

EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS Y EN LAS DEMANDAS AGRARIAS DE LA CUENCA DEL RÍO JALÓN

B. Pisani¹, J. Samper¹ y M.A. García-Vera²

¹Grupo de Agua y Suelo, Escuela de Caminos, Universidade da Coruña, Campus Elviña s/n, 15071, La Coruña, España. e-mail: bpisani@udc.es, jsamper@udc.es

²Oficina de Planificación Hidrológica, Confederación Hidrográfica del Ebro, Paseo de Sagasta 24, 50071, Zaragoza, España. e-mail: mgarciave@chebro.es

RESUMEN. Se presentan los resultados de la evaluación de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del río Jalón en el periodo 2071-2100 para los escenarios de emisión A2 y B2 utilizando un modelo hidrológico semidistribuido. Se prevé que la temperatura media anual aumente entre 2 y 4 °C, la precipitación anual disminuya entre un 14% y un 18%, la recarga de los acuíferos disminuya entre un 60% y un 80% y las aportaciones totales disminuyan entre un 59% y un 77%. Se estima que las necesidades hídricas brutas podrían aumentar entre un 12% y un 16% y las necesidades netas entre un 25% y un 33%. Se prevé que la concentración de Cl⁻ del agua de escorrentía aumente en un factor comprendido entre 1.45 y 5. Estos resultados se deben tomar con cautela dadas las considerables incertidumbres de los datos de partida y de las predicciones de los modelos numéricos.

ABSTRACT. The impact of climate change on the water resources of the Jalón River basin has been evaluated for the period 2071-2100 for the A2 and B2 emission scenarios by using a semi-distributed water balance model. The results indicate that the mean annual temperature will rise from 2 to 4 °C while the mean annual precipitation will decrease from 14% to 18%. Groundwater recharge will decrease from the 60% and 80% while the total stream flow will decrease from 59% to 77%. The increase in crop water demand will range from 12% to 16% while the net crop water demand will increase from 25% to and 33%. The concentration of Cl⁻ in the runoff will increase by a factor from 1.45 to 5. These results must be taken with caution given the large uncertainties of the hydrologic data and the predictions of the numerical models.

1.- Introducción

La evaluación de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos y los usos de agua está siendo uno de los temas que más preocupación está generando en la sociedad en los últimos años. Para la estimación de estos efectos el *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático* (2006) preveía la realización por parte del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) de una serie

de estudios. Además de los estudios que se están realizando a escala nacional dentro del *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático* (2006) es necesario realizar estudios locales para abordar los aspectos específicos de los efectos del cambio climático a pequeña escala.

La cuenca del río Jalón, afluente del río Ebro en su margen derecha, es una de las cuencas que previsiblemente serán más afectadas por el cambio climático (CHE, 2005; Álvares y Samper, 2009; Álvares et al., 2009 y Álvares, 2010). La cuenca del Jalón está situada en el sector centro oriental de la Península Ibérica, ocupa una superficie aproximada de 10187 km² (12% de la superficie de la cuenca del Ebro) y está situada en las comunidades de Castilla y León, Castilla La Mancha y Aragón (Fig. 1).

CHE (2005) contiene la evaluación de los posibles efectos del cambio climático en varias subcuencas del río Ebro, incluyendo la cuenca del río Jalón. Álvares y Samper (2009), Álvares et al. (2009) y Álvares (2010) ampliaron el estudio de CHE (2005) y presentaron la evaluación de los impactos del cambio climático en las subcuencas de los ríos Jiloca hasta Daroca, y Jalón hasta Cetina y hasta Grisén (Fig. 1). Hay que tener en cuenta que CHE (2005), Álvares y Samper (2009), Álvares et al. (2009) y Álvares (2010) consideraron escenarios climáticos que en promedio son más optimistas que los A2 y B2 utilizados en este estudio.

MAGRAMA (2011) incluye el estudio hidrológico y las actuaciones previstas por el Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro para la cuenca del río Jalón.

CEDEX (2011) presenta la evaluación de los impactos del cambio climático en todo el territorio español basadas en una resolución espacial de 1 km².

En 2010 la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) encargó a la Universidad de La Coruña una evaluación de detalle de los efectos del cambio climático en la cuenca del río Jalón. En este trabajo se presenta un resumen de los resultados de dicha evaluación. Se ha utilizado un modelo hidrológico semidistribuido con el programa VISUAL-BALAN, ampliamente contrastado en numerosas cuencas del Ebro y de otras muchas partes de España y Latinoamérica (Samper et al. 1999; CHE, 1997; Samper et al., 2007). El modelo calibrado ha sido la referencia básica para la estimación de los efectos del cambio climático. La evaluación de los efectos del cambio

climático en los recursos hídricos de la cuenca del río Jalón se ha realizado utilizando los resultados de dos modelos climáticos del proyecto PRUDENCE (<http://prudence.dmi.dk>) que consideran los escenarios de emisión A2 y B2.

Los escenarios climáticos futuros se obtienen mediante la combinación de un escenario de emisión de CO₂, un Modelo de Circulación General (MCG) y un Modelo de Circulación Regional (MCR) (Xu y Singh, 2004). Los MCG resuelven las ecuaciones de la dinámica atmósfera-océano en todo el planeta utilizando entre otros datos de entrada las concentraciones de CO₂ en la atmósfera. Trabajan con tamaños de malla muy grandes ($\approx 10^2$ km) que dificultan su aplicación a escala local. Los MCR resuelven las ecuaciones de la dinámica atmosférica a escala regional con tamaños de malla del orden de 10^1 km y utilizan como condiciones de contorno los resultados de los MCG (Van der Linden y Mitchel, 2009; van Roosmalen et al., 2010). A pesar de que la resolución espacial de los MCR es adecuada para muchos estudios, sus predicciones no siempre reproducen adecuadamente los datos medidos en las estaciones meteorológicas. Por ello, es necesario corregir las predicciones del MCR a escala local utilizando los parámetros deducidos para el periodo de control (Fowler et al., 2007; Stoll et al. 2011). En este proceso se introducen incertidumbres que se deben tener en cuenta al analizar los resultados.

Se han analizado los efectos del cambio climático en los recursos hídricos, en las demandas hídricas de los cultivos y en la calidad del agua de la cuenca utilizando la concentración del ión Cl⁻ como indicador de la calidad.

Se presentan los resultados de los efectos del cambio climático, se analizan las principales incertidumbres y se dan recomendaciones para mejorar la gestión de los recursos hídricos.

2.- Zona de estudio

La cuenca del río Jalón tiene una superficie de 10187 km². Está situada en el sector sur-central de la cuenca del río Ebro (Fig.1). Los principales afluentes del río Jalón por la margen izquierda son los ríos Nájima, Deza, Manubles, Aranda e Isuela, y por la margen derecha los ríos Blanco, Piedra, Jiloca, Perejiles, Grío y Cariñena (Fig.1).

La topografía de la cuenca del río Jalón corresponde a una zona de montañas y valles de altitudes moderadas que varían entre 230 y 1600 msnm. Las zonas altas y de mayor pendiente las ocupan mayoritariamente bosques de encinas, coscojas, pinos y hayas. Las zonas medias y bajas de la cuenca corresponden a los valles de los ríos, en los cuales se cultivan maíz, alfalfa, cebada, trigo, frutales, huertos y otros cultivos minoritarios.

La precipitación anual en la cuenca es escasa. Varía entre 350 mm en las zonas media y baja del río Jalón y la cabecera del Jiloca, y 640 mm en las cabeceras de los ríos Mesa y Piedra. Las nevadas son escasas y afectan marginalmente a las zonas más altas. Las precipitaciones son más abundantes en primavera y otoño. En el verano,

la mayor parte de las precipitaciones se produce en forma de tormentas y chubascos.

La cuenca presenta importantes contrastes térmicos entre el verano, en que hay una marcada insolación, y el invierno, en que son frecuentes las heladas. Asimismo, existe un considerable gradiente térmico entre las zonas de valle y de montaña.

Las cabeceras de los ríos Jalón y Jiloca pertenecen al dominio hidrogeológico del Alto Jalón-Alto Jiloca, un ámbito integrado por formaciones calcáreas permeables que descargan en manantiales y en los cañones que excavan los ríos (CHE, 1997). La zona media y baja de la cuenca pertenecen al dominio hidrogeológico del macizo central ibérico. En la cuenca se identifican 16 masas de agua subterránea. Entre la variedad de materiales geológicos que componen el subsuelo de la cuenca destacan las calizas, dolomías, yesos, conglomerados, gravas y arenas en los aluviales y los materiales paleozoicos del alto Jalón y de las sierras paleozoicas de Ateca y de la Virgen y Vicort.

La demanda de agua en la cuenca se satisface tanto con aguas superficiales como subterráneas. La demanda más significativa es para los regadíos. Las aguas superficiales se aprovechan en los numerosos embalses que hay en la cuenca. Hay además varios embalses en fase de construcción.

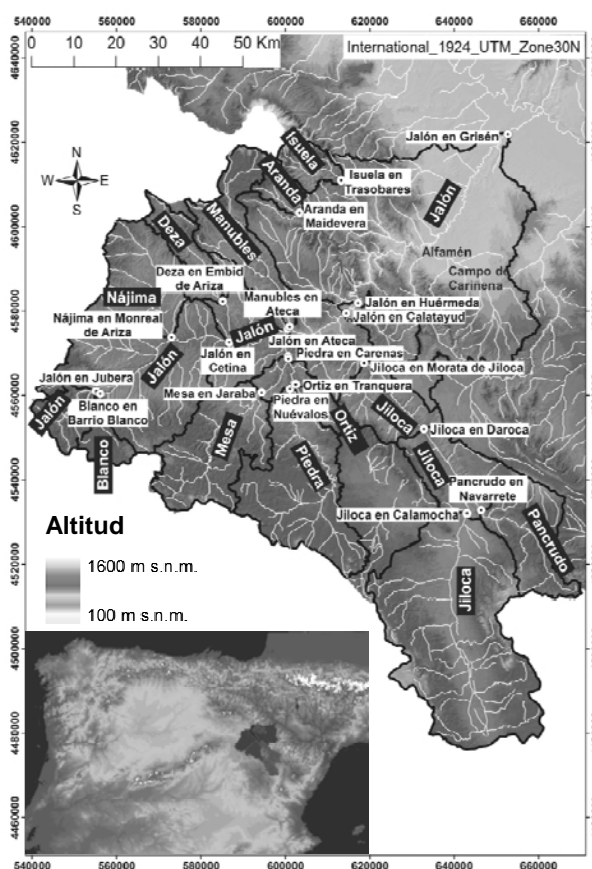


Fig. 1. Situación de la cuenca del río Jalón y sus subcuencas. Los nombres de los ríos se indican en letra blanca. Las estaciones de aforo se indican con los cuadrados blancos que tienen letra negra

Hay regadíos con aguas subterráneas en la cabecera del Jiloca y en el campo de Cariñena (Fig. 1). En esta última zona los bombeos son especialmente intensos. Los acuíferos de Alfamén y del Campo de Cariñena llegaron a estar sobrexplotados.

3.- Modelo de balance hidrometeorológico

El modelo numérico de balance hidrometeorológico se realizó con el programa VISUAL-BALAN v2.0 (Samper et al., 1999; Pisani, 2008; Espinha Marques et al., 2011). Este código resuelve diariamente el balance de agua en el suelo edáfico, la zona no saturada y el acuífero, utilizando como entrada la información meteorológica. Las componentes del balance se resuelven secuencialmente comenzando por las correspondientes al suelo edáfico y finalizando por las del acuífero. El programa permite obtener los valores diarios de todas las componentes del balance así como de las fluctuaciones del nivel freático.

CHE (1997) presenta una evaluación de los recursos hídricos en las cabeceras de los ríos Jalón y Jiloca, situadas en el dominio hidrogeológico Alto Jalón-Alto Jiloca. La información que contiene CHE (1997) es de especial interés para este estudio y se ha utilizado para la recopilación y el contraste de datos, la caracterización geológica e hidrogeológica, la elaboración del modelo conceptual de balance hídrico, la asignación de valores iniciales a los parámetros del modelo y para el contraste de resultados del modelo de balance en el periodo 1950-1990.

La cuenca del río Jalón se ha dividido en 20 subcuencas que cuentan con estaciones de aforo con un periodo de datos superior a 10 años. A su vez, las 20 subcuencas se han dividido en 62 zonas homogéneas de parámetros. Las zonas homogéneas son áreas o dominios dentro de una subcuenca que se caracterizan por su uniformidad. Una zona homogénea tiene topografía y meteorología uniformes, el mismo tipo de suelo y sustrato geológico y un único uso del suelo. Las zonas homogéneas se han delimitado a partir de las variaciones de los usos del suelo (monte, secano, regadío), la hidrogeología (masas de agua subterránea), la altitud, la pendiente y la precipitación media anual. El balance hídrico se ha resuelto con VISUAL-BALAN en cada zona homogénea de forma independiente. Posteriormente, los resultados de las zonas se han agregado para cada subcuenca y para el conjunto de subcuencas.

El modelo de balance se ha calibrado con datos de aportaciones mensuales restituidas al régimen natural en 20 estaciones de aforo del periodo comprendido entre octubre de 1980 y septiembre de 2000. En algunas zonas, además el modelo se ha calibrado con datos de niveles piezométricos. En la calibración se ha procurado también que los resultados de evapotranspiración del modelo fuesen coherentes con los valores estimados para los cultivos más representativos de la cuenca. Dado que el modelo se ha calibrado en régimen natural, no se han tenido en cuenta las

derivaciones de agua de los embalses ni las extracciones de agua subterránea.

Se han calibrado primero las zonas homogéneas pertenecientes a las subcuencas de cabecera y posteriormente se han ido calibrando las zonas situadas aguas abajo. La calibración se ha realizado por tanteos sucesivos evaluando la bondad del ajuste mediante la siguiente función objetivo, ELn:

$$ELn = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\ln O_i - \ln C_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\ln O_i - \ln \bar{O})^2} \quad (1)$$

donde $\ln O_i$ y $\ln C_i$ son los logaritmos neperianos de las aportaciones mensuales restituidas al régimen natural (O_i) y de las aportaciones calculadas (C_i), respectivamente, en el mes i , y N es el número de meses con datos entre 1980 y 2000. La función ELn también se conoce como la función de *eficiencia* de Nash-Sutcliffe con valores logarítmicos (Krause et al., 2005). La función ELn varía entre $-\infty$ y 1. Es igual a 1 para un ajuste perfecto, mientras que toma valores negativos cuando los ajustes son malos. Valores superiores a 0.2 se pueden considerar aceptables. La utilización de logaritmos hace disminuir el peso de los valores muy grandes en el valor de la función objetivo. Los valores grandes corresponden a aportaciones restituidas grandes, que suelen tener grandes incertidumbres. La utilización de la función ELn ha conducido a un buen ajuste de las aportaciones en la mayoría de las estaciones de aforos. Para toda la cuenca del Jalón (hasta Grisén) $ELn=0.02$, lo que indica un ajuste regular. Sin embargo, si se analiza por estaciones de aforo, el ajuste es de mejor calidad. De las 20 cuencas calibradas, se considera muy bueno el ajuste en 3, bueno en 10, regular en 6 y malo en 1. Los valores de ELn para cada una de las cuencas calibradas están comprendidos entre -2.82 y 0.64.

4.- Escenarios climáticos

Para cuantificar los efectos del cambio climático en las componentes del balance hídrico se ha seleccionado el periodo 1960-1990 como periodo de referencia o de control. A su vez, se ha adoptado el periodo 2071-2100 como el periodo de simulación. Por lo tanto, los cambios en el periodo de simulación hacia finales del siglo XXI están referidos siempre al periodo de control 1960-1990.

Para este estudio se han utilizado las proyecciones climáticas de la AEMet (2008) que incluyen series meteorológicas diarias que cubren el periodo de simulación 2071-2100. Dichas proyecciones se han realizado considerando los escenarios de emisión A2 (más pesimista) y B2 (más optimista), que determinan una horquilla razonablemente amplia de posibilidades (Nakicenovic et al., 2000). En este estudio se han

seleccionado las simulaciones realizadas con el modelo de circulación global HadCM3 y la regionalización del modelo RCM-PROMES-UCM (AEMet, 2008). Para elegir los escenarios climáticos se ha tenido en cuenta la disponibilidad de información de buena calidad y que permita comparar y contrastar los resultados de este estudio con otros, en particular con el estudio “Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural” realizado por el CEDEX (2011).

Las series meteorológicas generadas por el modelo climático RCM-PROMES-UCM se presentan a una escala relativamente detallada (0.5° o aproximadamente 50 km). Sin embargo, los resultados de los modelos climáticos - incluso en el periodo histórico en el que se calibraron - presentan desviaciones respecto a los datos registrados de las estaciones meteorológicas. Para soslayar estas desviaciones existen distintas técnicas (Kilsby et al., 2007; Lenderink et al., 2007; Vidal y Wade, 2008). La técnica que se ha aplicado en este trabajo consiste en calcular el balance hidrológico en el periodo histórico utilizando los datos medidos en las estaciones meteorológicas. Para el cálculo en el periodo de simulación se ha procedido de la siguiente manera: 1) Se ha calculado la desviación del modelo climático regional en el periodo histórico mediante una regresión lineal; 2) Se ha utilizado dicha regresión para trasladar los resultados del modelo climático a la escala local de la cuenca en el periodo de simulación; 3) Las series generadas por el modelo climático se han reducido de escala para trabajar a la escala local de la cuenca en el periodo de simulación. De esta forma se han podido calcular los cambios relativos y también los resultados absolutos del balance hídrico.

Se ha hecho un análisis en la cuenca del río Mesa (Fig. 1) para evaluar las incertidumbres en las predicciones introducidas por la regresión lineal utilizada para corregir las desviaciones de las series de precipitación. Se han contrastado las predicciones obtenidas a partir de la corrección mediante la regresión lineal con las predicciones obtenidas utilizando directamente en el modelo hidrológico las series generadas por el modelo climático regional tanto en el periodo histórico como en el de predicción. Esta técnica consiste en comparar los resultados del balance en los dos periodos y calcular las diferencias, sin considerar los resultados absolutos. Aunque las series de precipitación generadas por el modelo climático para el periodo histórico pueden no coincidir con los valores históricos medidos en la cuenca, la comparación de los resultados del balance en el periodo histórico y en el de simulación permite evaluar el efecto del cambio climático en los recursos hídricos.

5.- Efectos del cambio climático en la evapotranspiración y las demandas agrarias de agua

Se han evaluado las necesidades hídricas de los cultivos mayoritarios de la cuenca del río Jalón, tanto para el periodo histórico 1960-1990 como para el periodo de simulación 2071-2100. Se han seleccionado para el cálculo los cultivos de maíz y alfalfa, que son

representativos en las principales comarcas agrícolas de las cuencas de los ríos Jalón y Jiloca. Las superficies regadas se han obtenido de la base de datos de la CHE. Se ha supuesto que dichas superficies se mantienen constantes durante el siglo XXI.

Se han evaluado las necesidades hídricas brutas y netas de los 2 cultivos seleccionados. La necesidad hídrica bruta de un cultivo es su máximo consumo de agua, sin ninguna escasez y en condiciones óptimas, y se denomina evapotranspiración del cultivo (ET_c). La ET_c se ha calculado mediante el método de Blaney-Cridde en su versión modificada por la FAO (Allen et al., 2006). Los coeficientes de cultivo se han calculado siguiendo la metodología de Faci (1986).

Se denomina necesidad hídrica neta de un cultivo a la fracción de la demanda potencial de agua (ET_c) que no es satisfecha por la humedad aportada al suelo por las precipitaciones. La necesidad hídrica neta es por lo tanto el déficit respecto a la ET_c cuando no se aplican regadíos. Se puede estimar como la diferencia entre la ET_c y la evapotranspiración real ETR correspondiente al cultivo cuando no hay riego. Además de estimar las necesidades hídricas brutas y netas del maíz y de la alfalfa en el periodo histórico, se han calculado los cambios previstos en las necesidades hídricas para el periodo de simulación 2071-2100 para los escenarios de emisión A2 y B2.

6.- Estimación de los efectos del cambio climático en la calidad del agua mediante el balance de ión Cl^-

Se ha utilizado la concentración del ión Cl^- en el agua como indicador de su calidad y se ha calculado el cambio previsto de la concentración media en las aguas de escorrentía y de recarga subterránea para los periodos 1960-1990 y 2071-2100. El cálculo se ha realizado en régimen natural para estimar cuantitativamente los efectos del cambio climático en la concentración de sales (conservativas) en las aguas de recarga y escorrentía de la totalidad de la cuenca.

Para calcular el balance de Cl^- se ha utilizado un procedimiento simplificado que consiste en estimar la concentración de Cl^- en el agua de recarga en cada una de las subcuencas del río Jalón a partir de la relación $P/(FH+R)$, siendo P, FH y R los valores medios anuales de la precipitación, del flujo hipodérmico y de la recarga, respectivamente. Este método se basa en suponer que la concentración de Cl^- en el flujo hipodérmico es igual a la concentración de Cl^- en el agua de recarga. El balance interanual de masa de Cl^- en régimen estacionario se puede plantear mediante:

$$PC_p = FH C_R + R C_R \quad (2)$$

donde C_p y C_R son las concentraciones medias de Cl^- en las aguas de precipitación y de recarga, respectivamente. En la Ecuación (2) se han despreciado

las salidas de Cl⁻ del sistema debidas a la escorrentía superficial ya que no son significativas en la cuenca del Jalón. De la Ecuación (2) se deduce que:

$$\frac{P}{FH+R} = \frac{C_R}{C_P} \quad (3)$$

El cociente C_R/C_P es aproximadamente igual a C_T/C_P (C_T es la concentración media de Cl⁻ en la escorrentía total) ya que la contribución de la escorrentía superficial es despreciable. La variación temporal del cociente P/(FH+R) se puede utilizar como un indicador de la variación de la calidad del agua subterránea como de la escorrentía total. Se han calculado los valores de la relación P/(FH+R) para el periodo histórico y para el de simulación para los 2 escenarios climáticos considerados y para cada una de las subcuencas.

7.- Resultados e incertidumbres

Se prevé que la temperatura media anual en el periodo 2071-2100 aumente entre 2 y 4 °C. La precipitación media anual disminuirá entre 9% y 23% en las distintas subcuencas. En el conjunto de la cuenca del río Jalón se espera que la precipitación disminuya en promedio entre 14% y 18%.

Se estima que la evapotranspiración potencial (ETP) aumentará entre 14% y 24% como consecuencia del aumento de la temperatura. Si se considera toda la cuenca del Jalón, la previsión es que la ETP aumente entre un 15% y un 20%. La ETR, en cambio, disminuirá debido al efecto combinado de una mayor ETP y una menor disponibilidad de humedad en el suelo. En el conjunto de la cuenca del Jalón se prevé que la ETR disminuya en promedio un 7%.

Se estima que la interceptación no cambiará o disminuirá levemente.

Se prevé una importante disminución de la recarga que podría variar entre un 36% y más del 90%. Los valores porcentuales más altos corresponden a las subcuencas que tienen muy poca recarga en el periodo histórico como las de los ríos Nájima y Deza (Fig. 1), que tienen recargas medias anuales de 6 y 23 mm/a, respectivamente. En la zona del campo de Cariñena y de Alfamén (Fig. 1) se prevé una disminución de la recarga entre el 65% y el 85%. Además de las subcuencas del Nájima y del Deza, las subcuencas más afectadas por la disminución de la recarga serán las del río Jiloca (Fig. 1). Globalmente, en toda la cuenca del Jalón se prevé una disminución de la recarga del 60% para el escenario B2 y del 80% para el escenario A2.

Las previsiones indican que las aportaciones totales podrían disminuir entre el 36% y el 96% (Fig. 2). Las mayores disminuciones se prevén en las subcuencas de los ríos Nájima y Deza, mientras que las menores en las subcuencas de los ríos Aranda e Isuela (Fig. 1) y en la cabecera del río Jalón (subcuencas del río Blanco y del

Jalón hasta Jaraba, Fig.1. Globalmente, para toda la cuenca del río Jalón se prevé una disminución de las aportaciones del 77% en el escenario A2 y del 59% en el escenario B2. Las disminuciones previstas de las aportaciones en la subcuenca del río Jiloca son de 87% en el escenario A2 y 64% en el B2.

Los resultados obtenidos son globalmente coherentes con los presentados por Alvares (2010) y por CHE (2005). No ha sido posible comparar los resultados del presente estudio con los obtenidos por CEDEX (2011) ya que presenta sólo los resultados globales para toda la cuenca del Ebro. Se espera que en un futuro cercano el CEDEX haga públicos los resultados a una escala de mayor resolución espacial.

El estudio realizado en la cuenca del río Mesa permite observar que la corrección de las desviaciones de las series de precipitación mediante regresiones lineales conduce a la reducción de la varianza de las series de precipitación y temperatura, lo que a su vez puede ocasionar que se subestimen los recursos hídricos del periodo 2071-2100 (pero no en el periodo histórico, porque las regresiones sólo se aplican para corregir las desviaciones en el periodo de predicción). Se ha constatado también que la reducción de la varianza de la precipitación debida a las regresiones lineales no es mayor que la reducción de la varianza introducida por el modelo climático utilizado.

Se prevé que el aumento de la temperatura media hacia finales del siglo XXI conduzca a un aumento de las necesidades hídricas brutas de los cultivos (ET_c). Adicionalmente, la disminución de la precipitación media provocará una disminución de la humedad disponible en el suelo.

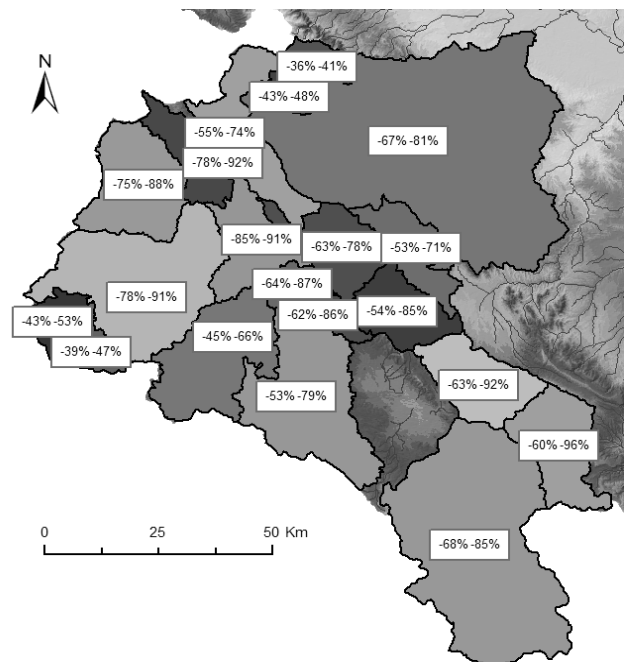


Fig. 2. Disminuciones porcentuales de la aportación media anual de las subcuencas para los escenarios B2 y A2 en el periodo de simulación respecto a las aportaciones del periodo histórico

Por lo tanto, el cambio en los valores medios de temperatura y precipitación conducirá a un aumento en las necesidades hídricas netas de los cultivos (Fig. 3), que en porcentaje será mayor que el aumento de las necesidades hídricas brutas. Se debe tener en cuenta que el modelo utilizado no considera los efectos de los cambios de la concentración atmosférica de CO₂ en la transpiración estomática y el crecimiento vegetal.

Se estima que la ET_c media anual aumentará en el periodo 2071-2100 entre 9% y 15% en el escenario B2 y entre un 12% y un 20% en el escenario A2. Las necesidades hídricas netas de los cultivos podrían aumentar entre un 18% y un 33% en el escenario B2 y entre un 25% y un 41% en el escenario A2. Se prevé que el aumento de las necesidades hídricas sea más o menos homogéneo en toda la cuenca del río Jalón, aunque los resultados de los modelos indican que los aumentos en las necesidades hídricas serán mayores en las subcuencas situadas en las zonas más altas de la cuenca del Jalón.

Se prevé que para el periodo 2071-2100 en la cuenca del río Jalón se produzca un aumento de la concentración media del ión Cl⁻ en la escorrentía total, C_T, que podría duplicarse (escenario B2) o incluso triplicarse (escenario A2). Como es de esperar, el escenario más desfavorable es el A2 porque prevé disminuciones mayores de los recursos hídricos.

En las cuencas de cabecera del río Jalón (Jalón hasta Jubera y Blanco hasta Barrio Blanco) C_T aumentará en factores comprendidos entre 1.45 y 1.9, mientras que en la cabecera del río Jiloca (Jiloca hasta Calamocha) se prevé que C_T aumente en factores comprendidos entre 2.45 y 5. Los aumentos de C_T previstos en las subcuencas del curso medio del río Jalón (Jalón entre Ateca y Huérmeda, Fig.1) están comprendidos entre 1.8 y 4.43. En la subcuenca del río Jiloca entre Daroca y Morata de Jiloca el aumento previsto varía entre 1.7 y 5.85.

En las cuencas de los ríos Nájima y Deza, situadas mayoritariamente sobre materiales paleozoicos y con escasos recursos subterráneos, se prevé un aumento considerable de la concentración de Cl⁻ en la escorrentía y en la recarga. Pero hay que tener en cuenta que en estas dos cuencas la estimación de C_T tiene una incertidumbre grande porque se ha estimado a partir de P/(FH+R), cuyo denominador es un número pequeño.

Finalmente, en la subcuenca del río Jalón situada entre Huérmeda y Grisén (Fig. 1), que comprende al campo de Cariñena y a la zona de Alfamén, se prevén aumentos de C_T con factores comprendidos entre 2.45 y 5.

Las predicciones de los efectos del cambio climático tienen incertidumbres debidas a:

- Los modelos climáticos, que contienen incertidumbres sobre la representación numérica de los fenómenos climatológicos.
- Las predicciones de los modelos climáticos que se basan en diferentes proyecciones y escenarios de la previsible evolución de la sociedad global y de sus hábitos de consumo energético en el siglo XXI.
- La resolución espacial y temporal de los modelos

climáticos que proporcionan las simulaciones para grandes celdas. De hecho, los modelos climáticos actuales no son capaces todavía de reproducir ni la media ni la varianza de las series hidroclimáticas medidas en las estaciones meteorológicas de la red de la AEMet. La reducción de la varianza de la precipitación puede producir una subestimación de los recursos hídricos.

- Los métodos de reducción de escala y de corrección de desviaciones, que tienden a reducir la varianza de las precipitaciones y con ello a subestimar la magnitud de la recarga y de los recursos totales.
- Los balances hidrológicos que se han realizado considerando que la cuenca se encuentra en régimen natural y trabajando con caudales restituidos. Esta hipótesis ha permitido simplificar los cálculos, sin embargo, ha introducido incertidumbres en los resultados de los modelos. Además, existen incertidumbres en los datos de caudales restituidos al régimen natural. Este tipo de incertidumbres son especialmente importantes en las zonas de regadío con aguas subterráneas en las que no se cumplen las hipótesis del método de restitución de caudales. Estos son los casos del Alto Jiloca y del Campo de Cariñena. En estas zonas los modelos no se pueden calibrar usando los datos de caudales restituidos. Hay que tener en cuenta además las incertidumbres en los parámetros de los modelos hidrológicos de balance que se deben calibrar para cada zona homogénea.

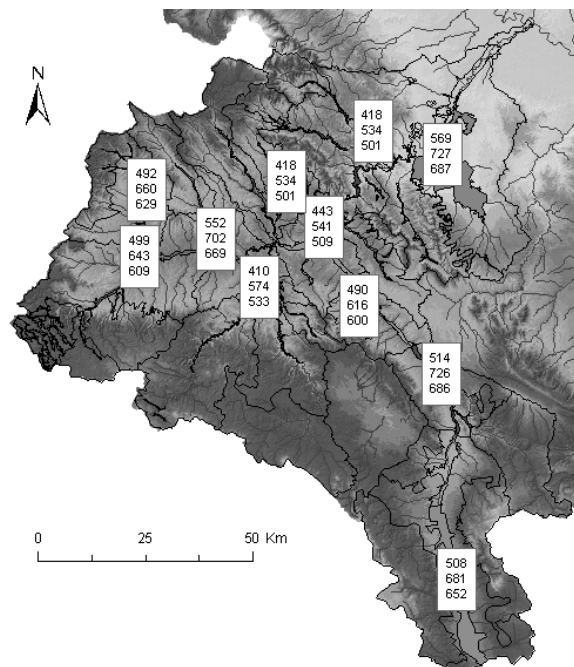


Fig. 3. Necesidades hídricas netas (mm/a) de los cultivos mayoritarios en las zonas homogéneas con regadío. Las zonas homogéneas analizadas son bandas situadas en ambas márgenes de los principales ríos. El valor superior de cada cuadro corresponde al periodo 1960-1990, el del medio al escenario A2 del periodo 2071-2100 y el valor inferior al escenario B2 del periodo 2071-2100

- La complejidad hidrogeológica de los sistemas acuíferos que es especialmente importante en la zona de Cariñena y Alfamén.
- Los efectos de los cambios de la concentración atmosférica de CO₂ en la transpiración estomática y el crecimiento vegetal, que no se han tenido en cuenta y añaden incertidumbre a las estimaciones de la ETR para finales del siglo XXI.

8.- Conclusiones

Se han evaluado los efectos del cambio climático en los recursos hídricos y las necesidades hídricas de los cultivos en la cuenca del río Jalón en el último tercio del siglo XXI. Los cálculos se han realizado con un modelo semidistribuido de balance hidrometeorológico calibrado con las aportaciones mensuales restituidas al régimen natural en 20 estaciones de aforos para un periodo de 20 años. Se han utilizado las predicciones climáticas del modelo de circulación global HadCM3 y la regionalización del modelo RCM-PROMES-UCM, que consideran los escenarios de emisión A2 (más pesimista) y B2 (más optimista).

Se prevé que la temperatura media anual aumente entre un 2 y un 4 °C. La precipitación media anual disminuirá entre un 14% y un 18%. Se prevé que la recarga de los acuíferos disminuya entre un 36% y más del 90%. En toda la cuenca del Jalón se prevé una disminución de la recarga del 60% para el escenario B2 y del 80% para el escenario A2. Las aportaciones totales podrían disminuir en promedio en la cuenca del río Jalón un 77% en el escenario A2 y un 59% en el escenario B2. Se prevé que las necesidades hídricas brutas de los principales cultivos de la cuenca del Jalón aumenten en el periodo 2071-2100 entre un 9% y un 15% en el escenario B2 y entre un 12% y un 20% en el escenario A2. Se estima que las necesidades hídricas netas de los cultivos podrían aumentar entre un 18% y un 33% en el escenario B2 y entre un 25% y un 41% en el escenario A2.

Se han evaluado también los efectos del cambio climático en la evolución de la calidad del agua. Se prevé que para el periodo 2071-2100 se produzca un aumento de la concentración media de Cl⁻ en la escorrentía total, C_T, que podría duplicarse o incluso triplicarse. Los aumentos de C_T previstos están comprendidos entre 1.8 y 5.

Los resultados de los impactos del cambio climático se deben interpretar con cautela ya que contienen incertidumbres importantes debidas a las predicciones de los modelos climáticos y de los métodos de reducción de escala y de corrección de desviaciones de las series meteorológicas. Además de reducir las incertidumbres de las previsiones climáticas se deberá profundizar el estudio de las zonas con mayores demandas de agua utilizando modelos más detallados que tengan en cuenta la relación entre las aguas superficiales y las subterráneas. A la luz de las previsiones de los efectos del cambio

climático en la cuenca del Jalón, se considera que serán especialmente beneficiosas las siguientes medidas contempladas en el Plan Hidrológico de la cuenca: 1) Modernización y mejora de la eficiencia de los regadíos; 2) El aumento de la regulación de los recursos de la cuenca que proporcionarán los embalses en construcción; 3) El aumento de los recursos en la zona del Campo de Cariñena mediante el bombeo de aguas desde el Canal Imperial y la infiltración de las aguas de escorrentía de los barrancos de Aguarón y Cosuenda mediante técnicas de recarga artificial; 4) La mejora de la garantía del abastecimiento de agua de boca en los pueblos del Bajo Jalón con su incorporación al Plan de Abastecimiento de Zaragoza y su entorno.

Agradecimientos. Se ha contado con financiación de la Confederación Hidrográfica del Ebro (Proyecto 2010-PH-02.I) y con un proyecto de la CICYT (CGL2012-36560). En las fases finales del trabajo, el primer autor ha contado con financiación de un proyecto de la Xunta de Galicia del Programa "Consolidación e Estructuración de unidades de investigación competitivas para grupos de referencia competitiva" (Expediente nº. 2012/181). Se agradece el apoyo prestado por la Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

9.- Bibliografía

- AEMet (Agencia Estatal de Meteorología) 2008. Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. http://escenarios.inm.es/escenarios/Documentacion/AEMET_Escenarios_Regionalizados.pdf [consulta: mayo 2011]
- Allen, R.G., L. Pereira, D. Raes, y M. Smith 2006. *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)*. Roma. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/x0490s> [consulta: agosto 2012].
- Álvares, D., 2010. *Acoplamiento de modelos hidrológicos semidistribuidos y GIS: Aplicación a la evaluación de los efectos del cambio climático*. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña.
- Álvares, D., y J. Samper, 2009. Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica del Ebro mediante GISBALAN. En: IX Jornadas de Zona no Saturada, Barcelona. Vol IX. 491-498.
- Álvares D., J. Samper, y M.A. García Vera, 2009. Evaluación del efecto del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica del Ebro mediante modelos hidrológicos. En: IX Jornadas de Zona no Saturada, Barcelona. 499-506.
- CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas), 2011. Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural. Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al CEDEX para el estudio del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. 281 pp.
- CHE (Confederación Hidrográfica del Ebro), 1997. Estudio metodológico piloto para la evaluación de la recarga de los acuíferos, primera fase (Plan Hidrológico). Zaragoza, informe inédito.
- CHE, 2005. Evaluación preliminar de la incidencia del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del Ebro: www.chebro.es/contenido.stream?Fichero.do?idBinario=6163 [consulta: septiembre 2012].
- Espinha Marques, J., J. Samper, B. Pisani, D. Alvares, J.M. Carvalho, H.I. Chaminé, J.M. Marques, G.T. Vieira, C. Mora, y F. Sodrê Borges, 2011. Evaluation of water resources in a high-mountain basin in Serra da Estrela, Central Portugal, using a semi-distributed hydrological model. *Environ. Earth Sci.* 62(6), 1219-1234.
- Faci, J.M., 1986. Necesidades hídricas de los cultivos. Servicio de Investigación Agraria de Zaragoza. Doc. Inédito.
- Fowler, H.J., S. Blenkinsop, y C. Tebaldib, 2007. Linking climate change to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *Int. J. Climatol.* 27, 1547-1578.
- Kilsby C.G., S.S. Tellier, H.J. Fowler, y T.R. Howels, 2007. Hydrological impacts of climate change on the Tejo and Guadiana

- Rivers. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11(3), 1175–1189.
- Krause, P., D. P. Boyle, y D.F. Base, 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *ADGEO* (5), 89–97.
- Lenderink G, A. Buishand, y W. Van Deursen, 2007. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrol. Earth. Syst. Sci.* 11(3): 1145–1159.
- MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente), 2011. Proyecto de Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro. Anejo VI. Estudio de los Sistemas de Explotación. Sistema Jalón.
- Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T.Y. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, R. van Rooijen, N. Victor, y Z. Dadi, 2000. *IPCC Special Report on Emission Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, 2006. Marco para la coordinación entre administraciones públicas para las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio de Medio Ambiente. http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/pna_v3_tem7-12445.pdf [consulta: septiembre 2011].
- Pisani, B. 2008. *Acoplamiento de modelos hidrológicos semidistribuidos y sistemas de información geográfica*. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña. http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/1102/1/PisaniVeiga_td.pdf [consulta: marzo 2013].
- Samper, J., L.I. Huguet, J. Ares, y M.A. García Vera, 1999. *Manual del usuario del programa VISUAL BALAN v1.0: código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga*. ENRESA (05/99). Madrid. 134.
- Samper, J., M.A. García Vera, B. Pisani, D. Alvares, J. Espinha Marques, A. Varela, y J.A. Losada, 2007. Using Hydrological models and Geographic Information Systems for water resources evaluation: GIS-VISUAL-BALAN and its application to Atlantic basins in Spain (Valiñas) and Portugal (Serra da Estrela) en *Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability (Proc. of the IV InterCeltic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources)*, Guimaraes, Portugal, IAHS Publ. 310 (Red Book).
- Stoll, S., H.J. Hendricks Franssen, M. Butts, y W. Kinzelbach, 2011. Analysis of the impact of climate change on groundwater related hydrological fluxes: a multi-model approach including different downscaling methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 21–38.
- Van Der Linden, P., y J.F.B. Mitchell, 2009. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK.
- Van Roosmalen, L., J. Christensen, M.B. Butts, K.H. Jensen, y J. Refsgaard, 2010. An intercomparison of regional climate model data for hydrological impact studies in Denmark. *J. Hydrol.* 380 (3–4), 406–419.
- Vidal, J.P. y S.D. Wade, 2008. Multimodel projections of catchment-scale precipitation regime. *J. Hydrol.* 353,143–158.
- Xu, C-Y, y V.P. Singh, 2004. Review on Regional Water Resources Assessment Models under Stationary and Changing Climate. *Water Resour. Manag.* 18, 591–612.