

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

Carlos Garijo^{a1}, Luis Mediero^{a2} y Luis Garrote^{a3}

^a Departamento 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

Línea temática B | Hidrología, usos y gestión del agua. Riegos. Energía hidroeléctrica.

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. AEMET ha regionalizado algunas variables suministradas por varios modelos de clima global en España, mediante dos métodos de downscaling estadístico. La utilidad de esta regionalización, en cuanto a las proyecciones de precipitaciones, reside en el ajuste que tengan a los estadísticos de los datos observados en el periodo de control (1961-2000). Para ello se ha realizado una comparación en base a una serie de estadísticos. Se ha comprobado 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, en comparación con las observaciones.

Palabras clave | Cambio climático; Modelos Climáticos Globales; Downscaling estadístico; Avenidas; España.

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 tienen un gran 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 dato 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. Para obtener una mayor resolución, se suelen utilizar técnicas de downscaling que permiten conseguir una resolución adecuada. Existen dos tipos de downscaling: (i) downscaling dinámico, que se basa en Modelos de Clima Regional (MCR) con una resolución mucho mayor y que utilizan como condiciones de contorno las salidas de los MCG; (ii) downscaling estadístico, 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., 2013). Este proyecto consiste en la simulación de distintas combinaciones de MCG-MCRs encuadradas V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

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 downscaling estadístico.

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 and 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 and Seibert (2012).

Esta comunicación recoge un primer análisis de la utilidad de las proyecciones 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. Para ello se han obtenido los principales estadísticos de las series temporales de precipitación en el periodo de control (1961-2000) de los modelos regionalizados por AEMET, así como de los datos observados en los pluviómetros utilizados a lo largo de toda España para el mismo periodo. A partir de dicha información se ha generado una serie de mapas a escala nacional que muestran los errores en los estadísticos seleccionados para observar 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 downscaling estadístico se comporta mejor.

La comunicación está organizada de la siguiente forma. Primero se expondrá la fuente de datos utilizados, así como la metodología utilizada para elaborar los mapas de errores. Posteriormente se presentará el caso de estudio seleccionado para ver el comportamiento de las proyecciones climáticas tras la simulación con el modelo hidrológico. Finalmente se expondrán los resultados tanto de la comparación de los mapas de errores como de las leyes de frecuencia obtenidas en el caso de estudio. Para terminar desarrollan las conclusiones alcanzadas tras el estudio de los resultados.

METODOLOGIA

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.

AEMET ha utilizado dos métodos de downscaling estadístico: (i) el método de análogos (ANA) y (ii) el método regionalización estadística (SDSM, en sus siglas en inglés). Conceptualmente, el método ANA identifica la situación atmosférica en el paso de tiempo considerado del 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 (AEMET, 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 (Themeßl 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 predictoras a escala regional, obtenidos a partir de los modelos de circulación general, y las

variables predictando a escala local (AEMET, 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.

Ambos tipos de regionalización, y de manera general todos los métodos de downscaling estadístico, tienen un problema fundamental, que consiste en la suposición de estacionariedad. 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.

Tabla 1 | Modelos regionalizados disponibles y escogidos del AEMET 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	
ACCES1-0	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	
ACCES1-3	x	-	x	x	-	x		x	-	x	x	-	x	
BCC-CSM1-1	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	
BCC-CSM1-1-m	x	x	x	x	x	-		x	x	x	x	x	x	x
BNU-ESM	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
CMCC-CESM	x	-	x	x	-	x		x	-	x	x	-	x	
CMCC-CM	x	x	x	x	-	x		x	x	x	x	x	x	x
CMCC-CMS	x	x		x	x			x	-	x	x	-	x	
CNRM-CM5	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	
CanESM2	-	-	-	-	-	-		x	x	x	x	x	x	x
CSIRO-Mk3-6-0	-	-	-	-	-	-		x	-	x	x	-	x	
GFDL-ESM2G	x	x	x	-	-	-		x	x	x	x	x	x	x
GFDL-ESM2M	x	x	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	
HadGEM2-CC	x	-	x	x	-	x		-	-	-	-	-	-	
INMCM4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
IPSL-CM5A-LR	x	x	x	-	-	-		x	x	x	x	x	x	x
IPSL-CM5A-MR	x	x	-	x	x			x	x	x	x	x	x	x
IPSL-CM5B-LR	x	x	-	-	-	-		x	x	x	x	x	x	x
MIROC-ESM	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
MIROC-ESM-CHEM	x	-	-	x	-	-		x	x	x	x	x	x	x
MIROC5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
MPI-ESM-LR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
MPI-ESM-MR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
MRI-CGCM3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

AEMET dispone de un total de 24 MCGs en su página web. En la Tabla 1 se muestran la regionalización que se ha hecho 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, 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.

Respecto a los datos observados de precipitación, éstos han sido suministrados asimismo 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 si se escogían valores superiores de umbral, en algunas zonas de la península quedaban huecos importantes sin ninguna estación. En la Figura 1 se muestra la disposición de todas las estaciones seleccionadas.

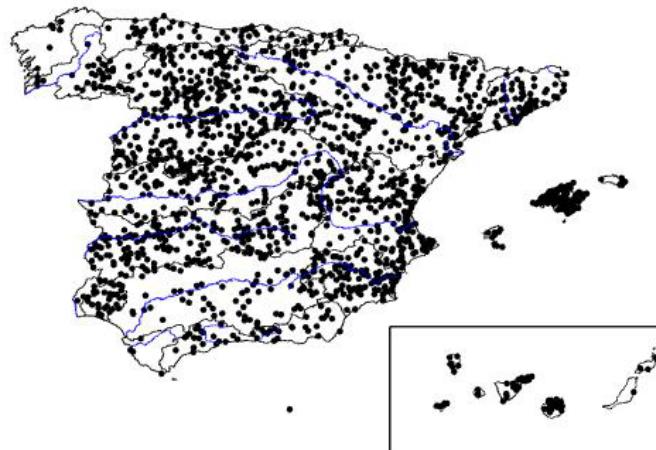


Figura 1 | Localización de las estaciones pluviométricas seleccionadas.

Medidas de error

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

Tabla 2 | Estadísticos de precipitación utilizados.

Estadístico	Acrónimo	Descripción
Media datos	Media	Precipitación media de la serie completa de precipitación
Coeficiente de variación datos	CV	Coeficiente de variación de la serie completa de precipitación
Coeficiente de sesgo datos	CS	Coeficiente de sesgo 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	Precipitación media de la serie de máximos valores anuales
Coeficiente de variación de máximos anuales	CVMax	Coeficiente de variación de la serie de máximos valores anuales
Coeficiente de sesgo de máximos anuales	CSMax	Coeficiente de sesgo de la serie de máximos valores anuales

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.

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 downscaling, 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 downscaling, 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 downscaling utilizado.

Leyes de frecuencia de caudales máximos anuales

Los datos regionalizados de los modelos de clima tienen como utilidad la entrada en un modelo hidrológico calibrado, para identificar posibles variaciones en el caudal que circula por los ríos en condiciones de cambio climático. En el caso de las avenidas, la forma más adecuada es utilizar la ley de frecuencia de caudales máximos anuales. Para este análisis, los máximos caudales anuales se obtendrán de las salidas del modelo hidrológico así como de la serie de caudales observados.

Para obtener los valores de caudal asociados a un determinado periodo de retorno se va a utilizar la función de distribución de Valores Extremos Generalizada (GEV en inglés) utilizando el método de los L-momentos para estimar sus parámetros. Esta distribución es ampliamente utilizada, y es la que mejor se comporta en la región donde se encuentra la cuenca estudiada (Álvarez et al., 2014). Además dichos autores recomiendan utilizar un valor regional para el L-coeficiente de sesgo. La ecuación general para la función de distribución acumulada del GEV es:

$$F(x; \mu; \sigma; k) = \begin{cases} \exp\left(-\left[1 + k\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/k}\right) & k \neq 0 \\ \exp\left(-\exp\left[1 + k\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]\right) & k = 0 \end{cases} \quad (2)$$

donde x es la variable aleatoria (en nuestro caso los caudales máximos anuales), k es el parámetro de forma, σ es el parámetro de escala, y μ es el parámetro de localización.

CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio va a ser la cuenca del río Arga. Esta cuenca está situada dentro de la Demarcación Hidrográfica del río Ebro, en el norte de España (Fig. 2). La cuenca tiene un área de drenaje de 2795 km², y conecta el Pirineo occidental con la depresión central del Ebro, uniéndose al río Aragón antes de desembocar en el río Ebro. La longitud del cauce es de 150 km. Sus principales afluentes son: el río Araquil (834 km²), el río Uzama (265 km²), el río Salado (192 km²) y el río Elorz (283 km²). El caudal medio anual en su desembocadura es de 50 m³/s. El clima es Atlántico-Mediterráneo de transición, con una precipitación media es de 972 mm/año, y unas temperaturas medias anuales en la cuenca entre 10 y 14°C. Los usos del suelo en la cuenca son variados, destacando los cultivos en sus zonas bajas y los bosques en las zonas más altas.

Se ha utilizado el modelo hidrológico HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning), que es un modelo conceptual de lluvia-escorrentía desarrollado por Bergström (1992) ampliamente contrastado en numerosas regiones climáticas a lo largo del planeta. La versión empleada en este estudio ha sido el HVB-light-GUI versión 4.0.0.7. (Seibert and Vis, 2012). El modelo hidrológico ha sido calibrado con un total de 10 estaciones meteorológicas y 4 estaciones de aforo situadas a lo largo del cauce de la cuenca. La calibración y validación del modelo ha sido satisfactoria, con unas eficiencias de entre 0.72 y 0.92 para la calibración, y de entre 0.67 y 0.86 para la validación en distintos puntos de la cuenca.



Figura 2 | Localización del área de estudio.

RESULTADOS

Evaluación de los errores de los modelos

A continuación se van a presentar 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 el color blanco, pero un tamaño grande (CV alto), implica que aunque el error sea casi 0 los resultados entre modelos presentarán 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 llegando hasta rojo, para errores menores 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 (Fig. 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 (Fig. 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 mucha variabilidad entre los modelos. En muchos casos, esta mayor variabilidad se obtiene en las cabeceras de los grandes ríos, así como en zonas montañosas.

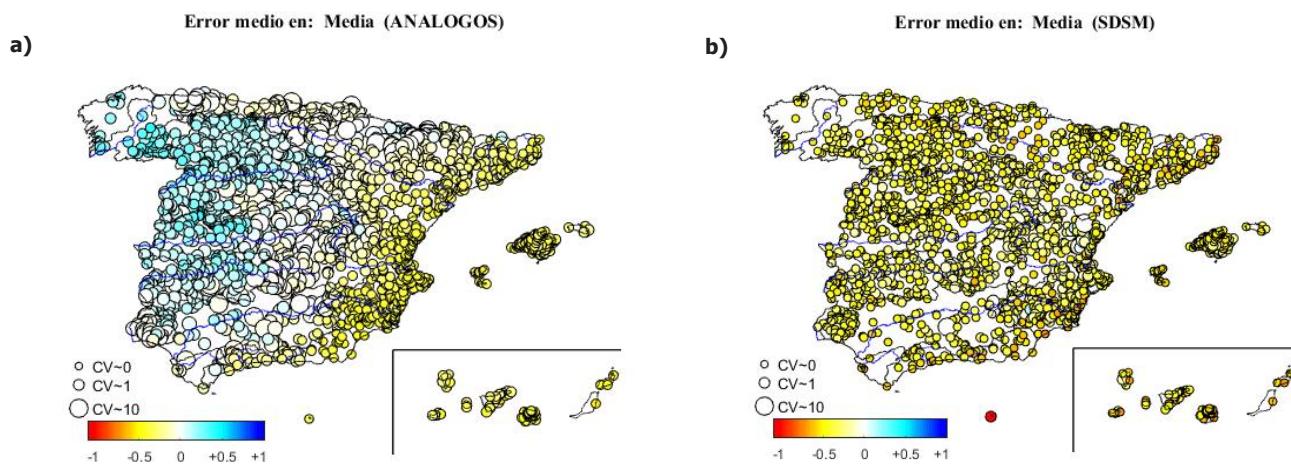


Figura 3 | Errores entre los modelos regionalizados y la serie observada en el estadístico Media (series completas de datos).

-CV. En la Figura 4 observamos que los resultados se intercambian entre los métodos de regionalización. En este caso, el método ANA (Fig. 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 (Fig. 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.

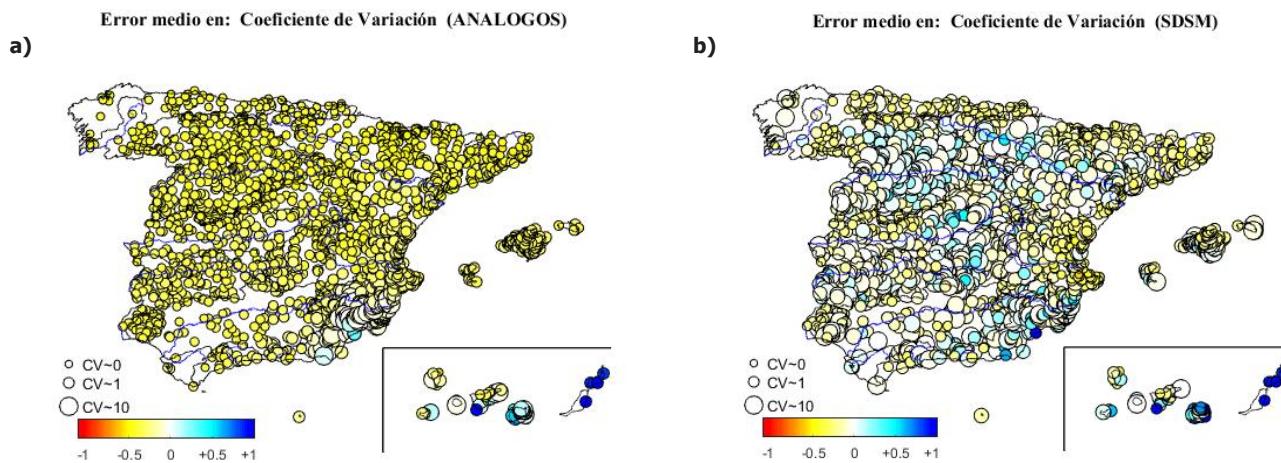


Figura 4 | Errores entre los modelos regionalizados y la serie observada en el estadístico CV (series completas de datos).

-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.

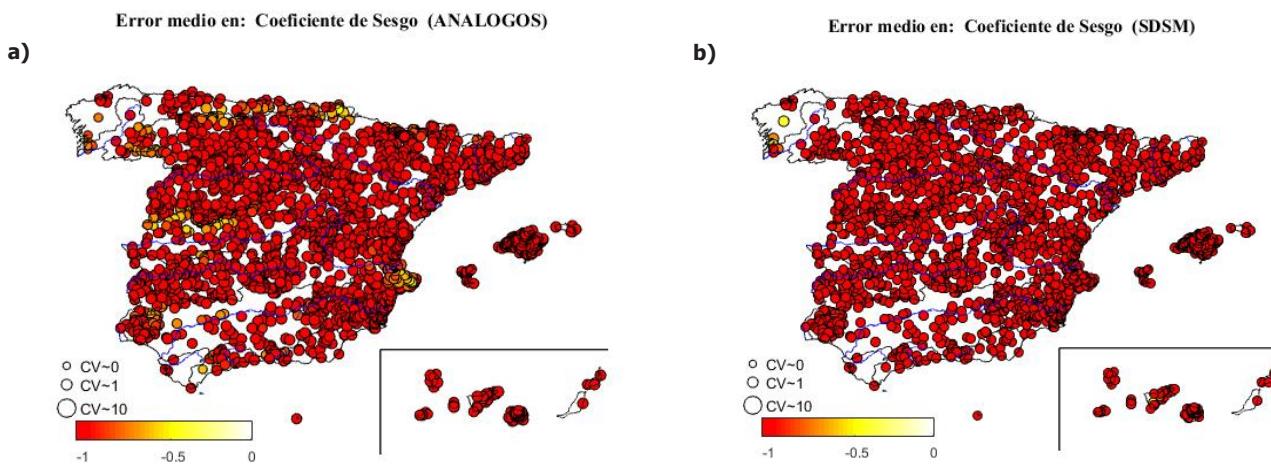


Figura 5 | Errores entre los modelos regionalizados y la serie observada en el estadístico CS (series completas de datos).

-DsP. Las diferencias son muy claras entre los dos métodos de regionalización. Mientras que en el método ANA (Fig. 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 (Fig. 6.b) se puede apreciar un color blanco uniforme por todo el país, que indica que el número de días sin lluvia simulados por los modelos es similar al observado.

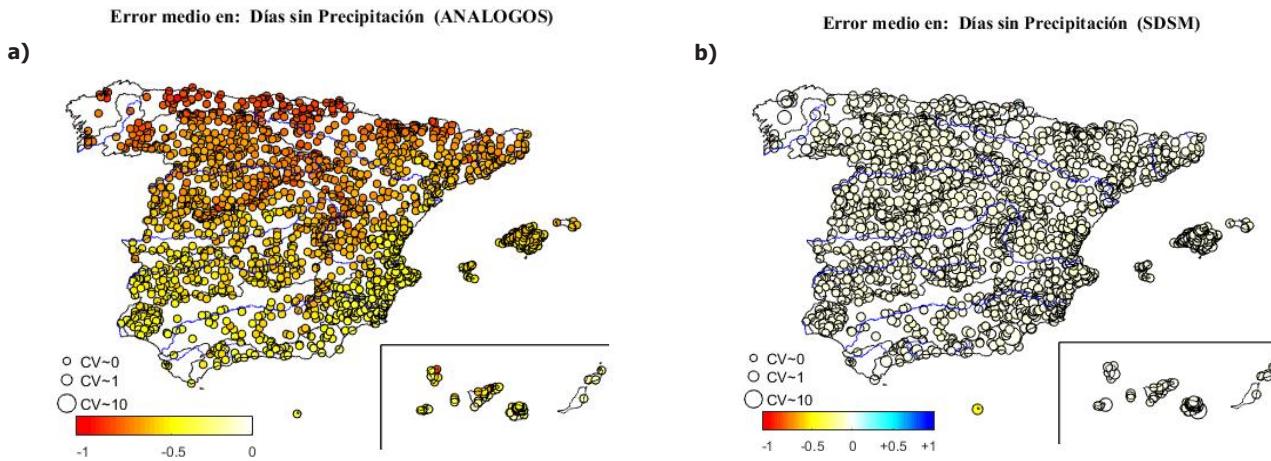


Figura 6 | Errores entre los modelos regionalizados y la serie observada en el estadístico DsP (series completas de datos).

-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. Además se puede diferenciar 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 las Islas Canarias.

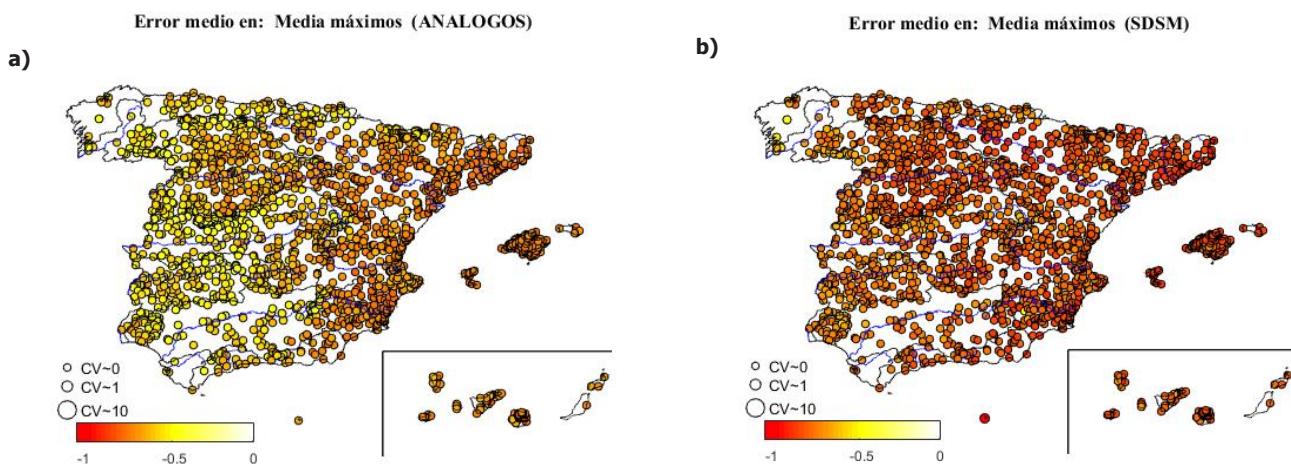


Figura 7 | Errores entre los modelos regionalizados y la serie observada en el estadístico MediaMax (series de máximos anuales).

-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 (Fig. 8.a), o Galicia en el método SDSM (Fig. 8.b)), en general los modelos dan unos CVmax menores para valores de máximos anuales en comparación con los datos observados, lo que indica que la dispersión de los 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.

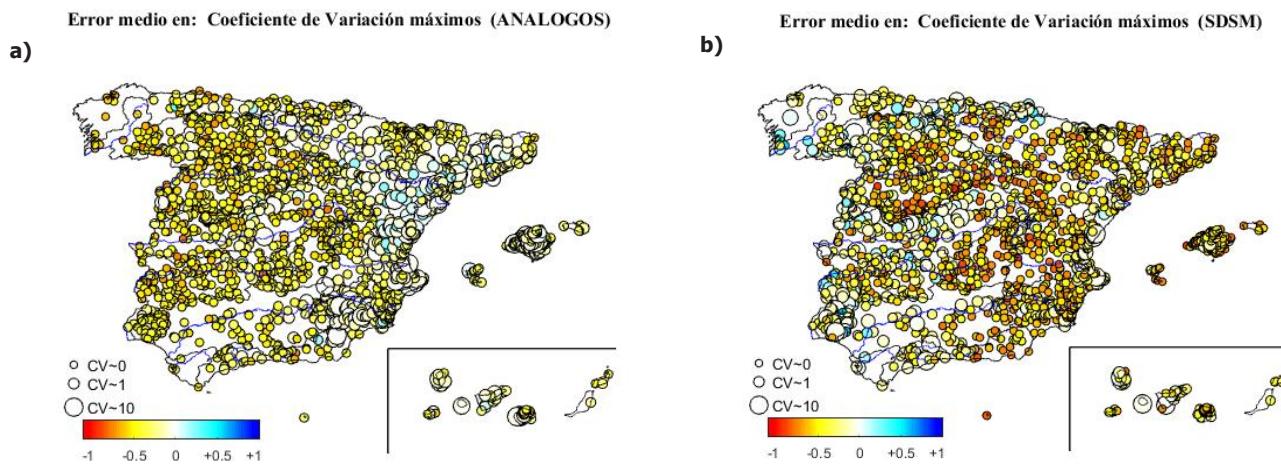


Figura 8 | Errores entre los modelos regionalizados y la serie observada en el estadístico CVMax (series de máximos anuales).

-CSMax. Por último, en la Figura 9 se presentan los mapas de errores del coeficiente de sesgo 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.

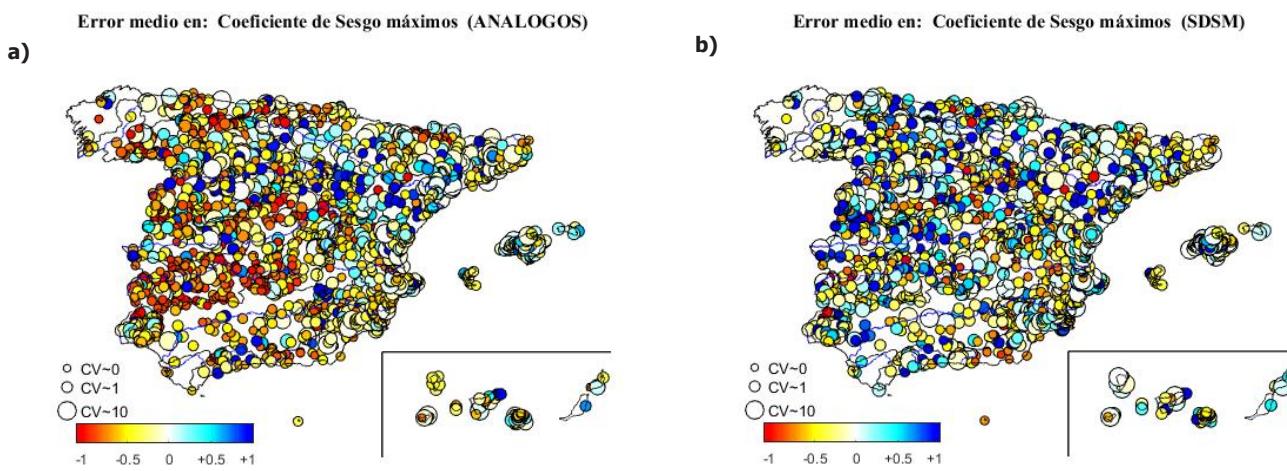


Figura 9 | Errores entre los modelos regionalizados y la serie observada en el estadístico CSMax (series de máximos anuales).

Comparación entre métodos de regionalización

Para el análisis de comparación entre métodos de regionalización no se van a utilizar todos los estadísticos calculados anteriormente, ya que para algunos de ellos no tiene sentido la comparación. Este es el caso de los estadísticos para valores máximos (MediaMax, CVMax y CSMax) y DsP. Tanto para MediaMax como para DsP, los resultados van a dar 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, indica la tendencia que tiene el estadístico (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.

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 como para 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-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 hay 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.

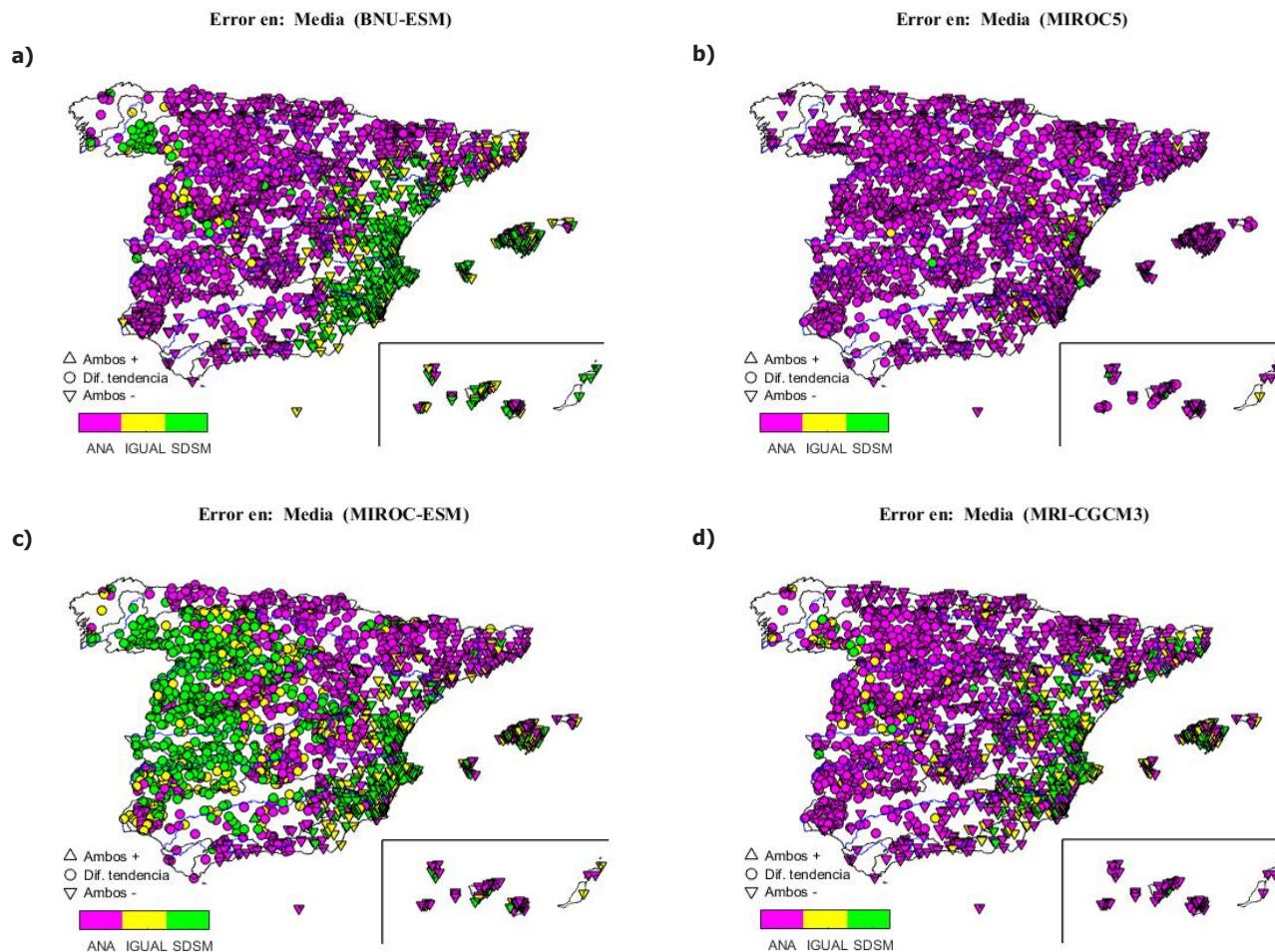


Figura 10 | Comparación entre métodos de regionalización y tendencia de los modelos en el estadístico Media (series completas de datos).

En la Figura 11 se reúnen los mapas del estadístico CV para los modelos establecidos (dispersión de las precipitaciones diarias de las series completas). En este caso el método que menor error tiene es el SDSM, 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 aprecia dos comportamientos diferentes, el de los mapas a y b (que incluyen a los modelos BNU-ESM, MIROC5 y por lo tanto también al modelo INMCM4) y el de los mapas c y d (que incluye los modelos MIROC-ESM y MRI-CGCM3 y por lo tanto también a los modelos MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR). Para los mapas a y b se aprecia como 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 los mapas a y b el método SDSM es mejor mientras que en los mapas c y d es el método ANA el que tiene un error menor.

Si se estudia la forma de las estaciones, se vuelve a tener 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 tendencias), en los mapas c y d la mayor parte de las estaciones tiene forma de pirámide invertida, lo cual indica que ambos métodos tienden a subestimar el coeficiente de variación.

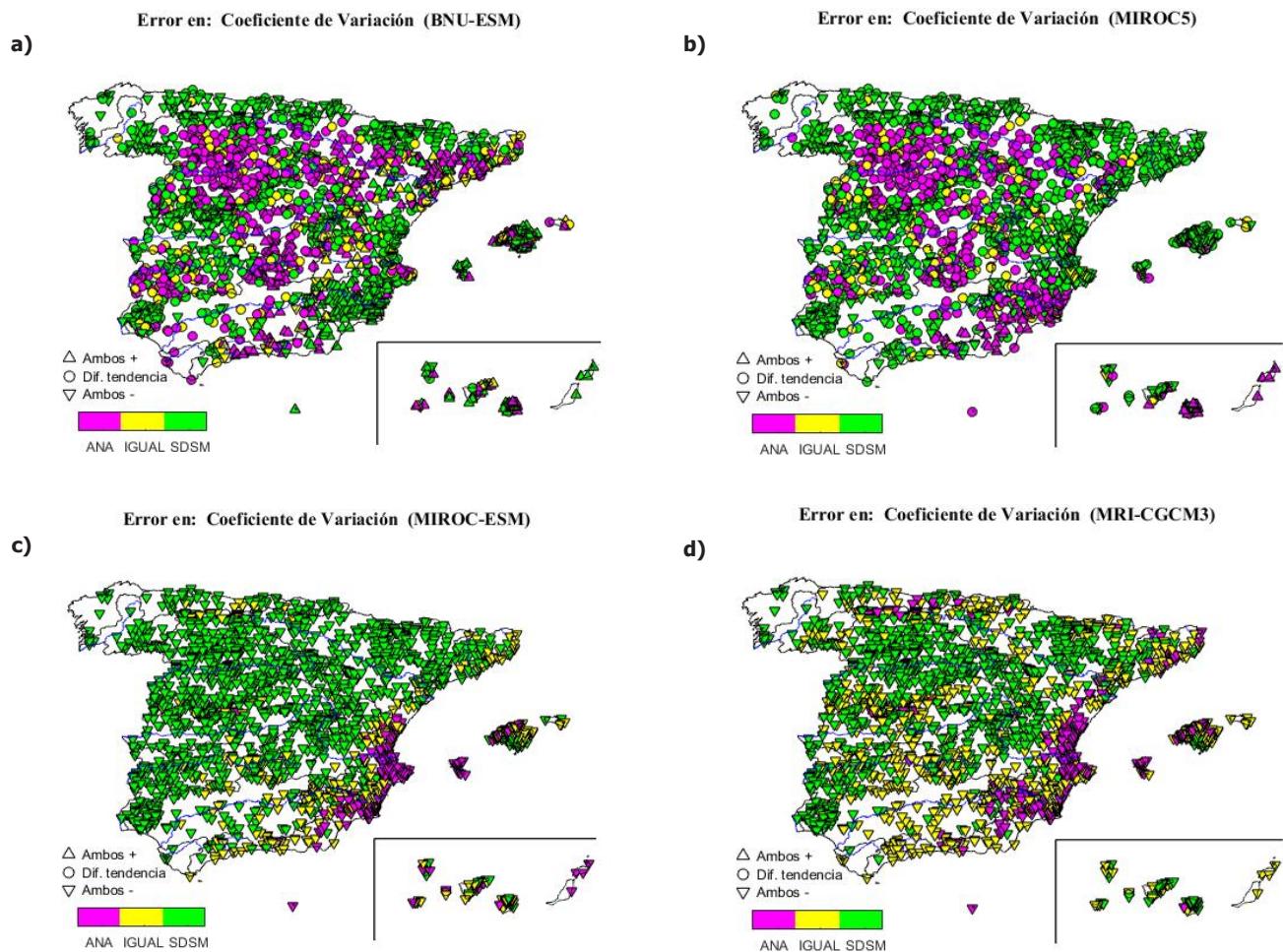


Figura 11 | Comparación entre métodos de regionalización y tendencia de los modelos en el estadístico CV (series completas de datos).

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 (sólo para los modelos BNU-ESM y MIROC5 y por lo tanto el modelo INMCM4). Si se estudia la forma, se puede observar como la mayoría de las estaciones tienen una tendencia negativa, tal y como se puede comprobar en la Figura 5. Es decir, la extremalidad climática 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.

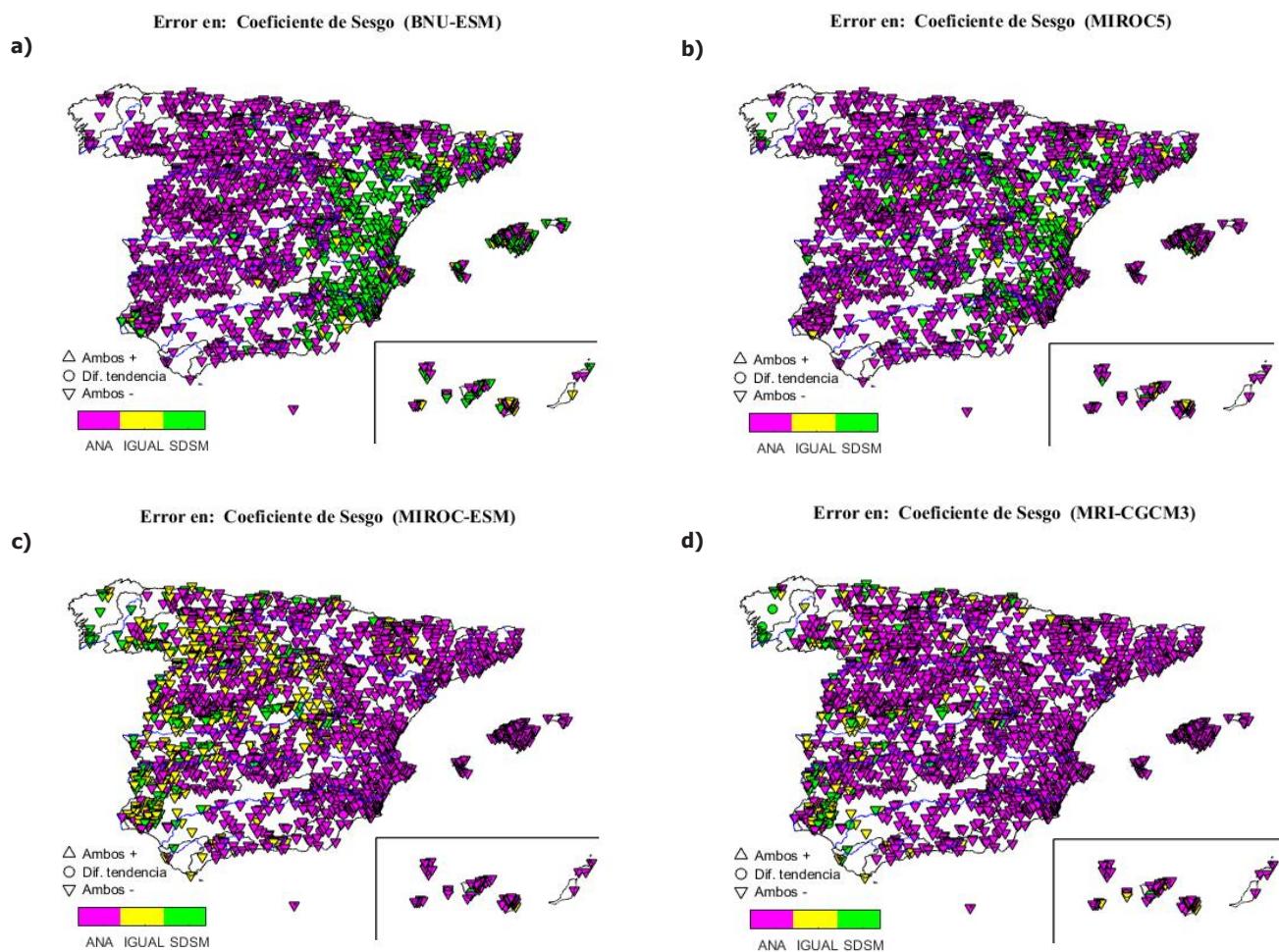


Figura 12 | Comparación entre métodos de regionalización y tendencia de los modelos en el estadístico CS (series completas de datos).

Resultados en el caso de estudio

Una vez evaluado el comportamiento de los modelos con cada método de regionalización en toda España, se ha decidido utilizar los datos de una serie de estaciones como entrada para el modelo hidrológico HBV previamente calibrado en la cuenca del río Argos. Las simulaciones se han realizado para el periodo 1962-2000, utilizando el año 1961 como calentamiento del modelo HBV. Una vez obtenidos los caudales de salida, se han calculado las leyes de frecuencia correspondientes a los caudales simulados en la desembocadura de la cuenca de estudio de cada modelo. También se ha simulado el modelo hidrológico pero con datos de precipitación y temperatura observados en la cuenca. La Figura 13 muestra la comparación entre la ley de frecuencia de la simulación con datos observados (línea azul gruesa) con las leyes de frecuencia de las simulaciones con los datos de los modelos.

Se puede observar como las leyes de frecuencia para todos los modelos y para ambos métodos de regionalización se encuentran por debajo de la ley de frecuencia con datos observados. El descenso es más acusado con el método SDSM (Fig. 13.b). En el caso del método ANA, algunos modelos se acercan a la ley de frecuencia con datos observados para percentiles bajos (bajos de periodo de retorno), sin embargo este parecido queda descartado para períodos de retorno altos. Esto indica que la subestimación de los valores de precipitaciones máximas anuales se traduce en una subestimación de los cuantiles de caudales máximos anuales.

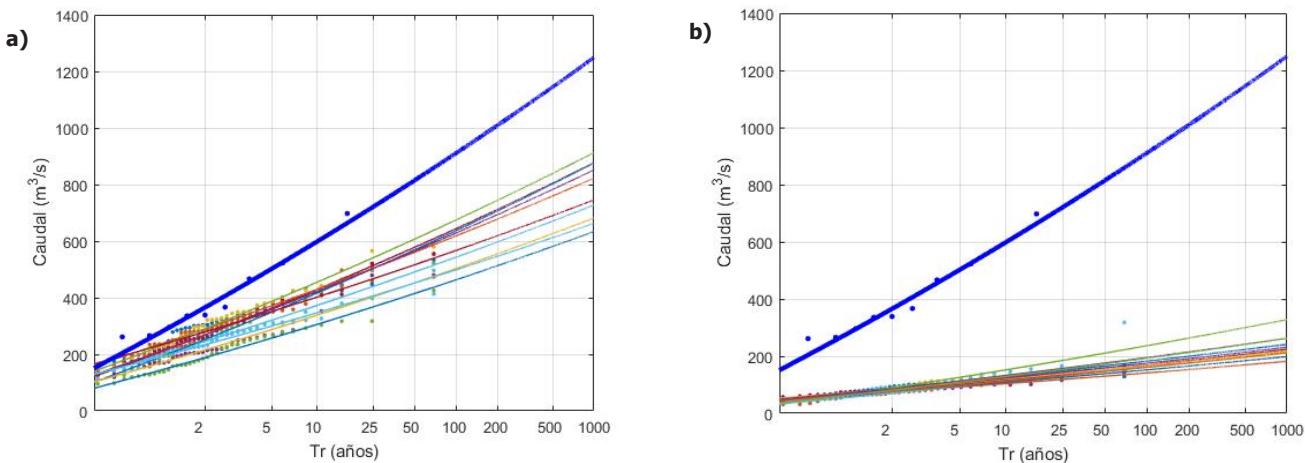


Figura 13 | Leyes de frecuencia de caudales para las simulaciones con datos observados (línea azul) y con datos de los modelos climáticos del modelo hidrológico. La gráfica a es para los modelos con el método ANA. La gráfica b es para los modelos con el método SDSM.

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 downscaling estadístico: el método de los análogos, y el método de regionalización estadística (SDSM, en sus siglas en inglés). El análisis se ha enfocado en el periodo de control (1961-2000) comparando los resultados de los modelos con los datos observados mediante una serie de estadísticos. Además, se han utilizado las variables climáticas regionalizadas como entrada de un modelo hidrológico en una cuenca seleccionada con el fin de comparar los caudales simulados.

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 (precipitación máxima anual), empeorándose estos 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, subestimando la variabilidad natural del clima. Respecto al coeficiente de sesgo, tanto para la serie completa como para la serie de máximos, 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.

Es interesante resaltar el buen comportamiento que tiene el método SDSM al corregir los días sin precipitación ya que no tiene casi error. 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) da más días con lluvia (normalmente baja) de lo que debería.

Respecto a las simulaciones hidrológicas, los resultados muestran una subestimación de las leyes de frecuencia para todos los modelos regionalizados. El método de los análogos consigue unos mejores resultados para las leyes de frecuencia de caudales. Esto concuerda con los resultados obtenidos en las comparaciones anteriores de los estadísticos.

Así pues, 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 transformando la media de los valores máximos anuales. Por todo ello, se concluye que antes de realizar cualquier estudio de impacto con estos datos es necesario

realizar una corrección del sesgo adecuada a la zona de estudio, en especial si se van a estudiar regímenes extremos, ya que los métodos de regionalización no se ajustan adecuadamente a los datos extremos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación del proyecto CGL2014-52570 ‘Impacto del cambio climático en la ley de frecuencia bivariada de avenidas’ del Ministerio de Economía y Competitividad Español.

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

- AEMET, 2014, Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR4, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, NIPO: 281-14-002-7, Madrid, España.
- Álvarez, A.J., Mediero, L., García, C., 2014. Review and selection of statistical models to fit maximum annual peak flows distribution function in Spain. *Ingeniería Civil*, N° 174, 2014, pags. 5-31.
- Bergström, S., 1992. The HBV model - its structure and applications. *SHMI Reports RH*, No 4, Norrköping.
- 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 J. Eur. Union*, L 288, 27-34.
- 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 Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.). IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.
- Jacob, D., et al., 2013. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14, 563-578. DOI: 10.1007/s10113-013-0499-2.
- Kundzewicz, Z.W. et al., 2017. Differences in flood hazard projections in Europe – their causes and consequences for decision making, *Hydrological Sciences Journal*, 62:1, 1-14, DOI: 10.1080/02626667.2016.1241398
- Quintana Segui, P., Ribes, A., Martín, E., Habets, F., and 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 (2010), 111-124.
- Seibert, J. and Vis, M., 2012. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3315–3325.
- 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*, 456-457 (2012), 12-29.
- 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.
- Themeßl, M.J., Gobiet, A., Leuprecht, A., 2011. Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *Int. J. Climatol.* 31:1530-1544. DOI: 10.1002/joc.2168.