

# EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE MODELOS HIDROLÓGICOS

Diego Alvares<sup>1</sup>, Javier Samper<sup>1</sup> y Miguel A. G. Vera<sup>2</sup>

1: E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
Universidad de La Coruña. Campus de Elviña s/n, CP 15192. A Coruña, España  
E-mail: diegoal@terra.com.br; jsamper@udc.es

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

**Palabras clave:** Modelo hidrológico semi-distribuido, cambio climático, GIS-BALAN, Ebro

**RESUMEN.** En este trabajo se presenta la evaluación del efecto del cambio climático en los recursos hídricos del conjunto de la cuenca hidrográfica del Ebro mediante un modelo hidrológico semidistribuido que se ha resuelto con el código GIS-BALAN. La cuenca se ha dividido en 40 subcuencas y éstas a su vez en 1.066 zonas homogéneas. Se han calculado los impactos del cambio climático en los recursos hídricos para los periodos de simulación comprendidos entre 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099. Los parámetros del modelo se han calibrado con datos del periodo de calibración comprendido entre 1970 y 1999. Se ha implementado en GIS-BALAN un módulo denominado GENBALAN para la reducción de escala espacial de los datos hidrometeorológicos, la desagregación temporal de las proyecciones de los modelos de circulación general (MCG) y la generación de series climáticas sintéticas. Se han empleado los datos del modelo CGCM3 para los escenarios A1B, A2, B1 y Commit del panel intergubernamental del cambio climático, IPCC. Se observa una disminución en las precipitaciones de un 1.9%, 8.6% y 7.9% para los periodos 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099. Las proyecciones de temperatura en el Ebro indican un aumento medio de 1.2°C, 2.2°C y 3.0°C en los citados periodos, respectivamente. Las predicciones del modelo indican una disminución de todas las componentes hidrológicas. La reducción media del caudal del Ebro se estima en 9.4%, 22.0% y 20.2% en los mismos periodos.

**ABSTRACT.** Here we present the evaluation of the effect of climate change on the water resources of the Ebro river basin using a semi-distributed hydrological model which was solved with GIS-BALAN. The basin is divided into 40 sub-basins and 1.066 homogeneous zones. Impacts of climate change were estimated for the following simulation periods: 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099. Model parameters were calibrated from data collected from 1970 to 1999. GIS-BALAN incorporates a specific module, GENBALAN, to perform the downscaling of general circulation models (CGM) results, to disaggregate time series and generate synthetic daily climatological data. We have used the outputs of model CGCM3 for IPCC scenarios A1B, A2, B1 and Commit. CGM results show that mean precipitation will decrease 1.9%, 8.6% and 7.9% in simulation periods 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099, respectively. Temperature predictions indicate an average warming of 1.2°C, 2.2°C and 3.0°C, respectively. All the hydrological components of runoff will decrease. The mean Ebro river streamflow will decrease 9.4%, 22.0% and 20.2%.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Grupo Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) fue establecido por la Organización Meteorológica Internacional (WMO) y por el Programa del Medio Ambiente de la Naciones Unidas (UNEP). De acuerdo con sus estudios y recopilación bibliográfica, el IPCC constató que para el periodo entre 1901 y 1995 la temperatura media anual en Europa aumentó en promedio 0.8°C (Hulme & Sheard, 1999). Este calentamiento fue

mayor todavía en la Península Ibérica. Las precipitaciones presentaron comportamientos diferentes a lo largo del continente. En el sur de Europa se observó una disminución del 20% y para España llegaron a constatar una disminución de hasta el 50%. Las evaluaciones preliminares para la Cuenca Hidrográfica del Ebro prevén un calentamiento de 2°C a 3°C hasta 2050 y una disminución de los caudales de hasta el 12% (IES, 2005).

En este trabajo se presenta una evaluación de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del Ebro utilizando el código GIS-BALAN (Samper et al., 2005. 2007). Ha sido necesario extender y desarrollar las capacidades del código GIS-BALAN. El proceso de evaluación del efecto del cambio climático en los recursos hídricos se ha realizado en dos etapas: *calibración* y *simulación*. Primero, en el periodo de calibración, se han cuantificado las componentes hidrológicas actuales y se han ajustado los parámetros del modelo. Después se han realizado simulaciones basadas en los resultados del modelo de circulación global CGM3 (el MCG del Centro Canadiense de Modelización y Análisis Climático - CCCma) para los periodos de simulación definidos y para los escenarios del IPCC seleccionados. Para estimar los impactos del cambio climático en los recursos hídricos del Ebro se han empleado los resultados de la reducción de escala de los datos climatológicos en el modelo hidrológico del Ebro construido con GIS-BALAN.

## 2. EL CÓDIGO GIS BALAN

El modelo hidrológico semi-distribuido GIS-BALAN se ha desarrollado en lenguaje Visual Basic empleando conceptos de programación orientada a objetos. Está construido utilizando la tecnología ArcObjects, 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).

GIS-BALAN se ha programado con tres módulos: el preprocesador, el procesador y el postprocesador. El intercambio de datos entre el SIG y los tres módulos se realiza mediante una base de datos común a los tres módulos. Los datos, parámetros y los resultados del preproceso y los resultados del balance calculados por el procesador se almacenan en la base de datos compartida del modelo (Samper et al., 2005. 2007. Espinha et al., 2006).

A los efectos del balance hídrico, el código GIS-BALAN distingue tres zonas: a) El suelo edáfico, en el que se produce la infiltración del agua de lluvia, riego o nieve y donde ocurren los procesos de evaporación y transpiración (el flujo en esta zona es fundamentalmente vertical), b) La zona no saturada, en la que pueden existir tanto flujos laterales como flujos verticales de percolación y c) El acuífero, formación geológica capaz de almacenar y transmitir agua. GIS-BALAN calcula de manera secuencial el balance diario en cada una de las tres zonas. Los principales flujos de este balance son las entradas por precipitación, riego y fusión de la nieve y las salidas por interceptación, escorrentía superficial, evapotranspiración, flujo hipodérmico y flujo subterráneo. El balance considera la variación del contenido de humedad en el suelo y la zona no saturada y de variación de los niveles piezométricos en el acuífero (Samper et al., 1999).

## 3. GENBALAN

Se ha implementado en GIS-BALAN un módulo específico para la evaluación de los impactos del cambio climático. Este módulo, GENBALAN, realiza la reducción de escala, *downscaling*, la desagregación de las series mensuales y la generación de series climatológicas sintéticas (Figura 1).

Los modelos hidrológicos como GIS-BALAN requieren datos de entrada de precipitación y temperatura con una resolución equiparable a la del tamaño de la cuenca a modelizar. Dado que los MCG no pueden describir los cambios a pequeña escala espacial y temporal, es necesario disponer de algoritmos de reducción de escala, *downscaling*, para trasladar los resultados de los modelos de circulación global a una escala local. Los métodos de reducción de escala se dividen en dos tipos: dinámicos y estadísticos.

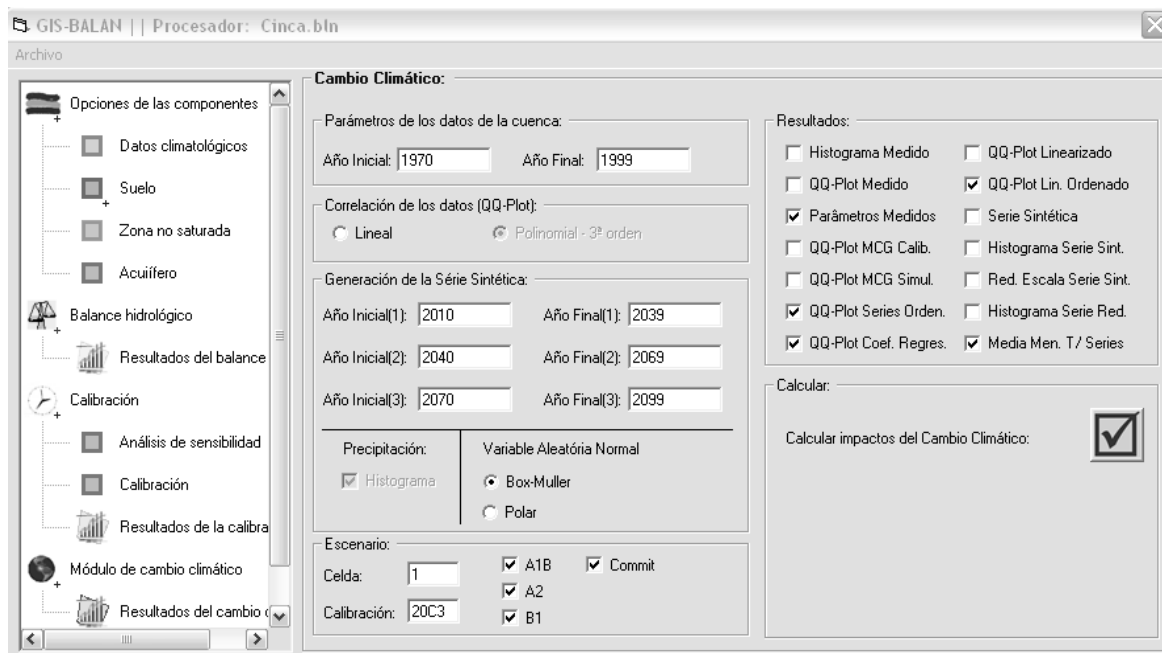


Figura 1. Pantalla principal de GENBALAN.

### 3.1 Reducción de escala

La resolución espacial de los MCG no es suficiente para servir de entrada de datos directos para evaluar los impactos del cambio climático en los recursos hídricos a la escala de las subcuencas. Por ello, se ha seleccionado el método de reducción de escala estadístico por medio de las temperaturas y precipitaciones mensuales utilizando una regresión polinómica y lineal.

GIS-BALAN compara los valores mensuales medidos de cada variable climatológica para cada zona homogénea del modelo con los valores mensuales de la celda correspondiente calculados por el MCG para el mismo periodo. Este período es el mismo del balance hidrológico y se denomina período de calibración. A partir de la correlación de las series mensuales ordenadas (qq-plot) se obtienen las funciones de regresión (Figura 2) para cada variable, mes y zona homogénea. Estas funciones se utilizan posteriormente para transformar los resultados de las proyecciones del MCG en los períodos futuros o períodos de simulación.

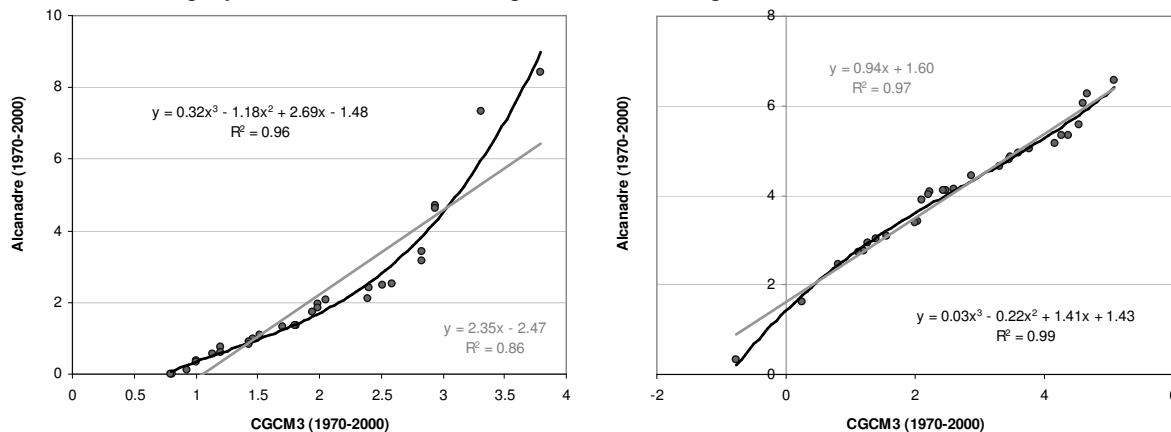


Figura 2. Gráficos de regresión lineal y polinómica (líneas más oscuras) de 1) precipitación y 2) temperatura en el mes de octubre para una de las zonas homogéneas de la subcuenca del Alcanadre.

Se trata de un método muy utilizado para traducir los cambios proyectados por los MCG en cambios en las variables climatológicas a escala local (Semenov et al, 1998; Jonson et al, 1999; Wassenaar et al, 1999; Wilby et al, 2002; Yu, 2005; Zhang, 2006). Ambas funciones proporcionan buenos resultados. Las funciones polinómicas dan mejores ajustes mientras que las funciones lineales son más conservadoras y presentan menos incertidumbres cuando se utilizan para extrapolar más allá del rango de los valores medidos (Weichert & Bürger, 1998; Zhang, 2005).

### 3.2 Generación de series sintéticas

En general los resultados de las simulaciones de los modelos de circulación global para las variables climatológicas son mensuales. Por otro lado, los modelos hidrológicos empleados para la estimación de los recursos hídricos como GIS-BALAN trabajan a escala diaria. Por lo tanto, se requiere un método para pasar de la escala mensual de los modelos de circulación global a la escala diaria del modelo hidrológico. Para ello se utilizan generadores de series sintéticas que producen series diarias sintéticas de variables climatológicas tales como precipitación, temperatura y radiación solar que tienen propiedades estadísticas similares a las de las series medidas (Richardson, 1981; Racsco et al., 1991). Los generadores climáticos son modelos estadísticos que generan valores diarios de una variable meteorológica suponiendo conocida la función de distribución estadística de la variable climatológica y empleando para ello variables aleatorias auxiliares.

La probabilidad de que llueva en un determinado día se calcula mediante el método de las cadenas de Markov, según el cual la probabilidad en un determinado día depende solo de lo sucedido en el día anterior. Una vez ajustadas las proyecciones a escala local, los valores mensuales de temperatura y precipitación se desagregan a escala diaria mediante el generador de series sintéticas. GIS-BALAN calcula las series sintéticas de lluvia utilizando dos formulaciones alternativas: 1) La ecuación de Pearson tipo III o 2) El histograma calculado para cada zona homogénea. La distribución de Pearson conduce a la siguiente ecuación:

$$P = \mu + \frac{2\sigma}{\gamma} \left( \frac{\gamma}{6} \left( \left( \chi - \frac{\gamma}{6} \right) + 1 \right)^3 - 1 \right) \quad (1)$$

donde  $P$  es la precipitación en mm,  $\mu$  es la media en mm,  $\sigma$  es la desviación típica en mm,  $\gamma$  es el coeficiente de asimetría y  $\chi$  es una variable aleatoria.

Sea PLL la probabilidad de lluvia en un día determinado dado que llovió 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:

$$PLL = \frac{NLL}{NLS + NLL} \quad (2)$$

$$PLS = \frac{NLS}{NSL + NSS} \quad (3)$$

donde NLL es el número de días de lluvia que siguen a otro día de lluvia, NLS es el numero de días de lluvia que siguen a un día sin lluvia, NSL es el numero de días sin lluvia que siguen a un día de lluvia y NSS es el numero de días sin lluvia que siguen a otro día sin lluvia (Richardson, 1981).

## 4. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL EBRO

Se han definido tres periodos de simulación: el período comprendido entre 2010 y 2039, la treintena 2040-2069 y finalmente el período comprendido entre 2070-2099. Las simulaciones se han realizado utilizando los resultados de las simulaciones del modelo CGCM3 para los escenarios A1B, A2, B1 y Commit definidos por el IPCC. La reducción de escala de estos resultados para cada una de las subcuencas seleccionadas se ha hecho con el método estadístico indicado anteriormente.

### 4.1 Datos del MCG

Los resultados de las proyecciones del CGCM3 para la cuenca del Ebro se obtuvieron en el centro de

distribución de datos del IPCC (IPCC Distribution Data Centre). La variación media anual de la temperatura para los distintos escenarios a la escala de las celdas del MCG es de 1.1°C para el período 2010-2039, 1.9°C para el período 2040-2069 y 2.6°C para el período 2070-2099. El escenario A1B presenta los mayores incrementos de temperatura en los dos primeros periodos de simulación, con valores medios de 1.3 y 2.5°C respectivamente, mientras que en el tercer periodo el escenario A2 lo supera con un aumento de 4.1°C.

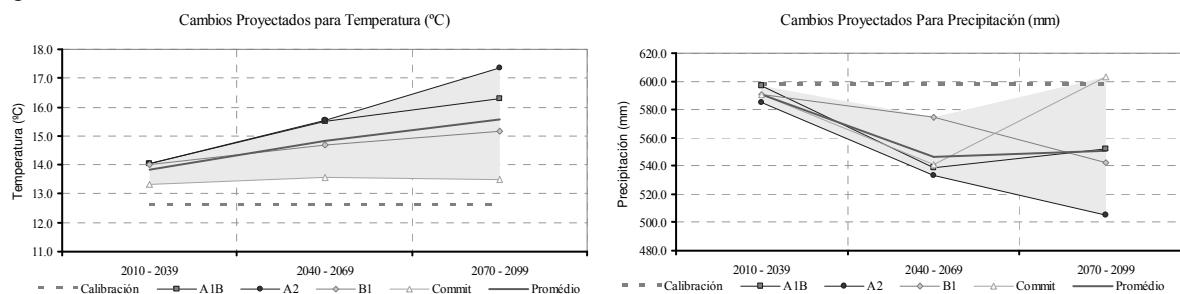
Los cambios proyectados para la precipitación media anual no son tan homogéneos como los de las temperaturas. Las predicciones de las precipitaciones de los diferentes modelos muestran discrepancias espaciales y temporales. El cambio medio anual de la precipitación en los diferentes escenarios es una disminución de 28,6 mm para el período 2010-2039, de 47.9 mm para el período 2040-2069 y de 51.1 mm para el período 2070-2099.

#### 4.2 Proyecciones del cambio climático

Una vez obtenidas las proyecciones del CGCM3 para la cuenca del Ebro se ha calculado la reducción de escala de estos datos para las subcuencas seleccionadas con GEN-BALAN para las 1.066 zonas homogéneas del modelo hidrológico del Ebro. Se han desagregado las proyecciones a la escala diaria con el generador de series sintéticas también incorporado a GEN-BALAN.

Se observa que el promedio del incremento de la temperatura es positivo en todos los escenarios y periodos de simulación (Figura 3). Se ha calculado un aumento promedio de 1,3°C, 2.2°C y 3.0°C para los periodos comprendidos entre 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099, respectivamente.

Se observa que ya en el primer periodo las temperaturas aumentan respecto al valor de referencia de 12,6°C obtenido en el periodo de calibración. Los cambios más intensos están asociados al escenario A2 en el que se llega hasta una temperatura media de 17.4°C al final de la simulación. Se obtiene un incremento de 4.8°C o, en términos relativos, un aumento del 37,8%. Los escenarios A1B y B1 siguen una tendencia similar de fuerte incremento al comienzo de la simulación, con una suavización a partir del segundo periodo de simulación, llegando hasta los 16.3°C y 15.2°C en 2070-2099, respectivamente. El escenario Commit se mantiene constante, oscilando entre 13.3°C y 13.6°C indicando una disminución de los cambios al terminar el tercer periodo con un promedio de 13.5°C.



**Figura 3.** Proyecciones del cambio de temperatura para los 4 escenarios seleccionados y para los 3 periodos de simulación: 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099.

A diferencia de las proyecciones de la temperatura, no se observa una tendencia clara en las proyecciones de las precipitaciones a lo largo de los periodos de simulación (Figura 3). Se produce una disminución de la precipitación en los dos primeros periodos mientras que en el último periodo los resultados de los diferentes escenarios presentan comportamientos diferentes. Entre 2040-2069 los datos de los escenarios A1B y B1 divergen diametralmente pero coinciden en 2070-2099. Por otro lado, las proyecciones de los escenarios A1B, A2 y Commit muestran el mismo descenso de precipitación entre 2040-2069 pero son distintas en el último periodo, siendo el primer escenario el más pesimista mientras que el escenario Commit es el único en el que las precipitaciones al final son superiores a las de referencia.

Con la reducción de escala la precipitación (para el promedio de los cuatro escenarios) disminuye 7,1 mm en 2010-2039, 51.1 mm en 2040-2069 y 47,1 mm en 2070-2099. Estas disminuciones son equivalentes a 1.2%,

8.6% y 7.9% del total, respectivamente. En el intervalo 2040-2069 el escenario B1 presenta una reducción de apenas 23.5 mm (-3.9%) mientras que los demás escenarios proyectan una disminución media de 60.3 mm (10.1% del total). En el intervalo 2070-2099 las estimaciones de los escenarios A1B y B1 resultan en una disminución media de 50.5 mm (-8.5%) mientras que los resultados del Commit y del A2 presentan un aumento de 5.2 mm (+0.9%) y una reducción de 92,6 mm (-15.5%).

### 4.3 Impactos del cambio climático

La Figura 4 muestra los resultados de las simulaciones de los efectos del cambio climático en el conjunto de la cuenca del Ebro para las diferentes componentes del ciclo hidrológico en cada uno de los periodos y escenarios. Se observa que las predicciones muestran un aumento de la ETP a lo largo del siglo debido al aumento de la temperatura. A pesar de ello, la ETR disminuye como consecuencia de la disminución del agua disponible en el terreno. La interceptación disminuye también debido a la disminución de la precipitación. Las predicciones de la escorrentía superficial muestran un aumento en el primer periodo, una disminución significativa en el segundo periodo y una recuperación en el último periodo. Esto ocurre porque aun que el total anual de la precipitación disminuya, esta en los meses lluviosos aumenta, haciendo con que se obtenga un número mayor de días de alta pluviosidad que la media registrada. Como en el modelo la escorrentía esta directamente relacionada a los fenómenos de precipitaciones intensas, se observa un pequeño aumento de esta componente en el primer periodo de simulación. El mismo efecto se observa en el escenario Commit del tercer periodo de simulación. Los impactos proyectados para los flujos hipodérmico y subterráneo son muy similares. En comparación con el periodo de calibración, el flujo hipodérmico disminuye 10.3%, 20.9% y 21.1% en cada uno de los tres periodos.

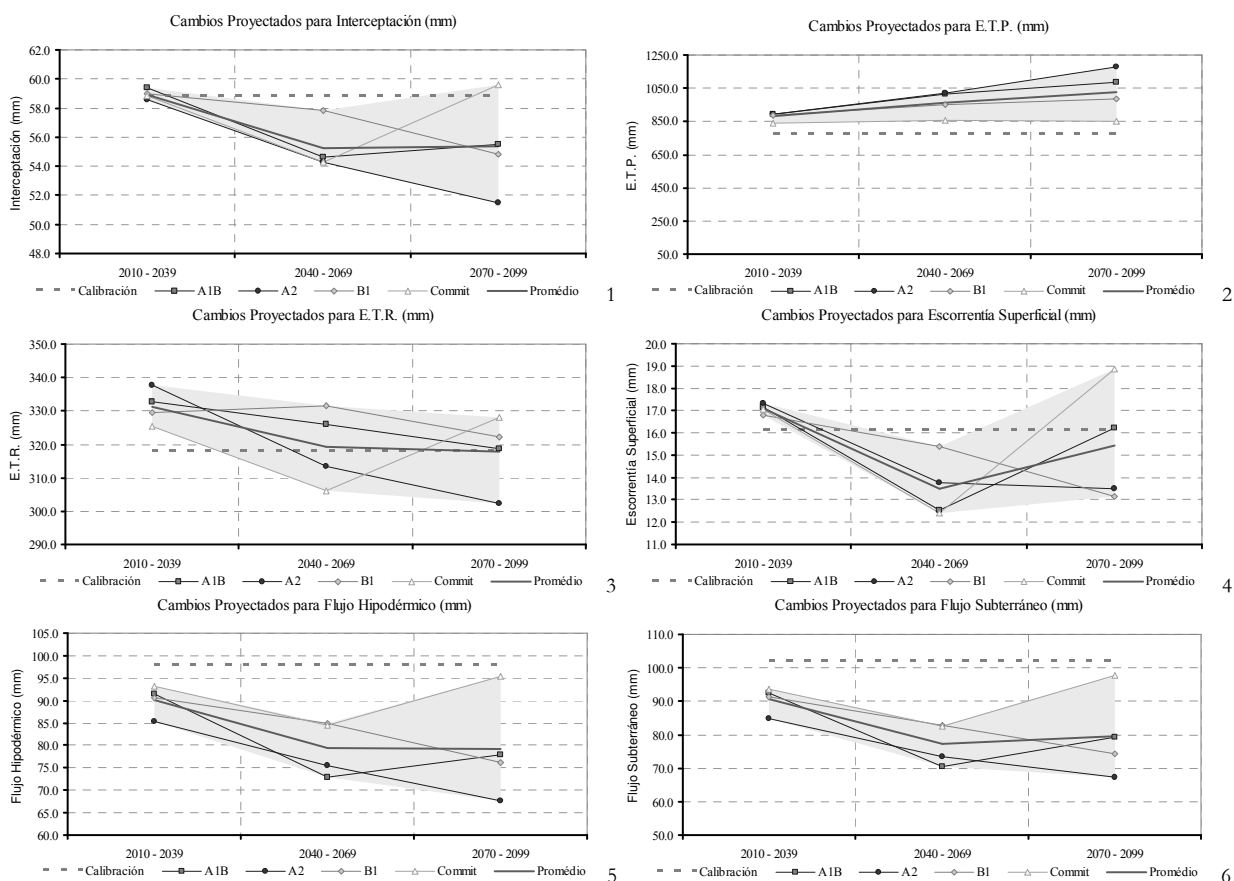


Figura 4. Proyecciones de los impactos del cambio climático en la cuenca del Ebro para 4 escenarios y 3 periodos de simulación..

El caudal total es la suma de la escorrentía superficial, el flujo hipodérmico y el subterráneo. La escorrentía superficial es pequeña comparada con las otras dos componentes, aproximadamente del 7%. Por tanto, los efectos del cambio climático son los producidos en el flujo hipodérmico y el subterráneo.

En el periodo de calibración se ha estimado una aportación media anual del Ebro de 18 447 hm<sup>3</sup>/año. Para cada periodo de simulación se han calculado unos valores medios de 16 713, 14 391 y 14 728 hm<sup>3</sup>/año, lo que equivale a una disminución de 9.4%, 22.0% y 20.2%, respectivamente. El escenario A2 resulta en las peores predicciones con reducciones de 14.1, 25.5 y 32.1% en los distintos periodos de simulación junto con el escenario A1B que predice una reducción de 28.5% para 2040-2069. El escenario Commit conduce a los menores impactos con reducciones de 6.6, 17.8 y 2.9% juntamente con el escenario B1 entre 2040-2069 con una reducción de 16.1%.

Se observa una uniformidad en los tres periodos de simulación en lo relativo a los datos mensuales. A partir de 2040-2069, los escenarios A1B y A2 conducen a los resultados más pesimistas mientras que los restantes escenarios, especialmente el Commit, conducen a valores más próximos a los actuales (Figura 5). Los meses de diciembre a febrero registran pequeños aumentos de caudal total de 4.8%, 0.6% y 4.7% para cada periodo de simulación. En el resto de las estaciones del año se producen reducciones de caudal que en primavera, verano y otoño registran las siguientes reducciones: 18.8%, 9.8% y 12.9% entre 2010-2039; 26.7%, 37.9% y 32.2% entre 2040-2069 y 24.8%, 43.5% y 27.6% entre 2070-2099.

La distribución espacial de los cambios en el caudal total presenta disminuciones más acentuadas en La Rioja, Navarra y Zaragoza, en la provincia de Soria y en las zonas al sur de Lérida, norte de Tarragona, Guadalajara y el oeste de Teruel. Los cambios más intensos alcanzan reducciones del 35%, 64% y 75% para cada periodo de simulación. Por otro lado, en las zonas oeste y este de Zaragoza y este de Teruel, se observan los resultados más positivos ya que se calculan incrementos de hasta 63%, 11% y 18% respectivamente.

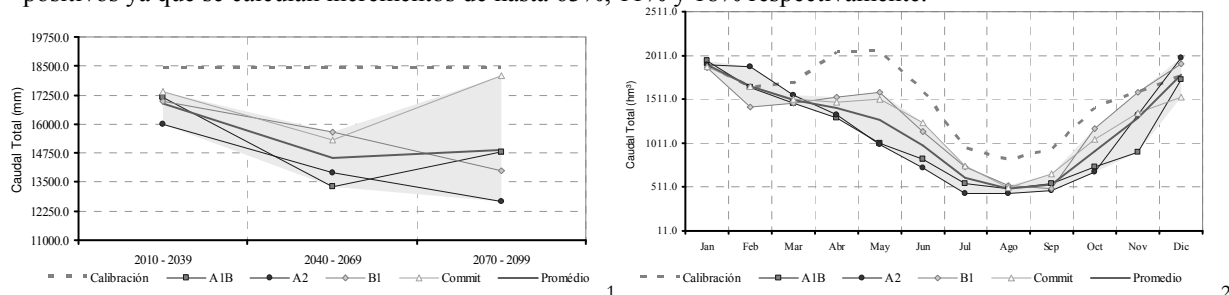


Figura 5. Impactos en el caudal total: 1) gráfico con los resúmenes de los cambios (en mm) por periodo y por escenario y 2) resultados mensuales de las proyecciones para el periodo 2070-2099.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha presentado la evaluación del efecto del cambio climático en los recursos hídricos del conjunto de la cuenca hidrográfica del Ebro mediante un modelo hidrológico semidistribuido con el código GIS-BALAN. Se han calculado los impactos del cambio climático en los recursos hídricos para los periodos de simulación comprendidos entre 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099. Se han empleado los datos del modelo CGCM3 para los escenarios A1B, A2, B1 y Commit del IPCC.

Se observa una disminución en las precipitaciones de un 1.9%, 8.6% y 7.9% para los periodos 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099. Las proyecciones de temperatura en el Ebro indican un aumento medio de 1.2°C, 2.2°C y 3.0°C en los citados periodos, respectivamente. Las predicciones del modelo indican una disminución de todas las componentes de la escorrentía. La reducción media del caudal del Ebro se estima en 9.4%, 22.0% y 20.2% en los mismos periodos. Los meses de diciembre a febrero registran pequeños aumentos de caudal total de 4.8%, 0.6% y 4.7% mientras que en el resto de las estaciones del año se producen reducciones de caudal que son especialmente importantes en verano (9.8%, 37.9% y 43.5%).

Las estimaciones de los efectos del cambio climático llevan asociadas incertidumbres. En la comunidad académica se cuestiona el propio concepto de cambio climático además de los impactos de la actividad del hombre como catalizador de estos cambios. La estimación de los efectos mediante los modelos de circulación

global también comporta muchas incertidumbres debido a la representación numérica de los fenómenos climatológicos y también a la definición de los escenarios empleados, basados en proyecciones de una sociedad global futura. Los resultados de los MCG son mensuales y para grandes celdas (cerca de 300 km). Estos resultados se trasladan a la escala de la cuenca de estudio mediante técnicas de reducción de escala. Además hay incertidumbres asociadas a la modelización del balance hidrológico. A pesar de todo, este es el mejor medio de estimar los impactos del cambio climático en los recursos hídricos. En la actualidad se están obteniendo nuevas evidencias del calentamiento global y de la participación del hombre en este proceso. Se está desarrollando una nueva generación de modelos de circulación global con una mayor resolución temporal y espacial. Las técnicas de teledetección, la mayor disponibilidad de datos y parámetros distribuidos espacialmente y el desarrollo de modelos hidrológicos distribuidos (como GIS-BALAN), permitirán reducir las incertidumbres de los modelos.

*Acknowledgments.* Este trabajo ha sido financiado con el proyecto CICYT REN2003-8882 y un proyecto de la Confederación Hidrográfica del Ebro (referencia 2000-PH17-1). Agradecemos a Santiago Moreira Martínez su colaboración en el desarrollo de GENBALAN y a todos que han contribuido a las mejoras del código BALAN.

## REFERENCIAS

- CHE (2005). Confederación Hidrográfica del Ebro Caracterización de la demarcación y registro de zonas protegidas. Implantación de la DMA. Ministerio de Medio Ambiente.
- Espinha Marques J., J. Samper, B. Pisani, D. Alvares, J. M. Carvalho, H. I. Chaminé, J. M. Marques, G. T. Vieira, C. Mora, F. Sodré Borges, (2009) Evaluation of water resources in a high-mountain basin in Serra da Estrela, Central Portugal, using a semi-distributed hydrological model, *Environmental Geology* (submitted).
- Johnson, G.L., Daly, C., Taylor, G.H., Hanson, C.L., (1999). Spatial Variability and Interpolation of Stochastic Weather Simulation Model Parameters. *Journal of Applied Meteorology* Vol 39, 778-797.
- Koka, S. (2004) Integration of Stream and Watershed Data for Hydrologic Modeling. MsC Thesis in Civil Engineering. Texas University
- MMA (2000). Ministerio del Medio Ambiente. Anteproyecto del Plan Hidrológico Nacional – Análisis de los sistemas Hidráulicos. España.
- Racsko, P., Szeidl, L., Semenov, M., (1991). A serial approach to local stochastic weather models. *Ecology Modelling* 57:27–41
- Richardson, C. W., (1981). Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources Research* 17:182–190.
- Samper J. (1997) Métodos de evaluación de la recarga por la lluvia por balance de agua: Utilización, calibración y errores, En: Seminario sobre La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica, Las Palmas de Gran Canaria. Ed. ITGE 41-81.
- Samper, J., Huguet, LL., 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”. Technical Publication ENRESA. 5/99, Madrid.
- Samper, J., M. A. G. Vera, B. P. Veiga, D. Álvarez, 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.. VII Jornadas de Investigación en la Zona No Saturada del Suelo. Coruña, 269-274. 2005. ISBN: 84-9749-171-8.
- Samper, J., M.A. G. Vera, B. Pisani, Varela, A., Losada, J. A., Álvarez, D. 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*. 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 Research* 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 Research* Vol. 11: 209–220.
- Weichert, A., Bürger, G., (1998). Linear versus nonlinear techniques in downscaling. *Climate Research* Vol. 10. 83-93.
- Wilby, R. L., Dawson, C. W., Barrow, E.M., (2002). SDSM- A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software* 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. *Agricultural and Forest Meteorology* 135. 215–229.