

## EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL EBRO CON GIS-BALAN

J. Samper<sup>1</sup>, D. Alvares<sup>1</sup>, B. Pisani<sup>1</sup>, M.A. García<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Caminos, Universidad de A Coruña, España, e-mail: jsamper@udc.es

<sup>2</sup> Confederación Hidrográfica del Ebro, Ministerio de Medio Ambiente, España, e-mail: mgarciave@chebro.es

**RESUMEN-** Este trabajo presenta una evaluación de los posibles efectos del cambio climático en los recursos hídricos de una serie de subcuencas de la cuenca hidrográfica del Ebro. Los modelos hidrológicos utilizados para evaluar los recursos hídricos se han calibrado con datos del periodo comprendido entre 1970 y 2000. Se han simulado los efectos del cambio climático en los periodos 2010-2040, 2040-2070 y 2070 y 2100, para los escenarios A1B, A2, B1 y Commit del IPCC y utilizando para ello los resultados de las proyecciones del modelo de circulación general CGCM3. Se ha desarrollado un código (GENBALAN) para realizar los cálculos de reducción de escala de los resultados mensuales del modelo CGCM3 para los períodos de simulación y la desagregación de las series mensuales en series diarias. La modelización hidrológica se ha realizado con el código semidistribuido GIS-BALAN, descendiente del código VISUAL-BALAN. Los resultados de la evaluación del efecto del cambio climático muestran una fuerte variabilidad espacio-temporal e indican una disminución media de las aportaciones en las cuencas seleccionadas de 12%, 21% y 19.0% para los periodos 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100, respectivamente. Los efectos serán más acusados en las cuencas de la margen derecha del Ebro que en la actualidad presentan ya déficits hídricos.

**ABSTRACT-** Here we present an evaluation of the impacts of climate change on water resources in several catchments of the Ebro River Basin. Hydrological models have been calibrated using data collected from 1970 to 2000. Simulations were performed for the following periods: 2010-2040, 2040-2070 and 2070-2100 for IPCC scenarios A1B, A2, B1 and Commit and using projection outputs from global climate model CGCM3. A computer code was developed (GENBALAN) for performing statistical downscaling of CGCM3 monthly results to simulation periods and disaggregation of monthly to daily series. A semi-distributed hydrological model GIS-BALAN (a descendent of VISUAL-BALAN) was used to perform water balance in selected basins. Model results of climate change impact show a marked space-time variability and indicate an average decrease in total runoff of 16.2%, 23.8% and 18.2% for simulation periods 2010-2040, 2040-2070 and 2070-2100, respectively. Impacts will be more

severe in Southern basins which already show the most intense water deficits

### 1.- Introducción

La temperatura media anual en Europa aumentó 0.8°C en media entre 1901 a 1995. Este calentamiento fue aún mayor en la Península Ibérica. La precipitación, sin embargo, mostró un comportamiento muy variable. En el sur de Europa se observó una disminución de casi el 20% y en algunos puntos de España se llegó a constatar una disminución de hasta el 50% (IPCC, 2001).

De acuerdo con el MMA (2005) la temperatura podría aumentar de 4 a 7°C en verano y de 2 a 4°C en invierno en el interior peninsular. Evaluaciones preliminares de los impactos del cambio climático en la Cuenca Hidrográfica del Ebro indican un calentamiento de 2 a 3°C en 2050 y una disminución de los caudales del 12% (IES, 2005).

La cuenca hidrográfica del Ebro es muy grande y muy variable en sus temperaturas, precipitaciones, topografía, coberturas vegetales, uso y tipo de suelo y geología. Esta gran variabilidad aumenta la dificultad de su modelización hidrológica y requiere un gran esfuerzo de procesamiento de datos y análisis espacial. Para este trabajo se ha empleado el modelo hidrológico semidistribuido GIS-BALAN (Samper et al., 2005).

El objetivo de este trabajo es evaluar los efectos del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica del Ebro en los siguientes periodos: 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100. Para ello se han utilizado los resultados de las proyecciones del modelo de circulación general CGCM3 para los escenarios A1B, A2, B1 y Commit del IPCC. Se ha definido el período de calibración de GIS-BALAN entre los años hidrológicos de 1970 y 2000.

Dado que los Modelos de Circulación Global (MCG) no proporcionan resultados a la escala espacial y temporal que requieren los modelos hidrológicos ha sido necesario desarrollar algoritmos de reducción de escala (*downscaling*) y de desagregación temporal de las series de datos climatológicos para traducir los resultados de los MCG a escala local y frecuencia diaria.

## 2.- Cuenca del Ebro y subcuencas seleccionadas

La cuenca hidrográfica del Ebro (CHE) está ubicada en el Noreste de España. Con un área de 85.530 km<sup>2</sup> es la cuenca hidrográfica más grande de España. Presenta una gran heterogeneidad en su geología, topografía y climatología. La precipitación media anual varía entre 2100 mm en los Pirineos y 350 mm en las zonas áridas. La altitud varía entre el nivel del mar en la costa mediterránea y su punto más alto situado a 3372 m. La topografía es muy variable de unas cuencas a otras.

Se han seleccionado 18 subcuencas que poseen estaciones de aforo cuyos datos, facilitados por la CHE, han servido para la calibración de los modelos hidrológicos realizados con el código GIS-BALAN (Fig. 1). La altitud media mínima es 215 m en la cuenca del Algas mientras que la altitud media máxima corresponde a la cuenca del Ésera (3372 m). Las áreas de las subcuencas varían entre 337 y 1.900 km<sup>2</sup> con un valor medio de 1207 km<sup>2</sup>. La Tabla 1 muestra las principales características de las subcuencas seleccionadas.

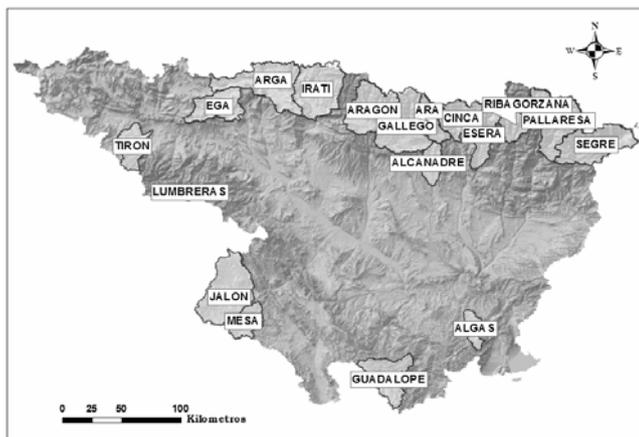


Fig. 1 - Mapa con las subcuencas seleccionadas.

Tabla 1. Resumen de las características topográficas de las subcuencas seleccionadas.

Nombre	Área (km <sup>2</sup> )	Altitud (m)				Pendiente Media (%)
		Min.	Máx.	Δ	Media	
Alcanadre	503.2	366	1990	1624	922	23.4
Algas	337.6	215	1329	1114	520	16.5
Ara	633.5	544	3305	2761	1504	43.5
Aragon	1497.2	478	2851	2373	1166	31.6
Arga	1714.8	360	1522	1162	690	15.8
Cinca	850.9	508	3313	2805	1626	46.9
Ega	955.3	398	1385	987	788	13.9
Esera	904.4	436	3372	2936	1522	38.9
Gallego	1362.6	543	3056	2513	1231	29.3
Guadalope	1017.1	562	1991	1429	1332	20.2
Irati	1540.9	381	2000	1619	849	18.4
Jalon	1902.2	657	1363	706	969	11.5
Lumbreras	112.2	1116	2161	1045	1485	21.0
Mesa	560.8	727	1477	750	1139	13.1
Pallaresa	1511.8	520	3035	2515	1744	44.6
Ribagorzana	569.8	814	3109	2295	1854	44.1
Segre	1543.4	513	2921	2408	1453	33.8
Tiron	688.3	491	2035	1544	933	15.5

Las precipitaciones anuales de las cuencas seleccionadas varían entre 250 y 2200 mm, con tendencias de norte a sur y de oeste a este. Las temperaturas mínimas varían entre 0 y 12 °C y las máximas lo hacen entre 7 y 25 °C. La región de los Pirineos registra las menores temperaturas medias y el interior árido registra las mayores medias.

## 3.- Escenarios considerados

Para estudios ambientales, y más precisamente para el IPCC, los escenarios son imágenes del futuro o alternativas futuras que no son ni predicciones ni previsiones, sino más bien imágenes alternativas (IPCC, 2001). El IPCC define como escenarios las proyecciones del estado futuro de la sociedad y del medio ambiente, basadas en suposiciones sobre el aumento de la emisión de gases de efecto invernadero y aerosoles, el aumento de la población, el crecimiento económico y las políticas ambientales (IPCC, 2001). Los escenarios de emisión están basados en las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas emisiones son productos de sistemas dinámicos muy complejos determinados por el desarrollo demográfico y socio-económico, cambios tecnológicos y políticas ambientales. Su incertidumbre es muy grande.

Cada escenario de emisión del IPCC incluye la línea evolutiva (*storyline*) y los cálculos de los modelos. Para las evaluaciones ambientales la línea evolutiva es la principal forma de trasladar el mensaje del escenario, mientras que los cálculos de los modelos tienen un papel de soporte. La línea evolutiva tiene la función de explicar la lógica en la selección o consideración de los parámetros de los escenarios. En los escenarios de emisión cada línea evolutiva expresa distintas hipótesis sobre el desarrollo del mundo, especialmente en función de la proporción de la globalización en contraposición a la regionalización, en el énfasis en el crecimiento económico y en el nivel de protección ambiental.

Hay cuatro líneas evolutivas cualitativas que dan lugar a cuatro conjuntos de escenarios llamados familias: A1, A2, B1 e B2. Todos ellos son igualmente válidos ya que no se les puede asignar ninguna probabilidad de ocurrencia. Existen seis grupos de escenarios definidos a partir de las cuatro familias anteriores (IPCC, 2001).

La línea evolutiva y la familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo XXI disminuyendo posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en términos de ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica: utilización

intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía de origen no fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B).

La línea evolutiva y la familia de escenarios A2 describen un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

La familia de líneas evolutivas y escenarios B1 describe un mundo convergente con una población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo XXI y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias, con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a un desarrollo sostenible económico, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero con ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

El escenario Commit supone que las emisiones de aerosoles y las concentraciones de gases de efecto invernadero permanecen constantes con valores similares a las del año 2000.

#### 4.- Modelo de circulación global

El modelo CGCM3 es la tercera generación (la más reciente versión) del modelo de circulación global del Centro Canadiense de Modelización y Análisis Climático (CCCma). Este modelo es el resultado del acoplamiento del modelo de circulación atmosférica general (AGCM3) con un modelo de circulación oceánico general, conocido como MOM (modelo oceánico modular). Este modelo tiene 10 capas horizontales con una resolución de aproximadamente 2.8° en latitud y longitud (cerca de 250 km).

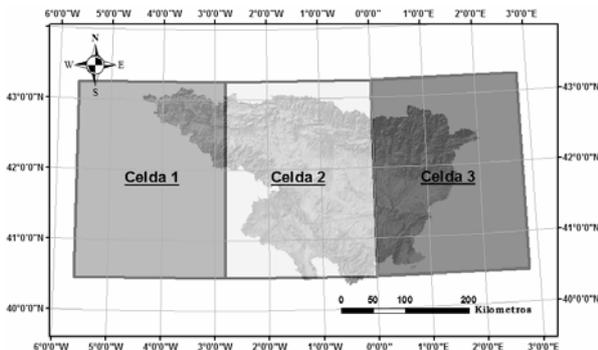


Fig. 2 - Celdas del modelo CGCM3 en las que se ubica la cuenca del Ebro.

La cuenca del Ebro se encuentra situada dentro de tres celdas del modelo CGCM3. La Fig. 2 muestra las celdas de salida del modelo seleccionadas para este trabajo, que de Oeste a Este se denotan como Celdas 1, 2 y 3.

#### 5.- Modelo hidrológico

Los modelos hidrológicos de las subcuencas seleccionadas se han realizado con el código GIS-BALAN, una versión avanzada del código VISUAL-BALAN (Samper et al., 1999) que se ha desarrollado en Visual Basic empleando conceptos de programación orientada a objetos. Está construido utilizando la tecnología ArcObjects, un conjunto de componentes específicos para ArcGis. ArcObjects está basado en COM (*Component Object Model*), un sistema desarrollado por Microsoft. COM es un estándar de la programación que incrementa la interoperabilidad entre *softwares* permitiendo su intercomunicación (Koka, 2004). Más detalles de la programación de GIS-BALAN se pueden encontrar en Samper et al. (2005, 2007), Marques et al. (2006) y Samper et al. (2007).

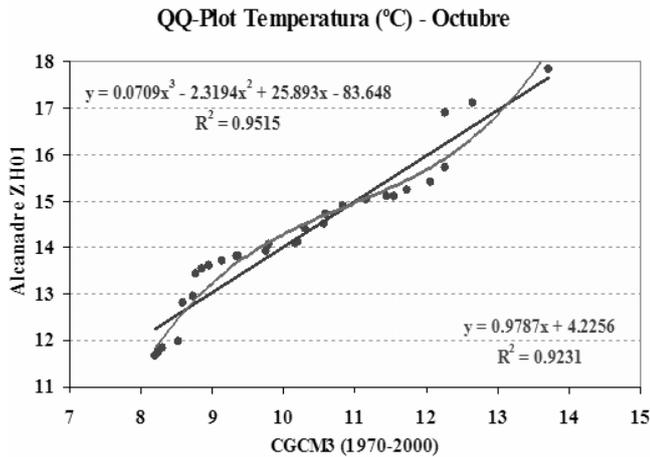
#### 6.- Reducción de escala y desagregación de series

Los MCG actuales tienen una resolución de 2.5° (Arpe & Roeckner, 1999) y trabajan a escala mensual. Una celda del modelo tiene un área mayor de 5.10<sup>4</sup> km<sup>2</sup> (Semenov et al., 1998).

Los modelos hidrológicos de balance de agua requieren datos diarios y trabajan a una menor escala espacial. Para resolver el problema de cambio de escala y la desagregación de series mensuales en series diarias se ha desarrollado el código GENBALAN. Este programa, que se ha integrado en la estructura modular de GIS-BALAN, realiza el escalado estadístico de los resultados del modelo CGCM3 y genera series sintéticas climatológicas a partir de datos mensuales.

Se han comparado los valores mensuales de precipitación y temperatura en cada una de las subcuencas con los valores mensuales calculados por CGCM3 para el *período de calibración*. De la correlación existente entre dichas series mensuales se han deducido funciones mensuales de regresión para cada variable y cada subcuenca (Fig. 3). Estas funciones se han utilizado posteriormente para traducir las proyecciones del modelo CGCM3 en los *períodos de simulación* en series mensuales en cada subcuenca (Semenov et al, 1998; Jonson et al, 1999; Wassenaar et al, 1999; Wilby et al, 2002; Yu, 2005; Zhang, 2006).

Una vez ajustadas las proyecciones a escala local, los valores mensuales de temperatura y precipitación se desagregan a escala diaria mediante un generador de series sintéticas.



**Fig. 3** - Funciones de regresión para las temperaturas mensuales calculadas por el modelo CGCM3 y las medidas en una subcuenca del Ebro.

GIS-BALAN calcula las series sintéticas de temperatura a partir de una distribución normal. Para las series sintéticas de lluvias, el código puede utilizar dos formulaciones alternativas, el método basado en la distribución de las precipitaciones empleando la ecuación Pearson tipo III o el método del histograma de precipitación, calculado a partir de los datos medidos en cada subcuenca.

La probabilidad de que se produzca precipitación se calcula mediante cadenas de Markov, suponiendo que la probabilidad en un determinado día sólo depende de lo sucedido en el día anterior (Elshamy et al., 2006). Sea *PLL* la probabilidad de ocurrencia de lluvia en un día determinado dado que ha llovido también en el día anterior y sea *PLS* la probabilidad de que llueva un día dado que el día anterior no ha llovido. Estas probabilidades se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$PLL = \frac{NLL}{NSL + NLL} \quad (1)$$

$$PLS = \frac{NSL}{NLS + NSS} \quad (2)$$

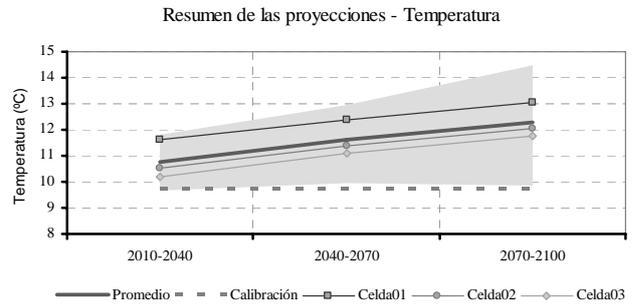
donde *NLL* es el número de días con lluvia que siguen a otro día lluvioso, *NSL* es el número de días de lluvia que siguen a un día seco, *NLS* es el número de días secos que siguen a un día de lluvia y *NSS* es el número de días secos que siguen a otro día seco (Richardson, 1981; Richardson & Wright, 1984).

### 7.- Proyecciones

Los resultados de las proyecciones de los MCG se obtuvieron del centro de distribución de datos del IPCC (IPCC Distribution Data Centre).

El valor medio del aumento de temperatura, considerando los resultados de los distintos escenarios es de 1.1°C para el período 2010-2040, 1.9°C para el período 2040-2070 y

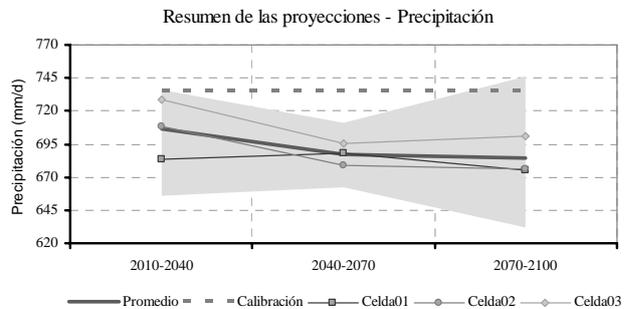
2.6°C para el período 2070-2100 (Fig. 4). Se producirá un calentamiento en todos los meses del año que será más significativo en verano.



**Fig. 4** - Valores medios de los cambios proyectados de temperatura para las tres celdas seleccionadas del modelo CGCM3. En gris se indica el rango correspondiente a los 4 diferentes escenarios.

Los resultados del modelo CGCM3 indican que la variación media en la precipitación para las 3 celdas seleccionadas y para los distintos escenarios es una disminución de 28 mm para el período 2010-2040, 47 mm para el período 2040-2070 y 50 mm para el período 2070-2100 (Fig. 5).

Las mayores reducciones proyectadas corresponden a la Celda 3 (Fig. 2) con una media de 83 mm/año para el período 2070-2100 y una máxima reducción de 111.1 mm/año (el equivalente al 15% de la precipitación media) para el escenario A2. Las proyecciones indican que en invierno se producirá un aumento medio de precipitación del 8% mientras que para el verano se producirá una disminución del 30%.



**Fig. 5** - Valores medios de los cambios proyectados de precipitación para las tres celdas seleccionadas del modelo CGCM3. En gris se indica el rango correspondiente a los 4 diferentes escenarios.

### 8.- Resultados

Se ha calculado el balance hídrico de las subcuencas seleccionadas con GIS-BALAN. En cada subcuenca se ha calibrado el modelo con datos de caudales y niveles piezométricos disponibles en el período de calibración comprendido entre 1970 y 2000. Teniendo en cuenta la gran variabilidad espacial de los datos y parámetros, el ajuste obtenido con el modelo hidrológico del balance para

las aportaciones anuales y mensuales es en general bueno (Fig. 6).

Se ha aplicado la reducción de escala estadística a los valores mensuales simulados por el CGCM3 para el período de simulación. El escalado se ha calculado para precipitación y temperatura para cada una de las cuencas del Ebro. Las diferencias entre los valores simulados y calculados por el CGCM3, es decir - *el cambio climático proyectado*, han sido calculadas y ajustadas a las subcuencas.

Se han evaluado los efectos del cambio climático en cada una de las 15 subcuencas para cada uno de los 4 escenarios y en cada uno de los 3 periodos de simulación. Es decir, se han evaluado los efectos del cambio climático en las componentes del ciclo hidrológico para un conjunto de  $15 \times 4 \times 3 = 180$  casos. En este trabajo se presentan solamente los valores medios de estos 180 casos. Los detalles de cada una de los casos se muestran en Samper y Alvares (2007).

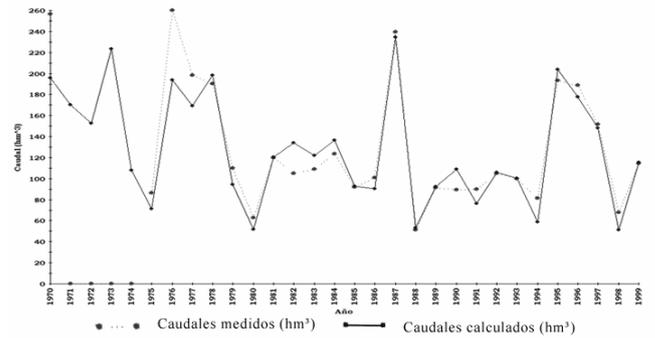
Los resultados de los modelos indican que, en términos de valores medios, se producirán cambios importantes en todas las componentes hidrológicas en todos los períodos de simulación (Fig. 7).

En el período 2070-2100 la precipitación disminuirá en media un 15%, la temperatura aumentará un 28%, la escorrentía superficial disminuirá un 45%, el caudal total disminuirá un 18%, el flujo hipodérmico disminuirá un 17% y la precipitación nival dejará de ser importante. La evapotranspiración real no varía significativamente en relación con los valores del período de calibración ya que a pesar del aumento de temperatura y por tanto de

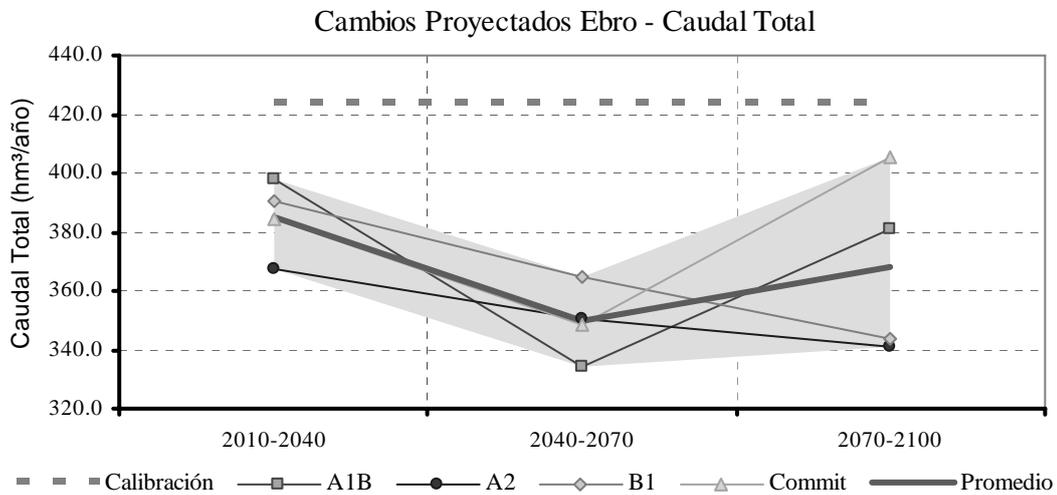
evapotranspiración potencial, el contenido de agua del suelo disminuye como consecuencia de la disminución de la precipitación.

**9.- Discusión de resultados y conclusiones**

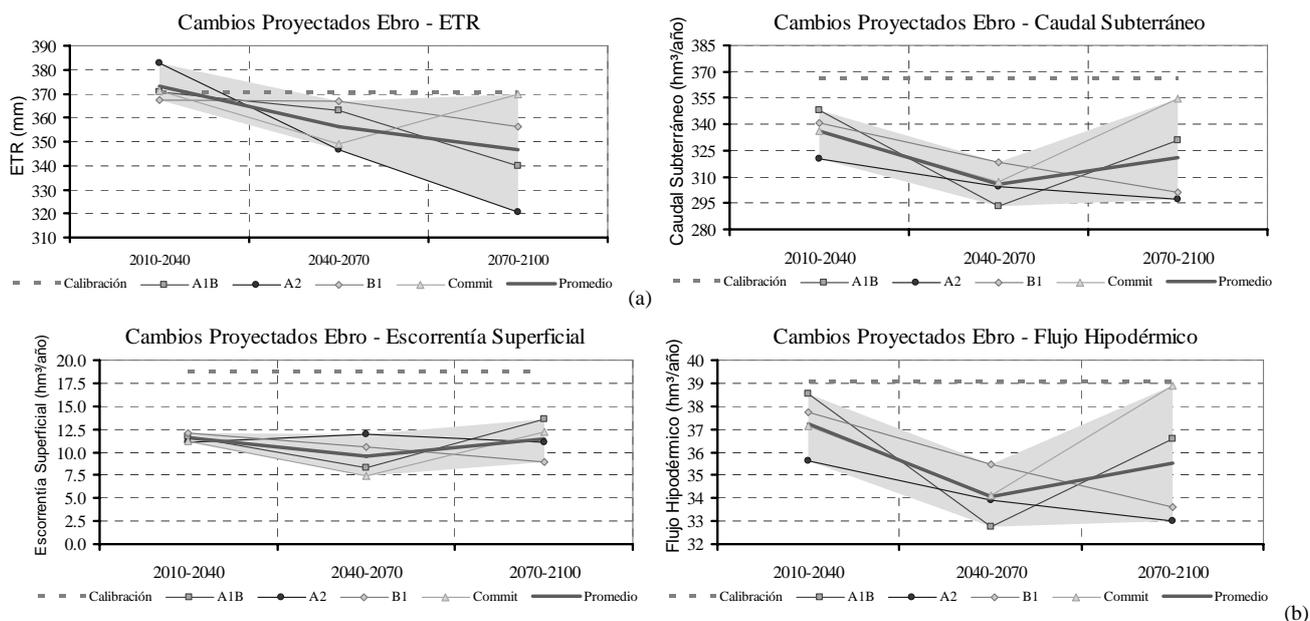
Se ha utilizado el modelo hidrológico distribuido GIS-BALAN para estimar el balance hidrológico de las cuencas seleccionadas. Se proyecta un aumento de la precipitación en los meses lluviosos, cerca del 5%, y una reducción significativa de la precipitación en los meses de verano, cerca de 45%.



**Fig. 6** - Comparación de aportaciones anuales calculadas y medidas (en  $hm^3$ ) en la subcuenca del Alcanadre.



**Fig. 7** - Cambios proyectados para el caudal total para el conjunto de las 15 subcuencas analizadas.



**Fig. 8** - Cambios proyectados para a) ETR y escorrentía superficial y b) flujo hipodérmico y caudal subterráneo para el conjunto de las 15 subcuencas analizadas.

Se prevé que la temperaturas aumentaran en todos los meses, menos intensamente en el invierno (2.5°C) y más intensamente en el verano, 6.1°C. Con la disminución significativa de la precipitación media anual y el aumento de las temperaturas, los impactos estimados en función del cambio proyectado son considerables.

En general, los impactos en las componentes hidrológicas son importantes con reducciones en los períodos de simulación 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100 de:

- 1) 12%, 21% y 19% para el caudal total
- 2) 17%, 25% y 19% para la escorrentía superficial,
- 3) 9%, 18% y 18% para el flujo hipodérmico
- 4) y 13%, 23% y 20% para el flujo subterráneo

Los impactos del cambio climático serán mayores en los meses de verano que en los del invierno, lo cual agravará los problemas de disponibilidad hídrica en los meses de estiaje.

Las estimaciones de los efectos del cambio climático llevan asociadas incertidumbres. Los modelos de circulación global tienen amplias incertidumbres y los escenarios son proyecciones de una sociedad global futura. Los resultados de los MCG son mensuales y están disponibles sólo a escala regional. Estos resultados se trasladan a la escala de las cuencas mediante técnicas de reducción de escala que introducen nuevas fuentes de error e incertidumbres.

Las continuas mejoras en los modelos de circulación global y las técnicas de reducción de escala redundarán en mejores predicciones en un futuro próximo.

Las técnicas de teledetección, la mayor disponibilidad de datos y parámetros distribuidos espacialmente y el desarrollo de códigos hidrológicos distribuidos (como

GIS-BALAN), permitirán reducir considerablemente las actuales incertidumbres de los modelos hidrológicos.

Los modelos de circulación global estiman que existirán cambios en las intensidades de lluvia, temperaturas y vientos. En nuestros cálculos sólo hemos considerado los cambios en la temperatura y la precipitación diaria. Los posibles efectos de los cambios en intensidades de lluvia y vientos en los recursos hidráulicos no se han tenido en cuenta en este trabajo ya que se ha utilizado el método de Thornthwaite para calcular la ETP. En la actualidad no existen métodos disponibles para el reescalado de intensidades de lluvia y vientos. En trabajos futuros se deberá analizar el efecto de los cambios en intensidades de lluvia y vientos.

*Agradecimientos.* Este trabajo ha sido financiado por la CICYT (REN2003-8882). Algunas de las mejoras de GIS-BALAN se han hecho gracias a un proyecto financiado por la Confederación Hidrográfica del Ebro (referencia 2000-PH17-I). Agradecemos a Santiago Moreira Martínez por su participación en el desarrollo de GENBALAN y a todos que han contribuido a las mejoras del código BALAN.

## Bibliografía

- Arpe, K. & Roeckner, E., 1999. Simulation of the hydrological cycle over Europe: Model validation and impacts of increasing greenhouse gases. *Ad Water Resour* 23, 105-119.
- Elshamy, M. E., Wheatler, H. S., Gedney, N. & Huntingford, C., 2006. Evaluation of the rainfall component of a weather generator for climate impact studies. *J Hydrol* Vol 326, 1-24.
- IES, 2005. Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. The Impact of Climate Change On Lakes in Europe. Ch. Iv.B. In Eisenreich, S. (Ed.), *Climate Change and European Water Dimension*. European Commission, EUR 21553 En: 52-80
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Johnson, G.L., Daly, C., Taylor, G.H. & Hanson, C.L., 1999. Spatial Variability and Interpolation of Stochastic Weather Simulation Model Parameters. *J. Appl Meteorol* Vol 39, 778-797.
- Koka, S. 2004. Integration of Stream and Watershed Data for Hydrologic Modeling. MS Tesis. Civil Engineering. Texas A&M University.
- Marques, J. E., Samper, J., Pisani, B., Álvares, D., Vieira, G.T., Mora, C., Carvalho, J. M., Chaminé, H. I., Marques, J. M., Borges, F. S., 2006, Avaliação de recursos hídricos através de modelação hidrológica: aplicação do programa VISUAL BALAN v2.0 a uma bacia hidrográfica na Serra da Estrela (Centro de Portugal), *Cadernos Lab. Xeoloxico de Laxe*, Vol. 31, 43-65.
- MMA, 2005. Ministerio de Medio Ambiente de España. Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Proyecto ECCE – Informe Final. Centro de Publicaciones. 846 pp.
- Richardson, C. W., 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resour Res* 17:182–190.
- Richardson, C. W. & Wright, D. A., 1984. WGEN: A model for generating daily weather variables. USDA, ARS-8, Washington, USA.
- Samper J. y D. Alvares, 2007. Evaluación del cambio climático en los recursos del río Ebro. Asistencia Técnica de la Fundación Universidad de Coruña para la Confederación Hidrográfica del Ebro.
- Samper, J., Hugué, L.L., Ares, J. & García Vera, M.A., 1999. “Manual del usuario del programa VISUAL BALAN V.1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga”. Pub. Tec. ENRESA. 5/99, Madrid, 205 pp.
- Samper, J., M.A. García-Vera, B. Pisani, D. Alvares, A. Varela y J.A. Losada. 2005. Modelos hidrológicos y sistemas de información geográfica para la estimación de los recursos hídricos: aplicación de GIS-BALAN a varias cuencas españolas, En: VII Jornadas de Zona no Saturada, ZNS'05, Coruña, 269-274.
- Samper, J., M.A. García-Vera, B. Pisani, Varela, A., Losada, J. A., Álvares, A. and Marques, J. E. 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). In: *Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate*, Guimaraes Portugal, IAHS Publ. 310, 259-266.
- Semenov, M. A., Brooks, R. J., Barrow, E. M., Richardson, C. W., 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Res* Vol. 10, 95–107.
- Wassenaar, T., Lagacherie, P., Legros, J. P., Rounsevell, M. D. A., 1999. Modelling wheat yield responses to soil and climate variability at the regional scale. *Climate Res* Vol. 11: 209–220.
- Wilby, R. L., Dawson, C. W., Barrow, E.M., 2002. SDSM- A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environ Modell Softw* 17, 147–159.
- Yu, B., 2005. Adjustment of CLIGEN parameters to generate precipitation change scenarios in southeastern Australia. *Catena* 61, 196–209.
- Zhang, X.C., 2005. Spatial downscaling of global climate model output for site-specific assessment of crop production and soil erosion. *Agr Forest Meteorol* 135, 215–229.

