors in Stratosphere-Resolving CMIP5 models. *J. Climate*, 30, 4351-4371, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0132.1.
- Casado, M. J., Pastor, M. A., Doblas-Reyes, F. J., 2008: Euro-Atlantic circulation types and modes of variability in winter. *Theoretical Applied Climatology*, 96, 17-29, doi:10.1007/s00704-008-0036-2.
- Casanueva Vicente, A., Rodríguez Puebla, C., Frías Domínguez, M. D., & González Reviriego, N., 2014: Variability of extreme precipitation over Europe and its relationships with teleconnection patterns.
- Cassou, C., 2008: Intraseasonal interaction between the Madden-Julian oscillation and the North Atlantic Oscillation. *Nature*, 455 (7212), 523.
- Christensen, J. H., Kanikicharla, K. K., Marshall, G., & Turner, J., 2013: Climate phenomena and their relevance for future regional climate change.
- Comas-Bru, L., & McDermott, F., 2014: Impacts of the EA and SCA patterns on the European twentieth century NAO—winter climate relationship. *Q. J. Royal Met. Soc.*, 140 (679), 354-363.
- Doblas-Reyes, F. J., Andreu-Burillo, I., Chikamoto, Y., García-Serrano, J., Guemas, V., Kimoto, M., ... & Van Oldenborgh, G. J., 2013: Initialized near-term regional climate change prediction. *Nature communications*, 4, 1715.
- Domeisen, D. I., Butler, A. H., Fröhlich, K., Bittner, M., Müller, W. A., & Baehr, J., 2015: Seasonal predictability over Europe arising from El Niño and stratospheric variability in the MPI-ESM seasonal prediction system. *J. Climate*, 28 (1), 256-271.
- Dunstone, N., Smith, D., Scaife, A., Hermanson, L., Eade, R., Robinson, N., ... & Knight, J., 2016: Skilful predictions of the winter North Atlantic Oscillation one year ahead. *Nature Geoscience*, 9 (11), 809-814.
- Favà, V., Curto, J. J., & Llasat, M. C., 2016: Regional differential behaviour of maximum temperatures in the Iberian Peninsula regarding the Summer NAO in the second half of the twentieth century. *Atmospheric Research*, 182, 319-334.
- Feng, S., Hu, Q., Huang, W., Ho, C. H., Li, R., & Tang, Z., 2014: Projected climate regime shift under future global warming from multi-model, multi-scenario CMIP5 simulations. *Global and Planetary Change*, 112, 41-52.
- Frankignoul, C., Friederichs, P., & Kestenare, E., 2003: Influence of Atlantic SST anomalies on the atmospheric circulation in the Atlantic-European sector. *Annals of Geophysics*.
- García-Herrera and Barriopedro, 2018, in review: Climate of the Mediterranean and North Africa. Oxford Research Encyclopedia of Climate Science, doi: 10.1093/acrefore/9780190228620.013.509.

- García-Serrano, J., Polo, I., Rodríguez-Fonseca, B. and Losada, T., 2013: Large-scale atmospheric response to eastern Mediterranean summer-autumn SST anomalies and the associated regional impact. *Clim. Dyn.*, Vol 41, 9-10, pp. 2251-2265, doi: 10.1007/s00382-013-1940-4.
- García-Serrano, J., Frankignoul, C., Gastineau, G., & De La Cámara, A., 2015: On the predictability of the winter Euro-Atlantic climate: lagged influence of autumn Arctic sea ice. *J. Climate*, 28 (13), 5195-5216.
- García-Serrano, J., Cassou, C., Douville, H., Giannini, A., & Doblas-Reyes, F. J., 2017: Revisiting the ENSO teleconnection to the tropical North Atlantic. *J. Climate*, 30 (17), 6945-6957.
- García-Serrano, J., Rodríguez-Fonseca, B., Bladé, I., Zurita-Gotor, P., & de La Cámara, A., 2011: Rotational atmospheric circulation during North Atlantic-European winter: the influence of ENSO. *Clim. Dyn.*, 37 (9-10), 1727-1743.
- Gillett, N. P., and Fyfe, J. C., 2013: Annular mode changes in the CMIP5 simulations. *Geophysical Research Letters*, 40 (6), 1189-1193.
- Gimeno, L., de la Torre, L., Nieto, R., García, R., Hernández, E., and Ribera, P., 2003: Changes in the relationship NAO–Northern hemisphere temperature due to solar activity. *Earth and Planetary Science Letters*, 206 (1), 15-20.
- Gómara, I., Rodríguez-Fonseca, B., Zurita-Gotor, P., & Pinto, J. G., 2014: On the relation between explosive cyclones affecting Europe and the North Atlantic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 41 (6), 2182-2190.
- Gómara, I., Rodríguez-Fonseca, B., Zurita-Gotor, P., Ulbrich, S., and Pinto, J. G., 2016: Abrupt transitions in the NAO control of explosive North Atlantic cyclone development. *Clim. Dyn.*, 47 (9-10), 3091-3111.
- González-Reviriego, N., Rodríguez-Puebla, C., & Rodríguez-Fonseca, B., 2015: Evaluation of observed and simulated teleconnections over the Euro-Atlantic region on the basis of partial least squares regression. *Clim. Dyn.*, 44 (11-12), 2989-3014.
- Greatbatch, R. J., Lu, J., & Peterson, K. A., 2004: Non-stationary impact of ENSO on EuroAtlantic winter climate. *Geophysical Research Letters*, 31(2).
- Guemas, V., García-Serrano, J., Mariotti, A., Doblas-Reyes, F., and Caron, L. P., 2015: Prospects for decadal climate prediction in the Mediterranean region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141 (687), 580-597.
- Handorf, D., & Dethloff, K., 2009: Atmospheric teleconnections and flow regimes under future climate projections. *The European Physical Journal-Special Topics*, 174 (1), 237-255.
- Haylock, M. R., Jones, P. D., Allan, R. J., and Ansell, T. J., 2007: Decadal changes in 1870-2004 Northern Hemisphere winter sea level pressure variability and its relationship with surface temperature. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 112 (D11).
- Herceg-Buliæ, I., Mezzina, B., Kucharski, F., Ruggieri, P., & King, M. P., 2017: Wintertime ENSO influence on late spring European climate: the stratospheric response and the role of North Atlantic SST. *Int. J. Climatol.*, 37 (S1), 87-108.
- Hertig, E., Beck, C., Wanner, H., & Jacobeit, J., 2015: A review of non-stationarities in climate variability of the last century with focus on the North Atlantic-European sector. *Earth-science reviews*, 147, 1-17.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B. & Yiou, P., 2014: EURO CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Change*, 14, 563-578, doi:10.1007/s10113-013-0499-2.
- Jérez, S., Jiménez-Guerrero, P., Montávez, J. P., Trigo, R. M., 2013: Access Impact of the North Atlantic Oscillation on European aerosol ground levels through local processes: a seasonal model-based assessment using fixed anthropogenic emissions. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 11195-11207, doi:10.5194/acp-13-11195-2013.
- King, M. P., Herceg-Buliæ, I., Kucharski, F., & Keenlyside, N., 2017: Interannual tropical Pacific sea surface temperature anomalies teleconnection to Northern Hemisphere atmosphere in November. *Clim. Dyn.*, 1-19.
- Lana, X., Burgueño, A., Martínez, M. D., & Serra, C., 2016: Complexity and predictability of the monthly Western Mediterranean Oscillation index. *Int. J. Climatol.*, 36 (6), 2435-2450.
- Lienert, F., and Doblas-Reyes, F. J., 2017: Prediction of interannual North Atlantic sea surface temperature and its remote influence over land. *Climate* Ramos, A. M., Tomé, R., Trigo, R. M., Liberato, M. L., & Pinto, J. G., 2016: Projected changes in atmospheric rivers affecting Europe in CMIP5 models. *Geophysical Research Letters*, 43 (17), 9315-9323. *Dynamics*, 48 (9-10), 3099-3114.
- Lin, Z., Liu, F., Wang, B., Lu, R., & Qu, X., 2017: Southern European rainfall reshapes the early-summer circuglobal teleconnection after the late 1970s. *Clim. Dyn.*, 48 (11-12), 3855-3868.

- Liu, Z., & Alexander, M., 2007: Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections. *Reviews of Geophysics*, 45 (2).
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Morán-Tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., Kenawy, A., and Beniston, M., 2011: Effects of the North Atlantic Oscillation (NAO) on combined temperature and precipitation winter modes in the Mediterranean mountains: observed relationships and projections for the 21st century. *Global and Planetary Change*, 77 (1), 62-76.
- López-Parages, J., Rodríguez-Fonseca, B., 2012: Multidecadal modulation of El Niño influence on the Euro-Mediterranean rainfall. *Geophysical Research Letters*, 39 (2).
- López-Parages, J., Rodríguez-Fonseca, B., Terray, L., 2015: A mechanism for the multidecadal modulation of ENSO teleconnection with Europe. *Clim. Dyn.*, 45 (3-4), 867-880.
- López-Parages, J., Rodríguez-Fonseca, B., Dommenges, D., & Frauen, C., 2016: ENSO influence on the North Atlantic European climate: a non-linear and non-stationary approach. *Clim. Dyn.*, 47 (7-8), 2071-2084.
- Lorenzo, M. N., Taboada, J. J. and Gimeno, L., 2008: Links between circulation weather types and teleconnection patterns and their influence on precipitation patterns in Galicia (NW Spain). *Int. J. Climatol.* 28, 1493-1505, doi:10.1002/joc.1646.
- Losada, T., Rodríguez-Fonseca, B. and Kucharski, F., 2012: Tropical Influence on the Summer Mediterranean Climate. *Atmospheric Science Letters*, Vol. 13, pp. 36-42, doi: 10.1002/asl.359.
- Mariotti, A., Pan, Y., Zeng, N., & Alessandri, A., 2015: Long term climate change in the Mediterranean region in the midst of decadal variability. *Clim. Dyn.*, 44 (5-6), 1437-1456.
- Martín-Vide, J., & López-Bustins, J. A., 2006: The western Mediterranean oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.*, 26 (11), 1455-1475.
- Martín-Rey, M., Rodríguez-Fonseca, B., Polo, I. and Kucharski, F., 2014: On the Atlantic-Pacific Niños connection: a multidecadal modulated mode. *Clim. Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-014-2305-3.
- Martín-Rey, M., Rodríguez-Fonseca, B. and Polo, I., 2015: Atlantic opportunities for ENSO prediction. *Geophysical Research Letters*, 42, doi:10.1002/2015GL065062.
- Mohino, E., & Losada, T., 2015: Impacts of the Atlantic Equatorial Mode in a warmer climate. *Clim. Dyn.*, 45 (7-8), 2255-2271.
- Müller, W. A., and Roeckner, E., 2008. ENSO teleconnections in projections of future climate in ECHAM5/MPI-OM. *Clim. Dyn.*, 31 (5), 533-549.
- Orsolini, Y. J., Senan, R., Vitart, F., Balsamo, G., Weisheimer, A., & Doblas-Reyes, F. J., 2016: Influence of the Eurasian snow on the negative North Atlantic Oscillation in subseasonal forecasts of the cold winter 2009/2010. *Clim. Dyn.*, 47 (3-4), 1325-1334.
- Ortiz Bevia, M. J., Ruiz de Elvira, A., Álvarez-García, F. J., & Tasambay-Salazar, M., 2016: The multidecadal component of the Mediterranean summer variability. *Clim. Dyn.*, 47 (9-10), 3373-3386.
- Palmeiro, F. M., Iza, M., Barriopedro, D., Calvo, N., & García-Herrera, R., 2017: The complex behavior of El Niño winter 2015-2016. *Geophysical Research Letters*, 44 (6), 2902-2910.
- Polo, I., Martín-Rey, M., Rodríguez-Fonseca, B., Kucharski, F. and Mechoso, C. R., 2015: Processes in the Pacific La Niña onset triggered by the Atlantic Niño. *Clim. Dyn.*, 44, 115-131, doi: 10.1007/s00382-014-2354-7.
- Peña-Ortiz, C., Barriopedro, D., García-Herrera, R., 2015: Multidecadal Variability of the summer length in Europe. *J. Climate*, 28 (13), 5375-5388, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00429.1.
- Quadrelli, R., and Wallace, J. M., 2004: A simplified linear framework for interpreting patterns of Northern Hemisphere wintertime climate variability. *J. Climate*, 17 (19), 3728-3744.
- Pinto, J. G., 2016: Projected changes in atmospheric rivers affecting Europe in CMIP5 models. *Geophysical Research Letters*, 43 (17), 9315-9323.
- Rodríguez-Fonseca, B., Polo, I., Serrano, E., & Castro, M., 2006: Evaluation of the North Atlantic SST forcing on the European and Northern African winter climate. *Int. J. Climatol.*, 26 (2), 179-191.
- Rodríguez-Fonseca, B., & Rodríguez-Puebla, C., 2010: Teleconexiones climáticas en el entorno de la Península Ibérica. Predictabilidad y cambios esperados. Clima en España: pasado, presente y futuro. Informe de evaluación del cambio climático regional, CLIVAR-España, 1-85.
- Rodríguez-Fonseca, B., Suárez-Moreno, R., Ayarzagüena, B., López-Parages, J., Gómara, I., Villamayor, J., Mohino, E., Losada, T., Castaño-Tierno, A., 2016: A Review of ENSO Influence on the North Atlantic. A Non-Stationary Signal. *Atmosphere*, 7 (7), 87.
- Rodríguez-Fonseca, B., Polo, I., García-Serrano, J., Losada, T., Mohino, E., Mechoso, C.R., and Kucharski, F., 2009: Are Atlantic Niños enhancing Pacific ENSO events in recent decades? *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L20705, doi 10.1029/2009GL040048.



- Rodríguez-Fonseca, B., Polo, I., Serrano, E., & Castro, M., 2006: Evaluation of the North Atlantic SST forcing on the European and Northern African winter climate. *Int. J. Climatol.*, 26 (2), 179-191.
- Rodríguez-Puebla, C., Encinas, A. H., García-Casado, L. A., Nieto, S., 2010: Trends in warm days and cold nights over the Iberian Peninsula: Relationships to large-scale variables. *Climatic Change*, 100, 667-684.
- Rodríguez-Puebla, C., Nieto, S., 2010: Trends of precipitation over the Iberian Peninsula and the North Atlantic Oscillation under climate change conditions. *Int. J. Climatol.*, 30, 1807-1815.
- Şahin, S., Türkeş, M., Wang, S. H., Hannah, D., & Eastwood, W., 2015: Large scale moisture flux characteristics of the mediterranean basin and their relationships with drier and wetter climate conditions. *Clim. Dyn.*, 45 (11-12), 3381-3401.
- Scaife, A. A., Knight, J. R., Vallis, G. K., & Folland, C. K., 2005: A stratospheric influence on the winter NAO and North Atlantic surface climate. *Geophysical Research Letters*, 32 (18).
- Scaife, A. A., Arribas, A., Blockley, E., Brookshaw, A., Clark, R. T., Dunstone, N., ... & Hermanson, L., 2014: Skillful longrange prediction of European and North American winters. *Geophysical Research Letters*, 41 (7), 2514-2519.
- Schwartz, C., & Garfinkel, C. I., 2017: Relative roles of the MJO and stratospheric variability in North Atlantic and European winter climate. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 122 (8), 4184-4201.
- Shepherd, T. G., 2014: Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections. *Nature Geoscience*, 7, 703-708, doi:10.1038/ngeo2253.
- Tompkins, A. M., M. I. Inés Ortiz de Zárate, R. I. Saurral, C. Vera, C. Saulo, W. J. Merryfield, M. Sigmond, W.-S. Lee, J. Baehr, A. Braun, A. Butler, M. Déqué, F. J. Doblas-Reyes, M. Gordon, A. A. Scaife, Y. Imada, M. Ishii, T. Ose, B. Kirtman, A. Kumar, W. A. Müller, A. Pirani., T. Stockdale, M. Rixen and T. Yasuda., 2017: The Climate-system Historical Forecast Project: providing open access to seasonal forecast ensembles from centers around the globe. *Bull. Amer. Met. Soc.*, doi:10.1175/BAMS-D-16-0209.1.
- Trenberth, K. E., Branstator, G. W., Karoly, D., Kumar, A., Lau, N. C., and Ropelewski, C., 1998: Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. *J. Geophys. Res.: Oceans*, 103 (C7), 14291-14324.
- Trigo, R. M., Osborn, T. J., & Corte-Real, J. M., 2002: The North Atlantic Oscillation influence on Europe: climate impacts and associated physical mechanisms. *Climate Research*, 20 (1), 9-17.
- Vicente-Serrano, S. M., García-Herrera, R., Barriopedro, D., Azorín-Molina, C., López-Moreno, J. I., Martín-Hernández, N., Tomás-Burguera, M., Gimeno, L., Nieto, R., 2016: The Westerly Index as complementary indicator of the North Atlantic oscillation in explaining drought variability across Europe. *Clim. Dyn.*, 47 (3), 845-863, doi:10.1007/s00382-015-2875-8.
- Vicente-Serrano, S., & R. M. Trigo (eds.), 2011: Hydrological, Socioeconomic and Ecological Impacts of the North Atlantic Oscillation in the Mediterranean Region. Springer, Netherlands.
- Vicente-Serrano, S., Beguería, S., López-Moreno, J., El Kenawy, A., and Angulo, M., 2009: Daily atmospheric circulation events and extreme precipitation risk in Northeast Spain: the role of the North Atlantic Oscillation, Western Mediterranean Oscillation and Mediterranean Oscillation, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 114, D08106, doi:10.1029/2008JD011492.
- Vicente-Serrano, S. M., and López-Moreno, J. I., 2008: Nonstationary influence of the North Atlantic Oscillation on European precipitation. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 113 (D20).
- Vicente-Serrano, S., López-Moreno, J. I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sánchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J. M., Azorín-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., 2014: Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*, 9 (4), doi:10.1088/1748-9326/9/4/044001.
- Vitart, F., Robertson, A. W., & Anderson, D. L., 2012: Subseasonal to Seasonal Prediction Project: Bridging the gap between weather and climate. *Bulletin of the World Meteorological Organization*, 61 (2), 23.
- Wallace, J. M., and Gutzler, D. S., 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, 109 (4), 784-812.
- Walter, K., and Graf, H. F., 2002: On the changing nature of the regional connection between the North Atlantic Oscillation and sea surface temperature. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 107 (D17).
- Woollings, T., Gregory, J. M., Pinto, J. G., Reyers, M., and Brayshaw, D. J., 2012: Response of the North Atlantic storm track to climate change shaped by ocean-atmosphere coupling. *Nature Geoscience*, 5 (5), pp. 314-317, doi: 10.1038/ngeo1438.
- Zampieri, M., Toreti, A., Schindler, A., Scoccimarro, E., and Gualdi, S., 2017: Atlantic multi-decadal oscillation influence on weather regimes over Europe and the

Mediterranean in spring and summer. *Global and Planetary Change*, 151, 92-100.

Zanchettin, D., Franks, S. W., Traverso, P., & Tomasino, M., 2008: On ENSO impacts on European wintertime rainfalls and their modulation by the NAO and the

Pacific multi decadal variability described through the PDO index. *Int. J. Climatol.*, 28 (8), 995-1006.

Zveryaev, I. I., 2006: Seasonally varying modes in long term variability of European precipitation during the 20th century. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 111 (D21).

# Variabilidad oceánica y cambios de nivel del mar alrededor de la península ibérica, Baleares y Canarias

DOI: <https://doi.org/10.31978/639-18-002-5.07>

Jordi Salat<sup>1</sup>, Alicia Lavín<sup>4</sup>, César González-Pola<sup>2</sup>, Pedro Vélez-Belchí<sup>2</sup>, Ricardo Sánchez<sup>2</sup>, Manolo Vargas-Yáñez<sup>2</sup>, Jesús García-Lafuente<sup>3</sup>, Marta Marcos<sup>4</sup>, Damià Gomis<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut de Ciències del Mar (CSIC), España

<sup>2</sup> Instituto Español de Oceanografía (IEO), España

<sup>3</sup> Universidad de Málaga, España

<sup>4</sup> Institut Mediterrani d'Estudis Avançats (IMEDEA: Universitat de les Illes Balears - CSIC), España

## Introducción

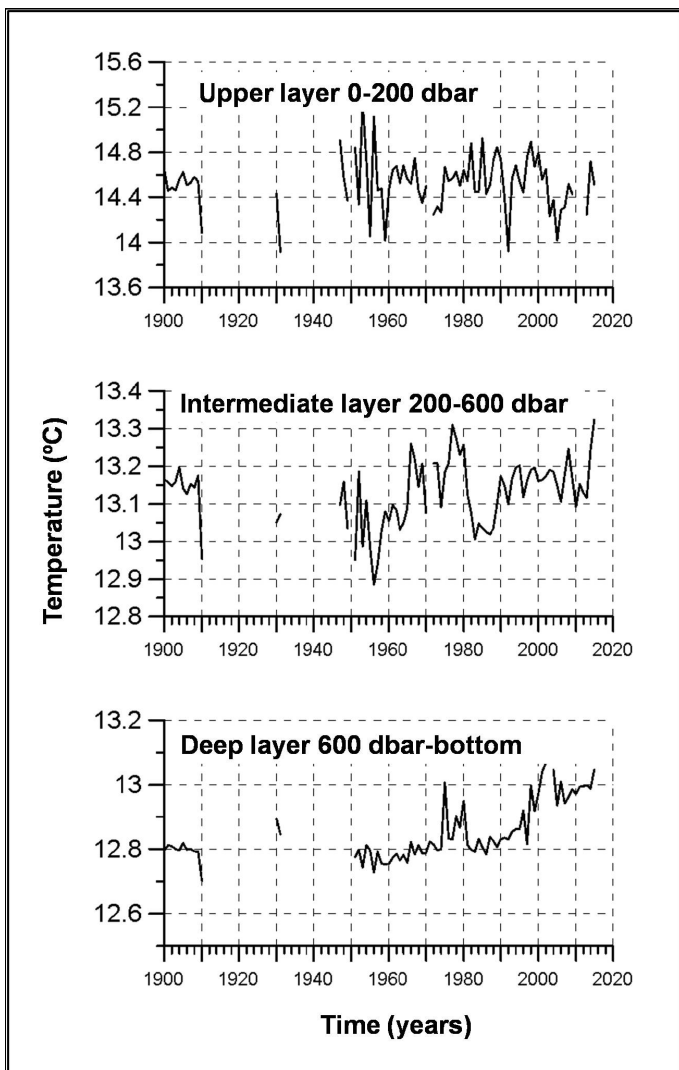
El océano, con una capacidad de almacenamiento de calor casi 1200 veces superior a la de la atmósfera, es el principal componente, en términos de balance de energía, del sistema climático de la Tierra. Uno de los objetivos de CLIVAR es obtener la máxima información posible sobre la variabilidad oceánica, incluyendo cambios en el nivel del mar, como consecuencia del almacenamiento de calor en el océano. Esta información es utilizada para mejorar la comprensión de la variabilidad climática a escala interanual, para detectar cambios en el sistema climático y los flujos de energía, y para ajustar y optimizar modelos que, a su vez, permitan mejorar tanto las predicciones de cambio climático tanto a escala de décadas como las proyecciones a más largo plazo. En un contexto regional, las aguas alrededor de la península ibérica (incluidas las islas Baleares) y alrededor de las islas Canarias están afectadas principalmente por la variabilidad del Atlántico nororiental y del Mediterráneo occidental, incluyendo la comunicación entre ambas cuencas. En la anterior evaluación de CLIVAR-España (2010), se analizaron y discutieron los resultados básicos sobre variabilidad oceánica y cambios del nivel del mar en la región, basados en observaciones *in situ* a largo plazo e imágenes de satélite. En aquella evaluación se describió la evolución de las características del agua (tendencias y escalas de variabilidad de temperatura, salinidad, contenido de calor y de nivel del mar) desde las primeras observaciones hasta el primer decenio de este siglo.

Como principales resultados de aquel informe cabe destacar, en primer lugar, que las aguas superficiales en todo el margen atlántico de la península ibérica presentaban alternancia entre periodos fríos y cálidos desde 1854. El último periodo cálido dio comienzo en 1974. Se describió una tendencia al calentamiento claramente detectada en el golfo de Vizcaya durante la década de los noventa, que se extendía a toda la capa superior del océano hasta 1000 m de profundidad. Las aguas oceánicas del Atlántico subtropical alrededor de las islas Canarias presentaban una tendencia al calentamiento y un incremento de salinidad a profundidades de entre 600 y 1800 m, probablemente asociados a variaciones en la

intensidad de los vientos dominantes a través de su impacto en los desplazamientos verticales de las masas de agua. También se constató un reforzamiento del afloramiento del noroeste de África, o por lo menos un debilitamiento de la tendencia al calentamiento de las aguas superficiales de la región tropical del Atlántico que se venía observando desde 1967. En el Mediterráneo occidental se observó un aumento de temperatura y salinidad de las aguas profundas, así como de la salinidad de las aguas intermedias, desde mediados del siglo XX. Sin embargo, según el mencionado informe, las estimaciones de flujos de calor en la región ibérica no presentaban ninguna tendencia significativa, tan solo algunas alternancias entre periodos de mayor o menor transferencia de calor del mar a la atmósfera (por ejemplo, de 1958 a 1975, y entre 1975 y 2001, respectivamente). En ese contexto, se destacaron por su relevancia los elevados flujos de calor hacia la atmósfera, observados durante el invierno de 2004/2005, que provocaron la formación de grandes capas de mezcla vertical en una extensa región del Mediterráneo noroccidental y la producción de un volumen excepcional de agua densa, sin precedentes en la región.

Con respecto a la variabilidad a largo plazo del nivel medio del mar, las observaciones referidas en el informe indicaban tendencias crecientes, aunque de diversas magnitudes. Como resultado destacable, cabe indicar que desde los años sesenta hasta los noventa, no se observó ningún aumento del nivel del mar en el Mediterráneo occidental debido al forzamiento negativo causado por el aumento de la presión atmosférica. Sin embargo, desde entonces el nivel del mar ha vuelto a aumentar siguiendo la tendencia positiva global. Asimismo, en lo referente a los valores extremos del nivel del mar, se constató que tanto su evolución a largo plazo como su variabilidad interanual eran consistentes con el comportamiento del nivel medio, a pesar de la diversidad de procesos que causan los extremos, tales como la interacción entre marea y tormentas. Ello supone una comprobación indirecta de que durante las últimas décadas del siglo XX no habría habido cambios importantes, ni en frecuencia ni en intensidad, en las perturbaciones atmosféricas que afectan a las costas de la península ibérica.





**Figura 1.** Series de temperatura en tres capas, de 1900 a 2015, promediada anualmente en toda la región española del Mediterráneo occidental. Adaptado de Vargas-Yáñez *et al.* (2017).

En este trabajo se presentan nuevos resultados, obtenidos de las observaciones de los últimos diez años, la mayoría basados en nuevos conjuntos de datos. Su objetivo es actualizar y revisar los resultados anteriores, así como tener una perspectiva detallada de los cambios interanuales observados durante la última década. La mayoría de los datos provienen de los mismos programas de seguimiento que figuraban en el informe anterior: la red de medidores del nivel del mar, secciones de CTD y estaciones fijas repetidas estacionalmente, y anclajes desplegados en puntos clave de las cuencas marinas y en el estrecho de Gibraltar. Para medir la temperatura superficial y el nivel del mar se ha usado, además, la teledetección desde satélites. Más allá de los datos provenientes de seguimientos sistemáticos, los datos de campañas oceanográficas y de algunos anclajes ocasionales también han contribuido a los resultados analizados en este artículo. También datos de planeadores marinos («gliders»), boyas de deriva instrumentadas y, muy especialmente, de perfiladores ARGO, que hoy en día se han convertido en esenciales (no se utilizaron en el informe anterior porque su expansión empezó hace tan solo unos pocos años). Por contraposición, cabe señalar que observaciones reales de los flujos de calor, especialmente de los

intercambios de calor latente, aunque son cruciales para los fines de CLIVAR aún no están disponibles a día de hoy; por lo tanto, los resultados de los flujos de calor todavía se basan principalmente en reanálisis o en estimaciones indirectas.

## Resultados

### *Aguas alrededor de la península ibérica, incluyendo las islas Baleares*

Las series temporales analizadas muestran una marcada variabilidad, con cambios bruscos en la mayor parte de ellas, debido a la respuesta no lineal del sistema océano-atmósfera. Ello no entra en contradicción con la existencia de tendencias de las propiedades hidrográficas sostenidas a largo plazo, sino que revela una heterogeneidad regional en las respuestas. La característica más destacada de este último periodo es todavía fruto del anómalo invierno 2004/2005, ya mencionado en el informe anterior. Ahora, con algo más de perspectiva, se confirma como el invierno más frío y uno de los más secos de los últimos 60 años en el suroeste de Europa y la zona templada del Atlántico nororiental (Häkkinen *et al.*, 2015). Las condiciones atmosféricas en el invierno de 2005 afectaron notablemente a la capa superficial de casi todas las aguas alrededor de la península ibérica (Levitus *et al.*, 2012). La excepcional pérdida de calor en áreas extensas provocó un aumento del espesor de la capa de mezcla hasta profundidades sin precedentes, tanto en el Atlántico NE (Somavilla *et al.*, 2009) como en la cuenca mediterránea occidental, donde el volumen de agua profunda formada aquel año fue muy superior a la media (Ulses *et al.*, 2008; CIESM, 2009). Los principales cambios asociados con este episodio se han observado tanto en los registros de temperatura y salinidad de superficie (Goikoetxea *et al.*, 2009; González *et al.*, 2013) como en las características de las masas de agua formadas en la región, concretamente: el agua central del Atlántico nororiental (en inglés, ENACW; Prieto *et al.*, 2015) y el agua profunda de la cuenca mediterránea occidental (en inglés, WMDW; López-Jurado *et al.*, 2005; Font *et al.*, 2007; Schroeder *et al.*, 2016).

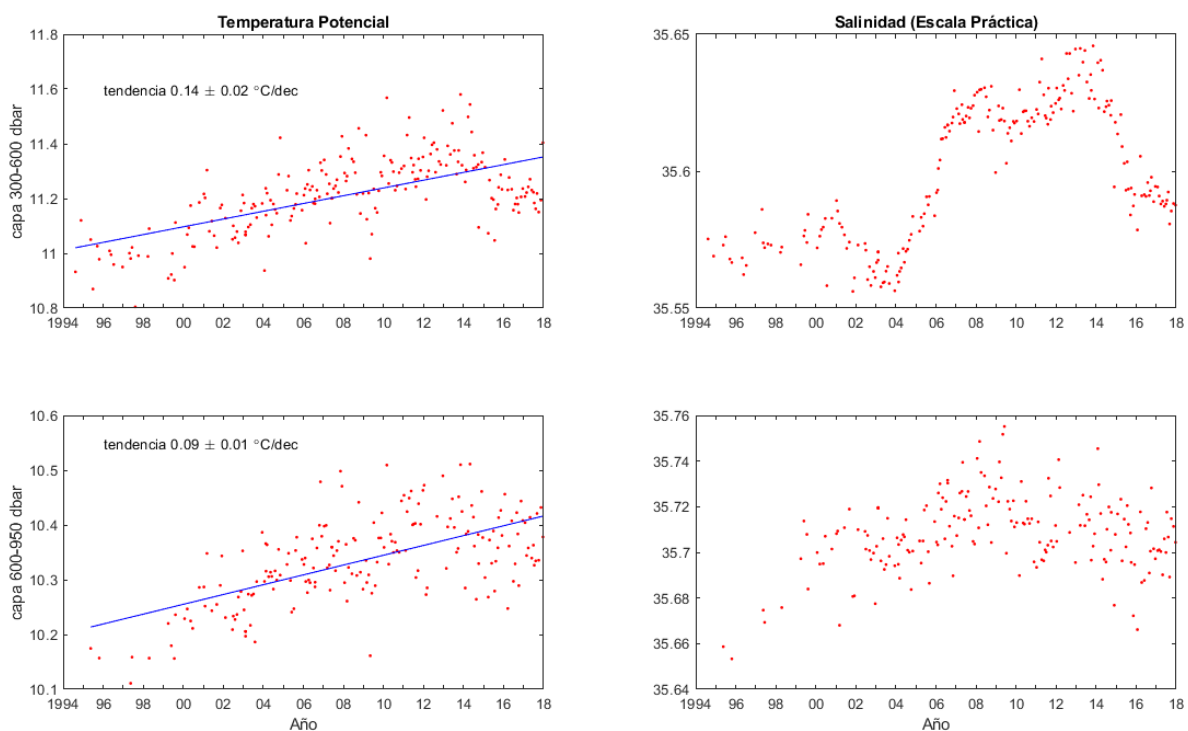
Los cambios descritos también tuvieron un impacto directo sobre el contenido de calor de los océanos en toda la región, cuya consecuencia más importante fue una redistribución del calor hacia capas más profundas (a 800-1000 m en el Atlántico NE). Como consecuencia, también se detectaron cambios en los patrones de circulación debidos a la alteración de la estructura de los campos de densidad del Atlántico NE (Somavilla *et al.*, 2016). En el Mediterráneo, la formación masiva de nueva WMDW en 2005 tuvo un impacto directo sobre la estructura de las capas más profundas, hasta tal punto que el evento ha sido denominado como el Transitorio del Mediterráneo Occidental. Es decir, la WMDW recién formada provocó un desplazamiento hacia arriba del agua profunda residente y, por lo tanto, una disminución de temperatura y salinidad en las aguas intermedias (Zunino *et al.*, 2012) parecido a lo ocurrido en el Mediterráneo oriental a finales de los años ochenta (Theocharis *et al.*, 2002). El impacto de la Formación de Aguas Densas Profundas (FADP) en 2004/05 sobre la estructura termohalina del Mediterráneo occidental tiene algunos precedentes, aunque

con mucha menor intensidad (Lacombe *et al.*, 1985), y podría plantearse como un fenómeno recurrente (Puig *et al.*, 2013). La disminución de temperatura y salinidad en las capas intermedias post-FADP ha influido en particular sobre el flujo de salida del agua mediterránea (en inglés, MOW) observado en Gibraltar (García-Lafuente *et al.*, 2007). La huella hidrográfica de la MOW, sin embargo, resulta difícil de seguir a lo largo de la propagación de la vena de agua mediterránea (MW, en inglés) en el Atlántico. En particular, tal como se menciona más abajo, las variaciones en las propiedades del núcleo de la MW observadas en el noroeste de la península ibérica a lo largo de los últimos 15 años han sido más bien interpretadas como una respuesta regional advectiva vinculada a la expansión y contracción de los giros subpolar y subtropical (Prieto *et al.*, 2015). No obstante, los impactos directos e indirectos de la anomalía del invierno 2005 produjeron un cambio en la mayor parte de los registros por encima de ~1000 m en una amplia zona del Atlántico norte. Como consecuencia relevante cabe señalar la contribución del océano Atlántico nororiental al denominado hiato del calentamiento global, a través del calor e incremento de salinidad, adquiridos progresivamente en las capas superiores del océano y transferidos rápidamente a capas más profundas (Sullivan, 2016). Según Somavilla *et al.* (2016), «patrones atmosféricos anómalos como los subyacentes a este cambio [2005] no son exclusivos de la última década, aunque estos puedan haberse visto acentuados debido al calentamiento global». Ello sugiere que pueden esperarse nuevos cambios relevantes en las series temporales climáticas, pero que difícilmente podrán ser anticipados.

Además del notable evento de 2004/2005, y sin una relación aparente, se pueden mencionar otros resultados relevantes:

1. En 2014, la capa superior de la ENACW mostró una marcada disminución de salinidad (hasta 400 m) por primera vez en casi una década (Larsen *et al.*, 2016).
2. Se han detectado cambios significativos en la zona de transición entre la MW y el agua del mar del Labrador (LSW, en inglés), concretamente, el paso de una bolsa de agua de muy baja temperatura y salinidad de la LSW entre 2008 y 2010 (Prieto *et al.*, 2015). Las oscilaciones en la temperatura y salinidad de esas aguas intermedias parecen estar relacionadas con la expansión/contracción del giro subpolar y la variabilidad interanual en la formación de las masas de agua en origen (Larsen *et al.*, 2016).
3. En los años 2006, 2009, 2010, 2012 y 2013 hubo episodios claros de FADP en el Mediterráneo noroccidental (Durrieu de Madron *et al.*, 2013). No obstante, en los tres últimos años (de 2015 a 2017) no se ha vuelto a registrar ningún episodio significativo de FADP (Durrieu de Madron *et al.*, 2017).
4. La salinidad de la WMDW formada con posterioridad a 2005 ha ido aumentando progresivamente, especialmente en años en los que se ha formado exclusivamente por procesos de convección en mar abierto (Borghini *et al.*, 2014).
5. Durante el episodio de FADP de 2010 se formó también una gran cantidad de agua intermedia en una zona mucho más amplia de lo habitual (Vargas-Yáñez *et al.*, 2012).

La reciente evolución de las aguas del Mediterráneo también se ha documentado en Sammartino *et al.* (2014) y



**Figura 2.** Series de temperatura y salinidad en niveles intermedios (300 a 1000 m), obtenidas entre 1990 y 2016 en una estación de aguas abiertas situada frente a Santander (golfo de Vizcaya, 43° 48' N, 03° 47' W; 2400 m).

Naranjo *et al.* (2015, 2017) en la zona del estrecho de Gibraltar.

El caudal de salida del agua del Mediterráneo en el umbral de Espartel, mostró una leve tendencia a la baja, no significativa, desde 2004 (Sammartino *et al.*, 2014), con un ciclo estacional, con valores máximos en marzo y abril, que es cuando la interfaz se encuentra en su nivel más superficial. La salinidad, y particularmente la temperatura, de la MOW fueron bastante sensibles a este ciclo estacional, así como a la intensidad de los episodios de DWF en el Mediterráneo occidental. Desde 2004 a 2013 se detectó una tendencia ligeramente positiva tanto en temperatura (significativa al nivel de confianza del 95 %) como en salinidad (no significativa a este nivel), tendencia que aumentó en un factor de casi 4 a partir del año 2013. Esta notable aceleración del aumento en salinidad ha sido tentativamente relacionada con la WMT, a saber por el final del drenado de la WMDW previa a 2005, que había sido desplazada hacia arriba por la WMT (Naranjo *et al.*, 2017). En la parte oriental del golfo de Cádiz, desde 1996, la capa superior de la columna de agua, hasta 150 m, presentó un enfriamiento y disminución de salinidad y, por el contrario, en los niveles de la MOW (entre 350 y 550 m de profundidad), las aguas se fueron calentado y su salinidad fue en aumento (Informe de 2017 sobre Clima Oceánico (IROC) del Grupo de Trabajo sobre hidrografía oceánica (WGOH) del Consejo Internacional para la Exploración del Mar (ICES), *en prensa*). Estos cambios, no obstante, no han tenido ninguna influencia estadísticamente significativa en la estratificación de la columna de agua.

#### ***Aguas del Atlántico subtropical alrededor de las islas Canarias***

En 2011 se repitió la sección hidrográfica transatlántica a lo largo del paralelo 24° 30' N, muestreada anteriormente en 1992. La comparación de los resultados entre ambas secciones muestra que ha habido un aumento en el transporte hacia el sur de la capa superior de agua profunda del Atlántico Norte (NADW, en inglés), compensado por una disminución del transporte de la capa inferior de la NADW. Asimismo, se infiere un hundimiento del límite superior del agua de fondo antártica (AABW, en inglés) desde 1992 hasta 2011. En estos casi 20 años también se observa que el flujo hacia el norte del agua intermedia antártica (AAIW, en inglés) ha disminuido considerablemente. En conjunto, pues, el transporte total de calor a través del paralelo 24° 30' N no habría variado significativamente entre 1992 y 2011 (Vélez-Belchí *et al.*, 2010; Hernández-Guerra *et al.*, 2014).

Los registros de temperatura de la superficie del mar alrededor de las islas Canarias muestran una tendencia media al calentamiento de 0,28 °C por década, para el periodo 1982-2013, pero con una gran variabilidad espacial. En el margen continental las tendencias van desde casi cero en la región de afloramiento (Sáhara occidental), a más de 0,5 °C por década en la zona de hundimiento (entre Cabo Verde y cabo Blanco). Las observaciones hidrográficas en la región oceánica de la zona de transición costera durante el periodo 1997-2017 indican unas tendencias similares a las observadas por encima de la termoclina permanente

(200-600 dbar). Las observaciones hidrográficas obtenidas en aguas superficiales (50-150 dbar) de la región de afloramiento indican que durante los últimos 20 años ha habido una disminución de su temperatura y la salinidad, coherente con la intensificación de los vientos favorables al afloramiento asociada al calentamiento global. En términos de densidad, la tasa de calentamiento de las capas superiores se ha visto compensada por el aumento de salinidad, que ha sido de 0,02 por década. Las aguas intermedias y las de la capa superior de las profundas no muestran ninguna tendencia estadísticamente significativa. Por el contrario, las aguas más profundas (2600-3600 m) al norte de las islas Canarias presentan unas tasas de enfriamiento y disminución de salinidad de 0,01 °C y 0,002° por década, respectivamente (Vélez-Belchí *et al.*, 2015).

#### ***Nivel del mar***

Las observaciones del nivel del mar provienen de dos fuentes: los registros de mareógrafos y la altimetría por satélite. Durante la última década, ambos conjuntos de datos han mostrado cambios significativos que han permitido mejorar el conocimiento sobre la variabilidad del nivel del mar y sus tendencias.

Con respecto a la altimetría por satélite, la principal mejora proviene de la extensión de los registros, que en estos momentos ya cuentan con casi 25 años, junto con los esfuerzos para mejorar el procesado de los datos y correcciones geofísicas aplicadas. Ello ha permitido actualizar las tasas de aumento del nivel del mar, que habían sido evaluadas previamente en base a registros más cortos. En el mar Mediterráneo, por ejemplo, la altimetría por satélite muestra un incremento promedio del nivel del mar absoluto (geocéntrico) de  $2,6 \pm 0,2$  mm/año durante el periodo 1993-2015 (Marcos *et al.*, 2016). En ubicaciones particulares se muestran tendencias lineales que oscilan entre -4 y +6 mm/año, pero las tendencias positivas o negativas más extremas suelen estar más asociadas a la variabilidad de la circulación oceánica que a procesos persistentes a largo plazo. En el Atlántico nororiental, los valores de las tendencias son en su mayoría positivos (entre 1,0 y 4,5 mm/año (Pérez-Gómez *et al.*, 2015; Ablain *et al.*, 2017) y consistentes con los observados en el Mediterráneo. La estructura espacial de las tendencias muestra tanto la señal de la dinámica de mesoescala como la de gran escala.

En relación a los registros de los mareógrafos, ha habido una importante mejora en la estimación de los movimientos verticales (VLM) de la corteza terrestre, que en las ubicaciones de los mareógrafos, ha permitido separar las tendencias no climáticas de la contribución del océano. Así, restando la señal de VLM a los registros de los mareógrafos se ha obtenido una mayor coherencia espacial y, por lo tanto, una mejor comprensión de los procesos subyacentes a la variabilidad del nivel del mar en la costa (Wöppelmann y Marcos, 2012). Además, la extracción de los VLM es clave para poder comparar las tendencias del nivel del mar obtenidas mediante mareógrafos costeros con observaciones geocéntricas de altimetría. Con la digitalización y control de calidad de los registros en papel de mareógrafos antiguos y su intercomparación con medidas independientes



de nivel del mar, se han podido recuperar largas series de datos y estimar tendencias a largo plazo del nivel del mar, como por ejemplo, el registro de Tenerife (Marcos *et al.*, 2013). Durante la última década, también se han obtenido y mejorado las reconstrucciones regionales del campo de nivel del mar basadas en la combinación de altimetría y registros de mareógrafos, por ejemplo, en el Mediterráneo (Calafat y Jordà, 2011).

Durante la última década también ha habido un avance significativo en la comprensión de los procesos subyacentes a la variabilidad del nivel del mar. Por ejemplo, en lo que respecta al acoplamiento entre la variabilidad del nivel del mar en el Mediterráneo y en el Atlántico nororiental (Calafat *et al.*, 2012). Estos autores han puesto en evidencia que, además de la respuesta barotrópica a la presión atmosférica local y el viento, las variaciones costeras del nivel del mar en el límite oriental del Atlántico Norte (las que fuerzan el nivel del mar Mediterráneo) también muestran una respuesta baroclínica forzada por la componente del viento paralela a la costa. Otro avance ha sido la formulación del papel de la salinidad en la variabilidad del nivel del mar (Jordà y Gomis, 2013), que ha sido crucial para corregir las estimaciones previas de tendencias del nivel del mar en el Mediterráneo. Estos autores han demostrado que en mares semicerrados, la salinidad no solo contribuye negativamente a la componente estérica del nivel del mar, sino que al mismo tiempo contribuye positivamente a la componente de masa, por lo que ambas contribuciones prácticamente se cancelan.

Por último, también ha habido avances en el campo de la modelización regional (véanse los dos artículos de Jordà *et al.* en esta misma publicación). La razón de ser de los modelos regionales es que el diagnóstico del nivel del mar mediante modelos climáticos globales (MCG) no es un problema en sí mismo, pero esos modelos globales tienen poca resolución espacial que no es suficiente para resolver procesos relevantes en mares marginales, como la FADP en el Mediterráneo. En estos dominios se requiere, por tanto, modelos climáticos regionales (MCR) anidados con los MCG; en cuyo caso el problema se traslada a la configuración de las condiciones de contorno del MCR, que aunque sean correctas desde el punto de vista hidrodinámico, impiden un diagnóstico correcto del nivel del mar en el dominio regional (Adloff *et al.*, 2015). Este inconveniente ya ha sido reconocido (Slangen *et al.*, 2017) y se espera que quedará corregido en la próxima generación de MCR.

### **Conclusiones y observaciones finales**

Los resultados obtenidos confirman los impactos del calentamiento global en el océano a escala regional ibérica. Estos impactos a menudo se presentan como cambios repentinos o en forma de saltos, en lugar de observarse como tendencias uniformes. Dicho comportamiento es muy relevante, aunque a veces pase desapercibido, ya que puede aumentar la incertidumbre de las predicciones. En este artículo se resalta la importancia del seguimiento rutinario a largo plazo de las aguas marinas. Por desgracia, la mayor parte de la financiación dedicada a la investigación marina se basa en proyectos con un recorrido temporal limitado,

normalmente entre 3 y 4 años. Sin embargo, también es cierto que muchas de las observaciones en las que se basa el presente informe provienen de actividades de seguimiento y vigilancia que, si bien comenzaron a través de determinados proyectos científicos, actualmente se siguen manteniendo por parte del IEO y otras instituciones como Puertos del Estado o universidades. Este es el caso del IEOOS (Tel *et al.*, 2016) y de la estación de seguimiento fundada en el umbral de Espartel, en el estrecho de Gibraltar. Otras estaciones de vigilancia comenzaron como iniciativas voluntarias de muy bajo coste, por ejemplo la red Hydrochanges o algunas de las estaciones costeras más antiguas (Aquarium de San Sebastián o la estación de L'Estartit). En todos los casos, la utilidad de estas observaciones para seguir la evolución del cambio climático (además de para el estudio de los recursos biológicos y su dependencia de las variables fisicoquímicas, que son aspectos cruciales de la implementación de la Estrategia Marina de la UE) está más que demostrada. En cualquier caso, una estrategia más coordinada, que tuviera en cuenta la capacidad global del sistema de observación para detectar señales de cambio climático (en la línea del estudio de Llasses *et al.*, 2015) sería muy bienvenida.

### **Referencias**

- Ablain, M., Legeais, J. F., Prandi, P., Marcos, M., Fenoglio-Marc, L., Dieng, H. B., Benveniste, J., Cazenave, A., 2017: Satellite Altimetry-Based Sea Level at Global and Regional Scales. *Surv. Geophys.*, 38, 7-31.
- Adloff, F., Somot, S., Sevault, F., Jordà, G., Aznar, R., Déqué, M., Herrmann, M., Marcos, M., Dubois, C., Padorno, E., Álvarez-Fanjul, E., Gomis, D., 2015: Mediterranean Sea response to climate change in an ensemble of twenty first century scenarios. *Clim. Dyn.*, 45, 2775-2802.
- Borghini, M., Bryden, H., Schroeder, K., Sparnocchia, S. and Vetrano, A., 2014: The Mediterranean is becoming saltier. *Ocean Sci.*, 10, 693-700.
- Calafat, F. M., Jordà, G., 2011: A Mediterranean sea level reconstruction (1950-2008) with error budget estimates. *Global and Planetary Change*, 79 (1-2), 118-133.
- Calafat, F. M., Chambers, D. P., Tsimplis, M. N., 2012: Mechanisms of decadal sea level variability in the eastern North Atlantic and the Mediterranean Sea. *J. Geophys. Res. Oceans*, 117, C09022.
- CIESM, 2009: Dynamics of Mediterranean deep waters. *CIESM Workshop Monographs*, 38, 132 pp.
- Durrieu de Madron, X., Houpert, L., Puig, P., Sánchez-Vidal, A., Testor, P., Bosse, A., Estournel, C., Somot, S., Bourrin, F., Bouin, M. N., Beauverger, M., Beguery, L., Calafat, A., Canals, M., Cassou, C., Coppola, L., Dausse, D., D'Ortenzio, F., Font, J., Heussner, S., Kunesch, S., Lefevre, D., Le Goff, H., Martín, J., Mortier, L., Palanques, A., Raimbault, P., 2013: Interaction of dense shelf water cascading and open-sea convection in the northwestern Mediterranean during winter 2012. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 1379-1385.

- Durrieu de Madron, X., Ramonden, S., Berline, L., Houpert, L., Bosse, A., Martini, S., Guidi, L., Conan, P., Curtil, C., Delsaut, N., Kunesch, S., Ghiglione, J. F., Marsaleix, P., Pujo-Pay, M., Severin, T., Testor, P., Tamburini, C. and the ANTARES collaboration, 2017: Deep sediment resuspension and thick nepheloid layer generation by open-ocean convection. *J. Geophys. Res. Oceans*, 122.
- Font, J., Puig, P., Salat, J., Palanques, A., Emelianov, M., 2007: Sequence of hydrographic changes in the NW Mediterranean deep water due to the exceptional winter 2005. *Sci. Mar.*, 72, 339-346.
- García-Lafuente, J., Sánchez Román, A., Díaz del Río, G., Sannino, G., Sánchez-Garrido, J. C., 2007: Recent observations of seasonal variability of the Mediterranean outflow in the Strait of Gibraltar. *J. Geophys. Res.*, 112, C10005.
- Goikoetxea, N., Borja, A., Fontán, A., González, M., Valencia, V., 2009: Trends and anomalies in sea-surface temperature, observed over the last 60 years, within the southeastern Bay of Biscay. *Contin. Shelf Res.*, 29, 1060-1069.
- González, M., Fontán, A., Esnaola, G., Collins, M., 2013: Abrupt changes, multidecadal variability and long-term trends in sea surface temperature and sea level datasets within the southeastern Bay of Biscay. *J. Mar. Syst.*, 109-110, S144-S152.
- Häkkinen, S., Rhines, P. B. and Worthen, D. L., 2015: Heat content variability in the North Atlantic Ocean in ocean reanalyses. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 2901-2909.
- Hernández-Guerra, A., Pelegrí, J. L., Fraile-Nuez, E., Benítez-Barrios, V., Emelianov, M., Pérez-Hernández, M. D., Vélez-Belchí, P., 2014: Meridional overturning transports at 7.5°N and 24.5°N in the Atlantic Ocean during 1992-93 and 2010-11. *Prog. in Oceanogr.*, 128, 98-114.
- Larsen, K. M. H., González-Pola, C., Fratantoni, P., Beszczynska-Möller, A., and Hughes, S. L. (eds), 2016: ICES Report on Ocean Climate 2015. ICES Cooperative Research Report, 331. 79 pp.
- Jordà, G., Gomis, D., 2013: On the interpretation of the steric and mass components of sea level variability: The case of the Mediterranean basin. *J. Geophys. Res. Oceans*, 118.
- Lacombe, H., Tchernia, P., Gamberoni, L., 1985: Variable bottom water in the Western Mediterranean basin. *Prog. in Oceanogr.*, 14, 319-338.
- Levitus, S., Antonov, J. I., Boyer, T. P., Baranova, K., García, H. E., Locarnini, R. A., Mishonov, A. V., Reagan, J. R., Seidov, D., Yarosh, E. S., Zweng, M. M., 2012: World ocean heat content and thermosteric sea level change (0-2000 m), 1955-2010. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L10603.
- Llases, J., Jordà, G., Gomis, D., 2015: Skills of different hydrographic networks to capture changes in the Mediterranean Sea at climate scales. *Climate Research*, 63, 1-18.
- López-Jurado, J. L., González-Pola, C., Vélez-Belchí, P., 2005: Observation of an abrupt disruption of the longterm warming trend at the Balearic Sea, western Mediterranean Sea, in summer 2005. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L24606.
- Marcos, M., Puyol, B., Calafat, F. M., Wöppelmann, G., 2013: Sea level changes at Tenerife Island (NE Tropical Atlantic) since 1927. *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 112.
- Marcos, M., Jordà, G., Le Cozannett, G., 2016: Sea level rise and its impacts on the Mediterranean, in AllEnvi (ed.) The Mediterranean region under climate change. A scientific update (coordinated by S. Thiébaud and J-P Moatti). 22nd Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (COP22, Marrakech, 2016).
- Naranjo, C., Sammartino, S., García-Lafuente, J., Taupier-Letage, I., 2015: Mediterranean waters along and across the Strait of Gibraltar, characterization and zonal modification. *Deep-Sea Res.*, Part 1, 105, 41-52.
- Naranjo, C., García-Lafuente, J., Sammartino, S., Sánchez-Garrido, J. C., Sánchez-Leal, R., 2017: Thermohaline properties of the Mediterranean outflow over the past decade. *Geophys. Res. Lett.* (en revisión).
- Pérez Gómez, B., Álvarez Fanjul, E., Marcos, M., Puyol, B., García, M. J., 2015: Sea level variability and trends in the Canary Current Large Marine Ecosystem. En: Valdés, L. and Déniz González, I. (eds.). Oceanographic and biological features in the Canary Current Large Marine Ecosystem. IOC UNESCO, Paris. IOC Technical Series, No. 115, 309320.
- Prieto, E., González-Pola, C., Lavín, A., Holliday, N. P., 2015: Interannual variability of the northwestern Iberia deep ocean: Response to large-scale North Atlantic forcing. *J. Geophys. Res. Oceans*, 120.
- Puig, P., Durrieu de Madron, X., Salat, J., Schroeder, K., Martín, J., Karageorgis, A. P., Palanques, A., Roullier, F., López-Jurado, J. L., Emelianov, M., Moutin, T., Houpert, L., 2013: Thick bottom nepheloid layers in the Western Mediterranean generated by deep dense shelf cascading. *Prog. in Oceanogr.*, 111, 1-23.
- Sammartino, S., García-Lafuente, J., Naranjo, C., Sánchez-Garrido, J. C., Sánchez-Leal, R., Sánchez-Román, A., 2015: Ten years of marine current measurements in Espartel Sill, Strait of Gibraltar. *J. Geophys. Res.*, 120, 6309-6328.
- Schroeder, K., Chiggiato, J., Bryden, H. L., Borghini, M., Ismail, S. B., 2016: Abrupt climate shift in the Western Mediterranean Sea. *Sci. Rep.*, 6, 23009.
- Slangen, A. B. A., Adloff, F., Jevrejeva, S., Leclercq, P. W., Marzeion, B., Wada, Y., Winkelmann, R., 2017: A Review of recent updates of sea-level projections at global and regional scales. *Surv. Geophys.*, 38, 385-406.

- Somavilla, R., González-Pola, C., Rodríguez, C., Josey, S. A., Sánchez, R. F., and Lavín, A., 2009: Large changes in the hydrographic structure of the Bay of Biscay after the extreme mixing of winter 2005. *J. Geophys. Res.*, 114, C01001.
- Somavilla, R., González-Pola, C., Schauer, U. and Budéus, G., 2016: Mid-2000s North Atlantic shift: Heat budget and circulation changes. *Geophys. Res. Lett.*, 43, 2059-2068.
- Tel, E., Balbín, R., Cabanas, J. M., García, M. J., García-Martínez, M. C., González-Pola, C., Lavín, A., López-Jurado, J. L., Rodríguez, C., Ruiz-Villareal, M., Sánchez-Leal, R. F., Vargas-Yáñez, M., Vélez-Belchi, P., 2016: IEOOS: The Spanish Institute of Oceanography Observing System. *Ocean Sci. Discuss.*, 12, 345-353.
- Sullivan, C., 2016: The North Atlantic Ocean's missing heat is found in its depths, *Eos*, 97, doi:10.1029/2016EO047009. Publicado el 3 de marzo de 2016.
- Theocharis, A., Klein, B., Nittis, K., and Roether, W., 2002: Evolution and status of the Eastern Mediterranean Transient (1997-1999). *J. Mar. Syst.*, 33-34, 91-116.
- Ulses, C., Estournel, C., Puig, P., Durrieu de Madron, X., Marsaleix, P., 2008: Dense shelf water cascading in the northwestern Mediterranean during the cold winter 2005. Quantification of the export through the Gulf of Lion and the Catalan margin. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L07610.
- Vargas-Yáñez, M., Zunino, P., Schroeder, K., López-Jurado, J. L., Plaza, F., Serra, M., Castro, C., García-Martínez, M. C., Moya, F., Salat, J., 2012: Extreme Western Intermediate Water formation in Winter 2012. *J. Mar. Syst.*, 105-108, 52-59.
- Vargas-Yáñez, M., García-Martínez, M. C., Moya, F., Balbín, R., López-Jurado, J. L., Serra, M., Zunino, P., Pascual, J., Salat, J., 2017: Updating temperature and salinity mean values and trends in the Western Mediterranean: RADMED project. *Prog. in Oceanogr.*, 157, 27-46.
- Vélez-Belchí, P., Hernández-Guerra, A., Fraile-Nuez, E., Benítez-Barrios, V., 2010: Changes in Temperature and Salinity Tendencies of the Upper Subtropical North Atlantic Ocean at 24.5°N. *J. Phys. Oceanogr.*, 40, 2546-2555.
- Vélez-Belchí, P., González-Carballo, M., Pérez-Hernández, M. D., Hernández-Guerra, A., 2015: Open ocean temperature and salinity trends in the Canary Current Large Marine Ecosystem. En: Valdés, L. and Déniz-González, I. (eds.). Oceanographic and biological features in the Canary Current Large Marine Ecosystem. IOC UNESCO, Paris. *IOC Technical Series*, 115, 299-308.
- Wöppelmann, G., Marcos, M., 2012: Coastal sea level rise in southern Europe and the non-climate contribution of vertical land motion. *J. Geophys. Res. Oceans*, 117, C01007.
- Zunino, P., Schroeder, K., Vargas-Yáñez, M., Gasparini, G. P., Coppola, L., García-Martínez, M. C., Moya, F., 2012: Effects of the Western Mediterranean Transition on the resident water masses: Pure warming, pure freshening and pure heaving. *J. Mar. Syst.*, vol. 96-97, 15-23.



# Proyecciones de clima regional sobre España: atmósfera.

## Evaluación del clima presente

DOI: <https://doi.org/10.31978/639-18-002-5.08>

Juan Pedro Montávez<sup>1</sup>, Jesús Fernández<sup>2</sup>, Ana Casanueva<sup>2\*</sup>,  
José Manuel Gutiérrez<sup>3</sup>, Enrique Sánchez<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Modelización Atmosférica Regional, Departamento de Física, Universidad de Murcia, España

<sup>2</sup> Grupo de Meteorología, Dpto. Matemática Apl. y Ciencias de la Computación, Universidad de Cantabria, España

<sup>3</sup> Grupo de Meteorología, Instituto de Física de Cantabria (CSIC-UC), España

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Ambientales y Bioquímica, Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), España

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

### Introducción

Las proyecciones futuras de cambio climático se basan principalmente en simulaciones con modelos de circulación global (MCG) forzados por futuros escenarios de concentración de gases de efecto invernadero. Su relativamente vasta resolución horizontal hace que la representación de algunos procesos atmosféricos relevantes para el clima regional no sea realista. Por otro lado, los datos proporcionados no tienen la resolución espacial que a menudo se necesita para estudios de impacto y adaptación. Para superar estos problemas, se siguen dos enfoques principales de reducción de escala (*downscaling*) o regionalización: 1) la regionalización dinámica, basada en modelos climáticos regionales (MCR) alimentados por salidas de los MCG, y 2) la regionalización estadística (MRE) basada en establecer relaciones estadísticas entre la circulación a gran escala de MCG y el clima regional/local observado. En este contexto, la península ibérica es un candidato perfecto para los ejercicios de regionalización, debido a la complejidad de su orografía y a su posición respecto a la trayectoria de los ciclones extratropicales, lo que produce una alta heterogeneidad espacial de las condiciones climáticas.

El primer paso al aplicar una técnica de regionalización es verificar su capacidad para reproducir el clima observado. Este es un paso fundamental, ya que nos informa sobre la confianza que podemos tener cuando el método/modelo se aplica a escenarios de cambio climático (Sánchez *et al.*, 2011, entre muchos otros), clima pasado (Gómez-Navarro *et al.*, 2011), o la generación de una base de datos pseudo-reales (*hindcast* regional) para multitud de aplicaciones (Sotillo *et al.*, 2005; Jerez *et al.*, 2013c). Por otro lado, la evaluación del valor añadido con respecto al modelo global también es importante, porque la regionalización en los estudios climáticos solo tiene sentido si se proporciona información adicional y valiosa (Sánchez *et al.*, 2011; Jiménez-Guerrero *et al.*, 2013; Lorente-Plazas *et al.*, 2015).

La evaluación climática actual de las técnicas de regionalización se puede realizar bajo dos perspectivas diferentes, dependiendo de los datos que guíen al modelo regional. Por un lado, el uso de datos cuasi-observacionales (reanálisis o análisis) permite evaluar la destreza del MCR directamente. Por otro lado, la utilización de MCG (proyecciones históricas) en las condiciones actuales permite evaluar el rendimiento de acoplamientos MCG-MCR particulares. Esto es crucial para las distintas aplicaciones en estudios de cambio climático, ya que cualquier deficiencia en la representación del presente puede afectar la credibilidad de los cambios futuros que se proyecten (Turco *et al.*, 2013). La evaluación generalmente se realiza comparando distintos estadísticos climáticos (media, desviación estándar, así como otros índices) de los datos simulados y observados de referencia. Para simulaciones conducidas por reanálisis, la correspondencia diaria con observaciones se ha utilizado en algunos casos para evaluar los aspectos temporales de las simulaciones (para más detalles véase Maraun *et al.*, 2015).

En este artículo se presenta un resumen del progreso reciente en la evaluación de métodos de regionalización dinámicos y estadísticos en España. El objetivo es actualizar los resultados de la evaluación previa de CLIVAR-España (Sánchez y Míguez-Macho, 2010), que se basó principalmente en los resultados del proyecto europeo PRUDENCE. Los estudios mostrados en este trabajo se basaron en los resultados de posteriores iniciativas internacionales de regionalización como ENSEMBLES (Déqué *et al.*, 2012), VALUE (Maraun *et al.*, 2015) y CORDEX (Jacob *et al.*, 2014), así como de acciones estratégicas españolas para la generación coordinada de proyecciones regionales utilizando tanto métodos dinámicos (proyecto ESCENA) como estadísticos (proyecto ESTCENA). Estos proyectos han proporcionado simulaciones climáticas regionales con una resolución que varía de 0,44° a 0,11° (siendo la resolución típica de los MCG alrededor de 2°).

## Regionalización dinámica

Desde 2010 se han publicado multitud de estudios analizando los MCR en las condiciones climáticas actuales en la península ibérica. Algunos ejemplos son iniciativas y proyectos internacionales como EURO-CORDEX y Med-CORDEX o ENSEMBLES o el proyecto nacional ESCENA. Estos se pueden dividir en dos grupos: aquellos que se centran en la península ibérica o España (Herrera *et al.*, 2010; Jiménez-Guerrero *et al.*, 2013; Jerez *et al.*, 2013b, entre otros), y aquellos en los que la península ibérica es solo una parte del área analizada (Vautard *et al.*, 2013; Kotlarski *et al.*, 2014; Katragkou *et al.*, 2015, entre otros).

La mayoría de los estudios que evalúan los MCR generalmente se han centrado en la temperatura cerca de la superficie y la precipitación (Herrera *et al.*, 2010; Jerez *et al.*, 2013b; Gómez-Navarro *et al.*, 2013), otros se han centrado en el viento (Jiménez *et al.*, 2010; Lorente-Plazas *et al.*, 2015; Gómez *et al.*, 2016), la nieve (Pons *et al.*, 2016), la radiación (Ruiz-Arias *et al.*, 2013), o incluso los flujos entre la atmósfera y la superficie (Knist *et al.*, 2017). Cabe mencionar que la evaluación de varias variables involucradas en un proceso es altamente recomendable pues permite identificar y evitar posibles compensaciones de errores (García-Díez *et al.*, 2015b). Es importante prestar atención a los procesos en lugar o además de las variables. Por ejemplo, si se está interesado en la precipitación o el cambio de precipitación, hay que analizar el proceso (¿cómo/cuándo llueve?, ¿la cubierta de nubes es realista?, la separación de precipitación estratiforme y convectiva, etc.) para así poder contrastar nuestra confianza en el modelo. El potencial de la evaluación de procesos es una de las principales ventajas de los MCR respecto a los MRE. Otra dimensión a evaluar en los modelos es el régimen climático: evaluar la capacidad de reproducir el clima promedio (ciclo anual y variabilidad temporal) (Fernández *et al.*, 2007; Argüeso *et al.*, 2011; Jiménez-Guerrero *et al.*, 2013; López-Franca *et al.*, 2013) junto con regímenes de extremos (Argüeso *et al.*, 2012; Domínguez *et al.*, 2013; Vautard *et al.*, 2013; López-Franca *et al.*, 2015).

La principal conclusión de dichos estudios es que los MCR, en el caso particular de la península ibérica, proporcionan información muy valiosa, mejorando la distribución espacial regional y local de variables climáticas, debido principalmente a una mejor representación de las características de la superficie y la orografía. Los MCR son ampliamente capaces de capturar los regímenes espacio-temporales de precipitación, temperatura y viento, así como eventos extremos. Sin embargo, se observan sesgos sustanciales que dificultan la aplicabilidad directa de los resultados de los ejercicios con MCR en distintos sectores (hidrología, agricultura, energía, etc.). Esto abre un tema controvertido acerca de la corrección o ajuste del sesgo de los MCR, y su impacto sobre la señal del cambio climático (Casanueva *et al.*, 2018; Turco *et al.*, 2017). Además, los beneficios de aumentar la resolución en los MCR no son evidentes (por ejemplo, de  $0,44^\circ$  a  $0,11^\circ$ ). Mientras algunos estudios afirman que hay beneficios claros (Prein *et al.*, 2016), otros (García-Díez *et al.*, 2015a) sugieren que cuando la resolución aumenta, los índices de bondad tradicionales pueden

no ser apropiados, o incluso indican que no hay una clara mejora, como por ejemplo en los sesgos medios del modelo (Casanueva *et al.*, 2016b). Algunos resultados apuntan a que la formulación del modelo podría ser más importante que la resolución a la hora de tener una simulación más adecuada de ciertos procesos (Gaertner *et al.*, 2016).

Los datos observacionales (y la falta de ellos) juegan un papel clave en la evaluación de los modelos. Podemos encontrar dos fuentes principales de datos observacionales: datos meteorológicos en bruto (estaciones, sondeos, datos satelitales, etc.) y datos en rejilla basados en los anteriores. Los segundos son más comúnmente utilizados para la evaluación de MCR. Hay varias bases de datos en rejilla disponibles para España, como E-OBS, CRU y Spain02 (Herrera *et al.*, 2016). Estas se han construido usando distintos conjuntos de estaciones meteorológicas, así como diferentes métodos de interpolación. Esto genera diferencias importantes entre ellas, lo que hace que la evaluación del modelo sea dependiente de la propia base de datos que se escoja (Gómez-Navarro *et al.*, 2012). Por lo tanto, las bases de datos observacionales son una fuente importante de incertidumbre en la evaluación del modelo. Se han empleado varias metodologías para comparar modelos y datos observacionales: mediante comparación directa y usando regionalización (agrupamiento) de datos. La primera consiste en comparar el valor observado con los datos del modelo interpolados en dicha ubicación (Fernández *et al.*, 2007; Jiménez-Guerrero *et al.*, 2013). Aquí surge cierta controversia pues los resultados pueden depender del método de interpolación seleccionado o incluso estar afectados por parámetros muy locales. La segunda se basa en la selección de regiones espaciales con variabilidad temporal similar para la comparación (Herrera *et al.*, 2010; Argüeso *et al.*, 2011; Lorente-Plazas *et al.*, 2015; Argüeso *et al.*, 2011). Esta técnica parece ser más robusta ya que los efectos locales que los MCR no pueden explicar se filtran pero, por otro lado, la pérdida de detalles regionales podría ocultar el valor añadido de los experimentos de alta resolución.

La regionalización dinámica lleva inherentemente una serie de incertidumbres relacionadas con prácticamente cualquier cambio en el modelo: núcleo dinámico, parametrizaciones físicas, tamaño y posición del dominio, así como de las condiciones iniciales. Estas incertidumbres generalmente se exploran utilizando conjuntos de simulaciones. Varios estudios han analizado la incertidumbre introducida por muchos de estos factores, siendo los conjuntos multimodelo más comunes (Herrera *et al.*, 2010; Jiménez-Guerrero *et al.*, 2013; Domínguez *et al.*, 2013; Vautard *et al.*, 2013). Para la península ibérica también se han llevado a cabo varios estudios sobre conjuntos multifísica (Fernández *et al.*, 2007; Argüeso *et al.*, 2011; Argüeso *et al.*, 2012; García-Díez *et al.*, 2013; Jerez *et al.*, 2013b; Katragkou *et al.*, 2015). Los conjuntos multi-física tienen la ventaja de perturbar un solo componente del modelo (microfísica, convección, radiación, etc.), vinculando así las diferencias a procesos específicos. De esta forma, se puede evaluar la contribución de los diferentes componentes a la incertidumbre total, y también los posibles cambios en su rol en el clima futuro (Jerez y col., 2013a).

En la mayoría de los casos, las propiedades medias del conjunto muestran una gran mejora en la variabilidad temporal y la representación de los patrones espaciales de las variables climáticas frente a los miembros individuales, y muy a menudo la dispersión del conjunto suele cubrir los datos observados. Los conjuntos multifísica muestran una dispersión en los resultados comparable a la obtenida en conjuntos multimodelo, lo que sugiere que la distribución de conjuntos multimodelo se puede atribuir en gran medida a la diferente física de los modelos individuales. Otro resultado recurrente es que ningún miembro del conjunto, tanto en experimentos multifísica como en multimodelo, supera a los demás en todas las situaciones (tiempo y espacio) y los sesgos medios son independientes de la habilidad de reproducir la variabilidad temporal. Sin embargo, algunos esquemas o modelos particulares muestran un mejor rendimiento general, mientras que otros presentan peores resultados. Además, al evaluar modelos o parametrizaciones físicas analizando periodos largos (climatológicos) se concluye que los estudios a corto plazo deben usarse con precaución. Esto abre la puerta al problema de la destilación, es decir, poder decidir cómo las propiedades de los conjuntos deben ponderarse partiendo de mensajes contradictorios de diferentes modelos, configuraciones o experimentos para proporcionar información procesable. En los últimos años, la comunidad de MCR está incorporando más complejidad a sus modelos (principalmente componentes atmosféricos) acoplándolos a modelos de otros componentes del sistema climático a escala regional. Algunos ejemplos son los estudios de sensibilidad sobre el papel de los modelos de superficie terrestre (Jerez *et al.*, 2010; Jerez *et al.*, 2012; Knist *et al.*, 2017) o el acoplamiento a modelos oceánicos regionales (Gaertner *et al.*, 2016) y modelos de química atmosférica (Palacios-Peña *et al.*, 2017). Si bien se demuestra que el papel del modelo de tierra es crucial para una simulación climática correcta, especialmente en áreas con un régimen de transición en la retroalimentación tierra-atmósfera, no se encuentran trabajos que presenten claramente un impacto notable de acoplamiento de MCR a modelos oceánicos regionales. La mejora de las simulaciones climáticas por el acoplamiento de MCR a modelos de química no se ha experimentado completamente, aunque hay algunos resultados prometedores (Baró *et al.*, 2017).

### Regionalización estadística

Se pueden seguir dos enfoques fundamentales en el marco de la regionalización estadística. Bajo el enfoque *Perfect Prog* (PP), las relaciones estadísticas se calibran considerando observaciones tanto para los predictandos (observaciones históricas) como para los predictores (datos de reanálisis), mientras que las predicciones del modelo (MCG o MCR) se usan como predictores bajo la estrategia de estadísticas de salidas del modelo (MOS). El predictor típico en MOS es directamente la variable de interés, que se calibra con la equivalente local observada. En el contexto de cambio climático, se hace típicamente calibrando correcciones que ajustan parámetros de la distribución (por ejemplo, la media o percentiles), que generalmente se conocen como corrección de sesgo (en base a la distribución) (BC). Es importante señalar que la elección de reanálisis constituye una fuente adicional de incertidumbre para los

métodos de PP, aunque no desempeña un papel importante en la península ibérica (Brands *et al.*, 2012).

Gutiérrez *et al.* (2013) y San-Martín *et al.* (2017) evaluaron varios métodos convencionales de PP en España, incluyendo diferentes implementaciones del método de análogos, clasificación en tipos de tiempo y técnicas de regresión. Tras un proceso de selección analizando diferentes dominios y considerando distintas combinaciones de los predictores comúnmente utilizados, se comprobó que los resultados son más sensibles a la elección del predictor que al dominio geográfico, aunque generalmente se obtienen mejores resultados con dominios más pequeños cubriendo la península ibérica. En este caso se sugiere que la mejor configuración de predictores está formada por la presión a nivel del mar y la temperatura a 2 metros para pronosticar la temperatura, y la presión a nivel del mar, temperatura a 2 metros y la humedad específica a 850 hPa para la precipitación. Se demostró que los MCG del CMIP5 son capaces de simular bien estos predictores a gran escala (Brands *et al.*, 2013). Además, se han examinado otros métodos de regionalización estadística de PP en la península ibérica, incluyendo un método de análogos de dos pasos (Ribalaygua *et al.*, 2013) y una técnica estocástica de tipos de tiempo para precipitación (Osca *et al.*, 2013). Estos estudios se llevaron a cabo en el marco del proyecto ESTCENA, dentro del plan nacional español de escenarios regionalizados. Casanueva *et al.* (2016b) analizaron los sesgos de los MCR de EURO-CORDEX en la península ibérica y el efecto de los métodos de BC basados en correcciones sencillas (relacionadas con la intensidad y frecuencia de la precipitación). Además, se han analizado técnicas más sofisticadas de corrección de sesgo en la península ibérica (Amengual *et al.*, 2011), así como en el contexto de estudios a escala continental (Dosio y Paruolo, 2011).

Son interesantes los trabajos que combinan ambas técnicas (estadísticas y dinámicas). Turco *et al.* (2011) y Turco *et al.* (2017) analizaron el potencial de la regionalización estadística para la corrección de sesgo mediante los métodos MOS genéricos (basados en análogos), a partir de la correspondencia marginal diaria presentada por las simulaciones MCR alimentadas con reanálisis. Se mostró que estos métodos son una alternativa espacialmente coherente frente a los métodos de corrección de sesgos estándar, aunque la incapacidad de extrapolar para generar nuevos valores extremos implica que estos resultados se deban tomar con precaución en aplicaciones en las que este aspecto es relevante. Entre los beneficios de los MRE, cabe señalar que son menos costosos que los MCR desde el punto de vista computacional y permiten el pronóstico de variables no meteorológicas, como la energía eólica (García-Bustamante *et al.*, 2013) o índices climáticos de impacto (Casanueva *et al.*, 2014). La principal limitación de los MRE es que dependen de la serie temporal observada disponible para la fase de entrenamiento/calibración. Además, asumen que las relaciones estadísticas son invariables en el tiempo (hipótesis de estacionariedad) y pueden sufrir de la falta de capacidad de extrapolación cuando se utilizan en aplicaciones de cambio climático. Un ejemplo de esta limitación se puede encontrar en Gutiérrez *et al.* (2013) para métodos basados



en análogos sobre la península ibérica. Finalmente, es importante destacar que se han llevado a cabo varios estudios que comparan los métodos de regionalización estadísticos y dinámicos en la península ibérica (Casanueva *et al.*, 2013, San-Martín *et al.*, 2017). Es necesario hacer notar que para una comparación justa, se debe tener especial cuidado en utilizar índices adecuados que no estén calibrados directamente por ninguna de las dos metodologías (Casanueva *et al.*, 2016a).

## 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), 939-957.

Argüeso, D., Hidalgo-Muñoz, J. M., Gámiz-Fortis, S. R., Esteban-Parra, M. J., Castro-Díez, Y., 2012: Evaluation of WRF mean y extreme precipitation over spain: present climate (1970-99). *J. Climate*, 25 (14), 4883-4897.

Argüeso, D., Hidalgo-Muñoz, J. M., Gámiz-Fortis, S. R., Esteban-Parra, M. J., Dudhia, J., Castro-Díez, Y., 2011: Evaluation of WRF parameterizations for climate studies over southern spain using a multistep regionalization. *J. Climate*, 24 (21), 5633-5651.

Baró, R., Lorente-Plazas, R., Montávez, J., Jiménez-Guerrero, P., 2017: Biomass burning aerosol impact on surface winds during the 2010 russian heat wave. *Geophys. Res. Lett.*, 44 (2), 1088-1094.

Brands, S., Gutiérrez, J. M., Herrera, S., Cofiño, A. S., 2012: On the Use of Reanalysis Data for Downscaling. *J. Climate*, 25 (7), 2517-2526.

Brands, S., Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J. M., 2013: How well do CMIP5 Earth System Models simulate present climate conditions in Europe and Africa? *Clim. Dyn.*, 41, 803-817.

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.

Casanueva, A., Herrera, S., Fernández, J., Frías, M. D., Gutiérrez, J. M., 2013: Evaluation and projection of daily temperature percentiles from statistical and dynamical downscaling methods. *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.*, 13 (8), 2089-2099.

Casanueva, A., Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J. M., 2016a: Towards a fair comparison of statistical and dynamical downscaling in the framework of the EURO-CORDEX initiative. *Climatic Change*, 137, 411-426.

Casanueva, A., Kotlarski, S., Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J., Boberg, F., Colette, A., Christensen, O., Goergen, K., Jacob, D., Keuler, K., Nikulin, G., Teichmann, C., Vautard, R., 2016b: Daily precipitation statistics in a

EURO-CORDEX RCM ensemble: added value of raw and bias-corrected high-resolution simulations. *Clim. Dyn.*, 47 (3-4), 719-737.

Casanueva, A., Bedia, J., Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J. M., 2018: Bias correction of multi-variate climate indices: A new diagnostic tool to assess the effect on the climate change signal, *Climatic Change*, 10.1007/s10584-018-2167-5.

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.

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. y Paruolo, P., 2011: Bias correction of the ENSEMBLES high-resolution climate change projections for use by impact models: Evaluation on the present climate. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 116 (D16).

Fernández, J., Montávez, J., Sáenz, J., González-Rouco, J. F., Zorita, E., 2007: Sensitivity of the MM5 mesoscale model to physical parameterizations for regional climate studies: Annual cycle. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 112 (D4).

Gaertner, M. Á., González-Alemán, J. J., Romera, R., Domínguez, M., Gil, V., Sánchez, E., Gallardo, C., Miglietta, M. M., Walsh, K. J., Sein, D. V. *et al.*, 2016: Simulation of medicanes over the mediterranean sea in a regional climate model ensemble: impact of ocean-atmosphere coupling and increased resolution. *Clim. Dyn.*, pp. 1-17.

García-Bustamante, E., González-Rouco, J. F., Navarro, J., Xoplaki, E., Luterbacher, J., Jiménez, P. A., Montávez, J. P., Hidalgo, A., Lucio-Eceiza, E. E., 2013: Relationship between wind power production and North Atlantic atmospheric circulation over the northeastern Iberian Peninsula. *Clim. Dyn.*, 40 (3-4), 935-949.

García-Díez, M., Fernández, J., Fita, L., Yagüe, C., 2013: Seasonal dependence of WRF model biases and sensitivity to PBL schemes over europe. *Q. J. R. Met. Soc.*, 139 (671), 501-514.

García-Díez, M., Fernández, J., San-Martín, D., Herrera, S., Gutiérrez, J., 2015a: Assessing and improving the local added value of wrf for wind downscaling. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 54 (7), 1556-1568.

García-Díez, M., Fernández, J., Vautard, R., 2015b: A RCM multi-physics ensemble over europe: multi-variable evaluation to avoid error compensation. *Clim. Dyn.*, 45 (11-12), 3141-3156.

- 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., Romera, R., Gaertner, M. Á., 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., Montávez, J., Jerez, S., Jiménez-Guerrero, P., Lorente-Plazas, R., González-Rouco, J. F., Zorita, E., 2011: A regional climate simulation over the Iberian Peninsula for the last millennium. *Clim. Past.*, 7, 451-472.
- Gómez-Navarro, J., Montávez, J., Jerez, S., Jiménez-Guerrero, P., Zorita, E., 2012: What is the role of the observational dataset in the evaluation and scoring of climate models? *Geophys. Res. Lett.*, 39 (24).
- Gómez-Navarro, J., Montávez, J., Wagner, S., Zorita, E., 2013: A regional climate palaeosimulation for Europe in the period 1500-1990, part 1: Model validation. *Clim. Past*, 9 (4), 1667-1682.
- Gutiérrez, J. M., San-Martín, D., Brands, S., Manzananas, R., Herrera, S., 2013: Reassessing Statistical Downscaling Techniques for Their Robust Application under Climate Change Conditions. *J. Climate*, 26 (1), 171-188.
- Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J. M., 2016: Update of the Spain02 gridded observational dataset for EURO-CORDEX evaluation: assessing the effect of the interpolation methodology. *Int. J. Climatol.*, 36 (2), 900-908.
- Herrera, S., Fita, L., Fernández, J., Gutiérrez, J. M., 2010: Evaluation of the mean and extreme precipitation regimes from the ensembles regional climate multimodel simulations over Spain. *J. Geophys. Res.: Atmosph.*, 115 (D21).
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Krner, N., Kotlarski, S., Kriegsman, A., Martin, E., Meijgaard, E. von, Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P., 2014: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14 (2), 563-578.
- Jerez, S., Montávez, J., Gómez-Navarro, J., Jiménez, P., Jiménez-Guerrero, P., Lorente, R., y 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., Jiménez-Guerrero, P., Jiménez, J., González-Rouco, J. F., 2010: Temperature sensitivity to the land-surface model in MM5 climate simulations over the Iberian peninsula. *Meteorologische Zeitschrift*, 19 (4), 363-374.
- Jerez, S., Montávez, J. P., Gómez-Navarro, J. J., Lorente-Plazas, R., García-Valero, J. A., Jiménez-Guerrero, P., 2013a: A multi-physics ensemble of regional climate change projections over the Iberian Peninsula. *Clim. Dyn.*, 41 (7-8), 1749-1768.
- Jerez, S., Montávez, J. P., Jiménez-Guerrero, P., Gómez-Navarro, J. J., Lorente-Plazas, R., Zorita, E., 2013b: A multi-physics ensemble of present-day climate regional simulations over the Iberian peninsula. *Clim. Dyn.*, 40 (11-12), 3023-3046.
- Jerez, S., Trigo, R. M., Vicente-Serrano, S. M., Pozo-Vázquez, D., Lorente-Plazas, R., Lorenzo-Lacruz, J., Santos-Alamillos, F., Montávez, J., 2013c: The impact of the north Atlantic oscillation on renewable energy resources in southwestern Europe. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 52 (10), 2204-2225.
- Jiménez, P. A., González-Rouco, J. F., García-Bustamante, E., Navarro, J., Montávez, J. P., de Arellano, J. V.-G., Dudhia, J., y Muñoz-Roldán, A., 2010: Surface wind regionalization over complex terrain: Evaluation and analysis of a high-resolution WRF simulation. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 49 (2), 268-287.
- Jiménez-Guerrero, P., Montávez, J., Domínguez, M., Romera, R., Fita, L., Fernández, J., Cabos, W., Liguori, G., Gaertner, M., 2013: Mean fields and interannual variability in RCM simulations over Spain: the ESCENA project. *Clim. Res.*, 57 (3), 201-220.
- Katragkou, E., García-Díez, M., Vautard, R., Sobolowski, S., Zanis, P., Alexandri, G., Cardoso, R., Colette, A., Fernández, J., Gobiet, A. *et al.*, 2015: Regional climate hindcast simulations within EURO-CORDEX: evaluation of a WRF multi-physics ensemble. *Geosc. Model Develop.*, 8 (3), 603-618.
- Knist, S., Goergen, K., Buonomo, E., Christensen, O. B., Colette, A., Cardoso, R. M., Fealy, R., Fernández, J., García-Díez, M., Jacob, D. *et al.*, 2017: Land-atmosphere coupling in EURO-CORDEX evaluation experiments. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. doi: 10.1002/2016JD025476.
- Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O. B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Goergen, K., Jacob, D., Lüthi, D., Meijgaard, E. van, Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V., 2014: Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geosc. Model Develop.*, 7 (4), 1297-1333.
- López-Franca, N., Sánchez, E., Domínguez, M., 2013: Changes in the onset and length of seasons from an ensemble of regional climate models over Spain for future climate conditions. *Theor. Appl. Climatol.*, 114 (3-4), 635-642.
- 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), 661-677.

- Lorente-Plazas, R., Montávez, J., Jerez, S., Gómez-Navarro, J., Jiménez-Guerrero, P., Jiménez, P., 2015: A 49 year hindcast of surface winds over the Iberian peninsula. *Int. J. Climatol.*, 35 (10), 3007-3023.
- Maraun, D., Widmann, M., Gutiérrez, J. M., Kotlarski, S., Chandler, R. E., Hertig, E., Wibig, J., Huth, R., Wilcke, R. A., 2015: VALUE: A framework to validate downscaling approaches for climate change studies. *Earth's Future*, 3 (1), 2014EF000259.
- Osca, J., Romero, R., Alonso, S., 2013: Precipitation projections for Spain by means of a weather typing statistical method. *Global Planet. Change*, 109, 46-63.
- Palacios-Peña, L., Baró, R., Guerrero-Rascado, J. L., Alados-Arboledas, L., Brunner, D., Jiménez-Guerrero, P., 2017: Evaluating the representation of aerosol optical properties using an online coupled model over the Iberian peninsula. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17 (1), 277.
- 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), 3645-3655.
- Prein, A., Gobiet, A., Truhetz, H., Keuler, K., Goergen, K., Teichmann, C., Maule, C. F., Meijgaard, E. van, Déqué, M., Nikulin, G. *et al.*, 2016: Precipitation in the EURO-CORDEX 0.11° and 0.44° simulations: high resolution, high benefits? *Clim. Dyn.*, 46 (1-2), 383-412.
- Ribalaygua, J., Torres, L., Pórtoles, J., Monjo, R., Gaitán, E., Pino, M. R., 2013: Description and validation of a two-step analogue/regression downscaling method. *Theor. Appl. Climatol.*, 114 (1-2), 253-269.
- Ruiz-Arias, J. A., Dudhia, J., Santos-Alamillos, F. J., Pozo-Vázquez, D., 2013: Surface clear-sky shortwave radiative closure intercomparisons in the weather research and forecasting model. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 118 (17), 9901-9913.
- 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), 203-223.
- 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>
- Sánchez, E., Domínguez, M., Romera, R., López-Franca, N., Gaertner, M. Á., Gallardo, C., Castro, M., 2011: Regional modeling of dry spells over the Iberian peninsula for present climate and climate change conditions. *Climatic change*, 107 (3), 625-634.
- Sotillo, M., Ratsimandresy, A., Carretero, J., Bentamy, A., Valero, F., González-Rouco, F., 2005: A high-resolution 44-year atmospheric hindcast for the Mediterranean basin: contribution to the regional improvement of global reanalysis. *Clim. Dyn.*, 25 (2-3), 219-236.
- 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), 2631-2648.
- 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).
- Turco, M., Sanna, A., Herrera, S., Llasat, M.-C., Gutiérrez, J. M., 2013: Large biases and inconsistent climate change signals in ensembles regional projections. *Climatic Change*, 120 (4), 859-869.
- Vautard, R., Gobiet, A., Jacob, D., Belda, M., Colette, A., Déqué, M., Fernández, J., García-Díez, M., Goergen, K., Guttler, I. *et al.*, 2013: The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. *Clim. Dyn.*, 41 (9-10), 2555-2575.



# Proyecciones de clima regional sobre España: atmósfera.

## Proyecciones de clima futuro

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

Jesús Fernández<sup>1</sup>, Ana Casanueva<sup>1\*</sup>, Juan Pedro Montávez<sup>2</sup>, Miguel Ángel Gaertner<sup>3</sup>,  
María Jesús Casado<sup>4</sup>, Rodrigo Manzanás<sup>5</sup>, José Manuel Gutiérrez<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup> Grupo de Modelización Atmosférica Regional, Departamento de Física, Universidad de Murcia, España

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

<sup>4</sup> Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), España

<sup>5</sup> 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).

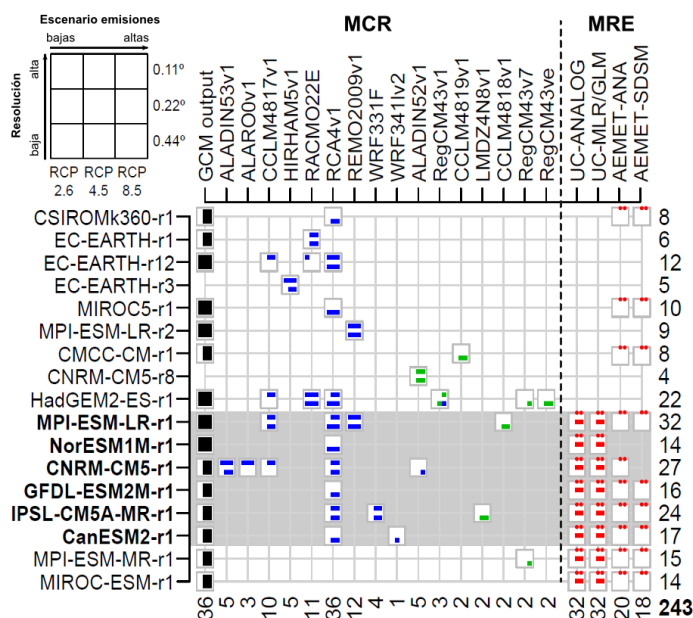
Otros estudios analizan otras variables, como la nieve, la velocidad del viento o los periodos de sequía. Por ejemplo, Pons *et al.* (2016) encontraron una tendencia decreciente en la frecuencia anual de nevadas (número de días al año con nevadas) en las proyecciones regionales de ENSEMBLES, con valores 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.

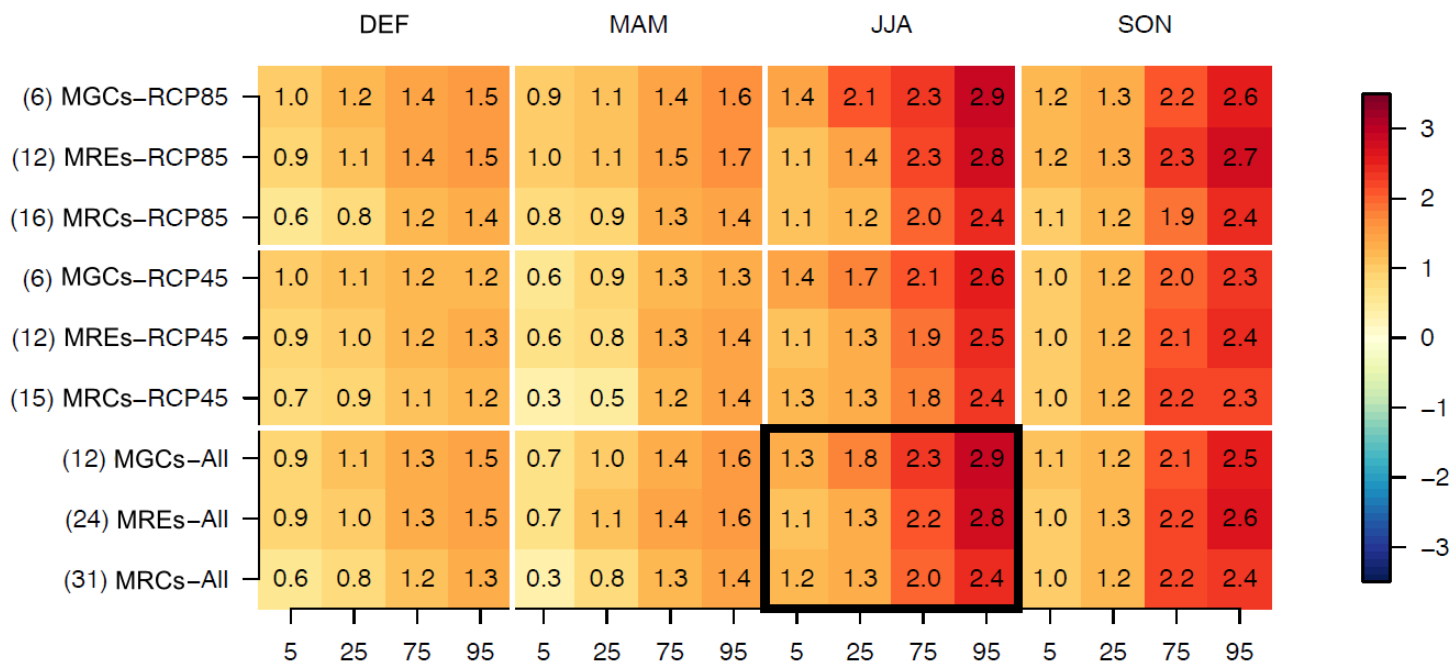
Además de las actividades del PNACC, ha habido también otra serie de estudios de proyecciones regionales de cambio climático en España, de gran valor para el estudio de climas regionales. Por ejemplo, Osca *et al.* (2013) aplicaron una técnica de clasificación de tipos de tiempo para la precipitación 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

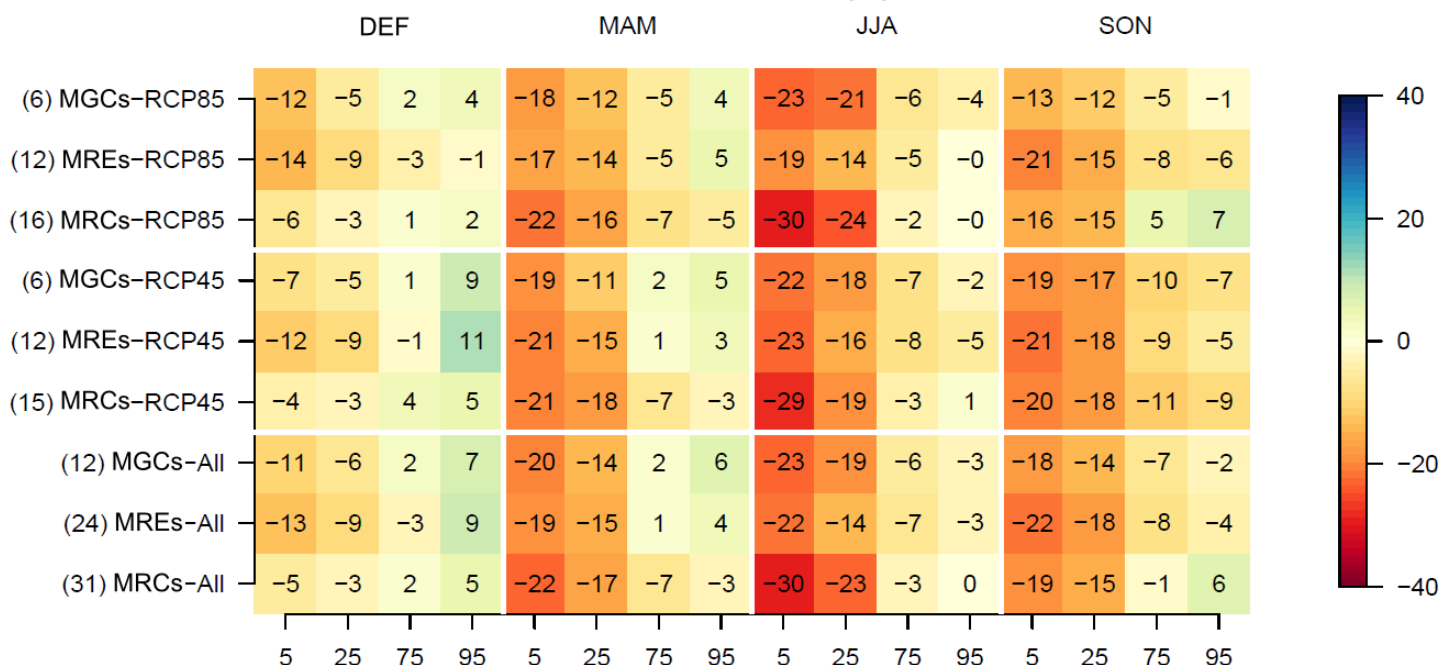


**Figura 1.** Matriz (a 30 de abril de 2017) de cruces MCG-MRC/MRE para los conjuntos de proyecciones regionales dinámicas (azul de EURO-CORDEX, verde de MED-CORDEX) y estadísticas (rojo), basadas en proyecciones globales del CMIP5. Los números muestran el número de miembros de cada conjunto (frecuencias 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.

## Temperatura (°C)



## Precipitación (%)



**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](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 «medicanes» 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

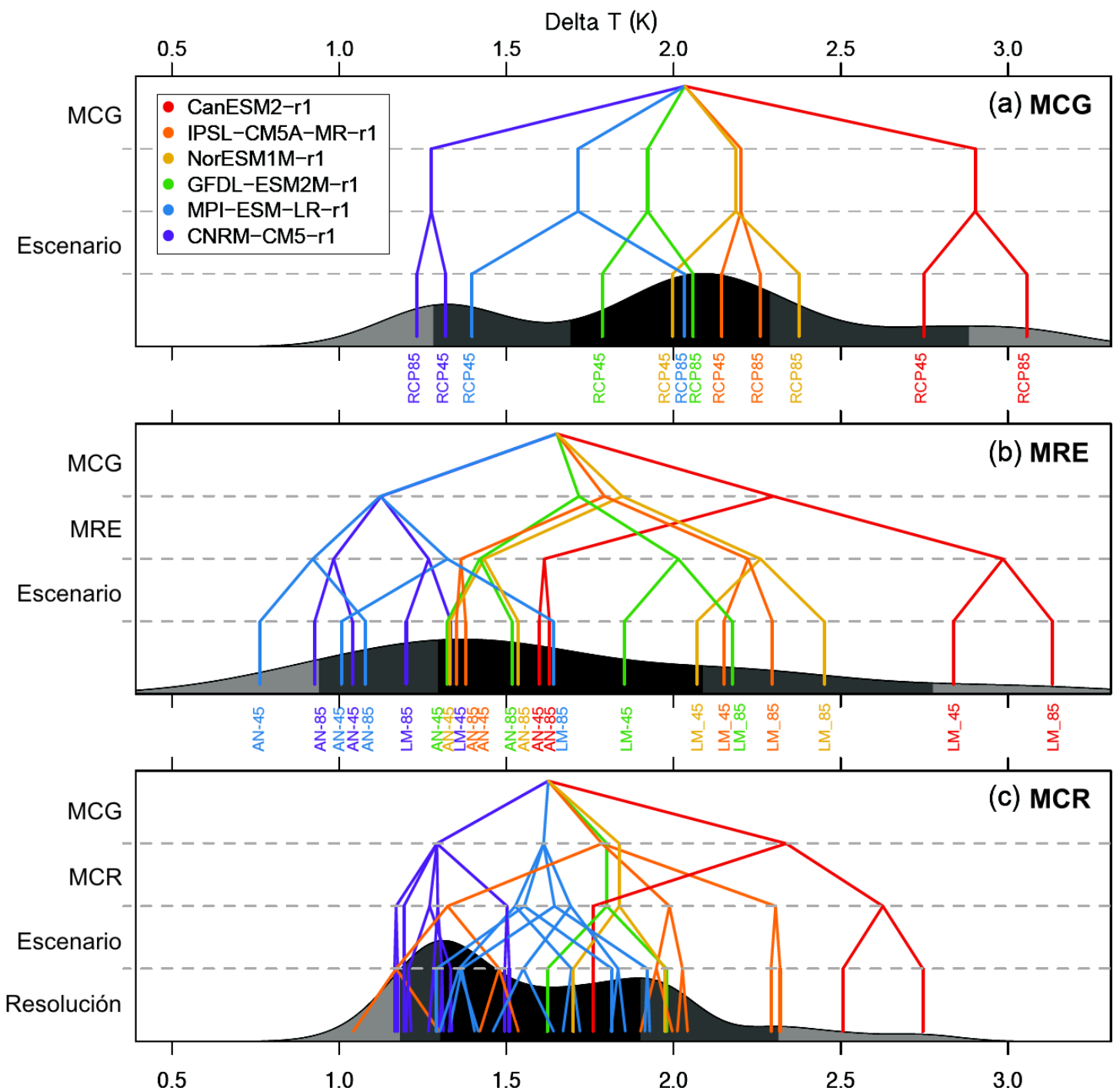
También se ha desarrollado una serie de estudios que analizan el impacto de las proyecciones de cambio climático en diferentes sectores socio-económicos utilizando índices relacionados con el clima a partir de información regionalizada. Por ejemplo, Bedia *et al.* (2013, 2014) analizaron las proyecciones 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 MRC, 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 MRC 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 MRC 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/serviciosclimaticos/cambio\\_climat/datos\\_mensuales/ayuda](http://www.aemet.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., Lebeau-pin-Brossier, C., Li, L., Liguori, G., Lionello, P., Maciàs, D., Nabat, P., Öno, 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.

Gabriel Jordà<sup>1</sup>, Melisa Menéndez<sup>2</sup>, Roland Aznar<sup>3</sup>, Agustín Sánchez-Arcilla<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut Mediterrani d'Estudis Avançats (IMEDEA: Universitat de les Illes Balears - CSIC), España

<sup>2</sup> Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria, España

<sup>3</sup> Puertos del Estado, España

<sup>4</sup> Laboratori d'Enginyeria Marítima, Universitat Politècnica de Catalunya, España

## Introducción

Los cambios en el clima marino debido al calentamiento global pueden tener consecuencias dramáticas para un país como España, donde el océano juega un papel clave en la socioeconomía del país. En España, una gran parte de la población vive en zonas costeras o cerca de ellas y la economía nacional depende en gran medida del turismo, la pesca y las actividades de transporte marítimo (Kersting, 2016). El calentamiento global tendría un impacto en el medio ambiente marino de diferentes maneras. El aumento de las temperaturas globales implica un aumento en la temperatura del océano que a su vez implica un aumento del nivel del mar a través de la expansión térmica de la columna de agua. Además, el calentamiento induce mayores tasas de fusión del hielo terrestre, que también contribuyen a aumentar el nivel del mar. Tal aumento se traduciría en un aumento de las inundaciones costeras, la salinización de los acuíferos o en un aumento de los daños asociados a las tormentas marinas (Nicholls y Cazenave, 2010). Otro efecto potencial del calentamiento global es la modificación de los sistemas de circulación atmosférica (por ejemplo, campos de viento o anomalías de presión a nivel del mar), que se traduce en una modificación de la variabilidad del nivel del mar (básicamente a través de mareas meteorológicas y oleaje) debido a forzamientos meteorológicos. Los cambios en la intensidad, dirección o periodo de las olas de viento pueden alterar i) la morfodinámica de las áreas costeras (por ejemplo, erosión de la playa, retroceso de la línea costa) y ii) aumentar los daños provocados por las tormentas marinas (Field, 2012). Finalmente, el calentamiento global también puede inducir cambios en las corrientes oceánicas y la redistribución de la sal y el calor. Las alteraciones de los campos de temperatura y salinidad pueden tener profundos impactos en ciertos ecosistemas marinos a través del aumento de la mortalidad de ciertas especies, el desplazamiento de nichos ecológicos o la llegada de especies invasoras (por ejemplo, Marbà *et al.*, 2015).

Varios trabajos han analizado el impacto potencial del cambio climático en el medio marino español. Por ejemplo, Losada *et al.* (2014) y Sánchez-Arcilla *et al.* (2016) analizaron los posibles impactos costeros, Gomis y Álvarez-Fanjul (2016) se enfocaron en las tendencias de las variables atmosféricas y oceánicas de las últimas décadas y el siglo XXI en áreas cercanas a los puertos españoles, y Kersting (2016) compiló los impactos y la vulnerabilidad de los ecosistemas

marinos. Sin embargo, todavía se requiere una revisión actualizada de los impactos proyectados del calentamiento global sobre las variables físicas alrededor de las costas españolas. En el último informe de CLIVAR-España (Pérez-Fiz *et al.*, 2013), Vargas-Yáñez *et al.* revisaron los signos de los cambios observados en el clima marino alrededor de las costas españolas. Sin embargo, no se abordó el tema de las proyecciones marinas regionales porque en ese momento había pocos estudios disponibles. Hoy en día la existencia de varios estudios nos permite dibujar una imagen general de cuál será el impacto del calentamiento global en el medio marino español. Este es el objetivo de este capítulo.

El capítulo está organizado abordando primero la región mediterránea y luego la región atlántica. Esta distinción es requerida por razones físicas. Ambas regiones se comportan de manera muy diferente y los mecanismos que impulsan la evolución del clima marino en cada región son bastante independientes. Por lo tanto, tiene más sentido separar ambas regiones en el análisis. También hay que señalar que, probablemente debido a la singularidad de la cuenca mediterránea, hay muchos más estudios regionales centrados en el Mediterráneo que en el Atlántico nororiental. Aquí hemos intentado compensar este desequilibrio analizando también estudios globales que arrojan algo de luz sobre la evolución del NE atlántico. Para cada sección estudiamos diferentes variables: oleaje, nivel del mar, temperatura y salinidad. El análisis de las corrientes no está incluido debido a la falta de estudios que se centren en esta variable. Finalmente, vale la pena mencionar que en la actualidad existen pocos estudios regionales basados en los escenarios de RCP (Moss *et al.*, 2010) que son los utilizados en el último informe del IPCC (AR5, Collins *et al.*, 2013). La razón es que las proyecciones oceánicas siempre se retrasan con respecto a las simulaciones climáticas globales. Los modelos oceánicos regionales requieren un forzamiento atmosférico de alta resolución (es decir, regionalización de los modelos globales) que a su vez requieren algún tiempo para producirse después de la aparición de las proyecciones climáticas globales. En consecuencia, aquí revisaremos los estudios utilizando los escenarios RCP y también los SRES (es decir, el informe IPCC-AR4). Cabe señalar que el calentamiento global proyectado en los escenarios RCP comparte algunas similitudes con el proyectado en los escenarios SRES, por lo que ambos conjuntos de escenarios se pueden asimilar.



## A. Región mediterránea

### A.1 Oleaje

El clima de oleaje en la costa mediterránea española es más suave que en el Atlántico con alturas de ola medias más pequeñas (1-1,5 m) y periodos más cortos (5-6 s) y presenta una variabilidad espacial importante. Las variaciones estacionales muestran un comportamiento diferente con respecto al patrón invierno-verano de las costas atlánticas, con un fuerte patrón semestral (Menéndez *et al.*, 2014) definido por alturas máximas de oleaje en primavera y otoño. Esto es debido a la presencia de ciclones intensos que resultan del aumento de las interacciones aire-mar durante ese periodo.

La evolución del clima de oleaje está fuertemente determinada por la evolución futura de las trayectorias de las tormentas. Aunque la mayoría de las proyecciones muestran un aumento de la intensidad del viento al norte de 45° N (Donat *et al.*, 2011; Nikulin *et al.*, 2011), la ubicación del desplazamiento hacia los polos está sujeta a debate (Scaife *et al.*, 2012). Además, a pesar de no ser el factor predominante, los ciclones extratropicales también se ven afectados por la concentración de vapor de agua en la atmósfera, lo que aumenta su intensidad, y por los gradientes de temperatura en la superficie del mar (SST), que afecta su posición y actividad (Bengtsson *et al.*, 2006). Debido a estos factores, la mayoría de los estudios coinciden en que habrá una disminución en el número de ciclones en el Mediterráneo. Sin embargo, hay una falta de consenso sobre si el número de ciclones intensos aumentará o disminuirá (véase por ejemplo, Pinto *et al.*, 2007).

Estos cambios también determinan las proyecciones del oleaje. Lionello *et al.* (2008) han corrido un modelo regional de olas para todo el Mediterráneo bajo los escenarios A2 y B2. Han descubierto que la altura media significativa (Hs) en gran parte del mar Mediterráneo sería menor durante todas las estaciones a fines del siglo XXI con una reducción mayor durante el invierno (alrededor de -20 cm) en el escenario A2. Estos cambios son similares, aunque más pequeños y menos significativos, en el escenario B2, excepto durante el invierno en el noroeste del mar Mediterráneo, donde se encontrarían alturas de oleaje mayores que en la actualidad. En cuanto a los eventos extremos, estos autores también han encontrado valores más pequeños en escenarios futuros que en el clima actual. Además, han demostrado que, en general, los cambios de Hs, la velocidad del viento y la circulación atmosférica son consistentes. Casas-Prat y Sierra (2013) han corrido un modelo de oleaje regional del Mediterráneo occidental forzado bajo el escenario A1b por 5 regionalizaciones atmosféricas diferentes. Sus resultados muestran un aumento en los vientos y las olas del noroeste sobre el golfo de León, lo que se traduce en un mayor predominio futuro de los estados de vientos marinos en esa región. Estos autores han encontrado cambios de altura proyectados en torno al ~ 10% para condiciones medias, ~ 20% para clima extremo (nivel de retorno de 50 años) y pequeños cambios en la frecuencia de aparición de olas desde diferentes direcciones (~ 5%). En sus resultados, los patrones espaciales de cambio son complejos y los resultados de los modelos forzados por diferentes

modelos climáticos globales (GCM) no concuerdan. Finalmente, en un trabajo basado en *downscaling* estadístico, Pérez *et al.* (2015) proyectó una disminución en Hs (Tm) de -5 cm (-0,1 s) en el escenario RCP8.5, -3 cm (-0,2 s) en el escenario RCP4.5, y ningún cambio en el escenario RCP 2.6. Estos resultados concuerdan con los estudios mencionados anteriormente y apuntan a una disminución mayor de la altura de la ola en escenarios de mayor emisión. Sin embargo, es importante tener en cuenta las grandes incertidumbres asociadas a estas proyecciones.

### A.2 Nivel del mar

Modelar la variabilidad del nivel del mar en el mar Mediterráneo no es sencillo. Por un lado, los GCM no tienen suficiente resolución espacial para reproducir los mecanismos principales que controlan la dinámica regional (Calafat *et al.*, 2012a). Por ejemplo, la redistribución del calor dentro de la cuenca está fuertemente sesgada si se utiliza una resolución demasiado gruesa (Llasses *et al.*, 2016). Esto tiene un fuerte impacto en la fiabilidad de las proyecciones de temperatura en el Mediterráneo y, en consecuencia, en la expansión térmica. Por otro lado, a bajas frecuencias la variabilidad del nivel del mar Mediterráneo está fuertemente influenciada por los cambios en el Atlántico cercano (Calafat *et al.*, 2012b), que generalmente no está incluido en los modelos climáticos regionales (RCM) lo que hace que sea imposible para ellos para estimar las tendencias a largo plazo del nivel total del mar (Calafat *et al.*, 2012a).

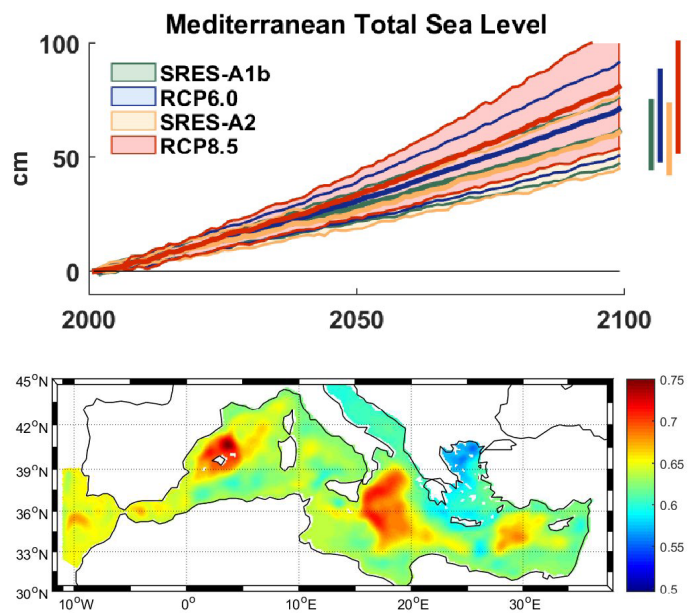
Hasta ahora, los estudios regionales sobre las proyecciones del nivel del mar Mediterráneo se han centrado en uno de los componentes de la variabilidad del nivel del mar: el componente estérico (es decir, relacionado con los cambios en la densidad de la columna de agua). Sin embargo, debido a la complejidad de la dinámica de la cuenca, se ha demostrado que las proyecciones basadas únicamente en el componente estérico deben considerarse cuidadosamente (Jordà y Gomis, 2013). Carillo *et al.* (2012) calcularon la evolución del componente estérico en el Mediterráneo hasta 2050, utilizando dos simulaciones forzadas por el modelo ECHAM5 en el escenario A1b. Sus resultados muestran una expansión térmica de ~ 5 cm en 2050. También concluyeron que las diferencias en la temperatura de las aguas del Atlántico que desembocan en el Mediterráneo tienen poco efecto sobre la evolución térmica de la cuenca. Gualdi *et al.* (2013) utilizaron un conjunto de cinco modelos regionales de atmósfera-océano acoplados para estimar la evolución del componente estérico hasta 2050 bajo el escenario A1b. Sus resultados mostraron un aumento en ese componente de ~ 15 cm, aunque debe notarse que esto no es completamente representativo del nivel total del mar ya que los efectos de la salinidad no están bien considerados. Adloff *et al.* (2015) utilizaron un conjunto de modelos oceánicos regionales para producir proyecciones del componente termostérico y para realizar diferentes experimentos de sensibilidad. Sus resultados proyectan una expansión térmica promedio de la cuenca a fines del siglo XXI que oscila entre +34 y +49 cm bajo el escenario A2. Esas discrepancias se deben principalmente a las condiciones prescritas para el forzamiento del Atlántico, por lo tanto, de alguna manera en

desacuerdo con Carillo *et al.* (2012), que no encontró una sensibilidad significativa al forzamiento del Atlántico. Además, Adloff *et al.* (2015) mostraron que se obtuvieron resultados similares forzando el modelo bajo el escenario A1b. Finalmente, Somot *et al.* (2016) siguió un enfoque diferente que combina información de modelos globales con resultados de modelos regionales para inferir una visión más completa de las futuras proyecciones del mar Mediterráneo. A partir de sus resultados, se puede ver que el nivel del mar Mediterráneo básicamente seguirá los cambios globales del nivel medio del mar debido a la combinación de dos factores. En primer lugar, los cambios de circulación en el Atlántico nororiental se traducirán en un aumento del nivel del mar Mediterráneo mayor que el promedio mundial. En segundo lugar, el efecto de la fusión continental de hielo dará lugar a cambios inferiores a la media mundial. Esos dos cambios se compensarán aproximadamente. Al final, el cambio total del nivel del mar para el Mediterráneo se ha proyectado que oscile entre 40 y 100 cm (Figura 1a). Además, Somot *et al.* (2016) mostraron que las diferencias regionales dentro de la cuenca podrían diferir hasta +15 cm del promedio de la cuenca (Figura 1b).

En cuanto a los eventos extremos del nivel del mar, Marcos *et al.* (2011) utilizaron un modelo de marea meteorológica forzado por un modelo atmosférico regional bajo los escenarios B2, A1b y A2 para caracterizar su evolución debido al cambio climático. Sus resultados apuntan hacia una reducción en el número promedio de eventos extremos positivos, mientras que los eventos extremos negativos aumentarán a lo largo del siglo XXI. Tales cambios en la magnitud de los eventos extremos pueden atribuirse en parte a la tendencia negativa del nivel medio del mar inducido atmosféricamente para el futuro (Jordà *et al.*, 2012a), con cambios en invierno de hasta  $-8$  cm bajo el escenario A2, aunque en general los resultados indican pequeños cambios en comparación con su magnitud actual (reducción de  $-10$  %). Jordà *et al.* (2012a) también encontraron que algunos eventos en las simulaciones de escenarios podrían ser especialmente fuertes, lo que sugiere que se pueden esperar menos ciclones, con un aumento en la fuerza para algunos de ellos. Conte y Lionello (2013) realizaron un conjunto de simulaciones de marea meteorológica con siete miembros hasta 2050, forzados bajo el escenario A1b. Encontraron una disminución general de  $\sim 5$  % en la magnitud de las tormentas positivas con cambios de hasta  $-10$  % en algunos lugares a lo largo de las costas mediterráneas. Cabe destacar que mostraron grandes diferencias entre simulaciones y que los resultados entre modelos no eran espacialmente coherentes. En un trabajo más reciente, Lionello *et al.* (2016) encontró resultados más consistentes. En otras palabras, las proyecciones de eventos extremos del nivel del mar en el Mediterráneo son muy sensibles a la elección del forzamiento atmosférico.

### A.3 Temperatura y salinidad

La evolución de las propiedades hidrográficas del Mediterráneo está estrechamente relacionada con la evolución del agua y los flujos de calor a través de la superficie del mar. Las proyecciones de modelos regionales (RCM) para la región mediterránea sugieren una disminución de la pérdida

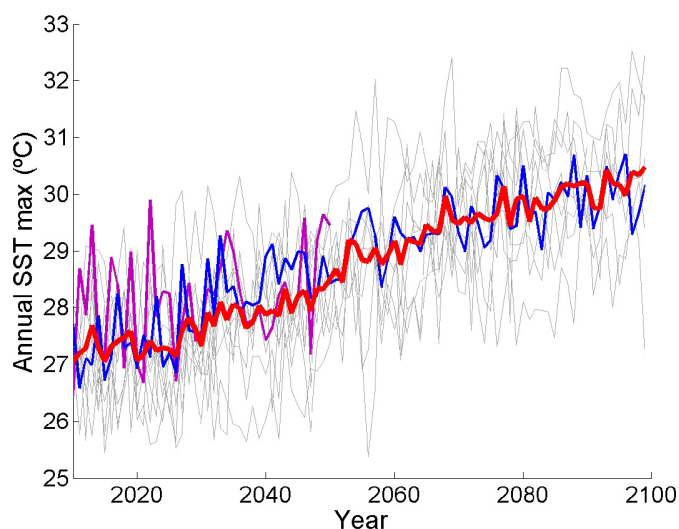


**Figura 1.** (Arriba), proyecciones del promedio de cuenca del nivel del mar Mediterráneo (en cm, adaptado de Somot *et al.*, 2016). (Abajo), distribución espacial de la proyección de nivel del mar Mediterráneo (en m) bajo un escenario moderado (RCP4.5 o A1b).

de calor en la superficie y un aumento del flujo de agua hacia la atmósfera (Collins *et al.*, 2013). Sánchez-Gómez *et al.* (2009) analizaron los resultados de 12 RCM forzados por 6 GCM diferentes bajo el escenario A1b. Sus resultados muestran que es probable que el balance hídrico del Mediterráneo se modifique significativamente a fines del siglo XXI. Específicamente, las proyecciones regionales muestran un aumento del 12 % en la evaporación, una reducción del 16 % en la precipitación, una reducción del 24 % en la escorrentía de los ríos y una reducción del 40 % en la contribución del mar Negro. Todos estos cambios resultan en un aumento del 40 % de las pérdidas de agua. La respuesta de las variables hidrológicas al calentamiento global comienza a ser estadísticamente significativa después de 2050, aunque ya se observaron algunas alteraciones antes de 2050. Dubois *et al.* (2012), utilizando un pequeño conjunto de modelos climáticos regionales acoplados atmósfera-océano (AORCM), mostraron resultados similares. Además, esas simulaciones proyectan un aumento de la pérdida de calor en la superficie para el periodo 2020-2050 que varía de  $-1,8$  a  $-5,5$   $W/m^2$ .

Esos cambios en los flujos superficiales tienen un impacto directo en la evolución de la temperatura y la salinidad en el Mediterráneo (Figura 2). Los GCM corridos bajo el escenario A1B proyectan un aumento de la temperatura media de  $2,8$  °C a fines del siglo XXI, con una dispersión de  $1,0$  °C (Jordà *et al.*, 2012b). Otros estudios basados únicamente en RCM proporcionan resultados muy similares. Gualdi *et al.* (2013) utilizando un conjunto de cinco AORCM mostraron una proyección de SST promediada para 2050 que oscila entre  $1,2$  °C y  $2$  °C. Adloff *et al.* (2015), en un conjunto de RCM oceánicos forzados, obtuvieron aumentos

de la SST promedio en la cuenca que variaban de +1,7 a +3,0 °C durante el periodo 2070-2099. Con respecto a la salinidad superficial del mar (SSS), Adloff *et al.* (2015) mostraron anomalías que variaban entre +0,48 y +0,89 en el periodo 2070-2099. Sus resultados sugieren que la evolución del agua superficial en la zona del Atlántico próximo, que es muy incierta en los GCM, tiene un gran impacto en la evolución de las masas de agua del Mediterráneo. También destacaron que el aumento de la SSS sería altamente heterogéneo con cambios regionales que podrían exceder de 1, principalmente debido a los cambios en la escorrentía de los ríos.



**Figura 2.** Proyecciones de la temperatura máxima anual de la superficie del mar (°C) para el Mediterráneo occidental a partir de un conjunto de GCM (líneas grises delgadas) y dos RCM oceánicos (líneas violeta y azul). La media del conjunto se muestra en rojo (adaptado de Jordà *et al.*, 2012b).

Los cambios en la temperatura y la salinidad también se sentirían en las capas más profundas. La mayor parte del calentamiento ocurriría en las capas 0-100, 100-600 y 600-fondo (+0,6 °C, 0,5 °C y 0,4 °C, respectivamente, en 2050), y de manera similar en las cuencas oriental y occidental (Carillo *et al.*, 2012; Adloff *et al.*, 2015). En cuanto a la salinidad, ambos estudios mostraron un aumento de +0,3-0,5 en toda la columna de agua durante el mismo periodo. A partir de un análisis de sensibilidad, estos autores han sugerido que la elección de las condiciones de frontera del Atlántico tiene un gran impacto en la evolución de la temperatura y la salinidad de la columna de agua, mientras que la elección del escenario tiene un impacto mucho menor que para las variables de superficie. También mostraron que la penetración de las anomalías de calor y sal desde la superficie a capas profundas varía de acuerdo con la simulación y depende de los cambios en las áreas convectivas, que están influenciadas por el estado histórico de la estratificación vertical y la circulación termohalina mediterránea asociada.

## B. Región atlántica

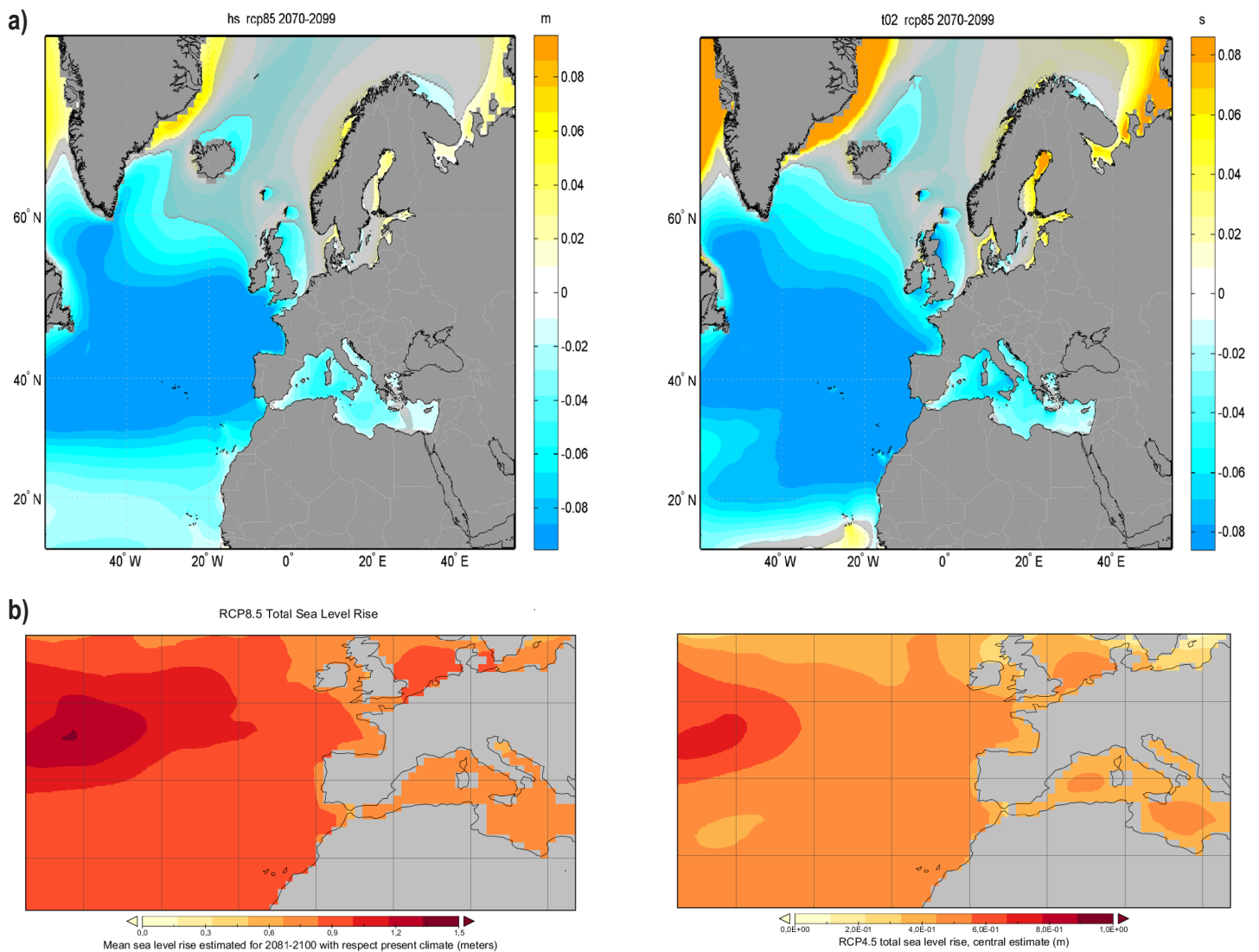
### B.1. Oleaje

Las costas del Atlántico español incluyen diferentes áreas regionales: golfo de Vizcaya, mar Cantábrico, golfo de Cádiz y las islas Canarias. En general, la fuerza y la dirección de los vientos del oeste y el recorrido de las tormentas son los principales factores climáticos que determinan el oleaje en el noreste atlántico. Las características del clima eólico marino varían sin embargo significativamente a lo largo de los márgenes atlánticos españoles (Menéndez *et al.*, 2014). Las costas del norte son aquellas que muestran las tempestades de olas más intensas (oleajes energéticos) generadas en toda la cuenca del noreste del Atlántico (Pérez *et al.*, 2014), con alturas promedio de onda de 2-2,5 m y un periodo de ola medio con valores máximos de ~ 10 s. En el golfo de Cádiz y las islas Canarias, los efectos del oleaje generado en latitudes altas en el Atlántico Norte son menos intensos (Izaguirre *et al.*, 2010), siendo la altura media de las olas de alrededor de 1-1,5 m y el pico medio de 7-8 s. Además, las características de la onda tienen una fuerte variabilidad temporal, tanto a escalas estacionales como interanuales. Una gran fracción de la energía de las olas a lo largo de la costa atlántica española puede asociarse a patrones de circulación atmosférica de gran escala, principalmente a la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la Oscilación Ártica (AO) y la oscilación del Atlántico oriental (EA) (véase por ejemplo, Izaguirre *et al.*, 2010; Espejo *et al.*, 2014; Martínez-Asensio *et al.*, 2015).

Con respecto a las proyecciones basadas en regionalizaciones dinámicas del clima de oleaje, el estudio global de Hemer *et al.* (2013a) es notable ya que proporciona una investigación integrada de 5 estudios independientes realizada en el marco del Proyecto Coordinado del Clima de Oleaje (COWCLIP). Sus resultados sugieren que para el Atlántico nororiental al final del siglo XXI habrá una disminución general de la altura de ola significativa (Hs, 5-10 %) y del periodo medio (Tm) y que esos cambios se concentrarán en la temporada de invierno. Estos resultados están en línea con las conclusiones de otros estudios basados en simulaciones individuales que utilizan el forzamiento de un modelo climático global (por ejemplo, Semedo *et al.*, 2013, Hemer *et al.*, 2013b). Complementariamente hay algunos estudios basados en modelos regionales, que usan una resolución más alta para el forzamiento atmosférico y los modelos de olas. Charles *et al.* (2012) proyectó una disminución muy similar de la altura de ola en invierno en el golfo de Vizcaya mediante el uso del ARPEGE-Climat GCM en tres escenarios climáticos futuros diferentes (B1, A1B, A2). En particular, mostraron una reducción de -5/-10 % en Hs dependiendo de la temporada. Un estudio similar fue realizado por Gomis *et al.* (2016) usando cuatro modelos climáticos globales parentales (GCM) en el escenario A1b. En todos los casos, los cambios proyectados fueron modestos (menos del 10 % de reducción al final del siglo XXI en todas las variables), y encontraron que la elección del GCM que impulsa el modelo atmosférico regional puede conducir a cambios significativos en los resultados.

Las proyecciones estadísticas proporcionan un complemento interesante a las simulaciones dinámicas del clima de





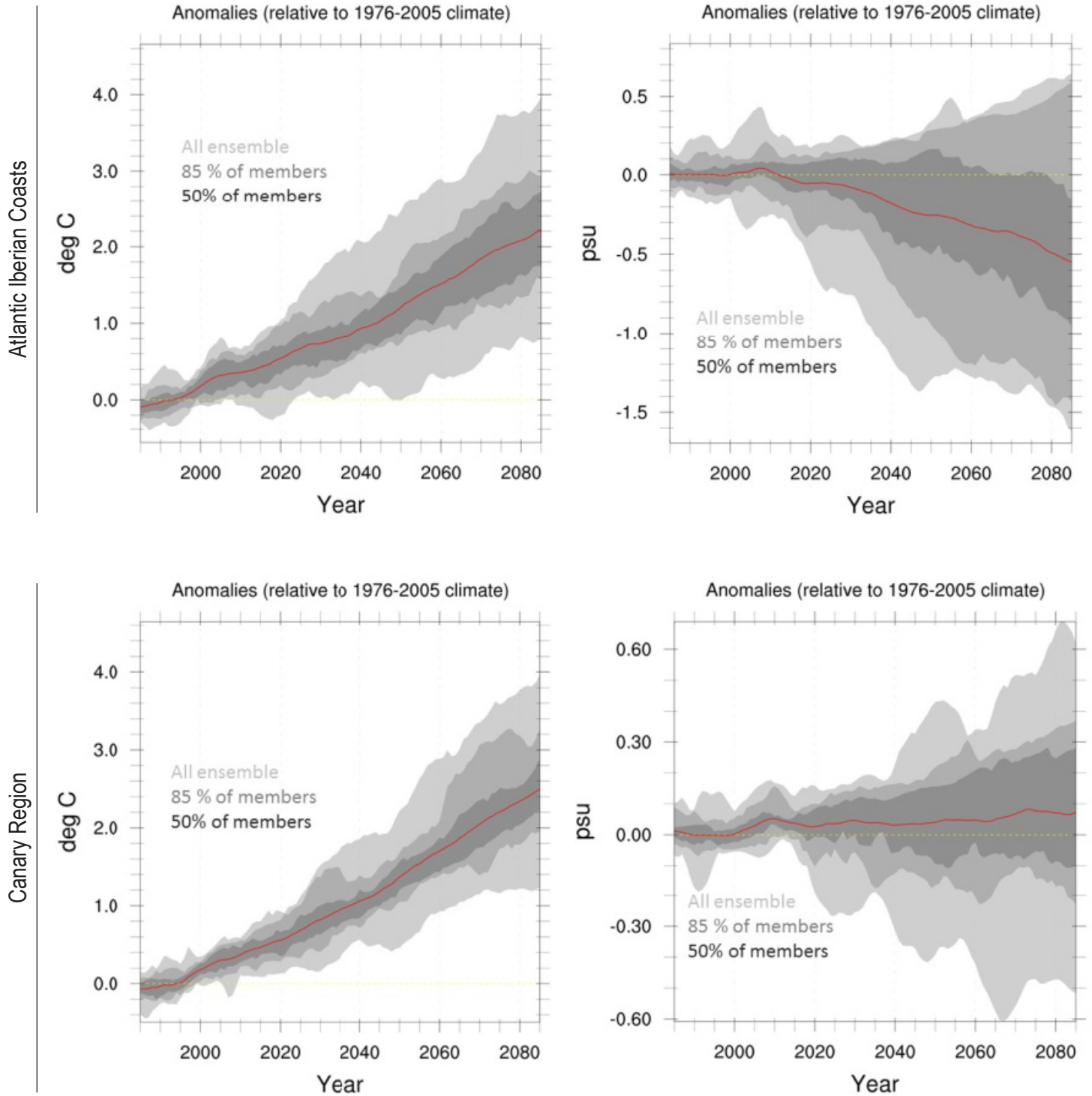
**Figura 3.** a) Altura significativa de ola (izquierda) y periodo medio (derecha) proyectados en el escenario RCP8.5 para el periodo 2070-2100 y expresados como anomalías con respecto al periodo 1970-2000 (adaptado de Pérez *et al.*, 2015). b) Aumento medio del nivel del mar proyectado en el escenario RCP 8.5 (izquierda) y RCP4.5 (derecha) para el periodo de 20 años 2081-2100 y expresado como anomalías con respecto al periodo 1986-2005 (adaptado de Church *et al.*, 2013).

ola atlántica. Wang *et al.* (2014) utilizaron el *downscaling* estadístico basado en la presión del nivel del mar (SLP) como predictor bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Sus resultados sugieren una disminución estadísticamente significativa de  $-10/-15$  cm de H promedio en el Atlántico NE y una reducción de  $-50/-60$  cm en la altura máxima. Además, no vieron diferencias significativas entre los resultados obtenidos con los nuevos GCM CMIP5 (IPCC-AR5) de lo obtenido con los antiguos GCM CMIP3 (IPCC-AR4). Pérez *et al.* (2016) desarrollaron un estudio regional de proyección del clima de oleaje multimodelo centrado en la costa europea. Analizaron la calidad de los modelos climáticos sobre el Atlántico Norte (Pérez *et al.*, 2014) y finalmente utilizaron 17 modelos climáticos atmosféricos del CMIP5 para construir el conjunto de simulaciones. Aplicaron un *downscaling* estadístico basado en la clasificación del tipo de clima utilizando SLP como predictor. Sus resultados sugieren que alrededor de las costas atlánticas ibéricas el cambio proyectado en Hs (Tm) es  $-10$  cm,  $-5$  cm y  $-2$  cm ( $-0,08$  s,  $-0,06$  s y  $-0,02$  s) para los escenarios

RCP8.5, RCP4.5 y RCP2.6, respectivamente (véase la Figura 3). Un resultado importante de ese estudio es la conclusión robusta de que los escenarios moderados de emisiones conducen a cambios moderados en la altura de la ola. Sus resultados también muestran que más del 80 % de las simulaciones coinciden en el signo del cambio en las costas españolas. Conclusiones similares han sido obtenidas por Martínez-Asensio *et al.* (2016).

### 3.2. Nivel del mar

Las proyecciones más actualizadas del nivel del mar medio a escala global (GMSL) basadas en modelos basados en procesos indican que a fines del siglo XXI el GMSL sería significativamente más alta de lo que era a fines del siglo XX. Los resultados sugieren que el aumento probablemente esté en el rango de 0,29-0,55 m para RCP2.6, 0,36-0,63 m para RCP4.5, 0,37-0,64 m para RCP6.0, y 0,48-0,82 m para RCP8.5 (Church *et al.*, 2013). Las proyecciones basadas en modelos semiempíricos sugieren incluso un aumento mayor, de 1 a 2 m (por ejemplo, Rahmstorf *et al.*, 2007).



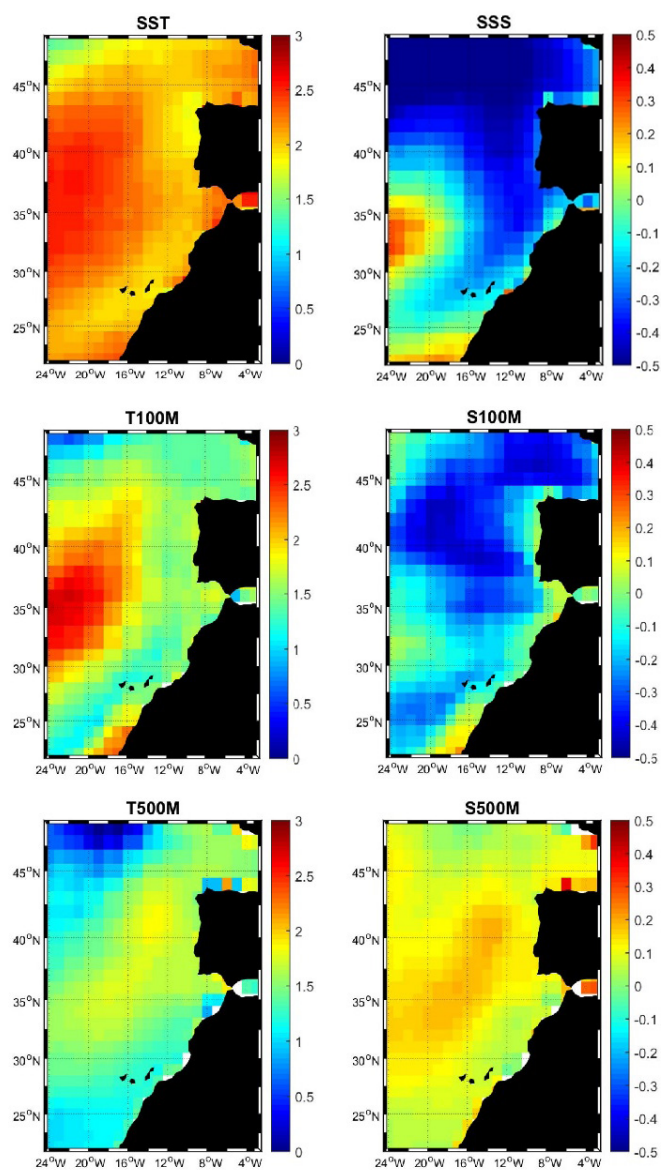
**Figura 4.** Evolución de la temperatura de la superficie del mar (**SST, izquierda**) y salinidad de la superficie del mar (**SSS, derecha**) en el conjunto CMIP5 de GCM bajo el escenario RCP8.5. Los resultados se muestran para la costa atlántica ibérica (**arriba**) y la región canaria (**abajo**). La línea roja representa la media del conjunto y los diferentes tonos de gris indican la dispersión del conjunto de simulaciones cuando se considera un % dado de los miembros. Tenga en cuenta los diferentes ejes verticales en cada figura.

Sin embargo, es bien sabido que el aumento no sería homogéneo y que se deberían esperar grandes diferencias regionales (por ejemplo, Pardaens *et al.*, 2011). Hasta donde sabemos, solo el estudio de Gomis *et al.* (2016) ha utilizado un modelo oceánico regional para generar proyecciones del aumento del nivel del mar a lo largo de las costas atlánticas españolas. Trabajaron bajo el escenario A1b, considerando solo los efectos de la expansión térmica y los cambios de circulación y su horizonte temporal fue 2050. Sus resultados sugieren una tasa de nivel del mar de  $1,36 \pm 0,27$  mm/año y  $2,18 \pm 0,54$  mm/año en el NE atlántico dependiendo del GCM utilizado para proporcionar las condiciones de contorno (ECHAM5 o HADCM3low). Una descripción más completa del aumento del nivel del mar regional ha sido proporcionada por Slangen *et al.* (2017), que actualiza trabajos anteriores sobre el mismo problema. Han analizado diferentes componentes del aumento del nivel del mar regional utilizando 21 proyecciones del modelo climático CMIP5 con contribuciones regionales basadas en modelos y observaciones de hielo terrestre, aportes de aguas subterráneas y ajuste isostático glacial, incluyendo los efectos gravitacionales debidos a la redistribución de masa. Sus resultados para el Atlántico nororiental en los escenarios RCP4.5/RCP8.5 indican que el nivel total del mar aumentaría 45/70 cm a fines del siglo XXI (Figura 3b). De ese total, 8/12 cm serían causados por derretimiento del hielo terrestre, 25/40 cm por cambios en la dinámica oceánica, 15 cm por la contribución de las plataformas de hielo, 5 cm por almacenamiento de agua terrestre y 2 cm por GIA.

Un complemento al estudio de la evolución del nivel medio del mar es el análisis de eventos extremos. En particular, los eventos extremos positivos causados por bajas presiones atmosféricas y vientos hacia tierra (es decir, marejadas ciclónicas) que amontonan el agua a lo largo de la costa son los responsables de los mayores daños en las infraestructuras costeras. Marcos *et al.* (2011) y Jordà *et al.* (2012a) han analizado esos efectos utilizando un modelo regional de marea meteorológica forzado por el modelo atmosférico regional ARPEGE en los escenarios B2, A1b y A2. Sus resultados muestran que el nivel de retorno de 50 años disminuiría entre 5 y 1 cm a fines del siglo XXI dependiendo del escenario elegido. Además, se esperan los mayores cambios en el golfo de Vizcaya. Esta reducción está asociada a una disminución en el número de eventos extremos positivos (~ 2 eventos/año menos al final del siglo) y a un aumento en la presión atmosférica media en invierno (es decir, el periodo donde ocurren los eventos más extremos) que se traduce en una reducción de ~ 4 cm en el golfo de Vizcaya a finales de siglo. Gomis *et al.* (2016), usaron la misma configuración de modelo pero forzados por otros GCM. Sus resultados no son concluyentes en cuanto las simulaciones forzadas por ECHAM5 y HADCM3low mostraron un cambio ligeramente positivo (~ 10 cm) del nivel de retorno de 50 años, mientras que las forzadas por HADCM3red y HADCM3high muestran exactamente lo contrario. Esto sugiere la ausencia de tendencias claras en las tormentas de la región. Es decir, los niveles extremos del mar serán más altos en el siglo XXI debido al aumento en el nivel medio del mar, no debido a un aumento significativo en las tormentas.

### 3.3. Temperatura y salinidad

Existen pocos estudios que analicen la evolución de la temperatura y la salinidad en las costas atlánticas españolas y la mayoría de ellos se basan en los resultados de los GCM (por ejemplo, Chust *et al.*, 2010, Villarino *et al.*, 2015). La Figura 4 muestra la evolución temporal del conjunto de proyecciones CMIP5 SST y SSS para las costas ibéricas del Atlántico y para la región de las islas Canarias. Se proyecta que la SST aumentará alrededor de  $2,2$  °C y  $2,4$  °C respectivamente a fines de siglo con la mayor tasa de aumento para después de 2050. La diferencia entre ambas regiones se encuentra en la dispersión del conjunto de simulaciones. En las costas ibéricas, el 50 % de los miembros del conjunto proyectan un aumento que oscila entre  $1,8$  y  $2,6$  °C, mientras que en la región de Canarias el aumento oscila entre  $2,2$  y  $2,8$  °C. Para la SSS, las diferencias entre las regiones son relativamente más grandes. Las proyecciones muestran una bajada de salinidad en el margen ibérico



**Figura 5.** Anomalia media del conjunto de CMIP5 para el periodo (2050-2099) con respecto a (1956-2005). Los mapas se muestran para la temperatura en °C (izquierda) y para la salinidad en psu (derecha), en la superficie (arriba), 100 m (centro) y 500 m (abajo).



y una ligera salinización de la región de Canarias (los cambios proyectados son de  $-0,5$  psu y  $+0,1$  psu, respectivamente). Nuevamente, la dispersión del conjunto es mayor para los márgenes ibéricos (de  $-0,9$  a  $-0,1$  psu) que para la región de Canarias (de  $-0,1$  a  $+0,3$  psu).

Si observamos diferentes profundidades (Figura 5) en el escenario RCP8.5, encontramos un calentamiento en toda la columna de agua. El aumento promedio a lo largo de las costas atlánticas españolas para la segunda mitad del siglo XXI fue de  $2-2,5$  °C,  $1-1,5$  °C y  $1-1,6$  °C en superficie, 100 m y 500 m respectivamente. En cuanto a la salinidad, los resultados son un poco diferentes. Si bien se espera que la salinidad superficial disminuya alrededor de  $0,3$  psu, los cambios a 100 m y 500 m a lo largo de las costas españolas son apenas significativos. Con respecto a la salinidad del océano abierto se espera que disminuya también a 100 m, mientras que aumentaría a 500 m. Con respecto a la estratificación vertical, los resultados apuntan a un aumento en la estratificación de la columna de agua (temperaturas más altas y salinidades más bajas en las capas superiores), lo que podría tener implicaciones para los ecosistemas costeros.

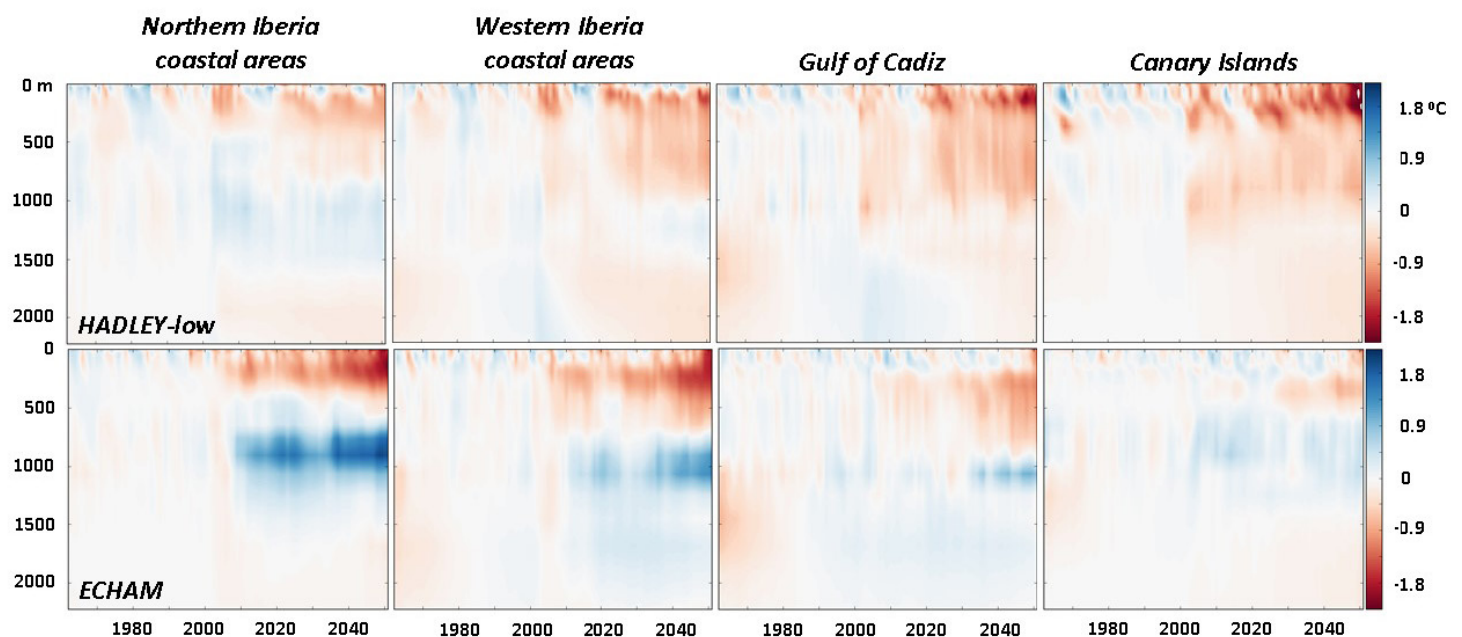
Los GCM muestran un comportamiento de algún modo distinto a lo largo del margen ibérico en comparación con el mar abierto. Su resolución espacial es demasiado gruesa para ser fiable y, por lo tanto, las proyecciones regionales deberían preferirse a ese análisis al tener una escala más fina. Usando un modelo de circulación regional, Gomis *et al.* (2016) muestran resultados que son altamente consistentes con la imagen general proporcionada por los GCM. Gracias a la mayor resolución de su modelo, han

podido obtener una imagen más compleja sobre los procesos que tendrían influencia sobre la evolución de la temperatura (Figura 6) y la salinidad en la región. En particular, han encontrado que cerca del margen continental, el aumento de la temperatura global podría contrarrestarse mediante un aumento del afloramiento estacional. Cabe destacar que el afloramiento intensificado podría ser lo suficientemente fuerte como para dar lugar a tendencias negativas de temperatura a lo largo de las costas ibéricas, mientras que a lo largo de la costa africana solo daría como resultado una reducción de las tendencias positivas de temperatura. Con respecto a la salinidad, los resultados sugieren que el eventual aumento de salinidad derivado de un afloramiento más intenso no sería suficiente para contrarrestar la bajada de salinidad mencionada anteriormente.

### Discusión y conclusiones

En este capítulo, hemos revisado el conocimiento actual sobre cómo el calentamiento global afectará el medioambiente marino español durante las próximas décadas. En cuanto al clima de oleaje, las proyecciones basadas en modelos numéricos y estadísticos sugieren una pequeña reducción ( $< 10\%$ ) en la altura de la ola y el periodo medio tanto en las costas españolas del Atlántico como del Mediterráneo.

Con respecto al nivel del mar, se espera que los valores del Mediterráneo y el NE atlántico sigan la tendencia positiva del nivel medio del mar mundial. El resultado global es un aumento significativo del nivel medio del mar a finales del siglo XXI, que oscila entre 45 y 100 cm en el Mediterráneo y entre 35 y 70 cm en el Atlántico nororiental, dependiendo del escenario, con una incertidumbre asociada a esas proyecciones de aproximadamente  $\pm 40$  cm.



**Figura 6.** Diagramas de Hovmöller: evolución de los perfiles de anomalías de temperatura (en °C, con respecto al promedio de 1971-2000) promediados para las zonas costeras del norte y oeste de la península ibérica, el golfo de Cádiz y las islas Canarias. Los datos corresponden a un RCM oceánico forzado con un escenario A1B de HADLEY-low y ECHAM GCM.

En cuanto a la temperatura, todos los modelos proyectan un aumento de la temperatura en el Mediterráneo español y las aguas del Atlántico, en consonancia con el aumento previsto en el flujo de calor de superficie. Sin embargo, la magnitud de la desaceleración de la Circulación Meridional Atlántica de Retorno (AMOC), que es incierta, puede modular ese calentamiento en el Atlántico Norte. En particular, una disminución en el transporte de la AMOC implicaría menos calor advechado hacia el NE atlántico. Por lo tanto, dependiendo de las características de la AMOC, deberíamos esperar una tasa de calentamiento diferente a lo largo de las costas ibéricas españolas. Esos efectos también se notarían en la región de Canarias, pero en menor medida. Además, algunos estudios regionales han sugerido que el aumento proyectado en los vientos favorables al afloramiento costero también puede desencadenar un afloramiento más intenso en el margen occidental de la península ibérica. El aumento de la cantidad de aguas afloradas puede (al menos parcialmente) contrarrestar el calentamiento del mar abierto en una banda estrecha a lo largo de la costa occidental ibérica.

En cuanto a la salinidad, el aumento de los flujos de agua dulce en latitudes altas del Atlántico Norte y/o el aumento de la fusión del hielo en Groenlandia traería aguas más dulces hacia las costas del Atlántico Nororiental. Por otro lado, se espera que la pérdida de agua dulce aumente en el Mediterráneo induciendo un aumento en la salinidad de la cuenca, aunque la advección de aguas menos saladas provenientes del Atlántico puede contrarrestar parcialmente este proceso. En cuanto a los eventos extremos, está claro que el impacto de las futuras tormentas marinas aumentará debido al aumento del nivel medio del mar, pero no está claro si el número e intensidad de tormentas cambiará en el futuro. Algunos resultados apuntan a una disminución en el número de tormentas pero también a un aumento de los eventos más intensos, aunque la significación estadística de esos resultados es débil. El último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) afirma que existe una gran incertidumbre asociada con vientos y tormentas futuras (Collins *et al.*, 2013).

Además de la evolución del régimen medio, para los impactos costeros es muy importante caracterizar la evolución de los eventos extremos. Algunos estudios han abordado proyecciones de eventos extremos de oleaje y de variación del nivel del mar, aunque sus resultados no fueron concluyentes. Los resultados más coherentes que se obtienen a partir de la mayor parte de la generación actual de modelos muestran un desplazamiento hacia el polo de las trayectorias que siguen las tempestades del hemisferio norte para un clima más cálido en el futuro. Sin embargo, ese desplazamiento depende de la superficie polar y del calentamiento de la troposfera tropical superior junto con los diferentes niveles de cambio de la AMOC. Las discrepancias en cómo los GCM proyectan la evolución de esos factores determinan las incertidumbres en los detalles del desplazamiento hacia el polo de la trayectoria de las tempestades.

Un resultado importante de esta revisión es que hemos encontrado relativamente pocos estudios que aborden el

cambio climático marino regional en el sur de Europa. Esto es especialmente problemático en el lado atlántico donde el número de estudios es extremadamente limitado y la mayoría de los que están relacionados con la hidrografía y el nivel del mar se basan en modelos climáticos globales. Esto es un serio inconveniente ya que los GCM no fueron diseñados para abordar las particularidades de esa región y a menudo pasan por alto los mecanismos básicos que pueden afectar las proyecciones regionales. En el Mediterráneo, el número de estudios regionales es mayor, pero aún pequeño, lo que impide el análisis preciso de la incertidumbre. Por último, cabe señalar que, en todos los casos, la gran mayoría de los estudios se basan en escenarios de SRES (IPCC AR4), por lo que no se tienen en cuenta los resultados más recientes del IPCC-AR5.

En cuanto a las fuentes de incertidumbre de las proyecciones regionales, el factor más determinante en general es el GCM utilizado para forzar los modelos regionales (atmosféricos y oceánicos). Aunque los GCM pueden estar de acuerdo en la gran escala, pueden ser muy diferentes en los cambios proyectados a pequeña escala y esto a su vez tiene un fuerte impacto en la incertidumbre de las proyecciones regionales. Por ejemplo, la mayoría de los GCM proyectan una disminución del AMOC, pero no están de acuerdo con el monto de su desaceleración. Por lo tanto, la trayectoria de las aguas dulces del Atlántico Norte hacia el NE atlántico es muy diferente entre los modelos, por lo que es la evolución de la salinidad en las costas españolas ibéricas. De manera similar, la mayoría de los GCM proyectan un desplazamiento hacia el norte de la trayectoria de las tormentas, pero la ubicación exacta es incierta. En consecuencia, las proyecciones del clima de viento sobre el Mediterráneo (y por lo tanto de la marejada ciclónica o el oleaje) dependen en gran medida del GCM elegido para forzar el sistema de modelado regional. En cuanto al escenario de emisión, los resultados apuntan a mostrar cambios más fuertes en los escenarios más pesimistas. Esto está claro para el nivel del mar y la temperatura. Sin embargo, para la salinidad y el oleaje, la relación no es tan robusta. Desafortunadamente, el número de simulaciones regionales es demasiado pequeño para poder producir una estimación precisa del presupuesto de incertidumbre. En este sentido, queremos señalar que los estudios basados en modelos individuales deben considerarse con precaución. Las incertidumbres en las proyecciones son grandes, por lo que las conclusiones basadas en un pequeño número de simulaciones (o incluso en una sola) pueden ser engañosas. Una forma de superar esta limitación es intentar comprender el mecanismo físico detrás de los cambios y analizar su robustez.

Los cambios proyectados en la temperatura y el nivel del mar para las próximas décadas son los resultados más sólidos que hemos encontrado. El aumento de la temperatura en toda la columna de agua y el aumento del nivel del mar en todas las costas españolas es muy probable que suceda a lo largo de este siglo. Los detalles de las heterogeneidades espaciales y el valor exacto de esos aumentos están sujetos a incertidumbres relacionadas con el escenario de emisión, las incertidumbres de modelado y la variabilidad natural. Sin embargo, esas incertidumbres son relativamente pequeñas

en comparación con el cambio promedio proyectado. Por lo tanto, el aumento previsto de la temperatura y el nivel del mar debe considerarse una amenaza grave. Por lo tanto, existe una necesidad apremiante de comenzar a desarrollar estrategias de adaptación para proteger las infraestructuras costeras y los entornos naturales. Aunque se ha realizado algún trabajo desde una perspectiva teórica hasta nuestro conocimiento, no hay planes específicos para transferir esas ideas de adaptación al mundo real. Esto debería ser abordado por las administraciones lo antes posible.

### Agradecimientos

Este trabajo es una contribución al proyecto CLIFISH (CTM2015-66400-C3-2-R) financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO). G. Jordà y M. Menéndez agradecen su contrato Ramón y Cajal (RYC-2013-14714 y RYC-2014-16469 respectivamente) financiado por MINECO. G. Jordà también quiere expresar su agradecimiento al Gobierno Regional de las Islas Baleares. Los datos de CMIP5 utilizados para producir algunas de las figuras en este capítulo han sido obtenidos del portal web de NOAA Climate Change (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/ipcc/>). R. Aznar quiere expresar su agradecimiento a la Autoridad Portuaria del Estado español (Puertos del Estado) y a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

### Referencias

Adloff, F., Somot, S., Sevault, F., Jordà, G., Aznar, R., Déqué, M., Herrmann, M., Marcos, M., Dubois, C., Padorno, E., Álvarez-Fanjul, E., Gomis, D., 2015: Mediterranean Sea response to climate change in an ensemble of twenty first century scenarios. *Clim. Dyn.*, 45, 2775-2802. doi:10.1007/s00382-015-2507-3.

Bengtsson, L., Hodges, K. I., Roeckner, E., 2006: Storm tracks and climate change. *Journal of Climate*, 19 (15), 3518-3543.

Calafat, F. M., Jordà, G., Marcos, M., Gomis, D., 2012a: Comparison of Mediterranean sea level variability as given by three baroclinic models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117 (C2).

Calafat, F. M., Chambers, D. P., Tsimplis, M. N., 2012b: Mechanisms of decadal sea level variability in the eastern North Atlantic and the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117 (C9).

Carillo, A., Sannino, G., Artale, V., Ruti, P. M., Calmanti, S., Dell'Aquila, A., 2012: Steric sea level rise over the Mediterranean Sea: present climate and scenario simulations. *Clim Dyn.*, 39 (9-10), 2167-2184. doi:10.1007/s00382-012-1369-1.

Casas-Prat, M. y Sierra, J. P., 2013: Projected future wave climate in the NW Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118 (7), 3548-3568.

Charles, E., Idier, D., Delecluse, P., Déqué, M., Le Cozannet, G., 2012: Climate change impact on waves in the Bay of Biscay, France. *Ocean Dynamics*, 62 (6), 831-848.

Church, J. A., Clark, P., Cazenave, A., Gregory, J., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M., Milne, G., Nerem, R. S., Nunn, P., Payne, A., Pfeffer, W., Stammer, D., Unnikrishnan, A., 2013: Sea level change. En: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, editado por Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Chust, G., Caballero, A., Marcos, M., Liria, P., Hernández, C., Borja, A., 2010a: Regional scenarios of sea level rise and impacts on Basque (Bay of Biscay) coastal habitats, throughout the 21st century. *Estuar Coast Shelf Sci*, 87, 113-124.

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W. J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A. J., Wehner, M., 2013: Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. En: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Conte, D. y Lionello, P., 2013: Characteristics of large positive and negative surges in the Mediterranean Sea and their attenuation in future climate scenarios. *Global and Planetary Change*, 111, 159-173.

Donat, M. G., Leckebusch, G. C., Wild, S., Ulbrich, U., 2011: Future changes in European winter storm losses and extreme wind speeds inferred from GCM and RCM multimodel simulations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11 (5), 1351.

Dubois, C., Somot, S., Calmanti, S., Carillo, A., Déqué, M., Dell'Aquila, A., Elizalde-Arellano, A., Gualdi, S., Jacob, D., Lheveder, B., Li, L., Oddo, P., Sannino, G., Scoccimarro, E., Sevault, F., 2012: Future projections of the surface heat and water budgets of the Mediterranean sea in an ensemble of coupled atmosphere-ocean regional climate models. *Clim. Dyn.*, 39 (7-8), 1859-1884.

Espejo, A., Camus, P., Losada, I. J., Méndez, F. J., 2014: Spectral ocean wave climate variability based on atmospheric circulation patterns. *Journal of Physical Oceanography*, 44 (8), 2139-2152.

Fernández Pérez, F., Boscolo, R., Bladé, I., Cacho, I., Castro Díez, Y., Gomis, D., González Sampéris, P., Míguez Macho, G., Rodríguez Fonseca, B., Rodríguez Puebla, C., Sánchez, E., Sotillo, M. G., Valero-Garcés, B., Vargas Yáñez, M., 2010: Clima en España: pasado, presente y futuro. Informe de evaluación del cambio climático regional.

Field, C. B. (ed.), 2012: Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.



- Gomis, D. y Álvarez-Fanjul, E., 2016: Vulnerabilidad de los puertos españoles ante el cambio climático. Vol. 1: Tendencias de variables físicas oceánicas y atmosféricas durante las últimas décadas y proyecciones para el siglo XXI. Organismo Público Puertos del Estado. Ministerio de Fomento. Madrid, 286 pp.
- Gomis, D., Álvarez-Fanjul, E., Jordà, G., Marcos, M., Aznar, R., Rodríguez-Camino, E., Sánchez-Perrino, J. C., Rodríguez-González, J. M., Martínez-Asensio, A., Llasses, J., Pérez, B., Sotillo, M. G., 2016: Regional marine climate scenarios in the NE Atlantic sector close to the Spanish shores. *Scientia Marina*, 80, 215-234.
- Hemer, M. A., Fan, Y., Mori, N., Semedo, A., Wang, X. L., 2013a: Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble. *Nature climate change*, 3 (5), 471-476.
- Hemer, M. A., Katzfey, J., Trenham, C. E., 2013b: Global dynamical projections of surface ocean wave climate for a future high greenhouse gas emission scenario. *Ocean Modelling*, 70, 221-245.
- Izaguirre, C., Méndez, F. J., Menéndez, M., Luceño, A., Losada, I. J., 2010: Extreme wave climate variability in southern Europe using satellite data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115 (C4).
- Gualdi, S., Somot, S., Li, L., Artale, V., Adani, M., 2013: The CIRCE simulations. Regional Climate Change Projections with Realistic Representation of the Mediterranean Sea. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, 65-81.
- Jordà, G., Gomis, D., Álvarez-Fanjul, E., Somot, S., 2012a: Atmospheric contribution to Mediterranean and nearby Atlantic sea level variability under different climate change scenarios. *Global Planet. Change*, 80-81, 198-214.
- Jordà, G., Marbà, N., Duarte, C., 2012b: Mediterranean seagrass vulnerable to regional climate warming. *Nature Climate Change*, 11, vol. 2, 821-824.
- Jordà, G. y Gomis, D., 2013: On the interpretation of the steric and mass components of sea level variability. The case of the Mediterranean basin. *J. Geophys. Res.*, 118, 953-963.
- Kersting, D. K., 2016: Cambio climático en el medio marino español: impactos, vulnerabilidad y adaptación. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, 166 pp.
- Lionello, P., Cogo, S., Galati, M. B., Sanna, A., 2008: The Mediterranean surface wave climate inferred from future scenario simulations. *Global and Planetary Change*, 63(2), 152-162.
- Lionello, P., Conte, D., Marzo, L., Scarascia, L., 2016: The contrasting effect of increasing mean sea level and decreasing storminess on the maximum water level during storms along the coast of the Mediterranean Sea in the mid 21st century. *Global and Planetary Change*, 151, 80-91.
- Llasses, J., Jordà, G., Gomis, D., Adloff, F., Macías, D., Harzallah, A., ..., Sannino, G., 2016: Heat and salt redistribution within the Mediterranean Sea in the Med-CORDEX model ensemble. *Climate Dynamics*, 1-25.
- Losada, I., Izaguirre, C., Díaz, P., 2014: Cambio climático en la costa española. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, 133 pp.
- Marbà, N., Jordà, G., Agusti, S., Girard, C., Duarte, C. M., 2015: Footprints of climate change on Mediterranean Sea biota. *Frontiers in Marine Science*, 2, 56.
- Marcos, M., Jordà, G., Gomis, D., Pérez, B., 2011: Changes in storm surges in southern Europe from a regional model under climate change scenarios. *Glob. Planet. Change*, 77, 116-128.
- Martínez-Asensio, A., Tsimplis, M. N., Marcos, M., Feng, X., Gomis, D., Jordà, G., Josey, S. A., 2015: Response of the North Atlantic wave climate to atmospheric modes of variability. *International Journal of Climatology*, 36 (3), 1210-1225.
- Martínez-Asensio, A., Marcos, M., Tsimplis, M. N., Jordà, G., Feng, X., Gomis, D., 2016: On the ability of statistical wind-wave models to capture the variability and long-term trends of the North Atlantic winter wave climate. *Ocean Modelling*, 103, 177-189.
- Menéndez, M., Méndez, F. J., Izaguirre, C., Luceño, A., Losada, I. J., 2009: The influence of seasonality on estimating return values of significant wave height. *Coastal Engineering*, 56 (3), 211-219.
- Moss, R., Edmonds, J., Hibbard, K., Manning, M., Steven, K., Rose, S., van Vuuren, D., Carter, T., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G., Mitchell, J., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S., Stouffer, R., Thomson, A., Weyant, J., Wilbank, T., 2010: s13 The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463 (7282), 747.
- Nicholls, R. J. y Cazenave, A., 2010: Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 328 (5985), 1517-1520.
- Nikulin, G., Kjellström, E., Hansson, U. L. F., Strandberg, G., Ullerstig, A., 2011: Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations. *Tellus A*, 63 (1), 41-55.
- Pardaens, A. K., Gregory, J. M., Lowe, J. A., 2011: A model study of factors influencing projected changes in regional sea level over the twenty-first century. *Climate Dynamics*, 36 (9-10), 2015-2033.
- Pérez, J., Méndez, F. J., Menéndez, M., Losada, I. J., 2014: ESTELA: a method for evaluating the source and travel time of the wave energy reaching a local area. *Ocean Dynamics*, 64 (8), 1181-1191.

- Pérez, J., Menéndez, M., Camus, P., Méndez, F. J., Losada, I. J., 2015: Statistical multi-model climate projections of surface ocean waves in Europe. *Ocean Modelling*, 96, 161-170.
- Pinto, J. G., Ulbrich, U., Leckebusch, G. C., Spanghel, T., Reyers, M., Zacharias, S., 2007: Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. *Climate Dynamics*, 29 (2-3), 195-210.
- Rahmstorf, S., 2007: A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 315 (5810), 368-370.
- Sánchez-Arcilla, A., García-León, M., Gracia, V., Devoy, R., Stanica, A., Gault, J., 2016: Managing Coastal Environments under Climate Change: Pathways to Adaptation, *Science of the Total Environment*, doi:10.1016/j.scitotenv.2016.01.124.
- Sánchez-Gómez, E., Somot, S., Mariotti, A., 2009: Future changes in the Mediterranean water budget projected by an ensemble of regional climate models. *Geophysical Research Letters*, 36 (21).
- Scaife, A. A., Spanghel, T., Fereday, D. R., Cubasch, U., Langematz, U., Akiyoshi, H., ..., Gettelman, A., 2012: Climate change projections and stratosphere-troposphere interaction. *Climate Dynamics*, 38 (9-10), 2089-2097.
- Semedo, A., Weisse, R., Behrens, A., Sterl, A., Bengtsson, L., Günther, H., 2012: Projection of global wave climate change toward the end of the twenty-first century. *Journal of Climate*, 26 (21), 8269-8288.
- Slangen, A. B. A., Adloff, F., Jevrejeva, S., Leclercq, P. W., Marzeion, B., Wada, Y., Winkelmann, R., 2017: A Review of recent updates of sea-level projections at global and regional scales. *Surv. Geophys.*, 38, 385-406. doi:10.1007/s10712-016-9374-2.
- Somot, S., Jordà, G., Harzallah, A., Darmaraki, S., 2016: The Mediterranean Sea in the future climate projections. En: *The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update*. IRD editions, Marseille. ISBN: 978-2-7099-2219-7.
- Villarino, E., Chust, G., Licandro, P., Butenschön, M., Ibaibarriaga, L., Larrañaga, A., Irigoien, X., 2015: Modeling the future biogeography of North Atlantic zooplankton communities in response to climate change. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 531, 121-142.
- Wang, X. L., Feng, Y., Swail, V. R., 2014: Changes in global ocean wave heights as projected using multimodel CMIP5 simulations. *Geophysical Research Letters*, 41 (3), 1026-1034.





<b>Progresos en la detección y proyecciones de cambio climático en España desde el informe 2010 de evaluación regional del clima pasado, presente y futuro del Comité CLIVAR-España</b> Enrique Sánchez, Belén Rodríguez-Fonseca, Ileana Bladé, Manola Brunet, Roland Aznar, Isabel Cacho, María Jesús Casado, Luis Gimeno, José Manuel Gutiérrez, Gabriel Jordá, Alicia Lavín, José Antonio López, Jordi Salat, Blas Valero .....	1
<b>Una breve síntesis de la evolución climática de la península ibérica durante los últimos 2000 años</b> Santiago Giralt, Ana Moreno, Isabel Cacho, Blas Valero-Garcés .....	5
<b>Observaciones climáticas atmosféricas y reconstrucciones instrumentales sobre la península ibérica I. Obtención de series climáticas de alta calidad</b> José Antonio Guijarro, Cesar Azorín-Molina, José Carlos González-Hidalgo, Arturo Sánchez-Lorenzo, Sixto Herrera, José Antonio López .....	11
<b>Observaciones climáticas y reconstrucción instrumental. Desarrollo de productos climáticos interpolados de alta calidad</b> Sixto Herrera, Juan Javier Miró Pérez, Pere Quintana-Seguí, Julián Gonzalo, José Antonio Ruiz-Arias, José Carlos González-Hidalgo, José Antonio Guijarro, José Antonio López .....	15
<b>Tendencias recientes de las variables atmosféricas en España</b> Sergio M. Vicente Serrano, Ernesto Rodríguez Camino .....	20
<b>Modos de variabilidad que afectan al suroeste de Europa</b> Belén Rodríguez-Fonseca, María Jesús Casado, David Barriopedro .....	24
<b>Variabilidad oceánica y cambios de nivel del mar alrededor de la península ibérica, Baleares y Canarias</b> Jordi Salat, Alicia Lavín, César González-Pola, Pedro Vélez-Belchí, Ricardo Sánchez, Manolo Vargas-Yáñez, Jesús García-Lafuente, Marta Marcos, Damià Gois .....	32
<b>Proyecciones de clima regional sobre España: atmósfera. Evaluación del clima presente</b> Juan Pedro Montávez, Jesús Fernández, Ana Casanueva, José Manuel Gutiérrez, Enrique Sánchez .....	39
<b>Proyecciones de clima regional sobre España: atmósfera. Proyecciones de clima futuro</b> Jesús Fernández, Ana Casanueva, Juan Pedro Montávez, Miguel Ángel Gaertner, María Jesús Casado, Rodrigo Manzananas, José Manuel Gutiérrez .....	45
<b>Proyecciones de clima regional marino sobre España</b> Gabriel Jordá, Melisa Menéndez, Roland Aznar, Agustín Sánchez-Arcilla .....	53

La revista CLIVAR Exchanges se publica por la Oficina Internacional del Proyecto CLIVAR — ISSN No: 1026-0471  
Versión en español publicada por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) de España, con autorización de CLIVAR

Editores: Nico Caltabiano (ICPO)

Editores invitados: Enrique Sánchez (UCLM) y Belén Rodríguez-Fonseca (UCM-CSIC)

Maquetación (versión inglesa): Harish J. Borse, ICMPO en IITM, Pune (India)

Maquetación (versión en español): Sección de Documentación, AEMET, España

Copyright:

El permiso para utilizar cualquier material científico (ya sea texto o figuras) publicado en CLIVAR Exchanges debería obtenerse de los autores. La referencia debería aparecer del siguiente modo: Autores, Año, Título. CLIVAR Exchanges, No. pp. (Manuscrito no publicado).



El Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP) está financiado por la Organización Meteorológica Mundial, el Consejo Internacional para la Ciencia y la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO.

Contacto:

Executive Director, ICPO.

First Institute of Oceanography, SOA,  
6 Xianxialing Road, Laoshan District, Qingdao 266061, China

icpo@clivar.org

http://www.clivar.org

