

EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE MODELIZACIÓN SEMI- DISTRIBUÍDA CON GIS-BALAN

D. Álvares y J. Samper

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: dalvares@udc.es; jsamper@udc.es;

Palabras clave: Modelo hidrológico semi-distribuido, cuenca del Ebro, GIS-BALAN

RESUMEN. *La cuenca del Ebro en sus 85 530 km² de superficie presenta una gran heterogeneidad en su topografía y climatología. La precipitación anual varía entre 261 y 2 187 mm. La temperatura media varía entre 5.6 °C y 15.8 °C. La altitud máxima es de 3 372 m. Se encuentra marcadamente afectada por las operaciones de embalses e intensa demanda de agua. Se ha desarrollado un modelo hidrológico semi-distribuido de toda la cuenca con el código GIS-BALAN. La cuenca se ha dividido en 40 subcuencas y 1.066 zonas homogéneas. Se ha realizado la interpolación de los datos climatológicos y se ha elaborado un submodelo de cálculo de la demanda de agua. Los parámetros del modelo se han calibrado mediante algoritmos genéticos. Se ha logrado un excelente ajuste del modelo tanto a escala anual como mensual y diaria. El modelo proporciona la distribución espacio-temporal de las componentes hidrológicas del balance en cada una de las zonas homogéneas. Estos resultados ponen de manifiesto las extraordinarias capacidades que ofrece GIS-BALAN como herramienta de modelización hidrológica para la planificación y gestión del agua para los organismos de cuenca.*

ABSTRACT. *The Ebre River basin has a large variability in topography and climatology. The surface area is 85 530 km² and the annual precipitation ranges from 261 to 2 187 mm. The average temperature varies between 5.6°C and 15.8°C. The maximum altitude is 3 372 m. The hydrology of the basin is highly affected by reservoir operations and intense water use. Water resources of the Ebre River basin have been evaluated with a semi-distributed hydrologic model using GIS-BALAN. The model includes 40 subbasins and 1 066 homogeneous zones. Climatologic data and water demands were interpolated for each homogeneous zone. Model parameters were estimated using efficient genetic algorithms. The model fit is excellent for annual, monthly and even daily data. GIS-BALAN provides spatial and temporal results of hydrological components for each homogeneous zone. These results illustrate the extraordinary capabilities that GIS-BALAN offers as a hydrologic modelling tool for water planning and management.*

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del Ebro está ubicada en el noreste de la Península Ibérica. Es la mayor cuenca hidrográfica de España, con una superficie de 85 530 km² que equivale al 17% de la superficie total del país. La cuenca del Ebro presenta una gran heterogeneidad en su topografía y climatología. La precipitación anual media varía entre 2 187.5 mm en los Pirineos y apenas 261.2 mm en las zonas áridas. La temperatura media anual varía entre 5.6 y 15.8 °C. La altitud varía entre cero, en la costa mediterránea, y los 3 372 m, el punto más alto de España en Esera. La hidrología de la cuenca está fuertemente afectada por los numerosos embalses que en la actualidad tienen una capacidad de almacenamiento total de 8.360 hm³ (con un rango de variación intraanual de 2.000 hm³) así como por los considerables usos de agua para el abastecimiento urbano e industrial, centrales hidroeléctricas y nucleares y, especialmente, para el riego de 800.000 ha. Este último uso de agua representa cerca del 80% de los 6.300 hm³/año de consumos netos en toda la cuenca del Ebro. El objetivo de este trabajo es evaluar los recursos hídricos de la Cuenca del Ebro estimando sus principales componentes hidrológicas mediante un

modelo hidrológico semi-distribuido de toda la cuenca con el código GIS-BALAN.

2. EL CÓDIGO GIS BALAN

El código GIS-BALAN se desarrolló a partir de un código hidrológico agregado BALAN para estimar la recarga de acuíferos (Samper, 1997; Samper y García-Vera 2004). Este código resuelve las ecuaciones de balance en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el acuífero. El código GIS-BALAN se comenzó a desarrollar en 2005 y marcó la transición de BALAN a la modelización hidrológica distribuida en la que además se añadieron importantes avances en la estimación automática con algoritmos genéticos y herramientas para la reducción de escala de las proyecciones del cambio climático y la evaluación de sus impactos en los recursos hídricos. GIS-BALAN resuelve el balance hidrológico de manera secuencial en cada una de las tres zonas. Los principales aspectos de este balance son las entradas de la precipitación, riego y fusión de la nieve, las salidas por interceptación, escorrentía superficial, evapotranspiración, flujo hipodérmico, flujo subterráneo y la variación en el contenido de humedad del suelo y del nivel piezométrico (Figura 1). Algunas de sus aplicaciones más recientes se muestran en Samper *et al.* (2007) y Espinha *et al.* (2009).

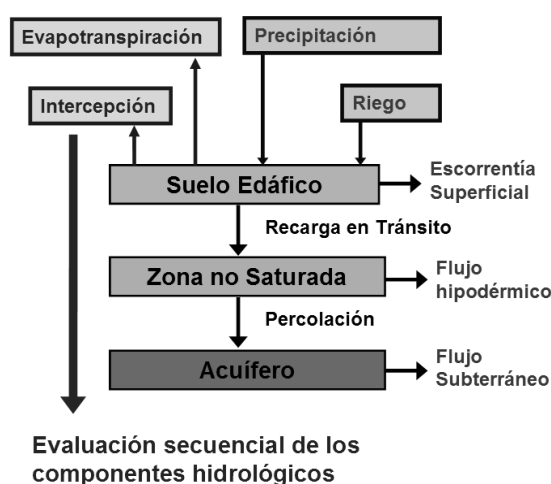


Figura 1. Esquema de los principales componentes hidrológicos.

2.1 Zona no saturada

El modelo conceptual de flujo en la zona no saturada (ZNS) incorporado en GIS-BALAN supone que hay una entrada de agua que proviene de la recarga en tránsito y el agua puede fluir horizontalmente y descargar hacia la atmósfera como interflujo (flujo hipodérmico) o bien percolar verticalmente hacia el acuífero como recarga (percolación). Para el cálculo de la percolación se usa una formulación de la Ley de Darcy que tiene en cuenta la presencia de acuíferos colgados. Los caudales de interflujo (Q_h) y de percolación (Q_p) se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$Q_h = \alpha_h V_h \quad (1)$$

$$Q_p = K_v + \alpha_p V_h \quad (2)$$

donde V_h es el volumen de agua por unidad de superficie almacenado en la ZNS, α_h y α_p son los coeficientes de agotamiento del interflujo y de la percolación, respectivamente y K_v es la conductividad hidráulica vertical saturada.

3.3 Definición de zonas homogéneas

Cada una de las subcuencas seleccionadas se ha dividido en zonas homogéneas (ZH) teniendo en cuenta la morfología del terreno, la conectividad de los cauces y la variabilidad espacial de los datos. Para ello, se han obtenido las curvas de nivel, las isoyetas e isotermas así como las áreas de drenajes más relevantes dentro de cada subcuenca. El proceso de definición de las ZH es automático con eventuales ajustes manuales. Se han definido 1.066 ZH en toda la cuenca del Ebro, con un promedio de 27 por subcuenca.

3.4 Datos climatológicos disponibles

Se han empleados los datos proporcionados por la Confederación Hidrológica del Ebro (CHEBRO) de 1.773 estaciones climatológicas con datos de precipitación y de 696 con datos de temperaturas máximas y mínimas diarias (datos de dominio público). Las series disponibles tienen períodos de registro variables desde el principio del siglo XX hasta la actualidad. Se han interpolado los datos climatológicos con el pre-procesador de GIS-BALAN para cada una de las zonas homogéneas empleando el método del cuadrado del inverso de la distancia.

Considerando el período de referencia establecido (comprendido entre 1970 y 1999) los cálculos de la interpolación de lluvia en el Ebro han resultado en una precipitación media anual igual a 597.7 mm. Los valores medios anuales oscilan entre 261.2 mm en la subcuenca del Ebro en Mequinenza y 2 187.5 mm en la subcuenca del Irati. La distribución espacial de la precipitación muestra claras tendencias de norte a sur y de oeste a este, con máximas registradas en los Pirineos y mínimas en el Bajo Ebro. Para el mismo período de referencia las temperaturas medias anuales varían entre 5.6 °C en el Cinca y 15.8 °C en Tortosa. La media anual en el conjunto de la cuenca es de 12.6 °C. Existe una tendencia en el aumento de las temperaturas desde los límites de la cuenca a lo largo del cauce principal de oeste a este.

3.5 Usos del agua y alteración del régimen natural

La utilización de los recursos hídricos de la cuenca del Ebro es muy intensa. Se estima que la demanda de agua es del orden de 50 000 hm³/año, es decir, aproximadamente tres veces el volumen del Ebro para el mismo período. El caudal destinado a uso hidroeléctrico es de 38 000 hm³/año (CHE, 2005) y otros 3 100 hm³/año se destinan a la refrigeración de 3 centrales térmicas, 4 de ciclo combinado y 2 nucleares. La demanda total de agua para el abastecimiento de las poblaciones situadas en el ámbito de la cuenca del Ebro, las cuencas internas de Cataluña y la zona Vasco-Cantábrica, es de 506 hm³/año (equivalente al 1% del total de la demanda). La industria no conectada a la red principal de abastecimiento demanda 250 hm³/año. Finalmente, la agricultura, la ganadería y la acuicultura demandan 7 310 hm³/año.

De acuerdo con los datos proporcionados por la CHEBRO (CHE, 2005), en la cuenca existen 234 embalses de los cuales 105 tienen capacidad de almacenamiento inferior al hm³, 116 no superan los 250 hm³ y 10 alcanzan los 500 hm³. Los embalses del Ebro (540 hm³), Canelles (680 hm³) y Mequinenza con sus 1 533 hm³ representan el 33 % de la capacidad total de almacenamiento que en la actualidad totaliza 8.360 hm³ (MMA, 2000).

A efectos del balance los embalses y su explotación afectan el régimen natural de los cauces. La variabilidad intraanual de los caudales se suaviza, suavizándose también los picos de las avenidas y los períodos de sequías debido a la regulación del sistema. Por tanto, los hidrogramas de caudales actuales de las subcuencas que tienen grandes embalses difieren mucho de los correspondientes al régimen natural.

La demanda por regadío se ha estimado la evolución del consumo mensual y anual del agua para cada una de las subcuencas. Esta estimación se ha basado en mapas de superficies de regadíos y en datos de consumo neto anual, demanda por sistema de explotación y distribución mensual con la correspondiente tasa de retorno disponibles en el Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro (PHE) y el Plan Hidrológico Nacional (PHN).

Como punto de partida, se ha calculado mediante análisis espacial, la participación en área de cada sistema de explotación en cada subcuenca del modelo. Una vez obtenida esta composición, se asignaron los correspondientes volúmenes de consumo anual, distribución mensual y tasa de retorno de las demandas, tomando el año 1996 como año de referencia. Las series anuales de consumo por subcuencas se obtuvieron considerando el promedio de las estimaciones del PHE y del PHN. Estos valores se dividieron de acuerdo con los respectivos coeficientes mensuales y luego se desagregaron linealmente a escala diaria.

3.6 Calibración

El modelo de la cuenca del Ebro totaliza 40 subcuencas y 1.066 zonas homogéneas. Se ha calculado con GIS-BALAN el balance hídrico diario en cada una de las zonas homogéneas y a continuación se integran los resultados en cada subcuenca.

Los parámetros de cada una de las subcuencas del modelo se calibraron empleando algoritmos genéticos y en algunos casos mediante ajustes manuales a partir de análisis de sensibilidad (Figura 2). El período de calibración es el comprendido entre 1940 y 1999. Los valores obtenidos en esta etapa se han asignado a las respectivas zonas homogéneas de las subcuencas modelizadas.

Se ha empleado el coeficiente de eficiencia del modelo Nash-Sutcliffe (NS) como función de evaluación de la modelación inversa. La formulación de NS se expresa por:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{simi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3)$$

donde Q_{obs} es el caudal medido y Q_{sim} es el caudal estimado por el modelo.

El módulo de calibración de GIS-BALAN ha calculado automáticamente un promedio de 15.000 simulaciones por subcuenca. Para el periodo de calibración establecido, cada simulación consiste en el cálculo diario del balance hidrológico en cada zona homogénea considerando un determinado conjunto de parámetros, la integración de los resultados por subcuenca y la correspondiente evaluación del grado de ajuste del modelo a los datos de las aportaciones medidas a escala anual, mensual y diaria.

Los valores del coeficiente NS para las series anuales y mensuales son de 0.83 y de 0.79 respectivamente, lo que indica un excelente ajuste del modelo. La calibración del modelo mediante algoritmos genéticos ha demostrado ser un proceso eficiente, de rápida convergencia y de bajo coste computacional. Se observa que se ha logrado obtener un modelo igualmente bueno desde el principio hasta el final del periodo de calibración.

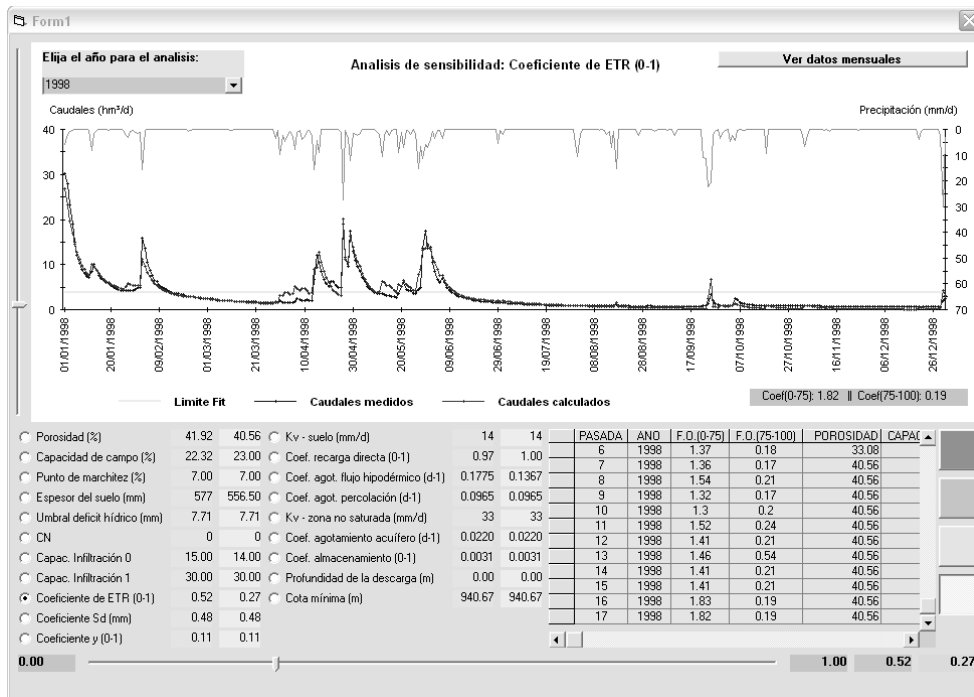


Figura 2. Pantalla del procesador con los resultados del análisis de sensibilidad.

4. RESULTADOS DEL BALANCE

Una vez calibrados los parámetros del modelo para cada una de las subcuencas, el tiempo de cálculo para la realización del balance en toda la cuenca del Ebro para el periodo comprendido entre 1940 y 1999 es de aproximadamente 15 minutos en un PC Core 2 Duo de procesador Intel T7300 2.0 GHz y 2.0 GB de memoria RAM.

La Figura 3 muestra los resultados anuales del balance para el periodo de referencia. Los datos medidos corresponden a la estación de aforos del Ebro en Tortosa, último punto de aforo con series de caudales suficientemente largas con datos fiables registrados desde 1955 hasta la actualidad.

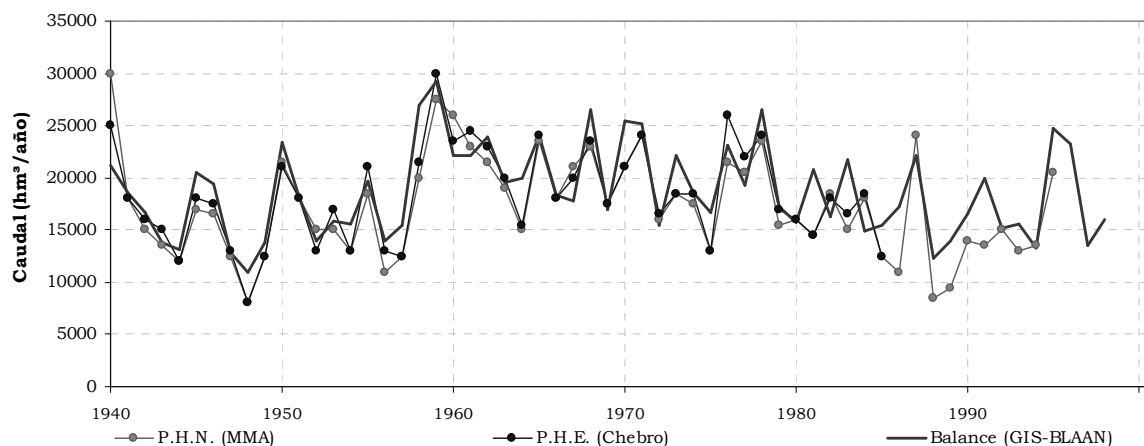


Figura 3. Comparación entre los caudales anuales restituídos con el modelo de la cuenca del Ebro calculado con GIS-BALAN y con los presentados en el PHE y el PHN.

A pesar de las simplificaciones adoptadas para la estimación de la demanda de agua, la comparación entre los caudales restituídos con los obtenidos en el PHN y el PHE muestra una alta consistencia.

A pesar de que se ha calibrado el modelo poniendo más atención a los primeros años del balance, los resultados mensuales son muy buenos en todo el periodo. En la Figura 4 se observa un ajuste excelente en los primeros 25 años en los que logra reproducir tanto los caudales de los meses lluviosos como los de los meses de verano.

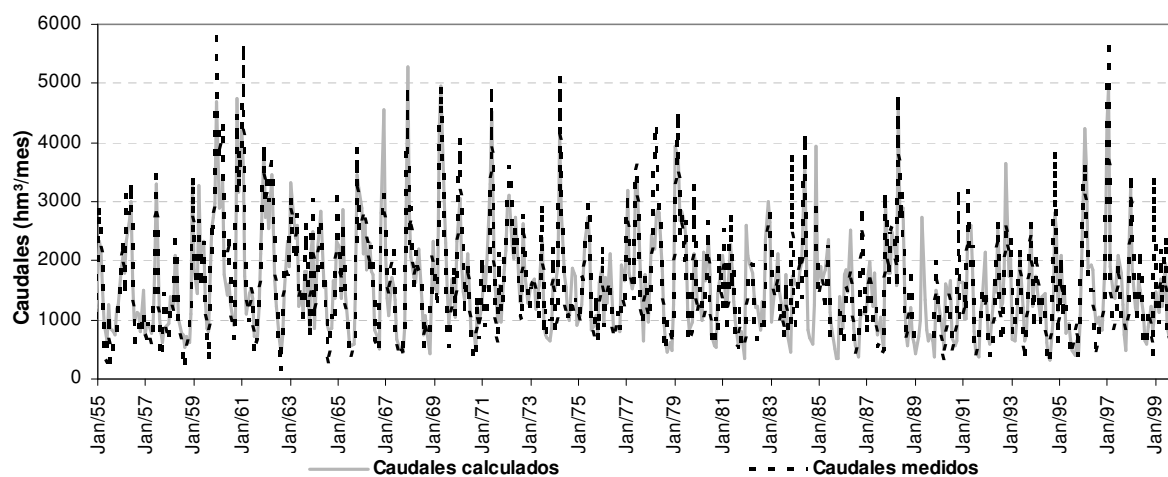


Figura 4. Caudales mensuales medidos y calculados del río Ebro en Tortosa (1955 – 1999).

Los meses entre diciembre y mayo corresponden a unos 11 000 hm³, el equivalente al 60% del total anual, mientras que en los meses de verano el caudal total es de unos 2 700 hm³, cerca del 14.5%. La Figura 5 presenta la distribución espacial de los caudales totales acumulados en la cuenca del Ebro. Además del propio río Ebro (18 447.5 hm³/año) se observa la importancia de los ríos Cinca y Segre con 3.565 hm³/año (19.3 %) y 3 731.9 hm³/año (20.2 %), respectivamente.

La Tabla 1 muestra los resultados de las componentes del balance desglosado para cada una de las márgenes, izquierda y derecha. La margen izquierda a su vez se ha dividido en dos partes: Zona 1 que comprende las subcuencas del Nela hasta el Aragón; y la Zona 2 que comprende las subcuencas del Gallego hasta el Segre. En la margen derecha se consideran dos partes: la Zona 1 comprende desde el Oca hasta el Jalón y la Zona 2 incluye las subcuencas del Martín hasta la del Algas.

La margen izquierda representa el 42 % del área de la cuenca pero aporta el 75 % del caudal del Ebro. La segunda zona de esta margen genera más de la mitad del flujo subterráneo de todo el sistema. La margen derecha, con el 23 % del área total, aporta 1.500 hm³ anuales equivalente a un 8 % del total. Finalmente, las áreas vertientes directamente al Ebro adoptadas en el modelo suman el 35 % del total de la cuenca y generan el 17 % del caudal total

Tabla 1. Áreas de contribución y caudales calculados (1940 – 1999) de los tramos seleccionados de la cuenca del Ebro.

Zona	Total	Ebro		Margen izquierda (%)		Margen derecha (%)	
		-	%	Zona 1	Zona 2	Zona 1	Zona 2
Área (km ²)	84 234.3	29 268	34.7	13.7	28.4	4.0	19.1
Escorrentía superficial (hm ³)	1 332.7	135.0	10.1	51.3	30.6	3.7	4.3
Flujo hipodérmico (hm ³)	8 486.5	1 654	19.5	37.9	34.9	5.6	2.2
Flujo subterráneo (hm ³)	8 628.2	1 392	16.1	19.6	55.7	4.1	4.4

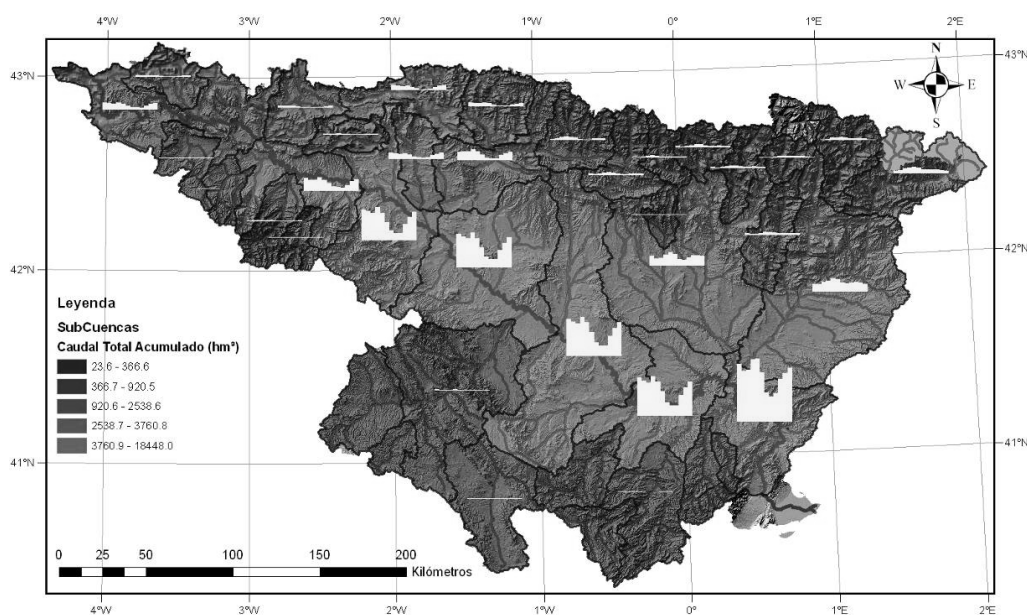


Figura 5. Resultados del caudal total acumulado en diferentes puntos de la cuenca del Ebro (hm³).

5. CONCLUSIONES

Se ha logrado el objetivo de este trabajo, la estimación de las principales componentes de los recursos hídricos de la cuenca del Ebro. Para eso se ha desarrollado un modelo hidrológico semi-distribuido de toda la cuenca con el código GIS-BALAN. La cuenca se ha dividido en 40 subcuencas y 1066 zonas homogéneas. Los parámetros del modelo se han calibrado mediante algoritmos genéticos, habiéndose conseguido un excelente ajuste del modelo tanto a escala anual como mensual y diaria.

Los datos del modelo, en escala anual, mensual e incluso diarios permiten una mejor comprensión de la dinámica hídrica de la cuenca. Se ha estimado que apenas 36% del total precipitado se convierte en algún tipo de aportación y que la recarga representa el 93% de este total. Además, se ha estimado que esta componente se divide entre los flujos hipodérmicos y subterráneos en proporciones muy similares (respectivamente 49% e 51%). Entre los meses de febrero y abril, como respuesta a las precipitaciones más intensas de los meses de invierno, el flujo hipodérmico corresponde a 53% del caudal total frente a los 43% del flujo subterráneo. Por otro lado, entre los meses junio y septiembre, debido a los efectos del verano, el flujo hipodérmico corresponde a apenas 30% del total mientras que el flujo subterráneo representa los 61%.

Con lo que se ha presentado, los resultados ponen de manifiesto que GIS-BALAN es una potente herramienta de modelización hidrológica que puede ser muy útil para la toma de decisiones por parte de los organismos de las cuencas hidrológicas.

Acknowledgments. Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CICYT REN2003-8882. Una gran parte de las mejoras de GIS-BALAN se ha hecho en el marco de un proyecto conjunto entre la Confederación Hidrográfica del Ebro y la Universidad de La Coruña (referencia 2000-PH17-I). 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. Sodrê 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).
- MMA (2000). Ministerio del Medio Ambiente. Anteproyecto del Plan Hidrológico Nacional – Análisis de los sistemas Hidráulicos. España.
- 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, García-Vera M A (2004) VISUAL-BALAN, un modelo interactivo de balance hidrológico: estado actual y desarrollos futuros In: VIII Simposio de hidrogeología. Zaragoza; 595-604.
- 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, 205 pp.
- 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. García-Vera, B. Pisani, Varela, A., Losada, J. A., Álvarez, 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.
- Samper J., Álvarez D. (2008) Evaluation of climate change impacts on water resources of Ebre River Basin with GIS-BALAN. XVII International Conference on Computational Methods in Water Resources (CMWR 2008). San Francisco, California, USA.