

Análisis hidrológico de los escenarios de cambio climático en España

Hydrologic analysis of climate change scenarios in Spain

Dunia González-Zeas¹, Luis Garrote², Ana Iglesias²

Recibido: Mayo 2013

Aprobado: Agosto 2013

Resumen.- Para evaluar el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos es importante conocer si las simulaciones de los modelos climáticos son representativas de las características hidrológicas observadas y determinar cómo son las variaciones de las distintas variables hidrometeorológicas bajo escenarios de cambio climático. El presente estudio analiza el comportamiento de las principales variables que intervienen en el ciclo hidrológico: precipitación, temperatura, evaporación y escorrentía, en situación actual o escenario de control (1961-1990) y en escenario de cambio climático A2 (2071-2100) según distintas proyecciones climáticas del proyecto europeo PRUDENCE. El análisis se realiza en el ámbito de las cuencas que cubren la totalidad del territorio de la España peninsular. Los resultados destacan un sesgo negativo en la escorrentía simulada por los modelos climáticos con respecto a los valores observados estimados por el modelo hidrológico SIMPA. Las proyecciones climáticas muestran un incremento en los valores medios de temperatura y una disminución en la precipitación, evaporación y escorrentía y, se proyecta además un incremento en el coeficiente de variación. Las variables temperatura y precipitación presentan resultados más homogéneos y similares. La variable evaporación presenta cierta heterogeneidad y la variable escorrentía muestra una mayor dispersión en los resultados.

Palabras clave: cambio climático; modelos climáticos; análisis hidrológico, variables climáticas

Summary.- In order to evaluate the impact of climate change in water resources it is important to know whether the simulations of climate models are representative of the observed hydrologic characteristics, as well as determine how are the variations of the different hydrometeorological variables under climate change scenarios. This study analyzes the behavior of the main variables involved in the hydrological cycle: precipitation, temperature, evaporation and runoff, in current situation or control scenario (1961-1990) and climate change scenario A2 (2071-2100) under different climate projections from the PRUDENCE European project. The analysis is performed in the basins that cover the whole territory of mainland Spain. The results highlight a negative bias in the runoff simulated by climate models with respect to the observed values estimated by the hydrological model SIMPA. The climate projections show an increase in mean temperature and a decrease in precipitation, evaporation and runoff and also projecting an increase in the coefficient of variation. Temperature and precipitation variables show more similar and homogeneous results, variable evaporation shows some heterogeneity and the variable runoff shows greater dispersion in the results.

Keywords: climate change; climate models; hydrological analysis; climatic variables

1. Introducción.- El cambio climático global y sus impactos sobre los recursos hídricos constituyen una de las principales preocupaciones al momento de cuantificar los recursos disponibles en escenarios futuros para orientar la toma de decisiones [1-2]. Los registros de las observaciones y las proyecciones climáticas aportan abundante evidencia acerca de la

¹Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética, Universidad Politécnica de Madrid, duniapg@ yahoo.com.mx, l.garrote@upm.es

²Departamento de Economía Agraria y Ciencias Sociales, Universidad Politécnica de Madrid, ana.iglesias@upm.es

vulnerabilidad de los recursos de agua al cambio climático, con diversas consecuencias para las sociedades humanas y los ecosistemas [3].

El empleo de modelos de clima constituye una herramienta importante para abordar estudios relativos a la gestión del agua bajo escenarios de cambio climático [4]. Dadas las características de las aplicaciones hidrológicas, la resolución espacial de los modelos de clima juega un papel significativo en la determinación del impacto sobre los sistemas hidrológicos, por lo que, en los últimos años el uso de modelos climáticos regionales (MCR) han permitido mejorar el detalle espacial de las proyecciones de cambio climático obtenidas por los modelos climáticos globales [5].

Los MCR proporcionan valores de las principales variables climáticas relacionadas con el ciclo hidrológico en escenario de control o situación actual y bajo escenarios de cambio climático, bajo diferentes escenarios de emisiones, establecidas en base a diferentes hipótesis de evolución global: crecimiento poblacional, desarrollo social, desarrollo económico y cambio tecnológico [6]. Sin embargo, los científicos son conscientes de la incertidumbre asociada a la modelación del sistema climático y de la necesidad de cuantificar la fiabilidad de las simulaciones de los modelos [7]. Una de las principales fuentes de incertidumbre proviene de la incapacidad de los MCR para simular con exactitud las condiciones de clima actual [8].

A pesar de las incertidumbres ligadas al proceso de generación de las proyecciones climáticas y las deficiencias en la resolución espacial de los modelos climáticos, dadas por su baja capacidad para reproducir detalles orográficos y costeros cuando se trabaja a escala de cuenca hidrográfica [9], los científicos confían cada vez más en la capacidad de los modelos climáticos para pronosticar el clima del futuro, si se considera la velocidad con la que avanza el desarrollo tecnológico en la actualidad.

En este trabajo se presenta un análisis del comportamiento de las proyecciones de las principales variables climáticas que intervienen en el ciclo hidrológico, realizadas por 10 simulaciones del proyecto europeo PRUDENCE, bajo escenario de control y escenario de cambio climático. El estudio se realiza en las cuencas que cubren la totalidad del territorio español, de acuerdo a la planificación hidrológica de España, con los objetivos de: (1) conocer si las proyecciones son representativas del comportamiento hidrológico observado y (2) cuantificar las variaciones de las variables climáticas como consecuencia del cambio climático.

2. Datos

2.1. Área de estudio.- El área en estudio es el territorio continental de España, que tiene un área de 504782 km². Se han considerado 338 sub-cuencas definidas a partir de los puntos de la red fluvial que son relevantes para la gestión de recursos hídricos. La Figura I muestra las 338 cuencas elementales. Las cuencas sobre las que se ha realizado el estudio se obtienen por acumulación de todas las cuencas situadas aguas arriba del punto considerado, mediante la definición de la topología de la red hidrográfica y de acuerdo a la planificación hidrológica de España.

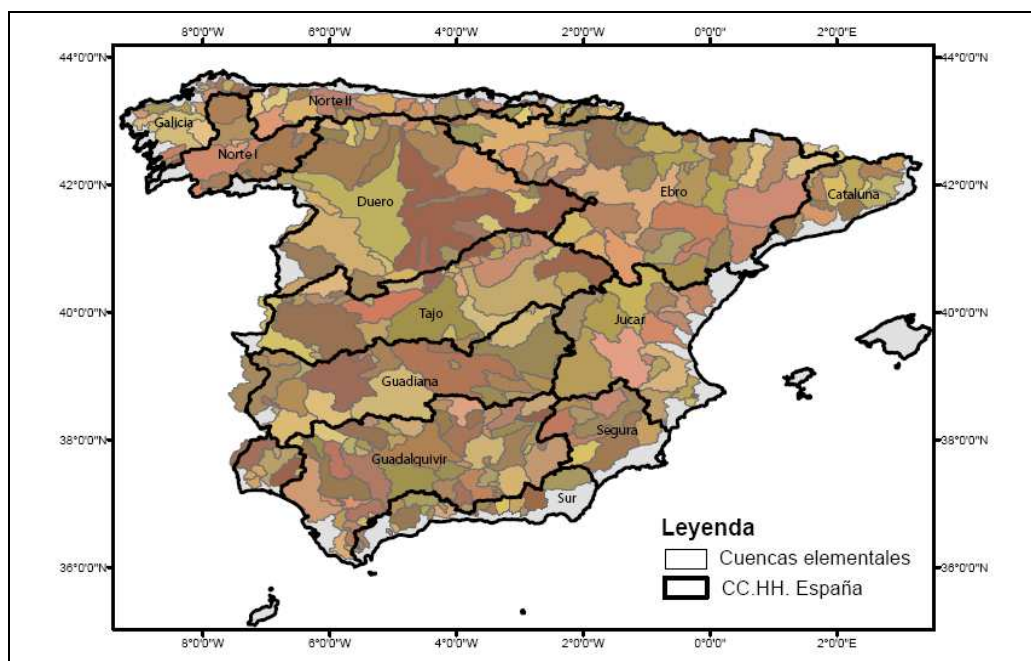


Figura I.- Cuenca elementales de estudio y cuencas acumuladas (cuencas hidrográficas de la planificación hidrológica en España)

2.2. Datos observados.- El régimen hidrológico en la mayor parte de los ríos españoles está fuertemente alterado por las detracciones de agua y la regulación. Por este motivo, los datos medidos en las estaciones de aforo no son directamente utilizables para comparar la escurrimiento en régimen natural. En España se dispone de las series de aportaciones mensuales en régimen natural estimadas por el modelo hidrológico distribuido denominado Sistema Integrado de Modelización Precipitación Aportación (SIMPA) [10], que son representativas del comportamiento hidrológico español. El modelo SIMPA ha sido calibrado en más de 100 puntos de control en España, usando estaciones de aforo donde los caudales han sido medidos en régimen natural. El modelo muestra un buen ajuste en todos los puntos de control y sus resultados están disponibles en el Libro Blanco del Agua en España [11].

Para comparación con los resultados de los modelos climáticos en situación actual, se han tomado las series de escurrimiento mensual para el periodo 1961-1990 generadas por el modelo SIMPA (denominados en este estudio datos observados) en cada una de las 338 cuencas elementales de estudio.

2.3. Modelos regionales de clima.- Se ha utilizado 10 simulaciones del proyecto Europeo PRUDENCE [5], que proporciona información de alta resolución (celdas de aproximadamente 50 km de lado) de las variables climáticas simuladas por 8 modelos regionales de clima anidados en el modelo global HadAM3H, (Tabla I).

Se utiliza la información de las variables hidrometeorológicas de importancia dentro del ciclo hidrológico: temperatura, precipitación, evaporación y escurrimiento, simuladas para el periodo 1961- 1990 o escenario de control y para el periodo 2071-2100 o escenario de cambio climático bajo el escenario de emisiones A2 [12].

Modelo Climático Global	*Centro o Instituto	Modelo Climático Regional	Simulaciones	
			Escenario CTL (1961 - 1990)	Escenario A2 (2071 - 2100)
HadAM3H	DMI	HIRHAM	HC1	HS1
	DMI2	HIRHAM	HC2	HS2
	DMI3	HIRHAM	HC3	HS3
	ETH	CHRM	HC_CTL	HC_A2
	GKSS	CLM	CTL	SA2
	ICTP	RegCM	ref	A2
	KNMI	RACMO	HC1	HA2
	MPI	REMO	3003	3006
	SMHI	RCAO	HCCTL	HCA2
	UCM	PROMES	control	a2

Tabla I.- Simulaciones de los modelos climáticos regionales utilizados en el estudio, generados por el proyecto europeo PRUDENCE [5]

*DMI: Instituto Meteorológico de Dinamarca; ETH: Escuela Superior Politécnica de Zurich; GKSS: Instituto de Investigaciones Costeras; ICTP: Centro Internacional de Física Teórica; KNMI: El Real Instituto Meteorológico de Holanda; MPI: Instituto Max Planck; SMHI: Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia; UCM: Universidad Complutense de Madrid.

3. Metodología.- El proceso metodológico empleado compara las series de escorrentía observadas con las simuladas por los modelos climáticos regionales (MCR) en escenario de control, para establecer si las simulaciones son representativas del comportamiento hidrológico observado. Se cuantifican las variaciones que experimentan las variables temperatura, precipitación, evaporación y escorrentía bajo el escenario de cambio climático con respecto al escenario de control, para conocer como se modifican las características de las variables climáticas como consecuencia del cambio climático. Este análisis se efectúa en los diferentes ámbitos de la planificación hidrológica de España. El procedimiento se resume en la Figura II e incluye los siguientes pasos: (1) generación de las series temporales de la variables climáticas, determinando sus estadísticos más representativos (media y coeficiente de variación (Cv)), (2) contraste de las series de escorrentía simuladas con las observadas y (3) contraste entre escenario de control y escenario de cambio climático.

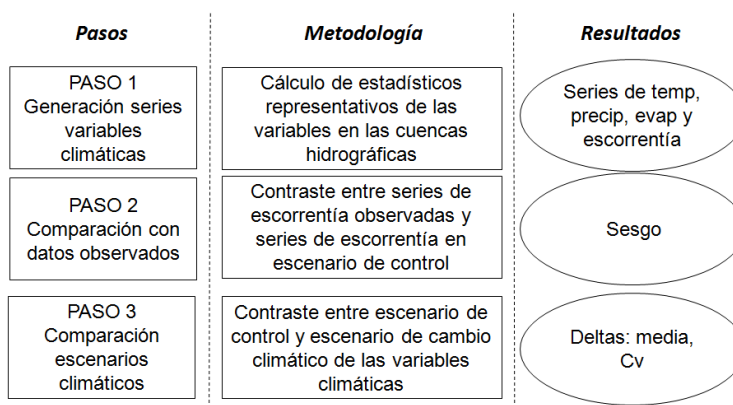


Figura II.- Esquema de la metodología de análisis

3.1. Generación de series temporales de las variables climáticas.- A partir de las salidas de las simulaciones de los MCR (datos diarios en cada una de las celdas del área de estudio 20 x 30 para el ámbito español), se generan series temporales mensuales, estacionales y anuales considerando años hidrológicos completos para el periodo de control (1961-1990) y para el periodo de cambio climático (2071-2100) bajo el escenario de emisiones A2. En total se obtienen 348 meses de datos que equivalen a los 29 años hidrológicos de estudio. Con esta información se calculan los estadísticos básicos (media y coeficiente de variación) en cada una de las celdas del ámbito de estudio de todas las variables climáticas (precipitación, temperatura, evaporación y escorrentía).

La media de las series de datos se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

Donde x_i representa los datos mensuales, anuales o estacionales en cada una de las celdas, n es el número total de datos y μ es la media.

La variabilidad de las series se ha estudiado mediante el cálculo coeficiente de variación:

$$Cv = \frac{s}{\mu}, \quad (2)$$

Donde s es la desviación típica y μ es la media de los datos. La desviación típica está dada por la siguiente expresión:

$$s = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \right)^{1/2}, \quad (3)$$

3.2. Contraste con los valores observados.- La escorrentía media anual observada y la simulada se compara empleando como medida cuantitativa el sesgo. Este nos proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable y nos cuantifica el error sistemático del modelo [13]. La medida del sesgo se ha determinado a partir del error medio, normalizado por la media de los valores observados para el conjunto de las cuencas acumuladas, y se expresa como sigue:

$$Sesgo = \frac{\bar{S} - \bar{O}}{\bar{O}}, \quad (4)$$

Donde $\bar{S}$ y $\bar{O}$ representan la escorrentía media simulada y observada del conjunto de las cuencas estudiadas.

3.3. Cambios en los estadísticos representativos bajo proyecciones de cambio climático.- Están dados por la variación de la media y el coeficiente de variación en escenario de cambio climático con respecto al escenario de control, expresados en tanto por uno. La variación de los estadísticos se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta = \frac{CC - CTL}{CTL}, \quad (5)$$

Donde Δ es la variación en la variable climática (diferencia entre el escenario de cambio climático y el escenario de control, expresada en tanto por uno), CC es el valor del estadístico en cambio climático y CTL es el valor del estadístico en escenario de control.

4. Resultados

4.1. Análisis de la situación actual.- En la Figura III se muestra el contraste entre la escorrentía media anual simulada y la observada. Esta comparación permite evaluar la robustez de las simulaciones de los MCR para representar el comportamiento de la serie anual en escenario de control (periodo 1961 - 1990) en el territorio continental de España. Se observa que las simulaciones de los MCR tienden a subestimar los valores de escorrentía y por tanto, no son representativas de los datos reales. Los resultados varían de un MCR a otro, destacándose un amplio rango de incertidumbre en sus resultados. De todos los MCR, el modelo GKSS se acerca más a los valores observados, por el contrario el modelo ETH, muestra los resultados más desfavorables.

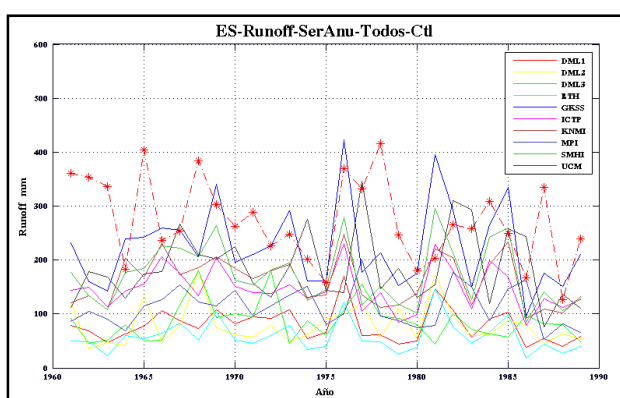


Figura III.- Escorrentía media anual en España estimada por el SIMPA (línea punteada en rojo) y escorrentía media anual simulada por los MCR (periodo 1961-1990)

La Figura IV muestra el comportamiento medio mensual de las simulaciones de los MCR con respecto a los valores observados para la totalidad del territorio español. Los modelos GKSS, SMHI y UCM presentan una menor desviación con respecto a la escorrentía media mensual observada. El resto de modelos destacan una mayor desviación o sesgo, el cual tiene que ser corregido, previo a la utilización de las salidas de las simulaciones de los MCR en escenario de control. Sin embargo, es importante recalcar que las simulaciones demuestran una tendencia a representar adecuadamente los ciclos estacionales observados. El modelo GKSS es el que mejor representa los ciclos estacionales observados para la España continental.

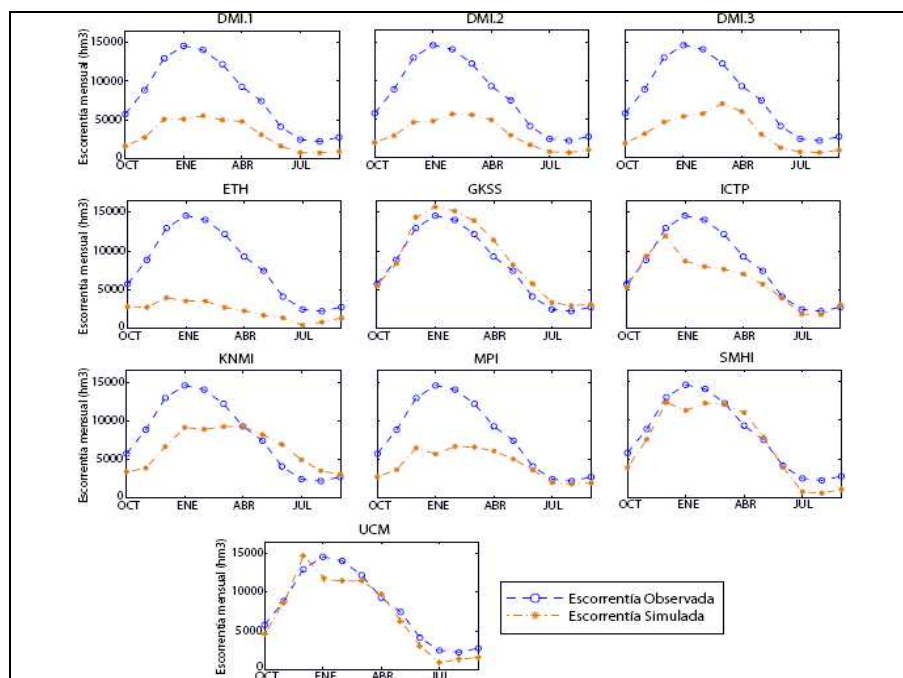


Figura IV.- Escorrentía media mensual estimada por el SIMPA y escorrentía media mensual simulada por los MCR del PRUDENCE, en España

En la Tabla II se presenta el sesgo obtenido del contraste entre la escorrentía media anual simulada por los MCR y los datos observados, para las diferentes cuencas hidrográficas de la planificación hidrológica de España. Se destacan resultados variables entre las diferentes simulaciones de los MCR. El comportamiento general muestra una desviación negativa con respecto a los valores observados, no obstante se destaca que los modelos ICTP, KNMI, SMHI y UCM, proyectan una desviación positiva en determinadas cuencas hidrográficas. Para el promedio de las 10 simulaciones de los MCR, la cuenca hidrográfica del Guadalquivir presenta el mayor sesgo con un valor negativo del 67% y el menor sesgo se obtiene en las cuencas internas de Cataluña, en la cuenca del Ebro y la cuenca del Duero, con valores negativos del 4%, 9% y 10% respectivamente.

En lo que respecta al territorio continental de España, se obtiene un sesgo negativo del 36% para el promedio de las 10 simulaciones de los MCR. Los modelos GKSS y UCM, muestran las menores desviaciones con valores del 11% y -11% respectivamente.

CC.HH.	Desviación con respecto a los valores observados (tanto por uno)										
	DMI1	DMI2	DMI3	ETH	GKSS	ICTP	KNMI	MPI	SMHI	UCM	Media
Norte I	-0.64	-0.64	-0.61	-0.75	0.11	-0.39	0.08	-0.48	0.03	-0.08	-0.34
Norte II	-0.69	-0.66	-0.63	-0.94	-0.44	-0.17	-0.20	-0.44	-0.34	-0.42	-0.49
Norte III	-0.86	-0.85	-0.84	-0.91	-0.26	-0.18	-0.84	-0.58	-0.74	-0.46	-0.65
Galicia Costa	-0.63	-0.62	-0.59	-0.74	0.03	-0.46	-0.38	-0.42	-0.41	-0.23	-0.45
Duero	-0.50	-0.50	-0.45	-0.63	0.50	0.02	0.15	-0.36	0.41	0.33	-0.10
Tajo	-0.65	-0.66	-0.62	-0.72	0.20	-0.42	-0.82	-0.60	-0.47	-0.32	-0.51
Guadiana	-0.77	-0.81	-0.73	-0.78	0.29	-0.26	-0.98	-0.70	-0.53	-0.74	-0.60
Guadalquivir	-0.78	-0.79	-0.74	-0.73	-0.20	-0.50	-0.84	-0.72	-0.64	-0.76	-0.67
Segura	-0.36	-0.39	-0.34	-0.66	0.21	0.09	-0.91	-0.22	-0.18	-0.22	-0.30
Júcar	-0.39	-0.37	-0.35	-0.53	0.39	0.02	-0.23	-0.29	0.26	0.29	-0.12
Ebro	-0.47	-0.44	-0.43	-0.59	0.25	-0.09	0.46	-0.27	0.26	0.39	-0.09
Cataluña	-0.75	-0.69	-0.73	-0.58	0.83	-0.16	0.59	-0.36	0.48	0.91	-0.04
Sur	-0.64	-0.67	-0.60	-0.78	-0.44	-0.07	-0.58	-0.59	-0.65	-0.68	-0.57
España	-0.62	-0.61	-0.58	-0.72	0.11	-0.24	-0.20	-0.46	-0.13	-0.11	-0.36

Tabla II.- Sesgo de la escorrentía media anual simulada por los MCR con respecto a los valores observados en los diferentes ámbitos de planificación hidrológica de España.

La Figura V presenta los resultados obtenidos del contraste entre los estadísticos representativos de las series de escorrentía en escenario de control con los estadísticos de las series observadas en las diferentes cuencas hidrográficas de España.

Las Figuras V (a y b) muestran el comportamiento de la media y el coeficiente de variación anual respectivamente, en las diferentes cuencas hidrográficas de España. La escorrentía media anual simulada por los MCR muestra desviaciones con respecto a los datos observados en todas las cuencas hidrográficas de España. Los valores medios de cada una de ellas tienden a estar alineados sobre una recta, y por tanto se deduce la existencia de un error sistemático o sesgo en sus resultados, tal como se muestra en la Tabla II. De igual manera, se destaca que los MCR no representan adecuadamente la variabilidad de las series observadas, observándose discrepancias en el coeficiente de variación anual en la mayoría de las cuencas hidrográficas de España.

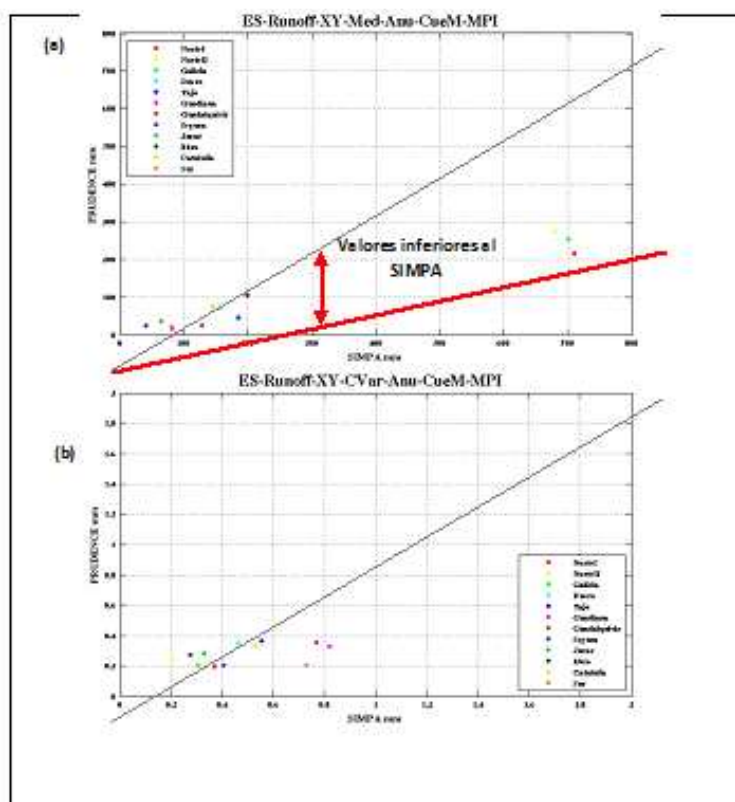


Figura V.- Contraste entre datos observados (SIMPA) y simulados (PRUDENCE) en las diferentes cuencas hidrográficas de la planificación hidrológica de España: (a) escorrentía media anual y (b) coeficiente de variación anual

4.2. Análisis del escenario de cambio climático.- La medida en la que el cambio climático afecta los recursos hídricos, se evalúa a través de los cambios observados en las diferentes variables. Así, el contraste entre los resultados de las variables simuladas por los MCR en escenario de control con los resultados simulados en escenario de cambio climático nos proporciona una idea de la magnitud de los posibles impactos.

La Figura VI muestra el contraste entre el escenario de control (CTL) y el escenario de cambio climático (A2) de los valores medios anuales de las variables temperatura, precipitación, evaporación y escorrentía obtenida por las 10 simulaciones de los MCR en la España continental y la Figura VII muestra el contraste entre el coeficiente de variación anual en el escenario de control (CTL) y el escenario de cambio climático (A2). De los resultados obtenidos se deduce un incremento medio de aproximadamente unos 4°C en la temperatura, una disminución en torno al 24% de la precipitación, una disminución del 16% en la evaporación y una reducción media del 37% en la escorrentía. El modelo ICTP presenta un comportamiento singular, puesto que proyecta un incremento en la escorrentía media anual de España. En cuanto a la variabilidad, se destaca un incremento en el coeficiente de variación del 14% en la temperatura, del 22% en la precipitación, del 36% en la evaporación y del 24% en la escorrentía. En general, los valores medios de temperatura proyectados por los diferentes MCR muestran una menor dispersión en sus resultados que los obtenidos con la variable precipitación. La variable evaporación muestra una mayor heterogeneidad en sus resultados y la variable escorrentía muestra los resultados más desfavorables, destacándose una mayor dispersión en las proyecciones.

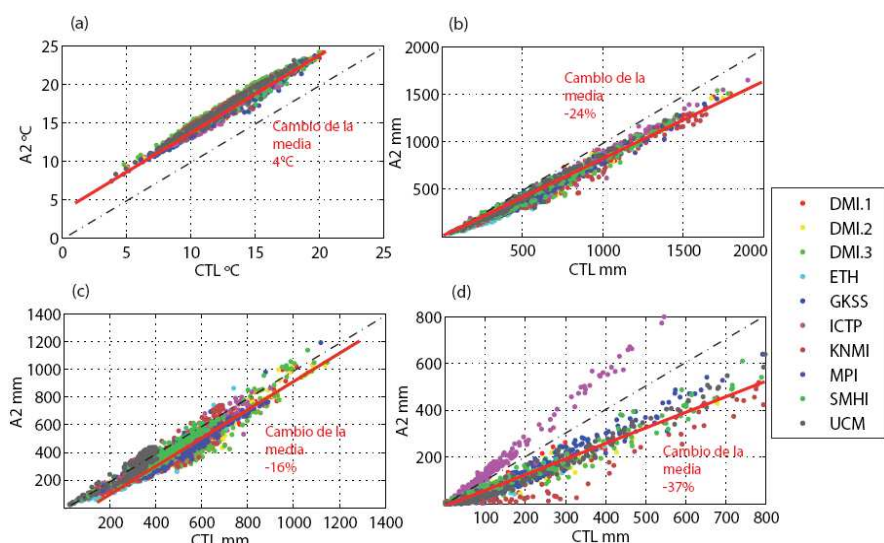


Figura VI.- Contraste escenario de control versus escenario de cambio climático de los valores medios de las variables: (a) temperatura, (b) precipitación, (c) evaporación y (d) escorrentía para las diferentes cuencas hidrográficas de España

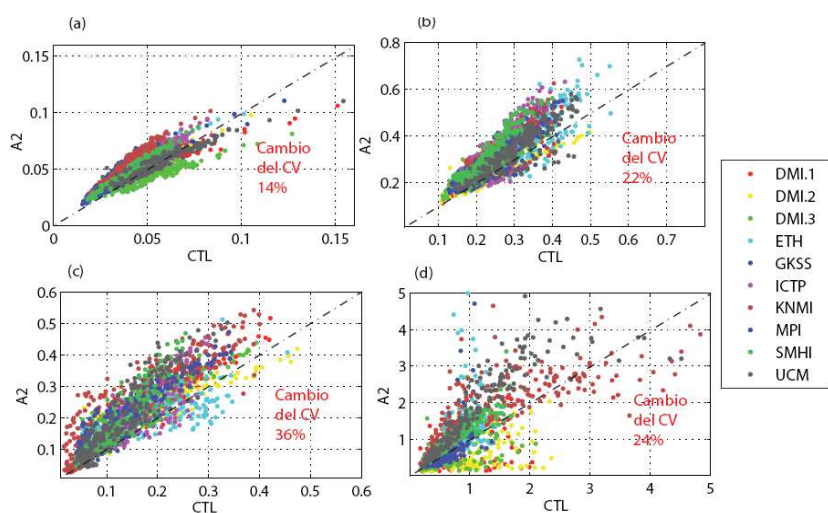


Figura VII.- Contraste escenario de control versus escenario de cambio climático del coeficiente de variación de las variables: (a) temperatura, (b) precipitación, (c) evaporación y (d) escorrentía para las diferentes cuencas hidrográficas de España

En la Tabla III se ilustran las variaciones de la escorrentía media anual en escenario de cambio climático con respecto al escenario de control, expresada en tanto por uno. Los resultados se presentan para todos los MCR y todas las cuencas hidrográficas de la planificación hidrológica de España. En general, los modelos coinciden en que el cambio climático generará disminuciones de la escorrentía en las diferentes cuencas hidrográficas de España, con excepción del modelo ICTP que proyecta cambios positivos. El efecto del cambio climático es más acusado en las

cuencas hidrográficas del Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Sur y Júcar, con disminuciones que varían entre el 42% y el 56% para el promedio de todos los MCR. Para el caso de la totalidad del territorio español se proyecta una disminución de la escorrentía del 37%.

Cuenca Hidrográfica	Delta media										Media
	DMI1	DMI2	DMI3	ETH	GKSS	ICTP	KNMI	MPI	SMHI	UCM	
Norte I	-0,42	-0,47	-0,45	-0,38	-0,19	0,43	-0,38	-0,30	-0,23	-0,26	-0,27
Norte II	-0,34	-0,37	-0,43	-0,43	-0,23	0,41	-0,46	-0,36	-0,37	-0,40	-0,30
Norte III	-0,34	-0,37	-0,43	-0,43	-0,23	0,41	-0,46	-0,36	-0,37	-0,40	-0,30
Galicia Costa	-0,42	-0,47	-0,44	-0,37	-0,19	0,43	-0,37	-0,27	-0,21	-0,24	-0,26
Duero	-0,43	-0,49	-0,50	-0,37	-0,25	0,35	-0,60	-0,50	-0,36	-0,38	-0,35
Tajo	-0,53	-0,57	-0,61	-0,44	-0,44	0,19	-0,86	-0,43	-0,43	-0,55	-0,47
Guadiana	-0,58	-0,57	-0,66	-0,66	-0,58	0,03	0,46	-0,40	-0,55	-0,73	-0,42
Guadalquivir	-0,50	-0,47	-0,59	-0,61	-0,69	-0,08	-0,79	-0,43	-0,65	-0,81	-0,56
Sur	-0,50	-0,47	-0,59	-0,61	-0,69	-0,08	-0,79	-0,43	-0,65	-0,81	-0,56
Segura	-0,47	-0,53	-0,58	-0,26	-0,67	0,27	0,84	-0,43	-0,70	-0,86	-0,34
Júcar	-0,45	-0,52	-0,60	-0,31	-0,61	0,26	-0,84	-0,46	-0,49	-0,64	-0,47
Ebro	-0,28	-0,35	-0,39	-0,45	-0,31	0,28	-0,46	-0,42	-0,33	-0,36	-0,31
Cataluña	-0,23	-0,36	-0,34	-0,33	-0,25	0,35	-0,47	-0,36	-0,23	-0,35	-0,26
España	-0,42	-0,46	-0,51	-0,43	-0,41	0,25	-0,40	-0,40	-0,43	-0,52	-0,37

Tabla III.- Variación (diferencia entre el escenario A2 y el escenario de control, en tanto por uno) del valor medio de las series de escorrentía media anual en las cuencas hidrográficas de España para las 10 proyecciones de cambio climático del PRUDENCE

La Tabla IV muestra las variaciones en el coeficiente de variación anual en escenario de cambio climático con respecto al escenario de control, expresada en tanto por uno, para las 10 simulaciones de los MCR y en las cuencas hidrográficas que cubren la totalidad del territorio español.

En general, se observa que la mayoría de los MCR proyectan incrementos de la variabilidad de la escorrentía bajo escenarios de cambio climático, sin embargo, estos incrementos son variables y su intensidad varía según el reparto territorial. Para el promedio de los 10 MCR, todas las cuencas hidrográficas experimentan un incremento en la variabilidad de la escorrentía con excepción de la cuenca del Segura que muestra una disminución en la variabilidad del orden del 11%. El efecto del cambio climático en la variabilidad de la escorrentía es más acusado en las cuencas hidrográficas del Norte I, Norte II, Norte III y Galicia Costa, con incrementos que varían entre el 46% y el 58% para el promedio de todos los MCR. Para el caso del territorio continental de España, se proyecta un incremento en la variabilidad del orden del 24%.

Cuenca Hidrográfica	Delta coeficiente de variación										Media
	DMI1	DMI2	DMI3	ETH	GKSS	ICTP	KNMI	MPI	SMHI	UCM	
Norte I	0,64	0,79	0,77	0,40	0,45	0,65	0,77	0,43	0,55	0,35	0,58
Norte II	0,45	0,13	0,50	0,18	0,45	0,42	0,76	0,45	0,63	0,59	0,46
Norte III	0,45	0,13	0,50	0,18	0,45	0,42	0,76	0,45	0,63	0,59	0,46
Galicia Costa	0,60	0,00	0,74	0,36	0,54	0,64	0,70	0,40	0,49	0,38	0,49
Duero	0,48	-0,28	0,50	0,22	0,48	0,44	0,38	-0,12	0,59	0,56	0,33
Tajo	0,05	-0,43	-0,08	0,31	0,42	0,30	0,45	-0,14	0,55	0,64	0,21
Guadiana	-0,43	-0,59	-0,32	1,00	0,50	0,29	0,06	-0,14	0,45	0,47	0,13
Guadalquivir	-0,50	-0,61	-0,36	0,93	0,97	0,26	0,36	-0,14	0,40	0,53	0,18
Sur	-0,50	-0,61	-0,36	0,93	0,97	0,26	0,36	-0,14	0,40	0,53	0,18
Segura	-0,42	-0,59	-0,52	0,58	-1,00	0,04	-0,10	0,00	0,24	0,64	-0,11
Júcar	-0,22	-0,35	-0,22	0,92	-1,00	0,01	0,22	-0,09	0,21	0,58	0,01
Ebro	-0,11	-0,28	-0,02	0,58	0,19	0,02	0,38	0,06	0,31	0,72	0,19
Cataluña	-0,04	-0,26	-0,18	0,29	0,31	-0,04	0,04	-0,07	0,06	0,36	0,05
España	0,03	-0,23	0,07	0,53	0,29	0,29	0,40	0,07	0,42	0,53	0,24

Tabla IV.- Variación (diferencia entre el escenario A2 y el escenario de control, en tanto por uno) del coeficiente de variación de las series de escorrentía media anual en las cuencas hidrográficas de España para las 10 proyecciones de cambio climático del PRUDENCE

5. Conclusiones.- El análisis de las proyecciones de cambio climático en situación actual y futura permite determinar la robustez de las simulaciones de los MCR en la representación del comportamiento hidrológico observado y la determinación de las variaciones en las variables climáticas como consecuencia del cambio climático. Los MCR utilizan parametrizaciones que simplifican los procesos que ocurren en la atmósfera y realizan una modelación simplificada de los procesos de generación de escorrentía, lo que hace que los resultados de las simulaciones no reflejen el comportamiento observado, mostrando por tanto, un sesgo negativo en las simulaciones de escorrentía de los MCR, el cual se debería corregir previo a su utilización en estudios relativos a la disponibilidad de agua bajo escenarios de cambio climático. El análisis del comportamiento hidrológico en España en escenario de control destaca una desviación en la escorrentía media anual del orden del -36% y discrepancias en su variabilidad anual. A pesar de ello, los MCR representan bastante bien la estacionalidad observada.

El comportamiento general de las simulaciones de los MCR destaca una gran dispersión entre sus diferentes proyecciones, sin embargo, el comportamiento del promedio de los MCR anticipa un incremento en la temperatura y una reducción en las variables precipitación, evaporación y escorrentía en las diferentes cuencas españolas, siendo la variable escorrentía la que presenta una reducción sustancial, del orden del 37% para el caso de la España continental. De igual manera, las simulaciones de los MCR anticipan un incremento en la variabilidad de las variables climáticas, aunque con menor grado de uniformidad. El incremento en la variabilidad supone un aumento en la dispersión de los impactos entre las diferentes cuencas hidrográficas, considerando que la variabilidad difiere según el reparto territorial, lo que puede dar lugar a impactos importantes para los diferentes usos del agua. Las proyecciones de cambio climático con respecto al escenario de control se caracterizan por presentar resultados más homogéneos y similares para

el caso de la temperatura y precipitación, la variable evaporación se caracteriza por presentar cierta heterogeneidad y la variable escorrentía es la que mayor dispersión muestra entre los diferentes MCR.

Por tanto, el presente estudio concluye que las simulaciones de los MCR no pueden utilizarse directamente, ya que presentan sesgo significativo en sus estadísticos básicos. Los cambios más significativos y coincidentes entre los distintos modelos corresponden a la media anual, seguida del coeficiente de variación.

6. Agradecimientos.- Los autores agradecen el apoyo económico prestado al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo - CYTED a través del proyecto VIAGUA (410AC0399). Se han utilizado datos procedentes del proyecto PRUDENCE, financiado por la Unión Europea mediante el contrato EVK2-CT2001-00132.

7. Referencias

- [1] Arnell, N.W., *The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective*, Glob. Environ. Change, 1999. 9: p. 5-23.
- [2] Fujihara, Y., Tanaka, K., Watanabe, T., Nagano, T., y Kojiri, T., *Assessing the impacts of climate change of the Seyhan River Basin in Turkey: Use of dynamically downscaled data for hydrologic simulations*, J. of Hydrol., 2008. 353: p. 33-48.
- [3] IPCC, *El Cambio Climático y el Agua*. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2008, Ginebra, Suiza
- [4] Varis, O., Kajander, T. y Lemmelä, R., *Climate and water: from climate models to water resources management and vice versa*, Clim. Change, 2004. 66: p. 321-344.
- [5] Christensen, J.H., Carter, T.R., Rummukainen, M. y Amanatidis, G., *Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE Project*, Clim. Change, 2007. 81: p. 1-6.
- [6] Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S. y Palutikof, J.P. (eds.), *El Cambio Climático y el Agua. Documento Técnico VI del Panel Intergubernamental del Cambio Climático, Secretaría del IPCC*, 2008, Ginebra, 224 pp.
- [7] Beven, K., *Changing ideas in hydrology – the case of physically based models*, J.Hydrol., 1989. 105: p. 157-172.
- [8] Christensen, J.H., Boberg, F., Christensen, O.B. y Lucas-Picher, P., *On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation*, Geophys. Res. Lett., 2008. 35: p. L20 709, doi: 10.1029/2008GL035694.
- [9] Giorgi, F., Hostetler, S.W. y Brodeur, C.S., *Analysis of the surface runoff hydrology in a regional climate model*, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1994. 120: p. 161-183.
- [10] Estrela, T. y Quintas, L., *El sistema integrado de modelización precipitación aportación (SIMPA)*, Revista de Ingeniería Civil, 1996. 104: p. 43-52.
- [11] MARM, Ministerio de Medio Ambiente, *Libro Blanco del Agua en España*. Secretaría de Estado de Aguas y Costas, 2000, disponible en: <http://www.mma.es/rechid/libro/index.htm>
- [12] Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.H.; Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, R., Victor, N. y Dadi, Z., *IPCC Special Report on Emission Scenarios*, Cambridge Univ. Press, 2000, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [13] Janssen, P.H.M. and Heuberger, P.S.C., *Calibration of process-oriented models*, Ecol. Modell., 1995. 83: p. 55-66.