

GIS-BALAN: UN MODELO HIDROLÓGICO SEMI-DISTRIBUIDO ACOPLADO A UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

J. Samper¹, B. Pisani¹, D. Alvares¹, M.A. García²

¹ Escuela de Caminos, Universidade da Coruña, Campus Elviña, 15192 Coruña, España, e-mail: jsamper@udc.es

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

RESUMEN. GIS-BALAN es un modelo hidrológico semi-distribuido ampliamente utilizado como herramienta para la evaluación de los recursos hídricos, que se ha acoplado a un SIG. GIS-BALAN resuelve el balance hidrológico en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el acuífero evaluando secuencialmente las componentes. Respecto a su predecesor VISUAL BALAN v2, GIS-BALAN funciona sobre una plataforma SIG y permite discretizar las subcuencas en zonas más pequeñas en las que se pueden considerar parámetros constantes. Además, se ha añadido un módulo para el cálculo del tránsito superficial y se han mejorado los cálculos del balance en la zona no saturada y en el acuífero. Para su programación se ha seguido la filosofía de la programación orientada a objetos, obteniéndose como resultado un código claro, flexible y escalable. En este trabajo se describen sus principales características ilustrando su aplicación a una pequeña cuenca en la llanura aluvial del río Guadalquivir en Andújar (Jaén).

ABSTRACT. GIS-BALAN is a semi-distributed hydrological model for water resources assessment, developed by the Hydrology Group of University of A Coruña, which has been coupled to a GIS (Geographic Information System). GIS-BALAN solves the water balance in the soil, the unsaturated zone and the aquifer calculating the components in a sequential manner. The most important improvements with respect to its predecessor – VISUAL BALAN v2 – are that GIS-BALAN runs over a GIS platform and allows to discretize sub-basins into smaller zones, where constant parameters can be adopted. Also, a module has been added to calculate surface runoff propagation and further improvements have been made in calculating the water balance in the unsaturated zone and the aquifer. The Object-Oriented philosophy has been followed for programming, obtaining as a result a clear, flexible and scalable code. Here we describe its main features and illustrate its application to a small basin in the alluvial plain of the Guadalquivir River in Andújar (Jaén).

1.- Introducción

La evaluación de los recursos hídricos requiere la realización de balances en las diferentes componentes del ciclo hidrológico. GIS-BALAN fue especialmente desarrollado para ello, aprovechando las posibilidades que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrecen para manejar grandes cantidades de información. Siguiendo recomendaciones de los organismos de cuenca, GIS-BALAN es de estructura modular y orientado a objetos, siendo así un código flexible y claro.

Samper et al. (2005, 2007) presentan la evolución de VISUAL BALAN – un modelo agregado ampliamente contrastado – hasta GIS-BALAN y describen aplicaciones del código a cuencas de la Península Ibérica y Latinoamérica. En este trabajo se presentan los desarrollos más recientes de actualización del modelo, especialmente los relacionados con el acoplamiento a un SIG y la orientación a objetos. Se presenta también la aplicación de GIS-BALAN a una pequeña cuenca en una llanura aluvial situada en Andújar, Jaén.

2.- Principales características de GIS-BALAN

GIS-BALAN evalúa los componentes hidrológicos en forma secuencial y realiza balances diarios de agua en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el acuífero (Samper et al., 2005, 2007).

La ecuación básica del balance en la zona de suelo se suele plantear entre dos tiempos t_i y t_f ($\Delta t = t_f - t_i$) y se compone de los siguientes términos:

$$P + D - In - Es - ETR - Pe = \Delta\theta \quad (1)$$

donde P es la precipitación, D es el agua de riego, In es la interceptación, Es es la escorrentía superficial, ETR es la evapotranspiración real, Pe es la recarga en tránsito (que coincide con la recarga al acuífero si no existen flujos laterales en la zona no saturada) y $\Delta\theta$ es la variación del contenido de humedad. Las componentes del balance se suelen expresar en términos de volumen de agua acumulados a lo largo del intervalo de tiempo Δt .

Para resolver el flujo en la zona no saturada el modelo dispone de dos opciones. En la primera se considera un modelo conceptual de flujo según el cual el agua puede fluir horizontalmente y descargar hacia la atmósfera como flujo

hipodérmico o percolar verticalmente hacia el acuífero alimentando a la recarga (percolación). Para el cálculo de la percolación se usa una formulación de la Ley de Darcy. En el balance en la zona no saturada hay una entrada que es la recarga en tránsito y dos salidas, el flujo hipodérmico y la percolación. Los caudales de flujo hipodérmico Q_h y de percolación Q_p se calculan mediante las siguientes expresiones (Samper et al., 2005):

$$Q_h = \alpha_h V_h \quad (2)$$

$$Q_p = K_v + \alpha_p V_h \quad (3)$$

siendo V_h el volumen de agua (por unidad de superficie) almacenada en la zona no saturada, α_h y α_p los coeficientes de agotamiento para flujo hipodérmico y percolación, respectivamente y K_v la conductividad hidráulica vertical saturada.

La segunda opción de GIS-BALAN para el cálculo del balance en la zona no saturada es la resolución de la ecuación de Richards en la dirección vertical, que se puede escribir de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} + S \quad (4)$$

donde θ es el contenido volumétrico de humedad, ψ la succión, t el tiempo, z la cota vertical, K la conductividad hidráulica vertical y S un término fuente/sumidero. La ecuación (4) se resuelve utilizando un esquema implícito en diferencias finitas. Hay que destacar que la ecuación (4) no considera flujo hipodérmico.

El código predecesor, VISUAL BALAN, permite realizar balances en múltiples subcuencas. Cada una de éstas constituye una unidad de balance independiente. En cada subcuenca, se calculan los balances en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el acuífero en forma secuencial (Espinha Marques et al., 2006; Samper y García Vera, 2004). La agregación de caudales se hace luego en cada subcuenca y posteriormente para el conjunto de las subcuencas si es que aportan a la misma estación foronómica. GIS-BALAN aprovecha la plataforma SIG y permite discretizar el terreno en unidades más pequeñas que una subcuenca: las Zonas Homogéneas (ZH). Este concepto puede encontrarse en otros modelos como el SWAT (Neitsch et al., 2002), o el Precipitation-Runoff Modeling System (Leavesley et al., 1983).

En cada ZH se supone uniformidad espacial de las características físicas, climatológicas y de uso de suelo. Se supone entonces único tipo y uso de suelo, pendiente, régimen de cultivo, riego, y también precipitación y evapotranspiración homogéneas. El balance de agua se calcula en cada ZH y la agregación de caudales para el tránsito superficial se hace en cada subcuenca. Además, se calculan balances de forma independiente en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el acuífero (Fig. 1).

Para el cálculo del balance se supone también que no hay interacción entre las zonas homogéneas. Por lo tanto el cálculo en una ZH es independiente del de la adyacente. La consideración de las ZH permite tener en cuenta las variaciones espaciales de los parámetros y de la climatología dentro de una subcuenca. Se ha comprobado que en muchos casos, las variaciones climatológicas dentro de una subcuenca influyen tanto o más en los resultados que las variaciones de los parámetros (Ajami et al., 2004).

Las componentes calculadas en cada ZH se agregan a nivel de la subcuenca, para calcular en ésta el tránsito superficial y obtener promedios de resultados. La transferencia de agua entre las subcuencas puede ocurrir de dos maneras: a) a través del cauce principal, y b) por flujo subterráneo.

Para el cálculo del tránsito superficial, GIS-BALAN incorpora el método de Muskingum-Cunge para cauces y el método de Puls para grandes cuerpos de agua.

El flujo hipodérmico (caudal efluente de la zona no saturada hacia la atmósfera) se calcula en cada ZH, se suma en la subcuenca, y se añade a las salidas superficiales. Por lo tanto, se incluye en el caudal de los cauces.

En la zona saturada los caudales y niveles se calculan mediante un modelo de flujo en diferencias finitas, o bien de manera simplificada considerando la división de las subcuencas en celdas. Si se elige la opción del modelo de flujo, entonces los límites de las cuencas superficiales y subterráneas pueden ser diferentes, como se muestra en la Fig. 1.

GIS-BALAN se compone básicamente de tres módulos: el preprocesador, el procesador y el postprocesador. En el procesador se efectúan los cálculos del balance hídrico y el tránsito superficial, mientras que el preprocesador y el postprocesador son los módulos que acoplan el modelo al SIG.

3.- El acoplamiento al SIG

El preprocesador es la interfaz de entrada de GIS-BALAN. Partiendo de un Modelo Digital del Terreno (MDT) y usando información geomorfológica almacenada en el SIG el preprocesador genera la información de entrada para el modelo como los límites de las subcuencas y las ZH, la red de drenaje, los parámetros geomorfológicos (pendientes, áreas, altitudes) y los tipos y usos del suelo. El SIG proporciona las características físicas de cada ZH, de modo que el procesador puede –a opción del usuario- consultar en su base de datos y asignar los valores de los parámetros iniciales más adecuados en la zona.

Los datos meteorológicos de distintas estaciones son introducidos en el preprocesador para obtener series de valores medios areales en cada ZH, permitiendo así tener en cuenta la variabilidad de la meteorología dentro de una subcuenca. La Tabla 1 muestra la información de entrada y salida que se obtiene del preprocesador, el procesador y el postprocesador.

El postprocesador de GIS-BALAN procesa los resultados del modelo hidrológico. A partir de los resultados diarios de las ZH, subcuencas y nodos de la red hidrográfica calculados

en el procesador, el postprocesador obtiene series mensuales, anuales y medias areales, y las muestra tanto en forma tabular como gráfica.

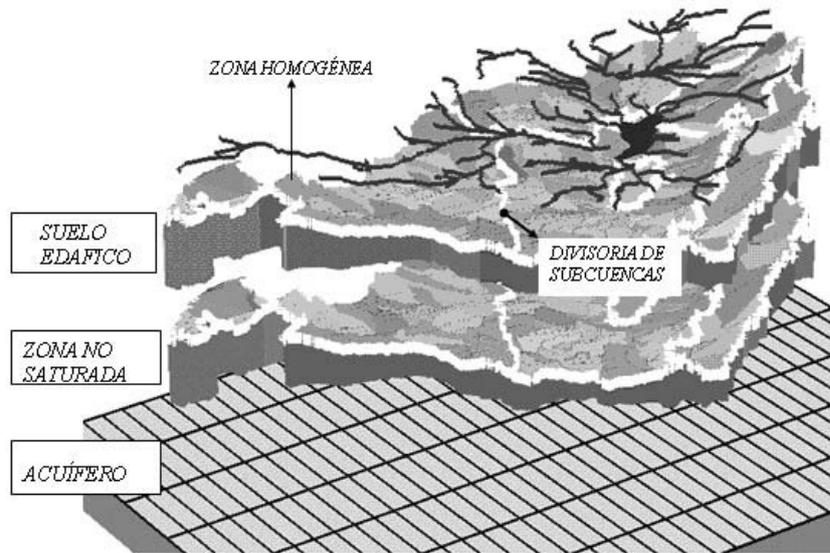


Fig. 1. Capas del subsuelo, subcuencas y zonas homogéneas en GIS-BALAN.

Tabla 1. Módulos componentes de GIS-BALAN y sus utilidades.

	ENTRADAS	SALIDAS
1. PREPROCESADOR		
a. Preproceso del terreno	MDT y mapa de rugosidad	Red hidrográfica, tiempos de tránsito, subcuencas y parámetros físicos
b. Introducción de mapas temáticos	Uso y tipo de suelo y geología	Trazado de ZH y almacenamiento de sus características
c. Series temporales georreferenciadas	Series temporales en estaciones meteorológicas y fonómicas, niveles piezométricos y dotaciones de riego	Series medias areales en las ZH
2. PROCESADOR		
a. Interfaces de opciones		
b. Estimación de parámetros	Características de ZH y subcuencas	Parámetros de ZH y cauces
c. Cálculo del balance	Series temporales, parámetros, opciones	Series de resultados diarios
3. POSTPROCESADOR		
	Resultados diarios	Resultados mensuales, anuales, promedios y gráficos de resultados vinculados al mapa

4.- GIS-BALAN: Un código orientado a objetos

En los últimos años se ha intentado que los códigos sean más flexibles, escalables y a la vez que representen mejor a las entidades de la realidad que modelizan. La programación orientada a objetos (POO) se ha consolidado desde hace ya años como una forma o metodología de programación para lograr esos objetivos. Una buena introducción a POO puede encontrarse en Eckel (2002). En POO hay dos conceptos básicos: objeto y clase. Por objeto se entiende una estructura con un estado, un comportamiento y una interfaz, teniendo límites definidos y con significado dentro de un sistema (Amescua et al., 2003; Ye et al., 1996). Una clase es una descripción de un conjunto de objetos que tienen las mismas propiedades (atributos que definen un estado), el mismo comportamiento (métodos u operaciones) y las mismas

relaciones con otros objetos (Amescua et al., 2003). Más sencillamente, se puede afirmar que una clase es una plantilla para crear objetos.

Los objetos principales de GIS-BALAN son los que representan a los elementos físicos que se modelizan: las subcuencas, las zonas homogéneas, los cauces, los embalses y las unidades hidrogeológicas. Cada uno de estos elementos –instancias de su clase– almacena sus características físicas y parámetros, e implementa funciones o métodos que son los cálculos propios de ese objeto. Así, por ejemplo, un objeto ZH calcula la ETP, ETR, infiltración y las demás componentes hidrológicas del balance en esa zona. La modularización en el cálculo de componentes hidrológicas fue necesaria para simplificar un código que considera unidades de análisis más pequeñas y más numerosas que las subcuencas. Además, se ha simplificado considerablemente la subrutina del balance principal, ya

que los parámetros y series temporales son manejados directamente por los objetos correspondientes con sus propias variables, ocultándolas al resto del programa. Esto permite modificar las clases en su funcionamiento interno sin alterar al programa principal, y a su vez modificar el programa principal sin riesgo de afectar al funcionamiento de la clase (Eckel, 2002). Además, pensando en futuras mejoras del modelo, las clases implementadas permiten crear otras subclases que permitirían cambiar el modelo conceptual. Por ejemplo, si se quisiera construir un modelo distribuido de celdas rectangulares, la clase Zona Homogénea es aprovechable para calcular las componentes hidrológicas, y también pueden serlo las clases que representan las subcuencas, los cauces, los embalses, y las unidades hidrogeológicas.

5.- Aplicación al aluvial de Andújar

Dentro de las actividades de clausura de la antigua fábrica de uranio de Andújar (FUA) se realizaron diversos estudios de la hidrología de la zona del entorno de dicha fábrica. De acuerdo con Samper et al. (2004), la recarga por infiltración de los excedentes de riego es la principal entrada de agua al acuífero aluvial sobre el que se ubica la FUA. La zona de estudio se encuentra en las terrazas fluviales del río Guadalquivir, dentro del meandro denominado “El Sotillo” (Fig. 2).

Los materiales aluviales del río Guadalquivir constituyen un acuífero que funciona en régimen libre en el que el flujo es fundamentalmente horizontal y con una circulación bastante rápida. La topografía del fondo del aluvial ejerce un control importante sobre el flujo en el acuífero. La fuerte variación espacial de espesores junto con las variaciones granulométricas a lo largo de la vertical se traducen en una fuerte heterogeneidad en el acuífero.

Se utilizó el código GIS-BALAN para calcular la recarga al acuífero en la zona de estudio. Dicha recarga sirvió de entrada a un modelo de flujo y transporte de solutos en el acuífero (Samper et al., 2004). El balance hidrológico se calculó entre 1983 y 2003. La Fig. 3 muestra un resumen de los principales datos meteorológicos de la zona del estudio.

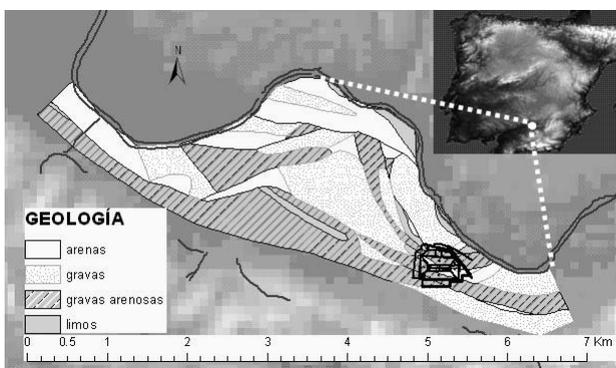


Fig. 2. Ubicación y marco geológico del aluvial de Andújar y situación de la FUA.

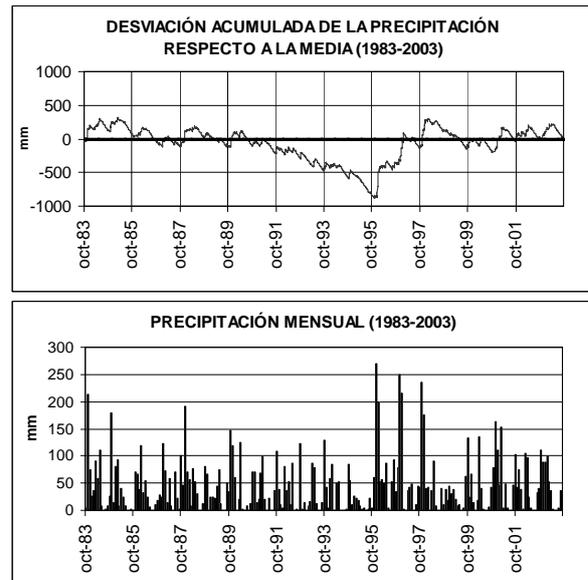


Fig. 3. Desviación acumulada de la precipitación respecto a la media y precipitación mensual en Andújar. Periodo 1983-2003.

La desviación acumulada de la precipitación respecto a la media muestra la secuencia de periodos secos y húmedos. Destaca en particular el periodo seco comprendido entre 1990 y 1995. También son notables las elevadas precipitaciones de los meses de diciembre de 1995 y noviembre de 1997 (entre 200 y 250 mm), que fueron además seguidas por meses muy lluviosos. Por ejemplo, la precipitación acumulada entre diciembre de 1995 y enero de 1996 es de 470 mm. Los efectos de estas abundantes precipitaciones pueden apreciarse en los ascensos de niveles registrados en dos piezómetros representativos de la cuenca (Figs. 8 y 9).

En la Fig. 4 se muestran las subcuencas en las que se dividió la zona del modelo (que son las diferentes zonas de riego) y también las ZH que consideradas en cada subcuenca. Esta división se realizó teniendo en cuenta la variación de la geología dentro de cada subcuenca. En la práctica, el mapa de ZH se obtuvo en GIS-BALAN superponiendo los mapas de subcuencas y el mapa geológico. El balance hidrometeorológico se calculó en cada una de las ZH.

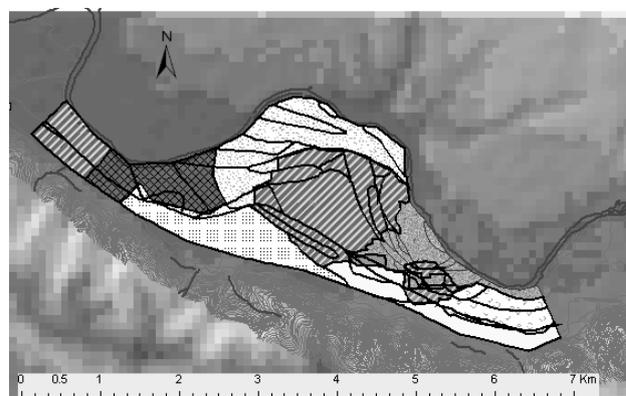


Fig. 4. Subcuencas y zonas homogéneas del modelo de Andújar.

En la Tabla 2 se muestran los valores medios anuales de las componentes del balance entre 1983 y 2003. Hay que destacar la importancia del riego por inundación (386 mm/año), que es casi comparable a la precipitación (542 mm/año).

En la Fig. 5 se muestra la recarga media anual al acuífero en las zonas de riego obtenida con GIS-BALAN.

La Fig. 6 muestra la ubicación general de pozos y sondeos del aluvial. En ella se señalan dos puntos con información piezométrica utilizados para la calibración del balance: el pozo P-430 y del sondeo S-611. El ajuste entre los niveles piezométricos medidos y calculados en ellos se presenta en las Figs. 7 y 8. La calibración del balance se efectuó utilizando los datos de los dos hidrogramas entre 1983 y 2003 y con el apoyo de los resultados del modelo de flujo construido con CORE (Samper et al., 2003). La recarga al acuífero obtenida con GIS-BALAN es un dato de entrada al modelo de flujo, por lo que el ajuste de niveles en este último permite calibrar la recarga en el balance hidrológico.

El ajuste de niveles es bastante bueno si se tiene en cuenta que se logran reproducir los ascensos de los episodios extraordinariamente lluviosos mencionados anteriormente (que se observan mejor en el gráfico de las precipitaciones mensuales de la Fig. 3). Para el cálculo de niveles en la subcuenca del S-611, se consideró un modelo de 6 celdas y se resolvió aplicando un método explícito en diferencias finitas. En la subcuenca del P-430 se consideró un acuífero multicelda de 5 celdas y se resolvió análogamente al del S-611.

Tabla 2. Resultados medios anuales del balance en Andújar entre 1983 y 2003.

	Media anual (mm)	Media anual (hm ³)
Precipitación	542	4.06
Dotación de riego	386	2.89
Recarga en tránsito	275	2.06
Flujo preferente	110	0.82
ETR	613	4.59
Escorrentía	39	0.29
Recarga al acuífero	253	1.89
Caudal subterráneo	244	1.82
Caudal total	283	2.12

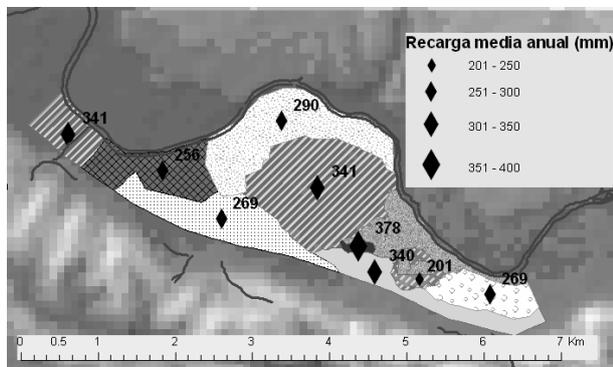


Fig. 5. Recarga media anual por zonas de riego en Andújar entre 1983 y 2003.

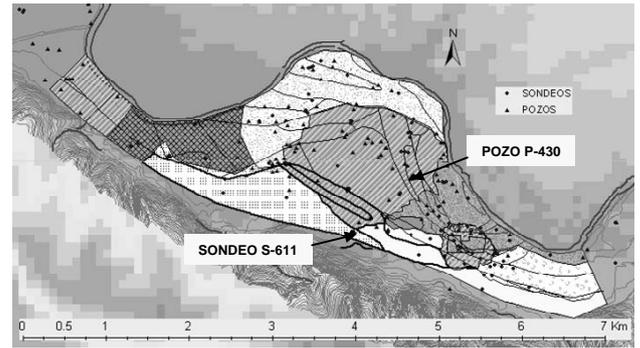


Fig. 6. Pozo P-430, Sondeo S-611 y situación general de otros pozos y sondeos en el aluvial de Andújar.

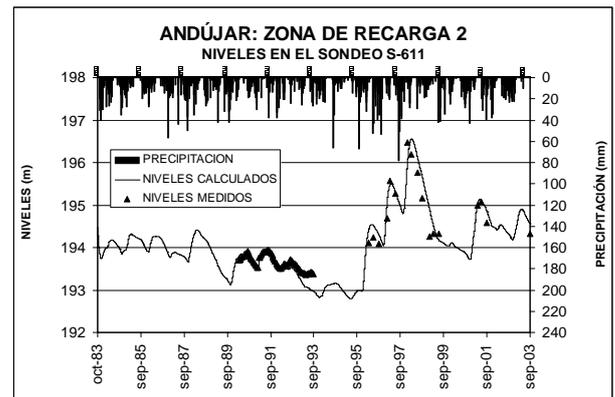


Fig. 7. Precipitación diaria y niveles piezométricos medidos y calculados con GIS-BALAN en el sondeo S-611.

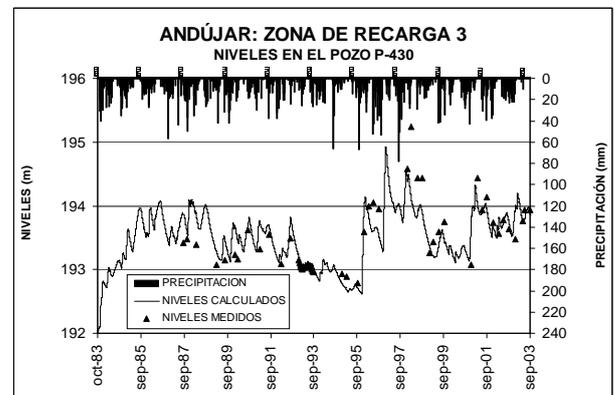


Fig. 8. Precipitación diaria y niveles piezométricos medidos y calculados con GIS-BALAN en el pozo P-430.

6.- Conclusiones

Se han presentado las principales características de GIS-BALAN y sus mejoras más recientes. Se trata de un código hidrológico semi-distribuido para la evaluación de los recursos hídricos en cuencas complejas, acoplado a una plataforma SIG. Se han descrito las diferencias y mejoras más importantes respecto a versiones anteriores del código BALAN. Se han mejorado sustancialmente los procesos de entrada de datos y postproceso de resultados y se ha

incorporado la modelización semi-distribuida. Se ha agregado además un módulo para el cálculo del tránsito superficial que utiliza el método de Muskingum-Cunge para cauces y el de Puls para grandes masas de agua.

Los nuevos desarrollos se han puesto de manifiesto en una cuenca en la llanura aluvial del río Guadalquivir en Andújar, Jaén. Se ha mostrado cómo se obtuvo la división de subcuencas en ZH a partir de la geología y de las zonas de riego. En cada ZH se calculó un balance hidrológico independiente, agregando posteriormente los resultados para cada subcuenca y para el conjunto de las subcuencas. La recarga al acuífero obtenida con GIS-BALAN ha sido utilizada como dato de entrada al modelo de flujo y transporte del aluvial, construido con CORE (Samper et al., 2003).

Los buenos resultados obtenidos en el ejemplo presentado muestran que el modelo conceptual utilizado puede ser apropiado para cuencas de pequeño tamaño. Esto mismo puede observarse en las aplicaciones presentadas en Espinha Marques et al. (2006), Samper y García Vera (2004) y Samper et al. (2005). La aplicación a cuencas de mediano y gran tamaño es el próximo paso que este grupo de trabajo ya ha comenzado y será objeto de otras publicaciones.

Está previsto que la próxima versión de GIS-BALAN incorpore mejoras en el módulo de estimación de parámetros iniciales, ampliando la base de datos e incluyendo información sobre las unidades hidrogeológicas españolas. También se está trabajando para hacer más amigable la interfaz del código.

Para el desarrollo de GIS-BALAN se ha utilizado la programación orientada a objetos que ha permitido obtener un código claro, flexible y escalable. Esta orientación a objetos facilitará su desarrollo y mantenimiento y eventualmente servirá como apoyo y guía para nuevos códigos que podrán utilizar las clases ya implementadas.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido financiado por un Proyecto de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (Proyecto REN2003-8882). El desarrollo de VISUAL BALAN fue financiado por la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA). Una gran parte de las mejoras de VISUAL BALAN v2.0 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 todos los que han contribuido a las mejoras del código.

Bibliografía

- Ajami, N., Gupta, H., Wagener, T. y Sorooshian, S. (2004). Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. *J. Hydrol.* 298. 112-135.
- Amescua, A., Cuadrado, J.J., Ernica, E., García, J., García, L., Martínez, P., Sánchez, M.I. (2003). *Análisis y Diseño Estructurado y Orientado a Objetos de Sistemas Informáticos*, McGraw-Hill.
- Eckel, B (2002). *Thinking in Java*, 3rd edition. Publicado por Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Espinha Marques, J., Samper, J., Pisani, B., Álvares, D., Vieira, G.T., Mora, C., Carvalho, J. M., Chaminé, H., Marques, J. y Sodrê Borges, F. (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.
- Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M. y Saindon, L.G. (1983). *Precipitation-runoff modeling system—User's manual*: U.S. Geol. Surv. Water Resour. Invest. Rep. 83-4238.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., y Williams, J. R. (2002). *Soil and Water Assessment Tool. User's manual*. Blackland Research & Extension Center, Texas Agricultural Experiment Station; Grassland, Soil And Water Research Laboratory, USDA, Agricultural Research Service, Texas.
- Samper, J. y García Vera, M.A. (2004). Visual-Balan, un modelo interactivo de balance hidrológico: estado actual y desarrollos futuros, En: VIII Simposio de Hidrogeología, Zaragoza, 18-22 octubre 2004, Vol. XXVI. 595-604.
- Samper, J., Yang, C. y Montenegro, L. (2003). User's manual of CORE2D version 4: A code for groundwater flow and reactive solute transport. Universidad de A Coruña, A Coruña, Spain.
- Samper, J., Yang, C., Pisani, B., Montenegro, L., Zheng, L. y Molinero, J. (2004). Actualización del modelo de flujo y transporte de Andújar. Informe para ENRESA. Universidad de A Coruña.
- Samper, J., García Vera, M.A., Pisani, B., Alvares, D., Varela, A., y Losada, J.A. (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., García Vera, M.A., Pisani, B., Alvares, D., Espinha Marques, J., Varela A., y Losada, J.A. (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).
- Ye, Z., Maidment, D. R. y McKinney, D. C. (1996). *Map-based surface and subsurface flow simulation models: An object-oriented and GIS approach*. CRWR Online Report 96-5. CENTER FOR RESEARCH IN WATER RESOURCES, Bureau of Engineering Research. The University of Texas at Austin. Austin.