

Utilidad de las proyecciones climáticas generadas por AEMET para estudios de impacto del cambio climático sobre avenidas a escala nacional

Usefulness of AEMET generated climate projections for climate change impact studies on floods at national-scale (Spain)

Garijo, C.^{a1}, Mediero, L.^{a2}, Garrote, L.^{a3}

^aDepartamento de Ingeniería Civil: Hidráulica, Energía y Medioambiente, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. c/ Profesor Aranguren 3, Ciudad Universitaria, ES-28040, Madrid, España.
E mail: ^{a1} c.garijo@upm.es, ^{a2} luis.mediero@upm.es, ^{a3} l.garrote@upm.es

Recibido: 23/01/2018

Aceptado: 23/04/2018

Publicado: 31/07/2018

Citar como: Garijo, C., Mediero, L., Garrote, L. 2018. Usefulness of AEMET generated climate projections for climate change impact studies on floods at national-scale (Spain). *Ingeniería del agua*, 22(3), 153-166. <https://doi.org/10.4995/la.2018.9312>

RESUMEN

La evaluación preliminar del riesgo de inundación deberá tener en cuenta el efecto del cambio climático en la incidencia de inundaciones, según la Directiva de Inundaciones. La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) española ha regionalizado algunas variables suministradas por varios modelos climáticos globales en España, mediante dos métodos de regionalización estadística. La utilidad de esta regionalización, en cuanto a las precipitaciones, reside en el ajuste que tengan a los datos observados en el periodo de control (1961-2000). Para ello, se ha realizado una comparación en base a una serie de estadísticos. Los resultados muestran que, aunque el ajuste es bueno para valores medios anuales, los valores máximos anuales de precipitación para ambas regionalizaciones no son adecuados, ya que los modelos simulan un clima con precipitaciones máximas anuales inferiores, menor variabilidad de los extremos y una gran incertidumbre en la caracterización de los valores más extremos.

Palabras clave | cambio climático; modelos climáticos globales; downscaling estadístico; precipitación; España.

ABSTRACT

The preliminary assessment of flood risk should take into account the effect of climate change on flood hazards, according to the EU Floods Directive. Some climatic variables supplied by a set of global climate models have been regionalized by the Spanish Meteorological Agency (Agencia Estatal de Meteorología, AEMET) in Spain, by using two statistical downscaling methods. The usefulness of this regionalization can be assessed by their fitting to the observed data in the control period (1961-2000). A comparison based on a set of statistics has been conducted. Results show that although the fit is good for annual mean values, annual maximum values for both regionalization are not adequately simulated by AEMET models, since they provide lower extremes with a smaller variability. In addition, a great uncertainty in the characterization of these extremes values, in comparison with the observations, is observed.

Key words | climate change; global climate models; statistical downscaling; precipitation; Spain.

INTRODUCCIÓN

Se prevé que el cambio climático tenga como consecuencia variaciones en la magnitud y frecuencia de las avenidas en el futuro. Por ello, la Directiva Europea de Inundaciones recoge en su artículo 4.2.d que la evaluación preliminar del riesgo de inundación deberá incluir una estimación del panorama de evolución de la ocurrencia de avenidas a largo plazo, teniendo en cuenta el efecto del cambio climático en la incidencia de inundaciones (EU, 2007).

A lo largo de los últimos años se han realizado numerosos estudios de impacto del cambio climático tanto a nivel nacional como a nivel europeo en el ciclo hidrológico. Sin embargo, los resultados de los mismos no permiten llegar a un consenso en cuanto al comportamiento de las avenidas en el futuro (Kundzewicz *et al.*, 2017).

La forma más habitual de evaluar dichos cambios consiste en tomar las proyecciones de una serie de variables climáticas e introducirlas como datos de entrada en un modelo hidrológico calibrado en la cuenca de estudio. Las proyecciones climáticas suministran series temporales de un conjunto de variables generadas mediante Modelos de Clima Global (MCGs), que simulan el comportamiento dinámico de la atmósfera. Sin embargo, los MCGs tienen una resolución muy baja (entre 150 y 300 km por celda) para poder utilizar sus variables en estudios de impacto a escala de cuenca. Para obtener una mayor resolución, se suelen utilizar técnicas de regionalización (llamado en inglés *downscaling*) que permiten conseguir una resolución adecuada. Existen dos tipos de regionalización: (i) regionalización dinámica, que se basa en Modelos de Clima Regional (MCR) con una resolución mucho mayor que los MCGs y que se utilizan como condiciones de contorno la salidas de estos MCGs; (ii) regionalización estadística, que trata de establecer semejanzas estadísticas entre las variables atmosféricas de los modelos y los datos observados.

Para España, se dispone de dos fuentes de proyecciones climáticas regionalizadas. La primera procede del proyecto CORDEX (Jacob *et al.*, 2014). Este proyecto consiste en la simulación de distintas combinaciones de MCG-MCRs encuadradas en distintas áreas de interés a lo largo del planeta. España estaría incluida en 2 de las 14 regiones disponibles: región 4 (Europa) y región 12 (Mediterráneo). La segunda fuente consiste en una serie de proyecciones climáticas regionalizadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) a escala nacional, mediante métodos de regionalización estadística.

Además, las proyecciones de las variables climáticas suelen presentar funciones de densidad de probabilidad que no se ajustan a las de los datos observados en el periodo de control, provocando alteraciones estadísticas sistemáticas respecto a los valores esperados (Teutschbein y Seibert, 2013). La presencia de errores de sesgo en las salidas de los modelos hace que estos sean difícilmente utilizables en la evaluación del impacto hidrológico. Esto ocurre tanto para las salidas de los MCGs como para las de los MCRs. Como consecuencia, normalmente es necesario realizar una corrección del sesgo, con el objetivo de asemejar las salidas de los modelos con los datos observados. A tal fin, se han desarrollado diversas técnicas de corrección del sesgo, tanto para precipitación como para temperatura. Una revisión de estos métodos puede encontrarse en Teutschbein y Seibert (2012).

Este artículo recoge un primer análisis de la utilidad de las proyecciones climáticas de precipitación suministradas por AEMET, para su utilización en estudios de impacto del cambio climático y más específicamente, para la implantación del artículo 4.2.d de la Directiva de Inundaciones en España. El objetivo consiste en analizar las cualidades o características estadísticas de las proyecciones de precipitación regionalizadas para España por parte del AEMET, evaluando su utilidad práctica. Las proyecciones de precipitación suministradas por AEMET son puntuales en una serie de puntos donde existen pluviómetros, por lo que la comparación con datos observados es inmediata. Para ello se han obtenido los principales estadísticos de las series temporales de precipitación en el periodo de control (1961-2000), tanto de los modelos regionalizados por AEMET como de los datos observados en los pluviómetros utilizados a lo largo de toda España. A partir de dicha información se ha generado una serie de mapas a escala nacional que muestran los errores en los estadísticos seleccionados, con el objetivo de identificar tendencias regionales y patrones generales de comportamiento. De esta manera se puede comprobar si los datos obtenidos por la regionalización del AEMET son adecuados, o si es necesario una corrección de los mismos. Asimismo, este estudio también sirve para ver qué método de regionalización estadística se comporta mejor.

El artículo está organizado de la siguiente forma. Primero, se expone la fuente de datos utilizados, así como la metodología utilizada para elaborar los mapas de errores. A continuación, se exponen los resultados tanto de la comparación de los mapas de errores como de las leyes de frecuencia obtenidas en el caso de estudio. Finalmente, se resumen las conclusiones alcanzadas tras el estudio de los resultados.

METODOLOGÍA

Datos climáticos regionalizados

Los datos de precipitación diaria de los modelos climáticos regionalizados han sido obtenidos gratuitamente de la página web del AEMET (http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat). La regionalización de los modelos ha sido llevada a cabo, en todos los modelos, en un total de 2321 estaciones a lo largo de toda España. Estos datos se encuentran regionalizados, de forma puntual, en cada una de las 2321 estaciones. Tienen una resolución temporal diaria.

AEMET ha utilizado dos métodos de regionalización estadística: (i) el método de análogos (ANA) y (ii) el método de regionalización estadística (SDSM, en sus siglas en inglés). Conceptualmente, el método ANA identifica la situación atmosférica en el paso de tiempo considerado por el modelo con los datos observados del lugar donde se quiere regionalizar, determinando la situación histórica más similar (el análogo) de acuerdo con alguna característica de similitud. El método, siguiendo los pasos del AEMET, consta de dos partes: selección de las variables predictoras (presión del nivel del mar, humedad específica en 7000 hPa, temperatura del aire en 500 hPa, entre otras) y formulación matemática de la medida de similitud (Morata-Gasca, 2014). Una de las particularidades de este método consiste en que es necesario tener una serie histórica de datos suficientemente larga para que se puedan encontrar análogos adecuados. Es por ello que, en el campo de los valores extremos, al no haber una serie suficientemente larga, el método pueda tener problemas para encontrar un análogo, siendo este uno de sus principales problemas (Thiemeßl *et al.*, 2011).

Por su parte el método SDSM está basado en técnicas de regresión lineal. Este método permite establecer relaciones empíricas entre campos de variables independientes o predictoras a escala regional, obtenidos a partir de los modelos de circulación general, y las variables dependientes o explicadas a escala local (Morata-Gasca, 2014). El método es adecuado para regiones heterogéneas con orografía compleja. El método, siguiendo los pasos del AEMET, consta de dos partes: la selección de las variables predictoras y la obtención del modelo de regresión.

Tabla 1 | Modelos regionalizados disponibles y escogidos del AEMET (x) para cambio climático.

Modelos	Método ANA							Método SDSM						
	Precipitación			Temperatura			Modelos Elegidos	Precipitación			Temperatura			Modelos Elegidos
	Control	4.5	8.5	Control	4.5	8.5		Control	4.5	8.5	Control	4.5	8.5	
<i>ACCES1-0</i>	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-
<i>ACCES1-3</i>	x	-	x	x	-	x	-	x	-	x	x	-	x	-
<i>BCC-CSM1-1</i>	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-
<i>BCC-CSM1-1-m</i>	x	x	x	x	x	-	-	x	x	x	x	x	x	x
<i>BNU-ESM</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>CMCC-CESM</i>	x	-	x	x	-	x	-	x	-	x	x	-	x	-
<i>CMCC-CM</i>	x	x	x	x	-	x	-	x	x	x	x	x	x	x
<i>CMCC-CMS</i>	x	x	-	x	x	-	-	x	-	x	x	-	x	-
<i>CNRM-CM5</i>	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-
<i>CanESM2</i>	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x
<i>CSIRO-Mk3-6-0</i>	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	x	-
<i>GFDL-ESM2G</i>	x	x	x	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x
<i>GFDL-ESM2M</i>	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>HadGEM2-CC</i>	x	-	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>INMCM4</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>IPSL-CM5A-LR</i>	x	x	x	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x
<i>IPSL-CM5A-MR</i>	x	x	-	x	x	-	-	x	x	x	x	x	x	x
<i>IPSL-CM5B-LR</i>	x	x	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x
<i>MIROC-ESM</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>MIROC-ESM-CHEM</i>	x	-	-	x	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x
<i>MIROC5</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>MPI-ESM-LR</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>MPI-ESM-MR</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>MRI-CGCM3</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Ambos tipos de regionalización, y de manera general todos los métodos de regionalización estadística, tienen un problema fundamental, que consiste en la suposición de estacionaridad. La conexión de las variables debe ser estable en el tiempo y, aunque esta afirmación pueda ser asumible en el periodo de control de los modelos (presente), no puede ser verificable en el futuro, y de hecho, puede ser falsa (Quintana-Seguí *et al.*, 2010). Sin embargo, su simplicidad y coste computacional favorecen su uso en muchos estudios de impacto de la actualidad.

AEMET dispone de un total de 24 MCGs en su página web. En la Tabla 1 se muestran la regionalización que se ha realizado para cada modelo y los escenarios de cambio climático definidos en el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC sobre cambio climático (IPCC, 2014). Como se puede observar en la Tabla 1, no todos los modelos tienen la regionalización con las dos metodologías. Además, para el presente estudio, es necesario que el modelo disponga de la regionalización de los escenarios de concentraciones RCP 4.5 y 8.5, por lo que la disponibilidad de datos se reduce. El modelo también debe tener la temperatura regionalizada con el fin de que se pueda utilizar fielmente los datos regionalizados del modelo climático en un modelo hidrológico para estudios de impacto. Finalmente, se han seleccionado 10 modelos regionalizados con el método ANA y 12 con el método SDSM (Tabla 1). De todos los modelos seleccionados, 7 están regionalizados por ambos métodos, por lo que se realizará un estudio más exhaustivo sobre qué metodología es mejor en cada uno de ellos.

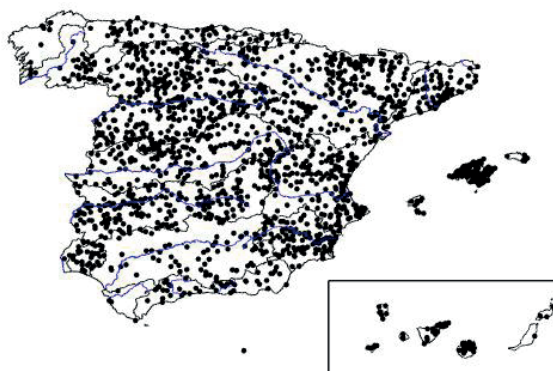


Figura 1 | Localización de las estaciones pluviométricas seleccionadas para el estudio. Separadas en el recuadro de abajo a la derecha se encuentran las Islas Canarias.

Respecto a los datos observados de precipitación, éstos han sido suministrados por el AEMET. De las 2321 estaciones disponibles, se han utilizado 1814 estaciones repartidas a lo largo de la península, que disponen de al menos 20 años hidrológicos de datos en el periodo de control (1961–2000). Se ha escogido un umbral de 20 años ya que para valores superiores de umbral, quedaban zonas sin ninguna estación, por ejemplo, amplias zonas de Galicia. En la Figura 1 se muestra la disposición de todas las estaciones seleccionadas.

MEDIDAS DE ERROR

Los estadísticos utilizados para la comparación de los modelos climáticos regionalizados con los datos observados están listados en la Tabla 2. Para el cálculo de los estadísticos en los datos observados, se han eliminado aquellos años hidrológicos (octubre–septiembre) en los que hay algún hueco en su registro, utilizando únicamente la información de los años completos.

Una vez obtenidos los estadísticos de las series de precipitación, tanto de la serie observada como de los modelos, en el periodo de control (1961-2000), se han obtenido los errores estandarizados en cada modelo con la Ecuación 1, de tal forma que se puedan comparar los resultados entre diferentes estaciones con diferentes magnitudes de precipitación.

$$Error = (x_i - x_{obs}) / x_{obs} \quad (1)$$

siendo x_i es el valor del estadístico del modelo i y x_{obs} es el valor del estadístico en los datos observados.

Tabla 2 | Estadísticos utilizados para la evaluación de las series de precipitación.

Estadístico	Acrónimo	Descripción
Media datos	Media	Precipitación media de la serie completa de precipitación
Coefficiente de variación datos	CV	Coefficiente de variación de la serie completa de precipitación
Coefficiente de asimetría datos	CS	Coefficiente de asimetría de la serie completa de precipitación
Días sin precipitación	DsP	Valor medio de días sin precipitación en un año hidrológico
Media de máximos anuales	MediaMax	Valor medio de las precipitaciones máximas anuales
Coefficiente de variación de máximos anuales	CVMax	Coefficiente de variación de la serie de máximos anuales
Coefficiente de asimetría de máximos anuales	CSMax	Coefficiente de asimetría de la serie de máximos anuales

Primero, se han obtenido los errores asociados a cada modelo y estadístico. A continuación, se ha calculado la media y el coeficiente de variación de los errores de todos los modelos para cada estadístico y en cada estación, distinguiendo los dos métodos de regionalización, con el objeto de evaluar la calidad de las proyecciones de precipitación. Finalmente, con el objeto de comparar también el comportamiento de cada método de regionalización, se han comparado directamente los errores producidos por cada método en los modelos de clima comunes a ambos métodos. De esta forma se han obtenido dos tipos de mapas: (i) los que comparan el error de los modelos y la dispersión de sus resultados, y (ii) los que comparan el comportamiento del método de regionalización utilizada.

RESULTADOS

Evaluación de los errores de los modelos

A continuación, se presentan los mapas comparativos de los estadísticos explicados en el apartado de “Medidas de error”. Cada círculo en el mapa representa una estación (Figura 1). El color representa el error medio de los modelos y el tamaño representa la dispersión de los errores cometidos por cada modelo de clima en dicha estación, mediante el valor del coeficiente de variación de los errores de los modelos. Cuanto más grande sea el tamaño del círculo mayores serán las diferencias entre los modelos en dicha estación de medida. Así, si una estación tiene un color cercano al blanco (error medio de los modelos cercano a 0) y tiene un tamaño pequeño (CV pequeño), significa que los modelos se comportan con poco error en ese estadístico y de forma homogénea. Por el contrario, si una estación tiene color blanco, pero un tamaño grande (CV alto), implica que aunque el error sea cercano a 0, los resultados entre modelos presentan grandes diferencias, pudiendo haber errores con signos diferentes que compensen el error global.

Respecto a las escalas de colores, los valores negativos tienen un color desde blanco, pasando por amarillo y llegando hasta rojo, para errores mayores del -100% . Estos valores negativos implican que los datos de los modelos regionalizados dan un estadístico menor que el de los datos observados. Por ejemplo, en el caso de la Media, si la serie observada tiene un valor de 3 mm, y se obtiene que la media de los modelos es igual a 2 mm, el error será del -33.3% y el color asignado será el amarillo. El caso contrario ocurre con los valores positivos, los cuales tienen colores que van desde el blanco, pasando por el azul claro y terminando en el azul oscuro (para valores mayores del 100% de error). En cada mapa, se ha ajustado la escala de colores en función de los valores obtenidos.

Siguiendo el orden presentado en la Tabla 2:

-Media. Como podemos observar en la Figura 3, hay diferencias apreciables entre ambos métodos de regionalización. El método ANA (Figura 3.a) presenta errores positivos en muchas estaciones de la parte oeste y noroeste de España (los modelos dan mayor precipitación media anual que la observada), mientras que los errores son negativos de manera generalizada en la parte mediterránea de España (los modelos dan menos precipitación media anual). Sin embargo, el método SDSM (Figura 3.b) presenta errores negativos de manera generalizada. También hay una diferencia visible en el tamaño de los círculos, mientras que

en el método SDSM muchos de los círculos son pequeños ($CV \sim 0$), lo que indica que todos los modelos suministran resultados parecidos, en el método ANA, la mayoría de las estaciones tiene un tamaño igual o superior a $CV \sim 1$, lo que indica que hay mayor variabilidad entre los modelos. En muchos casos, esta mayor variabilidad se obtiene en las cabeceras de los grandes ríos, así como en zonas montañosas.

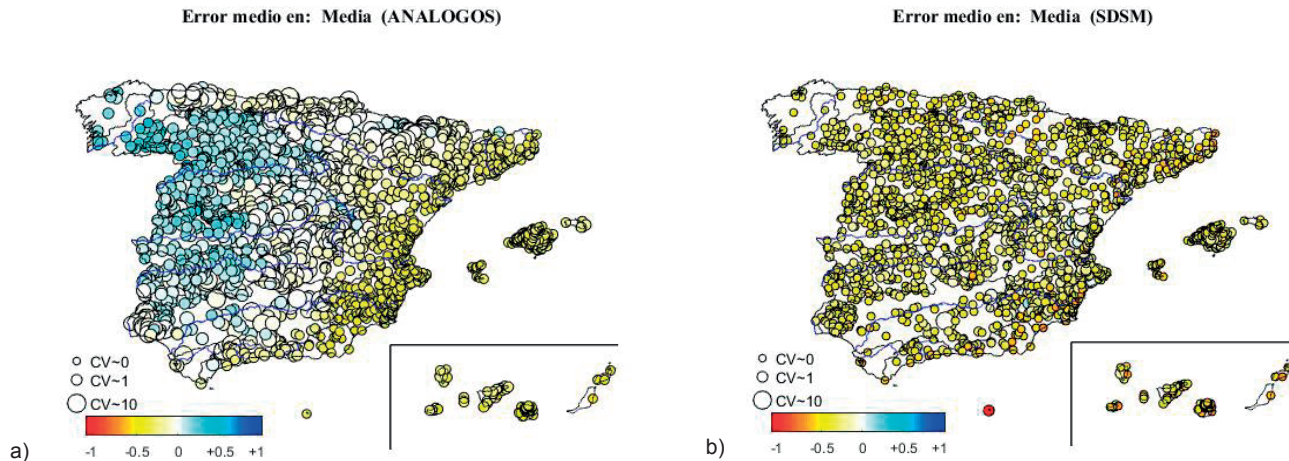


Figura 3 | Errores entre los modelos regionalizados y la serie observada en el estadístico Media (series completas de datos).

-CV. En la Figura 4 observamos que los resultados se intercambian entre los métodos de regionalización. En este caso, el método ANA (Figura 4.a) tiene unos resultados bastante homogéneos, con dispersión pequeña de los resultados, indicando que todos los modelos dan resultados parecidos para este estadístico, salvo en la costa sureste de la península (Murcia y Almería) y en las Islas Canarias. Por otro lado el método SDSM (Figura 4.b) tiene unos resultados sin ningún patrón claro. El error de ambos métodos es generalmente negativo, lo que indica que los CV de las series de datos de los modelos son menores que el de los datos observados, excepto en algunos casos del método SDSM, lo que indica que el clima simulado por los modelos tiene menos variabilidad que la del clima real.

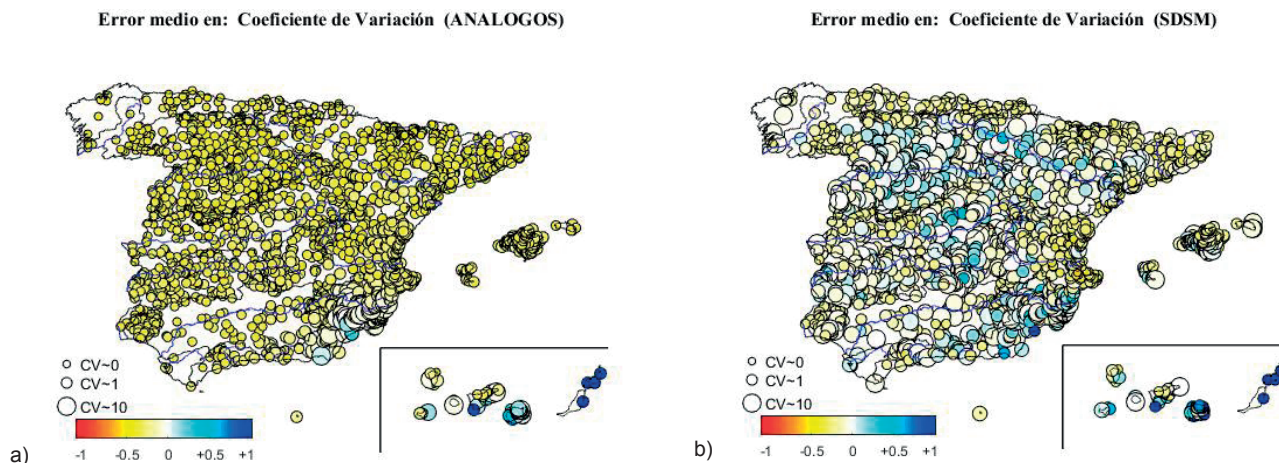


Figura 4 | Errores entre los modelos regionalizados y la serie observada en el estadístico CV (series completas de datos).

-CS. En este caso, ambos mapas en la Figura 5 muestran un error negativo de gran magnitud de forma generalizada. En ambos métodos, los modelos se mueven en un rango determinado para todas las estaciones, ya que la gran mayoría de las estaciones se sitúan en un tamaño medio ($CV \sim 1$). Esto nos indica que aunque los modelos tienen resultados bastante diversos, todas las

estaciones tienen el mismo rango de variación. Esto indica que la extremalidad del clima simulado con los modelos es inferior a la extremalidad del clima real, donde los extremos de precipitaciones pequeñas y/o grandes simulados son inferiores a los reales observados en las estaciones de medida.

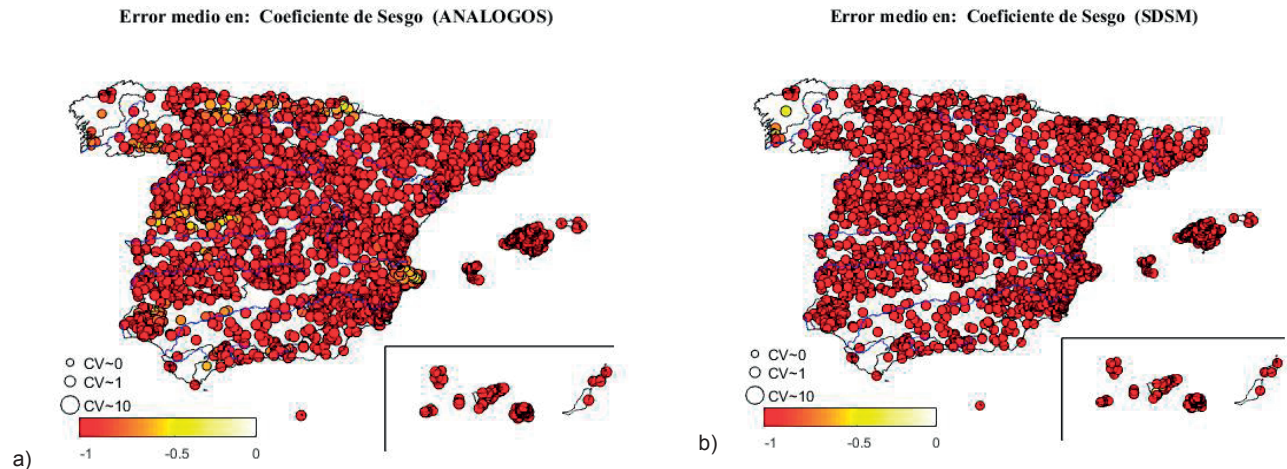


Figura 5 | Errores entre los modelos regionalizados y la serie observada en el estadístico CS (series completas de datos).

-DsP. Las diferencias son muy claras entre los dos métodos de regionalización. Mientras que en el método ANA (Figura 6.a) se distingue un degradado creciente hacia el norte de la península, es más negativo cuanto más al norte se encuentran las estaciones, es decir, cuanto más humedad y precipitación menos días sin precipitación hay respecto a las observaciones, por lo que los modelos simulan más días con lluvia de los que debería, en el método SDSM (Figura 6.b) se puede apreciar un color blanco uniforme en todas las estaciones estudiadas, que indica que el número de días sin lluvia simulados por los modelos es similar al observado.

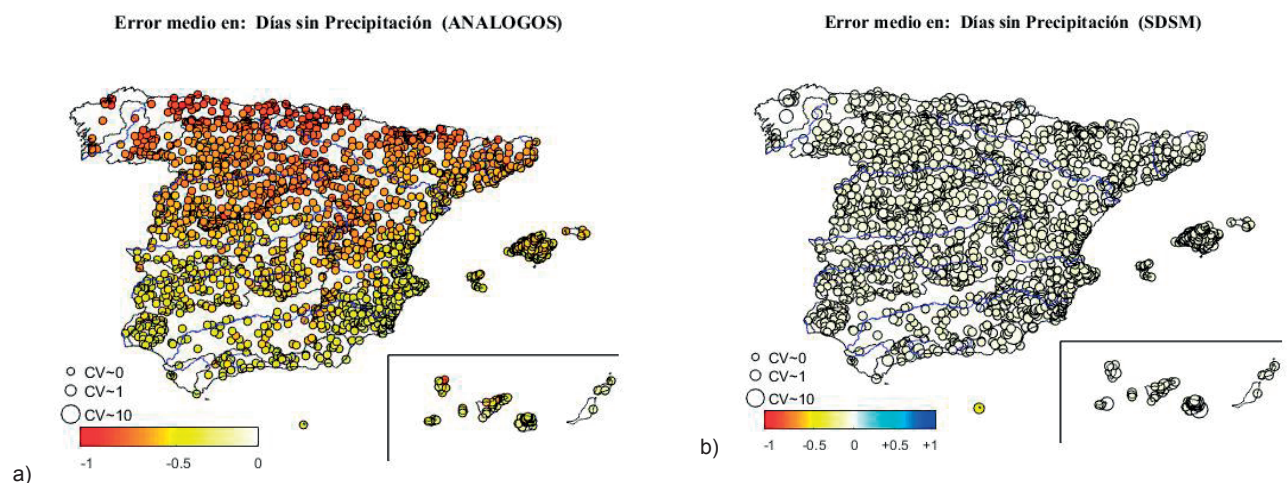


Figura 6 | Errores entre los modelos regionalizados y la serie observada en el estadístico DsP (series completas de datos).

-MediaMax. Comenzando con los estadísticos de las series de máximos anuales, podemos observar los errores en la media en la Figura 7. Ambos métodos de regionalización presentan para todas las estaciones errores negativos (las barras de colores representan solo valores negativos en este caso), lo que indica que los modelos simulan precipitaciones máximas anuales inferiores a las observadas de manera generalizada. Además, se puede observar que el método SDSM tiene errores negativos mayores que el

método ANA. Sin embargo, si se observa con detenimiento, existen los mismos patrones en ambos métodos: mayores errores en el Mediterráneo, valle del Ebro y meseta central superior, así como en las Islas Canarias.

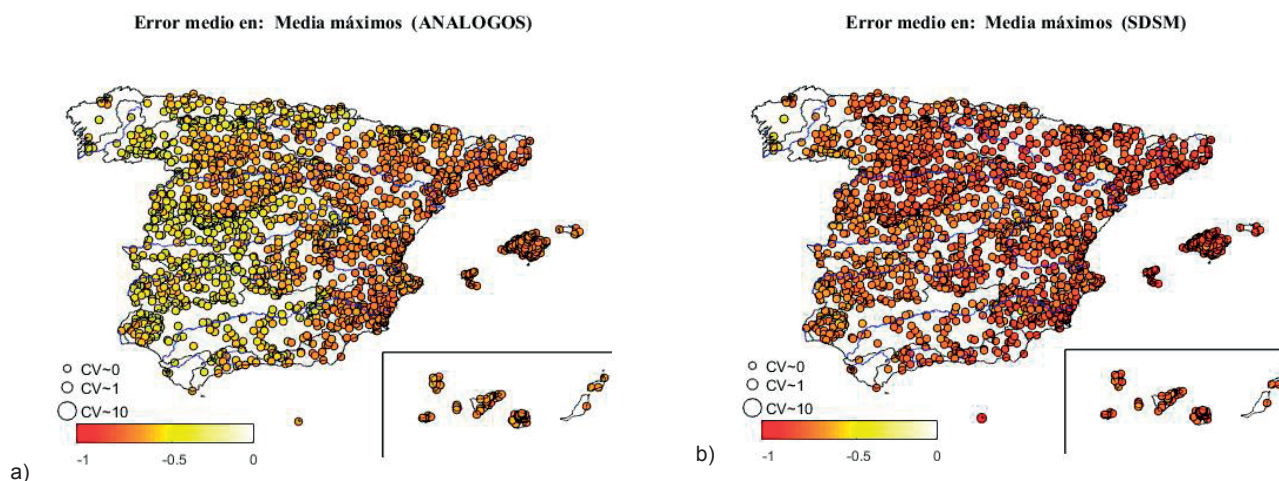


Figura 7 | Errores entre los modelos regionalizados y la serie observada en el estadístico MediaMax (series de máximos anuales).

-CVMax. En este estadístico, los errores son inferiores a los anteriores, con colores claros en muchas estaciones. Se puede apreciar que cuanto más blanco es el color, mayor es el tamaño, indicando que estos valores tan cercanos a cero se dan por compensación de errores entre modelos. Sin embargo, aunque algunas zonas de la península presenten errores positivos (final del valle del Ebro en el método ANA, en la Figura 8.a, y Galicia en el método SDSM, en la Figura 8.b), en general los modelos dan valores del CVmax menores en comparación con los datos observados, lo que indica que la dispersión de los máximos anuales, o extremos, simulados por los modelos es inferior a la dispersión de las observaciones, es decir el clima simulado es más homogéneo, en cuanto a extremos, que el clima real.

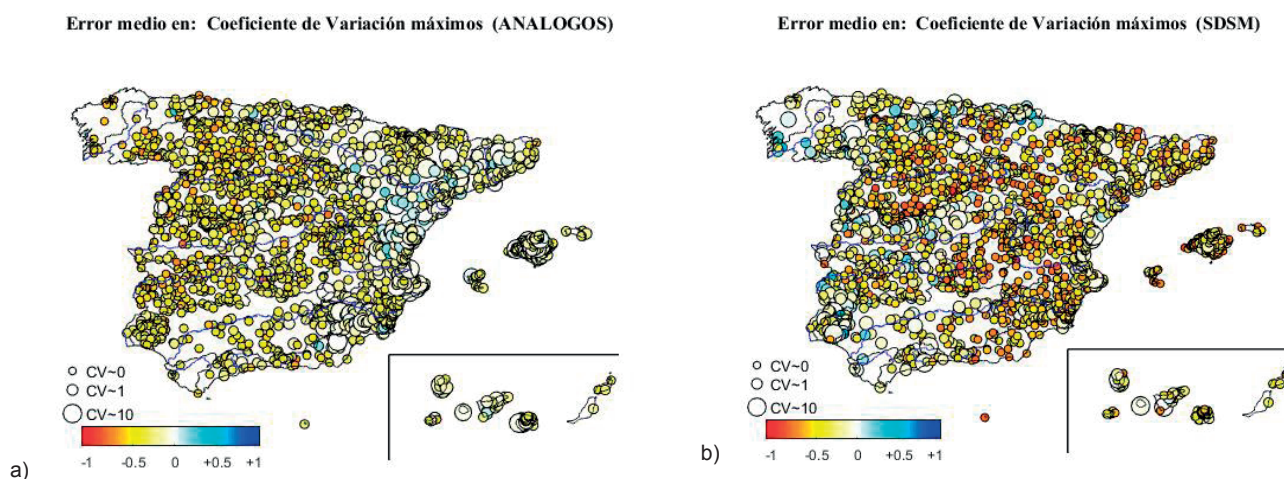


Figura 8 | Errores entre los modelos regionalizados y la serie observada en el estadístico CVMax (series de máximos anuales).

-CSMax. Por último, en la Figura 9 se presentan los mapas de errores del coeficiente de asimetría de las series de máximos anuales. No se puede apreciar ningún tipo de tendencia o patrón en los resultados, sino una gran dispersión de resultados. Los colores varían a lo largo de toda la península, así como los tamaños. Con ello, los mapas muestran que los modelos se comportan de manera completamente aleatoria, independientemente del clima, método de regionalización o altitud de la estación. Esto indica,

una gran incertidumbre en la simulación de los valores más extremos de las series de precipitación máxima anual, por ambos métodos de regionalización. La aleatoriedad de estos resultados también podría ser debida en parte a la variabilidad muestral, ya que el coeficiente de asimetría es el estadístico de tercer orden. Sin embargo, se están considerando series de 40 años, que no son excesivamente cortas.

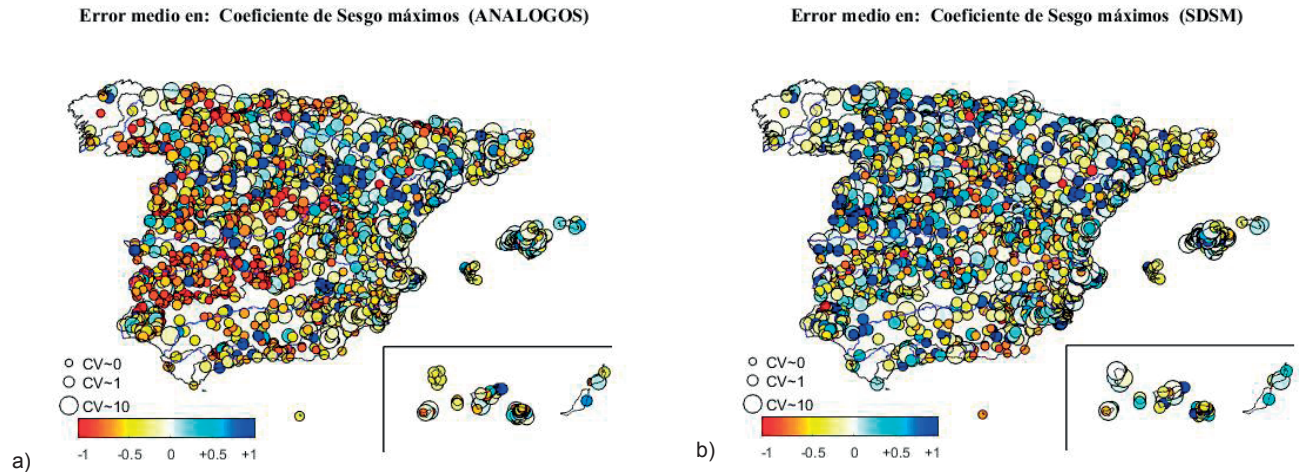


Figura 9 | Errores entre los modelos regionalizados y la serie observada en el estadístico CSMax (series de máximos anuales).

COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS DE REGIONALIZACIÓN

Para el análisis de comparación entre métodos de regionalización no se han utilizado todos los estadísticos calculados anteriormente, ya que para algunos de ellos la comparación no es necesaria. Este es el caso de los estadísticos para valores máximos (MediaMax, CVMax y CSMax) y DsP. Tanto para MediaMax como para DsP, los resultados concluyen que el mejor método es ANA y SDSM, respectivamente, en todos los casos. Por otro lado, CVMax y CSMax tienen unos resultados demasiado aleatorios como para percibir algún tipo de tendencia. Además, de los siete modelos que tienen ambos métodos de regionalización, solo se van a escoger cuatro (BNU-ESM, MIROC-ESM, MIROC5 y MRI-CGCM3), ya que los modelos MPI-ESM-LR y MPI-ESM-MR se comportan de manera muy similar al modelo MRI-CGCM3 y el modelo INMCM4 al modelo MIROC5.

En las gráficas se puede observar tres colores distintos, así como tres formas distintas para cada estación. El color depende del método de regionalización que tiene menor error, es decir, el mejor de los dos (morado para el método ANA y verde para SDSM). Además, hay un tercer color (amarillo) que indica que ambos métodos tienen el mismo error, con un intervalo de $\pm 5\%$ en valor absoluto, de tal forma que no se puede concluir que un método sea mejor al otro. La forma que se adopta en cada estación, es función del signo del estadístico en cada método (positivo o negativo). En el caso de que ambas técnicas de regionalización tengan un error positivo, la estación tendrá forma de pirámide, si ambos métodos tienen un error negativo, la estación tendrá forma de pirámide invertida, y si ambos métodos difieren (por ejemplo uno positivo y otro negativo) la forma será un círculo. Esto puede servir para ver si ambos métodos se comportan de la misma manera en ciertas regiones.

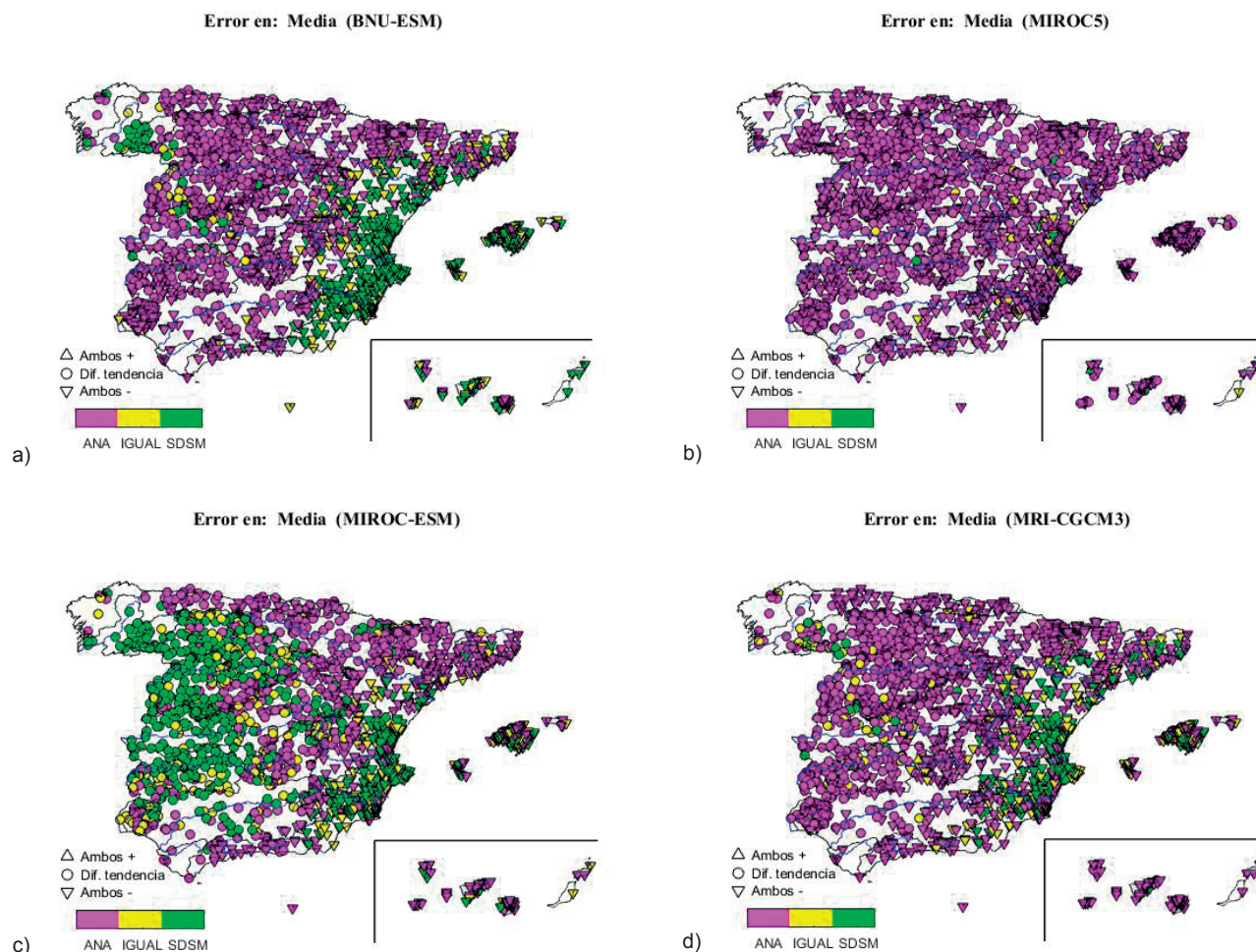


Figura 10 | Comparación entre métodos de regionalización y tendencia de los modelos en el estadístico Media (series completas de datos).

En la Figura 10 se han reunido los mapas correspondientes a la comparación en la Media (series completas). Se puede apreciar que los mapas son mayormente morados, a excepción del modelo MIROC-ESM. Esto significa que para este estadístico el método ANA tiene un error menor, es decir, los modelos simulan mejor la precipitación media anual por el método ANA que por el método SDSM. Se puede apreciar también, que en la costa mediterránea, sobre todo las regiones de Valencia, Alicante, Murcia, Almería y las Islas Baleares, hay zonas verdes que indican un menor error en el modelo SDSM, de tal forma que en estas zonas el método SDSM obtiene mejores resultados de la precipitación media anual. En el resto de zonas los resultados dependen del modelo. Por ejemplo, en el modelo BNU-ESM, hay una zona verde importante en León y Galicia que concuerda con el modelo MIROC-ESM, pero no con el resto de modelos. Asimismo, en el modelo MIROC5 solo se observan algunas estaciones verdes, mientras que el resto son moradas (el método ANA se comporta mucho mejor para este modelo).

Respecto a la forma de cada estación, se pueden observar dos tendencias claras: en toda la región de clima mediterráneo se observa que el error en ambos métodos es negativo, lo que indica que en esta zona los modelos simulan una precipitación media anual inferior a la observada, independientemente del método utilizado, mientras que en toda la zona superior de la meseta central predominan los círculos, es decir, que una técnica de regionalización simula precipitaciones medias anuales superiores a la observada, mientras que la otra técnica suministra precipitaciones inferiores. Esta tendencia puede comprobarse en todos los modelos.

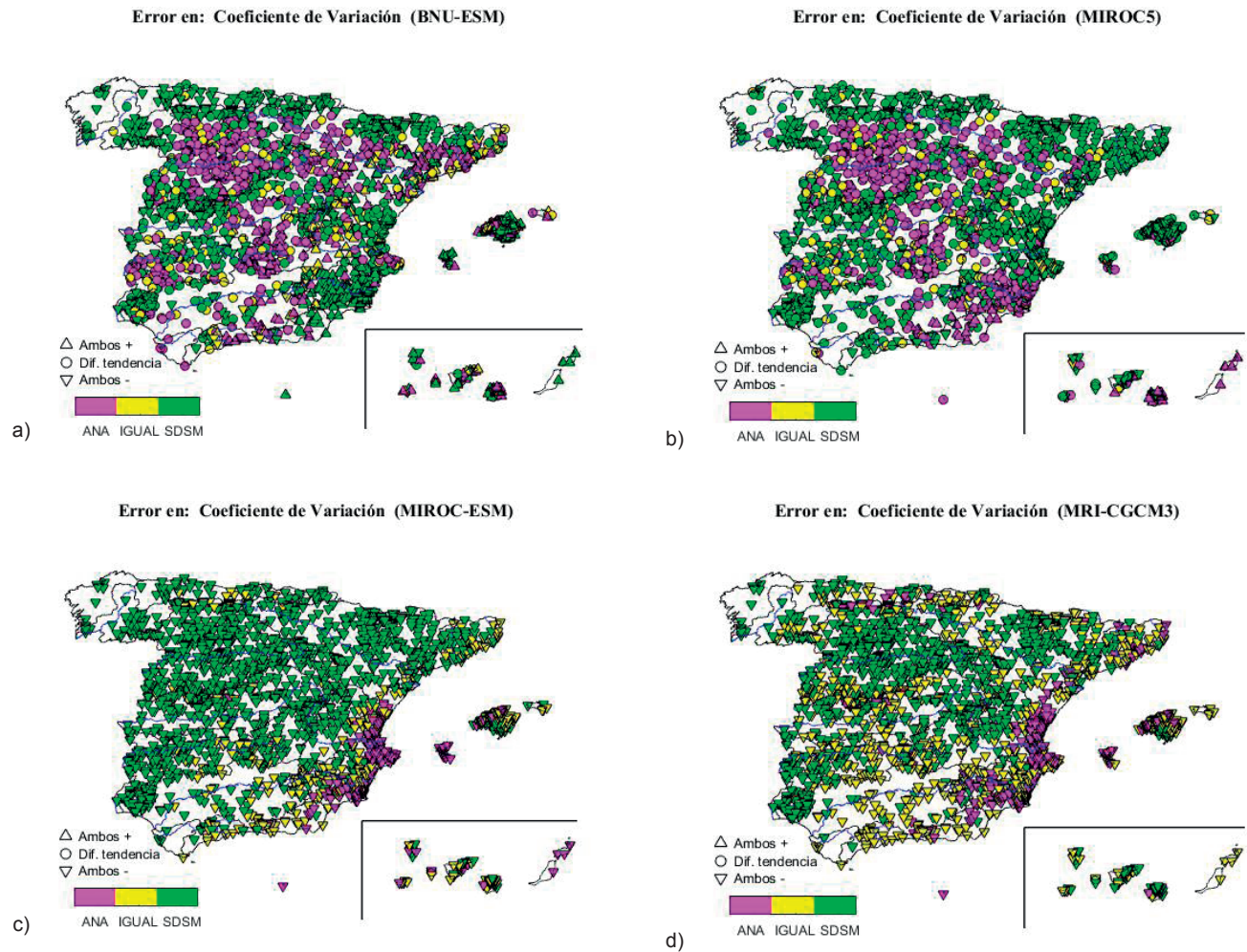


Figura 11 | Comparación entre métodos de regionalización y tendencia de los modelos en el estadístico CV (series completas de datos).

En la Figura 11 se reúnen los mapas del estadístico CV para los modelos seleccionados (dispersión de las precipitaciones diarias de las series completas). En este caso, el método SDSM es el que tiene menor error, es decir, la dispersión de los valores de precipitación en la serie completa de datos, o variabilidad del clima, es simulada mejor por el método SDSM. Al contrario de la Figura 10, en esta figura se aprecian dos comportamientos diferentes, el de los mapas a y b (modelos BNU-ESM y MIROC5 y, por lo tanto, también el modelo INMCM4) y el de los mapas c y d (modelos MIROC-ESM y MRI-CGCM3 y, por lo tanto, también los modelos MPI-ESM-LR y MPI-ESM-MR). Para los mapas a y b se aprecia que, en el valle del Ebro y la meseta central (a excepción del Sistema Central), el método ANA presenta un error menor, mientras que para los mapas c y d, el método que menor error tiene es el SDSM. Por el contrario, se observa que, en la costa valenciana, en los mapas a y b, el método SDSM es mejor, mientras que, en los mapas c y d, el método ANA es el que tiene un error menor.

Si se estudia el signo de los errores en las estaciones, se vuelve a observar una clara diferencia entre los mapas a y b y los mapas c y d. Mientras que los primeros muestran una mayor abundancia de círculos (lo que nos indica que ambas técnicas de regionalización tienen diferentes signos en el error), en los mapas c y d, la mayor parte de las estaciones tiene forma de pirámide invertida, lo que indica que ambos métodos tienden a subestimar el coeficiente de variación.

Finalmente, la Figura 12 presenta los mapas del estadístico CS. Al igual que en el estadístico Media, el método ANA es el que mejor se comporta. En la zona del interior de Valencia y Murcia, así como parte de Aragón, el método SDSM es mejor, pero

no para todos los modelos (solo para los modelos BNU-ESM y MIROC5 y, por lo tanto, también para el modelo INMCM4). Si se estudia el signo de los errores, se puede observar que la mayoría de las estaciones tienen errores negativos en ambos modelos, tal y como se puede comprobar en la Figura 5. Es decir, la extremalidad climática real está suavizada por los modelos, presentando extremos más cercanos al comportamiento medio, que en el caso de las observaciones. Sin embargo, dentro de esta tendencia, el método ANA simula un clima más cercano a la realidad que en el caso del método SDSM.

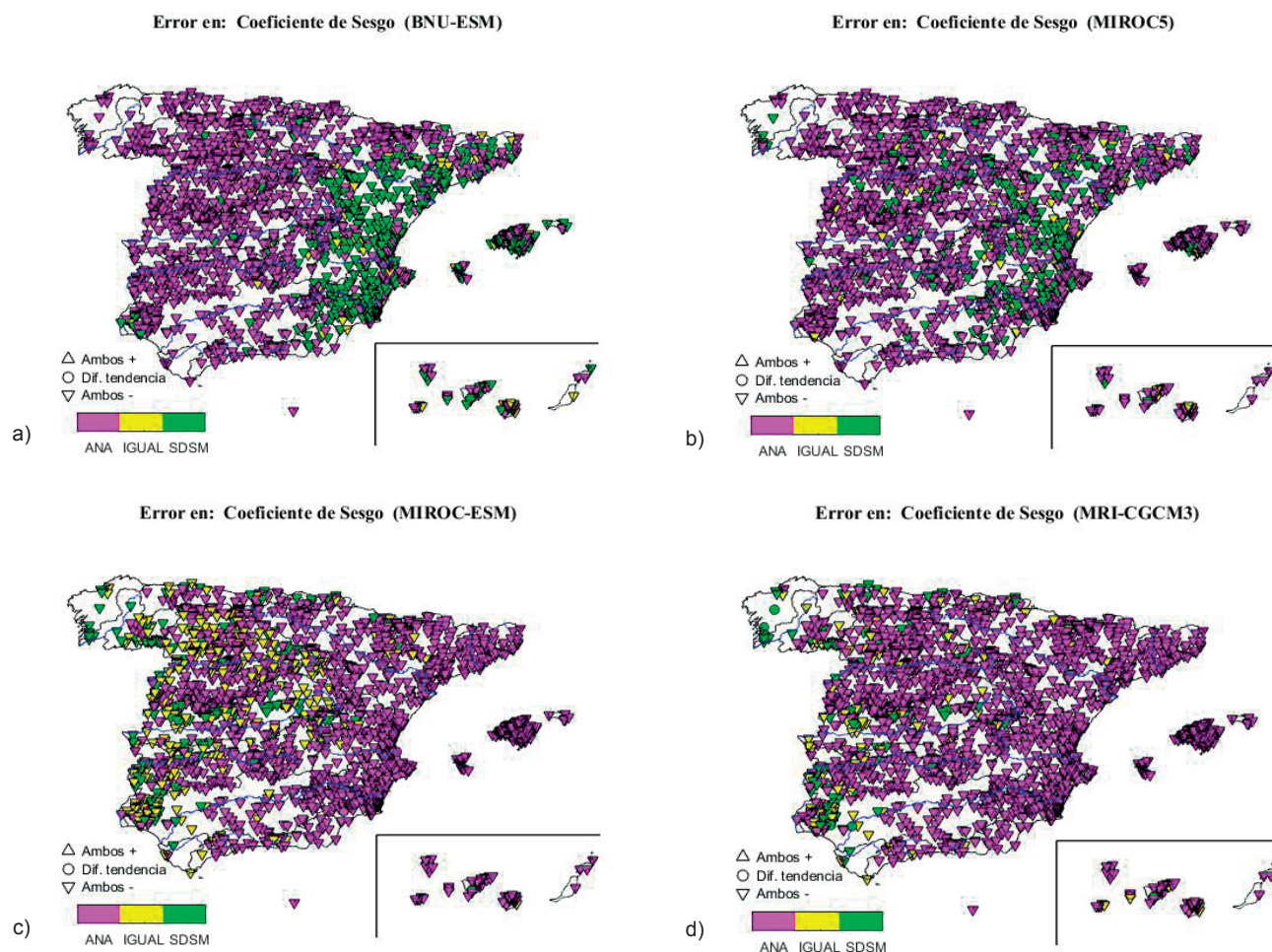


Figura 12 | Comparación entre métodos de regionalización y tendencia de los modelos en el estadístico CS (series completas de datos).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El presente estudio muestra la evaluación de las proyecciones de precipitación diaria en cambio climático suministradas por el AEMET en toda España. Esta regionalización ha sido realizada mediante dos métodos de regionalización estadística: el método de los análogos, y el método de regionalización estadística (SDSM, en sus siglas en inglés). El análisis se ha realizado en el periodo de control (1961–2000), comparando las proyecciones de los modelos climáticos con los datos observados en pluviómetros mediante una serie de estadísticos. Los resultados del estudio muestran que la regionalización de los MCGs no ha sido adecuada. La comparación de los estadísticos muestra unos resultados muy dispares en función del estadístico analizado. Hay una clara diferencia entre el comportamiento medio de las series y el comportamiento de los máximos anuales. Mientras que los modelos regionalizados se comportan razonablemente bien para valores medios, no ocurre así para valores máximos anuales. Todos los modelos para ambos métodos de regionalización subestiman las precipitaciones extremas (precipitaciones máximas anuales), empeorando los resultados

en el área mediterránea. El coeficiente de variación tanto para la serie completa como para la serie de máximos anuales se comporta de una manera adecuada, aunque con una subestimación generalizada del estadístico, suavizando la variabilidad natural del clima. Respecto al coeficiente de asimetría, tanto para la serie completa como para la serie de máximos anuales, los modelos no tienen un comportamiento correcto. Los resultados muestran una aleatoriedad completa en todo el territorio, sin la posibilidad de sacar ningún patrón regional.

La falta de ajuste en los máximos y la aleatoriedad de algunos de sus estadísticos indican que los métodos de regionalización utilizados por AEMET no son adecuados para caracterizar los extremos de precipitación, por lo que se deberían probar otros métodos de regionalización que quizás mejorasen el comportamiento extremal de las proyecciones de precipitación.

Es interesante resaltar el buen comportamiento que tiene el método SDSM al corregir los días sin precipitación, ya que presenta un error casi nulo de manera generalizada. Por el contrario, el método de los análogos provoca una subestimación generalizada del estadístico, sobre todo en las zonas con mayor precipitación de la península. Este fenómeno es llamado 'llovizna' y evidencia que el modelo (o el método) genera más días con lluvia (normalmente baja) de lo que debería. Este efecto, aunque inoportuno para estudios de precipitación, no influye sin embargo de manera evidente en las simulaciones hidrológicas, ya que los valores de precipitación de la 'llovizna' son muy pequeños, y no tienen una influencia determinante sobre la humedad del suelo, ya que se son abstraídos por la evapotranspiración.

Con estos resultados, no se puede seleccionar de forma clara qué método es mejor, ya que aunque en algunos estadísticos uno sea mejor, éste falla en otros. Sin embargo, se puede afirmar que el método de regionalización estadística ajusta de manera muy eficaz los días sin precipitación, y que el método de los análogos tiene mejores resultados en los valores máximos anuales. Por todo ello, se concluye que, antes de realizar cualquier estudio de impacto del cambio climático sobre las inundaciones con estos datos, es necesario compararlos con los disponibles en otras fuentes, como el CORDEX, ya que los métodos de regionalización utilizados por AEMET no se ajustan adecuadamente a los datos extremos. En cualquier caso, si se decide utilizar las proyecciones de precipitación suministradas por AEMET, se recomienda encarecidamente realizar una corrección del sesgo adecuada a la zona de estudio, (por ejemplo como hacen Garijo y Mediero, 2018 en su estudio utilizando datos de AEMET y CORDEX) para al menos obtener resultados en el orden de magnitud de las observaciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación del proyecto CGL2014-52570-R 'Impacto del cambio climático en la ley de frecuencia bivariada de avenidas' del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España.

Los autores también agradecen al Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) por suministrar los datos de caudal y de las variables climáticas, respectivamente, usadas en este estudio.

REFERENCIAS

Álvarez, A.J., Mediero, L., García, C. 2014. Análisis y selección de modelos estadísticos para el ajuste de la ley de frecuencia de caudales máximos anuales en España. *Ingeniería Civil*, 174, 5-31.

European Union. 2007. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. *Official Journal of the European Union*, L 288, 27-34.

Garijo, C., Mediero, L. 2018. Influence of climate change on flood magnitude and seasonality in the Arga River catchment in Spain. *Acta Geophysica*, <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0143-0>

IPCC. 2014. *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza. ISBN: 978-92-9169-343-6

- 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., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van 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. *Regional Environmental Change*, 14, 563-578, <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Kundzewicz, Z.W., Krysanova, V., Dankers, R., Hirabayashi, Y., Kanae, S., Hattermann, F. F., Huang, S., Milly, P. C. D., Stoffel, M., Driessen, P. P. J., Matczak, P., Quevauviller, P., Schellnhuber, H.-J. 2017. Differences in flood hazard projections in Europe – their causes and consequences for decision making, *Hydrological Sciences Journal* 62, 1-14, <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1241398>
- Morata-Gasca, A. 2014. *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR4*. Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, España.
- Quintana Seguí, P., Ribes, A., Martín, E., Habets, F., Boé, J. 2010. Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. *Journal of Hydrology*, 383, 111-124, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.050>
- Teutschbein, C., Seibert, J. 2012. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 16, 12–29, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- Teutschbein, C., Seibert, J. 2013. Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions?. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 5061–5077, <https://doi.org/10.5194/hess-17-5061-2013>.
- Thiemeßl, M.J., Gobiet, A., Leuprecht, A. 2011. Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *International Journal of Climatology*, 31, 1530-1544. <https://doi.org/10.1002/joc.2168>