

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA ADOPTADA EN LA GENERACIÓN DE LAS PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA (AEMET)

María P. AMBLAR FRANCÉS¹, Petra RAMOS CALZADO¹, María A. PASTOR SAAVEDRA², Ernesto RODRÍGUEZ CAMINO²

¹*AEMET, Sevilla 41092 Spain*

²*AEMET, Madrid 28040 Spain*

**mamblarf@aemet.es, pramosc@aemet.es, mpastors@aemet.es,
erodriguezc@aemet.es**

RESUMEN

A lo largo de los últimos decenios, los modelos climáticos globales (GCM) han experimentado un progreso extraordinario y, en consecuencia, son capaces de reproducir mejor el clima. No obstante, debido a la insuficiente resolución horizontal de los GCM, es preciso regionalizar estos resultados para su empleo en la evaluación de impactos y en la adopción de estrategias de adaptación a nivel local. En este marco, AEMET ha venido produciendo, desde 2006, un conjunto de proyecciones de cambio climático regionalizadas para España, aplicando métodos de regionalización estadística a las salidas de los GCM, bien, haciendo uso de la información generada por técnicas dinámicas surgidas en el seno de proyectos europeos como PRUDENCE, ENSEMBLES y, recientemente, EURO-CORDEX. La singularidad de la estrategia seguida por AEMET, enmarcada en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), radica en la explotación de todas las fuentes disponibles de información sobre las proyecciones.

Palabras clave: Proyecciones, cambio climático, PRUDENCE, ENSEMBLES, EURO-CORDEX.

ABSTRACT

Over the last decades, global climate models (GCM) have advanced and, as a result, can thus provide a better representation of climate. However, due to the lack of horizontal resolution of the GCMs, it is necessary to regionalize these results for their use to assess possible future impacts of climate change and to adopt adaptation strategies at local level. In this framework, AEMET has been producing since 2006 a set of regionalized climate change projections over Spain, either applying statistical regionalization methods to the outputs of the GCMs or making use of the information generated by dynamic downscaling techniques through European projects such as PRUDENCE, ENSEMBLES and, more recently, EURO-CORDEX. The strategy followed by AEMET and, framed in the National Plan of Adaptation to Climate Change (PNACC), lies at exploiting all available sources of information on climate change projections.

Key words: Projections, Climate Change, PRUDENCE, ENSEMBLES, EURO-CORDEX.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye una de las principales amenazas para el desarrollo sostenible y representa uno de los principales retos ambientales con efectos que se dejan sentir en la economía global, la salud y el bienestar social. Incluso en el caso de considerar las perspectivas más optimistas, por lo que respecta a las futuras emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los estudios científicos revelan que algún tipo de cambio climático es inevitable (IPCC, 2013). El aumento creciente de la concentración de los GEI en la atmósfera modificará el comportamiento de varios parámetros climáticos responsables, a su vez, de los cambios ambientales que pueden traducirse en desplazamientos en los ecosistemas y en los sistemas y sectores sociales y económicos. La dirección, cantidad e intensidad de las alteraciones climáticas determinarán, en último término, las tendencias definitivas y las magnitudes de los impactos a escalas local, regional y planetaria.

Por otra parte, la España peninsular y Baleares están situadas en la parte occidental de la cuenca mediterránea, reconocida como una zona problemática para el cambio climático (climate change hot spot, en inglés), que podría verse muy afectada en el futuro por un calentamiento y desecación considerables (Giorgi, 2006); convirtiéndose en una zona especialmente vulnerable a los impactos y, en consecuencia, particularmente importante e idónea para la toma de medidas y estrategias de adaptación y mitigación del cambio (Giorgi y Lionello, 2008; Brunet et al. 2008, Amblar-Francés et al. 2017).

Por tanto, para completar los esfuerzos en la reducción de las emisiones de GEI y aerosoles, se hace necesario implementar y adoptar medidas de adaptación con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de nuestros ecosistemas y sectores en las escalas relevantes y niveles de decisión, tratando de minimizar sus impactos negativos. Por eso, no debe sorprendernos que los estudios de cambio climático estén impulsando la actividad en la producción de proyecciones regionalizadas de cambio climático, ya que la demanda más acuciante está en la necesidad de disponer de información con la necesaria resolución espacial y temporal para los estudios de impacto. En este contexto, la regionalización o reducción de escala (*downscaling*, en inglés) surge para tratar de paliar las limitaciones de los modelos globales. Constituye un paso esencial, con el que aportamos detalle o refinamos la información proporcionada por dichos modelos. Es decir, mediante los métodos de regionalización se extrae información de escalas local a regional (de 10 a 100 km) a partir de modelos o análisis de datos a mayor escala. La regionalización tiene sentido porque existe una conexión entre la gran escala y la pequeña escala. En este marco, se están creando muchos institutos *ad hoc* para satisfacer esta demanda, a la vez que a los Servicios Meteorológicos e Hidrológicas se les encomienda esta nueva área de actividad. Así, AEMET ha generado una nueva colección de proyecciones regionalizadas de cambio climático,

pudiendo encontrar los usuarios en la página web de servicios climáticos, una serie de mapas y diagramas de evolución junto con una serie de textos explicativos.

1.1 Antecedentes

La adaptación al cambio climático constituye una prioridad en el conjunto de actuaciones nacionales, por este motivo en 2006 se puso en marcha el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC); marco de referencia en las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en España para la coordinación entre las diversas administraciones públicas. (http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/folleto_pnacc_ing_tcm7-197095.pdf). El PNACC tiene como objetivo proporcionar asistencia a todas aquellas organizaciones interesadas –públicas y privadas – en la evaluación de los impactos del cambio climático en España, facilitando conocimientos, herramientas y métodos sobre el tema; así como promover la participación de todos los involucrados para producir las mejores opciones de adaptación al cambio climático. La Oficina Española de Cambio Climático (OECC) es el organismo responsable de la coordinación, gestión y seguimiento de la implementación de este Plan. El antiguo Instituto Nacional de Meteorología, predecesor de AEMET, recibió el mandato de desarrollar y actualizar la producción de las proyecciones en coordinación con la comunidad universitaria e investigadora. Basándose en el Tercer Informe de Evaluación del IPCC (TAR, de sus siglas en inglés), aprobado en 2001, AEMET realizó las primeras proyecciones regionalizadas con métodos estadísticos. Además, se adaptaron proyecciones procedentes de la regionalización dinámica obtenidas en el seno del proyecto europeo PRUDENCE (acrónimo de Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining Climate Change Risks and Effects), financiado por el 5º programa marco de la Unión Europea para la energía, el medioambiente y el desarrollo sostenible. Con ambas proyecciones, AEMET publicó el primer conjunto de proyecciones de cambio climático, preludio del primer informe titulado *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España* (Brunet et al., 2008).

El segundo conjunto de proyecciones publicadas por AEMET se basó en los datos de los GCM utilizados por el IPCC en la elaboración de su Cuarto Informe de Evaluación (AR4) y del proyecto europeo ENSEMBLES, continuación del proyecto PRUDENCE. El trabajo realizado con estos datos fue publicado en la página web de AEMET (<http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio-climat/>) y, en el segundo informe *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR4* (Morata-Gasca, 2014). Por otra parte, en la página web de AEMET fueron puestas a disposición pública las proyecciones realizadas en el seno de los proyectos nacionales ESCENA (generación de escenarios de cambio climático regionalizados con métodos dinámicos) y ESTCENA (generación de escenarios de cambio climático regionalizados con métodos estadísticos) financiados por el Ministerio de Medio Ambiente.

En 2017 se publicó el tercer informe (https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones

_y_estudios/publicaciones/Guia_escenarios_AR5/Guia_escenarios_AR5.pdf), en el cual se presentan los resultados obtenidos con dos métodos de regionalización estadísticos; uno basado en regresión lineal múltiple y otro en análogos. Ambos aplicados a los GCM que participaron en la quinta fase del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5, según sus siglas en inglés), utilizados por el IPCC en su Quinto Informe de Evaluación (AR5) (IPCC, 2013), y las proyecciones generadas por el proyecto CORDEX mediante técnicas dinámicas (acrónimo inglés de COordinated Regional Downscaling Experiment), para la zona de Europa: EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014).

2. ESTRATEGIA

2.1 Presentación y aspectos más reseñables

Sucintamente, la estrategia adoptada en AEMET relativa a la generación de las proyecciones de cambio climático para España (http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat) se apoya en la explotación de toda la información relevante basada en técnicas de regionalización (o downscaling) estadísticas o dinámicas, generadas ya sea por AEMET o por otros proyectos e iniciativas nacionales e internacionales. Se ha puesto un especial énfasis en la mejora de la visualización (figura 1) junto con un acceso fácil a las escalas apropiadas (cuencas hidrográficas, provincias, comunidades autónomas, Iberia española, Baleares y Canarias).



Figura 1. Página web de AEMET dedicada a los servicios climáticos /proyecciones climáticas para el siglo XXI.

2.2 Datos y Metodología

La tabla 1 muestra el gran número de proyecciones regionalizadas, para temperatura (T) y precipitación (P), utilizadas en la tercera entrega obtenida por los dos métodos estadísticos (regresión y análogos) y la regionalización dinámica del EURO-CORDEX basada en los resultados del AR5 del IPCC, y tres trayectorias o sendas

representativas de concentración (RCPs, de sus siglas en inglés): RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, en el caso de la regionalización estadística y dos RCP: RCP4.5 y RCP8.5, para la regionalización dinámica. Las RCP4.5 y RCP6.0 representan dos trayectorias de estabilización intermedias en las cuales el forzamiento radiativo se estabiliza a aproximadamente 4.5 W/m² y 6.0 W/m² después del año 2100. Por lo que respecta al escenario RCP8.5, el forzamiento radiativo alcanzará los 8.5 W/m² hacia el 2100 y continuará aumentando durante un cierto tiempo (véase para más detalle, IPCC, 2013).

En la página web de AEMET, la información numérica (de escalas diarias y mensuales) está disponible para datos del AR4 del IPCC y del AR5 y de proyectos relevantes (ENSEMBLES, ESCENA, ESTCENA,...).

	Análogos		Regresión		CORDEX		TOTAL	
	Escenario	T	P	T	P	T	P	T
RCP8.5	14	17	19	19	10	10	43	46
RCP6.0	6	7	7	7			13	14
RCP4.5	13	18	15	15	10	10	38	43
TOTAL	33	42	41	41	20	20	94	103

Tabla 1. Proyecciones regionalizadas de temperatura (máxima y mínima) y precipitación obtenidas por métodos de regionalización estadística (análogos y regresión) y regionalización dinámica (EURO-CORDEX).

Otro de los aspectos más reseñables es el gran número de estaciones de la red de AEMET que incluye información termométrica para el siglo XXI en 374 observatorios y pluviométrica en 2323 distribuidos sobre la España peninsular, Baleares y Canarias (figura 2). Dicha colección está formada por aquellas estaciones que disponen de series temporales suficientemente largas y de calidad en el periodo 1951-2005.

Las técnicas de regionalización constituyen el eslabón crucial para proporcionar la información en las escalas local y regional, escalas necesarias en los estudios de impacto y adaptación ya que las salidas de los modelos globales carecen de la resolución espacial necesaria para llevar a cabo los estudios de impacto y adaptación (Gutiérrez et al., 2018). Los dos enfoques de regionalización más utilizados son: a) el *downscaling* dinámico basado en los modelos climáticos regionales (RCMs, de sus siglas en inglés) y b) métodos de *downscaling* empírico/ estadístico (ESD, de sus siglas en inglés), basados en el establecimiento de relaciones estadísticas entre la circulación a gran escala de los GCM y las características del clima observado a escala regional o local.

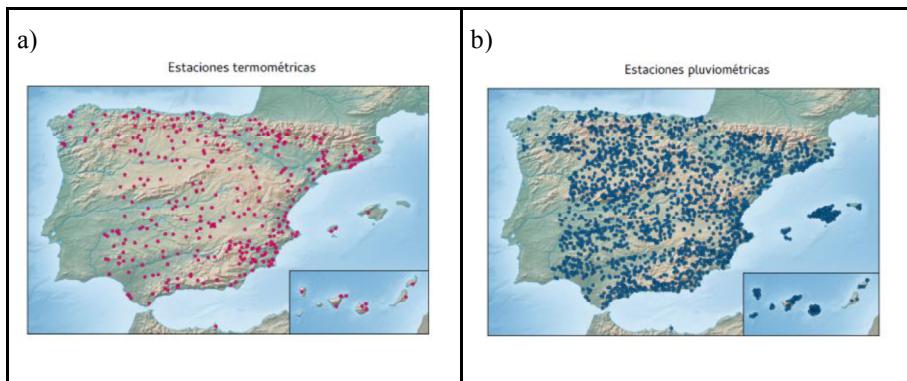


Figura 2. Distribución espacial de las estaciones climatológicas utilizadas para la regionalización de a) temperatura (374) y precipitación (2323).

El campo de la regionalización dinámica requiere manejar un volumen de datos considerable, con un coste computacional muy elevado. Además, el tratamiento de los RCM necesita de una gran experiencia en la interpretación de los resultados. Debido a estas limitaciones de orden práctico, los modelos regionales utilizados en el *downscaling* dinámico quedan fuera del alcance de muchos investigadores. En la tercera entrega de las proyecciones climáticas regionales por AEMET, la regionalización dinámica procede de la iniciativa internacional de regionalización de EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014), porque representa un conjunto de simulaciones climáticas de escala muy fina, de acceso abierto; con múltiples variables disponibles como, por ejemplo, precipitación, temperaturas máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento a 10m, velocidad máxima a 10 m, escorrentía etc., que son de interés en los estudios de impacto.

La regionalización estadística se basa en la constatación de que el clima regional está condicionado esencialmente por dos factores: el clima a gran escala y características locales/regionales como pueden ser la topografía, la distribución mar-tierra, uso de la tierra etc. (Fowler et al., 2007; Wilby et al., 2004). Esta metodología tiene la gran ventaja de no ser muy costosa computacionalmente y de ajustarse fácilmente a nuevas áreas, siendo una de sus mayores desventajas, la gran demanda de datos disponibles. En consecuencia, la regionalización estadística constituye una alternativa digna de tener en cuenta en aquellos proyectos en los que la capacidad computacional, la experiencia técnica o el tiempo constituyen una restricción importante (Trzaska & Schnarr, 2014). En AEMET, se han aplicado dos técnicas estadísticas de regionalización basadas en métodos de regresión (Amblar et al. 2017). Por un lado, el método de análogos (Petisco de Lara, 2008a y 2008b) y por otro, el método basado en regresión lineal múltiple (SDSM, Statistical DownScaling Method) (Wilby et al., 2002). Estos métodos se han aplicado a un gran conjunto de modelos climáticos globales disponibles a través del Programa de Investigación Climática Mundial (WCRP), pertenecientes a las fases 3 y 5 del proyecto de intercomparación de modelos climáticos acoplados (CMIP3 y CMIP5, de sus siglas en inglés), participantes en el AR4 y AR5 del IPCC.

Una vez obtenidas las proyecciones de cambio climático de la temperatura máxima, mínima y la precipitación (predictandos) para cada escenario futuro, se calculan las anomalías de estas respecto a los valores que toman las proyecciones en el escenario histórico (*historical*), considerando como referencia el periodo 1961-1990. La incertidumbre es una característica que no debería ignorarse o marginarse. Para abordarla, se ha optado, en AEMET, por utilizar múltiples realizaciones (ensembles) de proyecciones regionalizadas. En concreto, centrándonos en los datos disponibles en el portal de AEME, es posible estimar las incertidumbres asociadas a tres fuentes: escenarios de emisión, simulaciones globales y técnicas de regionalización (véase Amblar-Francés et al., 2017).

Se ha procurado prestar mucha atención a la claridad de los gráficos y a su síntesis. Así, en la figura 3 (Amblar-Francés et al., 2017), se han presentado los cambios en los valores medios anuales y estacionales de la temperatura máxima diaria, obtenidos por todas las proyecciones generadas para la España peninsular, en tres escenarios (RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5), para los últimos 20 años del siglo XXI. En el caso anual, existe un aumento progresivo tanto en valores medios como en su incertidumbre. En todas las estaciones, la incertidumbre mayor, como es de esperar, está ligada a los escenarios de mayores emisiones (RCP6.0 y RCP8.5), siendo especialmente marcada en el caso del verano y otoño.

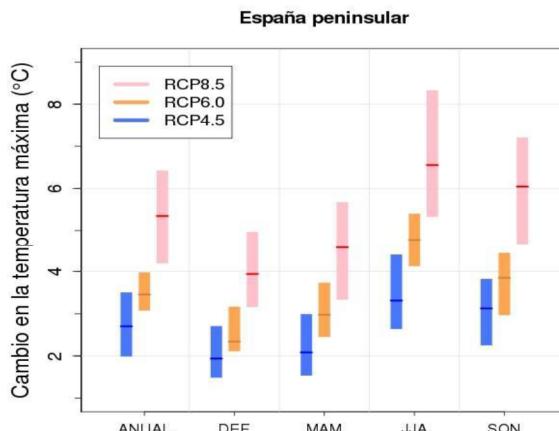


Figura 3. Cambios en los valores medios anuales y estacionales de la temperatura máxima de la España peninsular obtenido a partir de todas las proyecciones generadas (por los dos métodos estadísticos: análogos y regresión y por la técnica dinámica) bajo tres escenarios de emisiones (RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5) y para los últimos veinte años del siglo XXI (2081-2100). La línea central indica la mediana de las proyecciones y la barra el rango entre los percentiles 17 y 83.

2.3 Visor de AdapteCCa

El portal de AEMET proporciona información de entrada al visor de escenarios de cambio climático de la Plataforma de Adaptación al Cambio Climático de España (<http://escenarios.adaptecca.es>). Este visor, iniciativa de la OECC, la Fundación Biodiversidad y AEMET, está financiado por el proyecto LIFE-SHARA (www.lifeshara.com), consultese para más detalle, el artículo 'Visor de Escenarios de cambio climático de AdapteCCA: consulta interactiva y acceso a Escenarios-PNACC 2017' de Gutiérrez et al.; incluido en el volumen del XI Congreso Internacional de la AEC de 2018. Como puede observarse (figura 4), el visor cuenta con una interface de usuario muy fácil de utilizar y con distintas posibilidades de visualización y de descarga de datos. Mediante consulta con diferentes tipos de usuarios, incluye una gran lista de índices que se irá actualizando en las siguientes versiones. En este contexto, AdapteCCA contribuye a reforzar la estructura del eje de movilización de actores del PNACC y la coordinación entre administraciones, complementando el portal de AEMET.

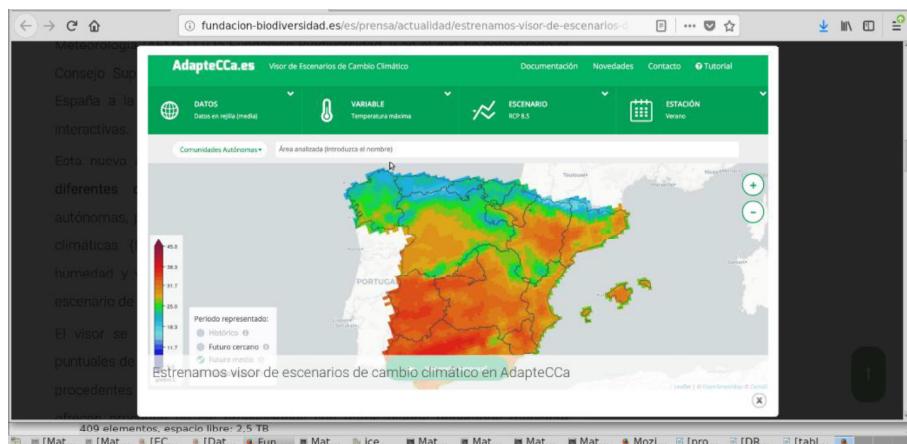


Figura 4. Visor de AdapteCCA

3. CONCLUSIONES

AEMET es la agencia nacional designada para el tiempo y el clima en España y tiene una considerable experiencia en la comunicación relativa al cambio climático y a los escenarios climáticos, contando con una audiencia que se muestra cada vez más interesada y receptiva. En el transcurso de los últimos años, AEMET ha colaborado estrechamente con la OECC, responsable de la coordinación, gestión y seguimiento del PNACC, participando en varios de los encuentros de los grupos, un área de intercambios de conocimientos y perspectivas muy fructífera. En contraste con otros Servicios Meteorológicos o Hidrológicos Nacionales, AEMET ha utilizado no solo las proyecciones regionalizadas dinámicas sino también las estadísticas, insistiendo en el uso de estas últimas aplicadas al mayor número posible de modelos globales para -conjuntamente con los datos de modelos regionales- explorar mejor la

incertidumbre; beneficiándose igualmente de la gran densidad de estaciones de la red climatológica española.

La experiencia con los usuarios nos ha mostrado algunas de las principales dificultades prácticas asociadas con el uso de las proyecciones climáticas, entre las cuales está la inconsistencia entre las necesidades de cierto tipo de datos y de su disponibilidad. Finalmente, somos conscientes de la necesidad de mejorar y progresar en las acciones de comunicación y diseminación de la información, asociadas a las mejoras de los modelos de los nuevos ciclos del IPCC y al empleo de técnicas de regionalización más precisas.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestra profunda gratitud a los participantes de los proyectos con los que hemos trabajado: IPCC, CMIP, PRUDENCE, ENSEMBLES y CORDEX y al equipo responsable de los datos de reanálisis del NCEP/NCAR. Este trabajo no hubiera sido posible sin el material que ponen a disposición de la comunidad científica.

REFERENCIAS

- Amblar-Francés P., Ramos-Calzado P., Casado-Calle, M. J., Pastor-Saavedra, M. A.. Rodríguez-Camino, E. (2016). Estudio de las proyecciones regionalizadas de cambio climático para las cuencas de España, XXXIV Jornadas científicas de la Asociación Meteorológica Española (AME), Teruel. ISBN: 978-84-617-5240-9
- Brunet, M., Casado M. J., Castro, M., Galán, M. P., López, J. A., Martín, J. M., ... y Torres, L. (2008): Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. Ministerio de Medio Ambiente Medio Rural y Marino. 158 pp.
- Fowler, H.J., Blenkinsop, S., and Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology* 27: 1547–1578. DOI: 10.1002/joc.1556.
- Giorgi, F., y Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and planetary change*, 63(2), 90-104.
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot spots. *Geos. Res. Letts.*, doi: 10.1029/2006GL025734.
- Gutiérrez, J.M., Maraun, D., Widman, M., Huth, R., Hertig, E., Benestad, R., Roessler, O., Wibig, J., Wilcke, R., Kotlarski, S., San Martin, D., Herrera, S., Bedia, J., Casanueva, A., Manzanas, R., Iturbide, M., Vrac, M., Dubrovsky, Ribalaygua, J., Portoles, J., Raty, O., Raisanen, J., Hingray, B., Raynaud, D., Casado, M.J., Ramos, P., Zerenner, T., Turco, M., Bosshard, T., Stepanek, P., Bartholy, J., Pongracz, R., Keller, D.E., Fischer, A.M., Cardoso, R.M., Soares, P.M.M., Czernecki, B., and Page, C. (2018). An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the VALUE perfect predictor cross-validation

- experiment. International Journal of Climatology, <https://doi.org/10.1002/joc.5462>,
- 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. Disponible en <http://www.ipcc.ch/report/ar5/>
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., ... y Georgopoulou, E.(2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563-578.
- Morata-Gasca, A. (2014). Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR4. http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/publicaciones/Guia_IPCC/Guia_IPC_C.pdf
- Petisco de Lara, S.E. (2008 a). Método de regionalización de precipitación basado en análogos. Explicación y Validación. Nota Técnica 3A, Área de Evaluación y Modelización del Cambio Climático. AEMET.
- Petisco de Lara, S.E. (2008 b). Método de regionalización de temperatura basado en análogos. Explicación y Validación. Nota Técnica 3B, Área de Evaluación y Modelización del Cambio Climático. AEMET.
- PNACC (2006). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. (2006a). Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente. http://www.mma.es/portal/secciones/cambio_climatico/areas_tematicas/impactos_cc/pdf/pna_v3.pdf
- Trzaska, S. and Schnarr, E.: A Review of Downscaling Methods for Climate Change Projections (2014). African and Latin American Resilience to Climate Change (ARCC). http://www.ciesin.org/documents/Downscaling_CLEARED_000.pdf
- Wilby, R. L., Dawson, C. W., y Barrow, E. M. (2002). SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling y Software*, 17(2), 145-157.
- Wilby, R. L., Charles, S. P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., and Mearns, L. O. (2004). Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change, available from the DDC of IPCC TGCIA, 27.