

APLICACIÓN DEL MODELO *AnnAGNPS* A UNA CUENCA AGRÍCOLA DE RIEGO PARA EL ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA ESCORRENTÍA Y LOS CONTAMINANTES

A. Canatário¹, L. Mateos², E. Fereres^{2,3}

¹ E.S.A.C.B., Quinta da Sra. de Mércules, Apartado 119, 6001-909 Castelo Branco, Portugal, acduarte@esa.ipcb.pt.

² I.A.S., C.S.I.C., Finca Alameda del Obispo, Apartado de Correos 4084, 14080 Córdoba, España, aglmainl@uco.es.

³ Departamento de Agronomía, U.C.O., Campus Universitario de Rabanales, 14071 Córdoba, España, aglfecae@uco.es.

RESUMEN. Este estudio tiene como objetivo central la aplicación del modelo hidrológico y de contaminación difusa *AnnAGNPS* a una pequeña cuenca (189 ha), que tiene un uso mayoritario de agricultura de riego. La cuenca de estudio pertenece la *Zona Regable de la Campiña de Idanha* (Portugal). Los cultivos de riego son tabaco maíz y sorgo, y de secano avena. Hay además un área adhesionada que representa cerca de una tercera parte del área total. Las condiciones básicas de la cuenca son de un clima con características típicamente mediterráneas, topografía levemente ondulada con una red de drenaje natural bien distribuida por toda el área, y suelos con perfiles irregulares y normalmente con un horizonte impermeable a poca profundidad. Se ha seleccionado el modelo *AnnAGNPS* por su relativa sencillez y razonable precisión en la simulación de los procesos estudiados. Un modelo digital de elevaciones con resolución vertical de 1 m es suficiente para describir la topografía de la cuenca. A lo largo de los años hidrológicos 2004/2005 y 2005/2006, se ha evaluado la concentración media de contaminantes, sedimentos y nitrógeno, así como el hidrograma diario en la sección de control de la cuenca, para determinar la carga contaminante. La concordancia de los datos de escorrentía observados en la sección de control de la cuenca con los datos simulados por el modelo, confirman su capacidad como herramienta de predicción hidrológica en la cuenca. Sin embargo, este ajuste es peor en el caso de los sedimentos y en el del nitrógeno. Por la forma de la distribución espacial de la escorrentía, y su integración con las diferentes condiciones de la cuenca, se deduce que la topografía del terreno y la cobertura del suelo son los factores que más influyen el volumen medio de escorrentía. La producción y arrastre medio de nitrógeno en la cuenca dependen de la distribución espacial de la escorrentía, mientras que la producción media de sedimentos no está tan relacionada con la escorrentía media, pues solamente una parte del volumen total tendrá energía suficiente para arrancar y arrastrar los sedimentos.

ABSTRACT. The goal of this paper is the application of the non point source pollution model *AnnAGNPS* to a small agricultural watershed (189 ha). The watershed is located in the *Idanha Irrigation Project* (Portugal). Barley, corn and sorghum are the main

irrigated crops, and oats is an important winter crop; the watershed also contains rangeland, that occupies about one third of its area. Climate is Mediterranean; topography slightly sloped with a natural drainage network distributed homogeneously; the soils have variable depth limited by an impervious layer. The *AnnAGNPS* model was selected among a group of hydrologic models because it has a reasonable compromise between complexity and performance.. The study (carried out during the 2004/2005 and 2005/2006 seasons) included evaluation of runoff, sediment and nitrate losses measured at the outlet of the watershed. Simulated and observed runoff were similar. Simulated and observed sediment losses showed some divergence. The model was unable to simulate the nitrate losses observed. Calibration of the model is desirable for future applications. Also, sediment and nitrate determinations should be improved by continuous sampling.

1.- Introducción

En la actividad agrícola, la modelación, de base física o empírica, o bien una conjugación de las dos, es de una importancia estratégica, dado que permite comparar rápidamente situaciones alternativas de uso de suelo y sus impactos (Kite y Droogers, 2000). Los modelos de simulación, una vez calibrados para condiciones específicas, son herramientas muy útiles en un primer análisis de las buenas prácticas agrícolas. Con la difusión de los *SIG* (*Sistemas de Información Geográfica*), se han desarrollado versiones integradas en *SIG* con una capacidad mayor de edición y análisis de datos. Como algunos autores refieren (Berry et al., 2003), una de las claves para la conservación del suelo y agua, y de una manera general la sostenibilidad global del ambiente, es la utilización de herramientas informáticas que permitan una conservación de precisión de los recursos naturales. Efectivamente, el abordaje de un proceso que no tiene origen puntual sino distribuido en el territorio, es indisoluble del tratamiento integrado de la información geográfica. Una de las cuestiones ambientales relevantes en la actividad agrícola, que ocurre de forma distribuida en el área, es la contaminación difusa de los recursos hídricos (Novotny, 2003). Las características principales de las fuentes difusas son que responden a las condiciones hidrológicas, presentan

dificultades para la medición o control directo y se relacionan con las prácticas de ordenación del territorio y otras afines (FAO, 1997). Para ejecutar este estudio, y ante una multiplicidad de modelos hidrológicos que simulan la contaminación difusa a escala de cuenca, hemos decidido seleccionar el modelo *AnnAGNPS* (*Annualized Agricultural Non Point Source Pollution*) (Cronshey y Theurer, 1998), por la suficiente exactitud de las aproximaciones usadas, por la relativa simplicidad de uso y por la gran difusión que tiene en estudios simulares al presente. El modelo *AnnAGNPS* ha sido desarrollado para simular el transporte de sedimentos y agroquímicos de forma continua en cuencas agrícolas, a escalas de trabajo muy variadas. Los procesos básicos simulados son la escorrentía superficial y subsuperficial directa, en presencia de una capa impermeable, transporte de sedimentos, nutrientes y pesticidas, para intervalos de tiempo de un día. La variabilidad espacial es tratada de forma distribuida, por celdas homogéneas en que se divide el área de estudio, facilitada por la interfaz del modelo en entorno *ArcView*.

El presente estudio presenta como objetivo central la aplicación del modelo *AnnAGNPS* a una cuenca agrícola de riego, con previa configuración topográfica y hidrológica de la cuenca, para el análisis de la escorrentía y contaminantes (sedimentos y nitrógeno), y comparación con datos observados de las mismas variables.

2.- Descripción de la cuenca de estudio

La cuenca de estudio se localiza en territorio portugués, en la comarca de Idanha-a-Nova (Fig. 1), estando incluida en la *Zona Regable de la Campiña de Idanha*. Es una zona que hace frontera, al este, con la comarca de Alcántara (España) y, al sur, con el río Tajo en su recorrido internacional



Fig. 1. Localización de la cuenca de estudio en Portugal.

Las características fluvio-morfológicas de una cuenca definen en gran parte su comportamiento hidrológico. La cuenca de estudio tiene un área de 189 hectáreas y presenta una jerarquía fluvial de 3^{er} orden (drenada por un conjunto de 28 cauces y una *densidad de drenaje* 12.2 m ha⁻¹). En la Fig. 2 podemos observar la topografía de la cuenca con límites bien demarcados en sus líneas de separación de aguas. Las cotas varían entre 248 metros de altitud, en el extremo NE en una zona altiplana, y 212 metros de altitud, en la sección de control de la cuenca. Las pendientes más representativas son las que se sitúan entre 0 y 4%, lo que se puede relacionar con zonas casi llanas o levemente onduladas.

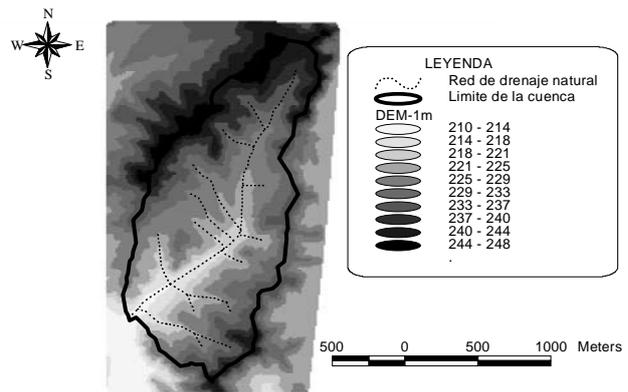


Fig. 2. Topografía general y red de drenaje natural de la cuenca de estudio.

Las clases de suelos que dominan en la zona son: *Cambisols*, que corresponden a depósitos de altiplano de los cauces tributarios del río Tajo con perfiles muy heterogéneos, y *Luvissols*, situados a altitudes menores (Fig. 3). Existe otra clase de suelos que tiene poca representatividad en la cuenca, los *Fluvisols* o suelos de aluvión, presentes en las márgenes de los cauces en extensión variable. La existencia de una capa impermeable a poca profundidad es una característica común a todas las categorías de suelos de esta cuenca, lo que la torna prácticamente impermeable.

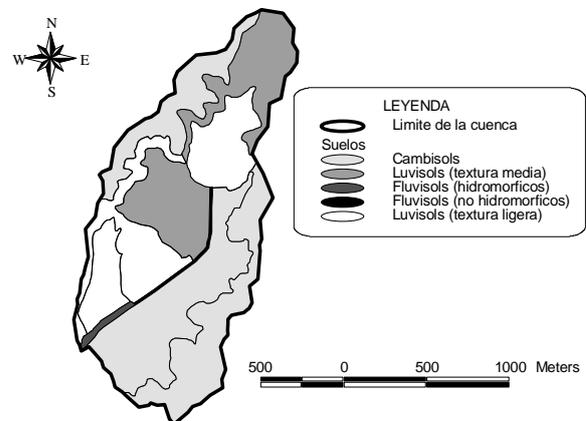


Fig. 3. Categorías de suelos existentes en la cuenca de estudio (nomenclatura de la FAO).

El clima de la zona es típicamente mediterráneo continental, con una precipitación media anual de 624 mm, y temperatura media diaria que oscila entre los 8.3 °C en enero y los 24.5 °C en agosto (INAG, 2007), propia de las zonas con una marcada interioridad. Además, el clima de la zona está marcado por una fuerte aleatoriedad.

Esta cuenca tiene, respecto a su sistematización en parcelas y su uso, tres zonas bien distintas (Fig. 4 y Fig. 5): zona de aprovechamiento no agrícola (robles y alcornos dispersos), zona de aprovechamiento agrícola intensivo (maíz en el año agrícola 2003/2004 y mayoritariamente barbecho en el año 2004/2005), y zona de diversidad de usos agrícolas con parcelas de menores dimensiones.

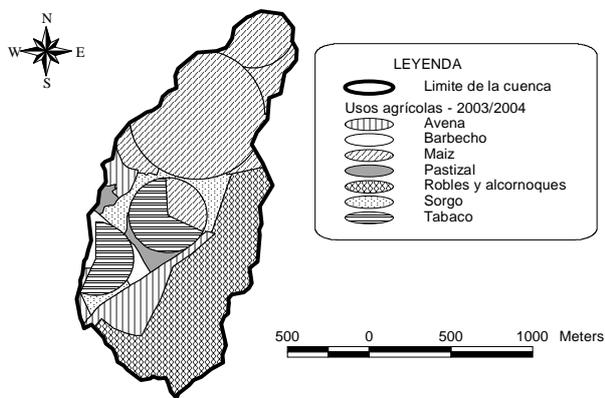


Fig. 4. Usos de la cuenca de estudio en el año agrícola 2003/2004.

El mosaico de usos de la cuenca tuvo un cambio significativo en el año agrícola 2004/2005 con respecto al año anterior (Fig. 5), que se ha traducido en una reducción importante en el área de riego (52%) en la parte alta de la cuenca, y una intensificación en algunas parcelas en la parte baja de la cuenca. Esta alteración ha tenido una influencia decisiva en el volumen y calidad de los flujos de retorno.

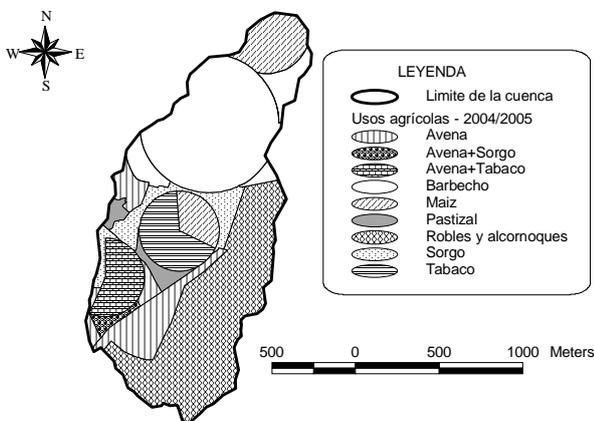


Fig. 5. Usos de la cuenca de estudio en el año agrícola 2004/2005.

Los métodos de riego usados por los agricultores de la cuenca de estudio son exclusivamente por aspersión. De entre estos, dominan los pivotes, ocupando las coberturas móviles solamente algunas parcelas irregulares o las áreas entre pivotes.

3.- Material y métodos

En lo que concierne a las metodologías y técnicas experimentales usadas para recopilar datos observados en la cuenca, tiene particular importancia la estación hidrológica instalada en la sección de control de la cuenca. Consta de un aforador de resalto de solera con sección compuesta triangular trapecial (Bos et al., 1991), y una sonda de ultra-sonidos dirigido a la superficie de la escorrentía y un *datalogger* para registro continuo de los datos de la sonda. Conocida la curva de descarga del aforador, los datos de la sonda son transformados en caudales.

Ante la ausencia de equipos de medición continua de la concentración de los contaminantes en estudio, optamos por la metodología de recolección puntual de muestras de agua en la sección de control de la cuenca, que se transportaban en ambiente frío al laboratorio para las determinaciones en causa. Las concentraciones de los contaminantes en el agua en una muestra, o muestras, relativa a un determinado día, se consideraban representativas de ese día. Conocidos el hidrograma de cada día y la concentración de los contaminantes en estudio, se determina la carga contaminante diaria.

La información relativa a las prácticas agrícolas en cada parcela de la cuenca, necesaria para la simulación con *AnnAGNPS*, era registrada por los agricultores en hojas propias o bien obtenida por observación directa de lo que pasaba en las parcelas.

El modelo *AnnAGNPS* requiere para su funcionamiento numerosos datos organizados en diversas categorías y obtenidos: por importación de ficheros generados manualmente o por un programa (datos climáticos); por importación de ficheros generados por módulos de configuración de la cuenca (datos de las celdas y cauces); por introducción manual de datos que resultan de evaluaciones de campo o de laboratorio (datos de suelos), y por selección, de entre una base del modelo, de datos de referencia para determinadas categorías (datos de operaciones agrícola y desarrollo de los cultivos).

Antes de avanzar a la simulación del proceso de la contaminación difusa, hay que estudiar cual es la resolución vertical adecuada del *DEM* para una conveniente configuración topográfica y hidrológica de la cuenca (Bingner y Theurer, 2001). Para averiguar la influencia en la configuración de la cuenca de estudio, han sido elaborados dos *DEM* con resoluciones verticales de 1 y 5 metros con base en información cartográfica existente. La resolución de 5 m fue insuficiente y la de 1 m adecuada (Duarte et al., 2006)

4.- Análisis de resultados

El análisis temporal de los resultados observados y simulados se establece para cuatro períodos que cubren dos años hidrológicos: dos estaciones de riego (2004 y 2005) y dos estaciones de lluvias (2004/2005 y hasta el 31 de diciembre de la de 2005/2006). La escorrentía fue la variable observada con más seguridad, ya que los caudales fueron medidos de forma continua según una técnica fiable.

Los resultados observados y simulados recogidos en la Fig. 6, evidencian diferencias notables en las dos estaciones de lluvias en análisis. La constatación de volúmenes de escorrentía observados en la temporada de lluvias francamente mayores que los simulados es debida en gran parte a que el modelo *AnnAGNPS* no simular la escorrentía de base (Bingner y Theurer, 2005), que demostró tener importancia en esta cuenca (Fig. 7). Sin embargo, en las dos estaciones de riego los volúmenes de escorrentía observados y simulados son bastante similares.

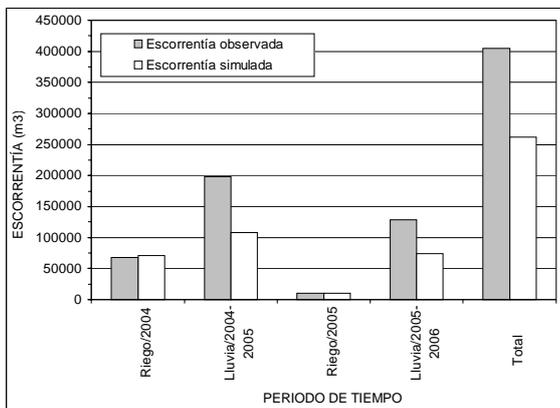


Fig. 6. Comparación entre los valores de escorrentía observados y simulados, para los periodos de tiempo en análisis.

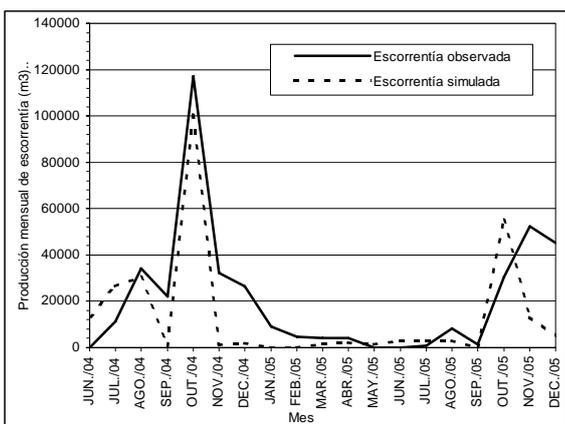


Fig. 7. Comparación entre la producción mensual de escorrentía observada y simulada en la cuenca de estudio.

La producción de sedimentos depende de la escorrentía

superficial directa, o sea del número de eventos de precipitación con intensidad suficiente para originarla (Lal et al., 1999). En el modelo *AnnAGNPS* se supone que los eventos de riego no son suficientemente intensos para causar erosión del suelo, exceptuando el proceso de riego por surcos abiertos al final (Bingner y Theurer, 2005). Dado que los métodos de riego practicados en la cuenca de estudio son únicamente de aspersión, la Fig. 8 no registra producción simulada de sedimentos en las dos campañas de riego. No obstante, tampoco la producción de sedimentos observada es muy elevada, habiendo, sin embargo, una diferencia grande entre las dos campañas motivada por una reducción significativa de la escorrentía en la campaña de riego de 2005. En lo que respecta a la estación de lluvias, se puede observar en la Fig. 8 que en la estación 2004/2005 los valores observados y simulados fueron bastante próximos; la producción de sedimentos simulada fue 91.6% de la observada. No ocurrió lo mismo en la estación de lluvias de 2005/2006, en que la producción de sedimentos simulada fue solamente 53.3% de la observada. Esta diferencia probablemente fue debida a que algunas recogidas de muestras de agua fueron hechas próximas al caudal punta originado por tormentas más o menos intensas. Como los valores puntuales de la concentración de contaminantes se consideran válidos para todo el día, influenciando también los días siguientes si no se efectuaban muestreos de agua, esto comporta una sobreestimación de la producción de sedimentos observados en estos períodos, que puede ser suficiente para explicar esta diferencia. Respecto a la evolución de la producción de sedimentos (Fig. 9), el análisis es semejante al hecho para la escorrentía. Las mayores diferencias que se pueden observar fueron en la campaña de riego de 2004 y en los meses de noviembre y diciembre de 2005, que hacen que las curvas, a pesar de tener desarrollos similares, terminen en valores bastante diferentes.

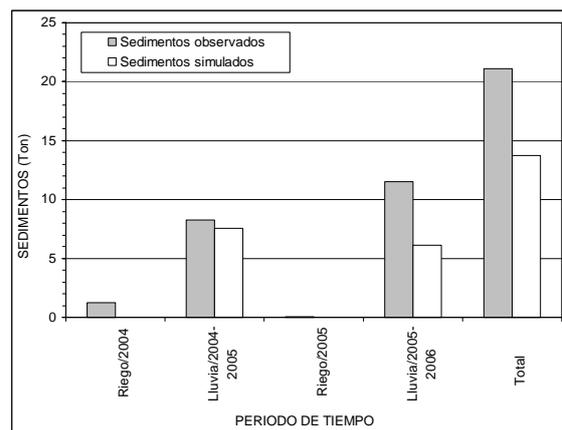


Fig. 8. Comparación entre los valores de sedimentos observados y simulados, para los periodos de tiempo en análisis.

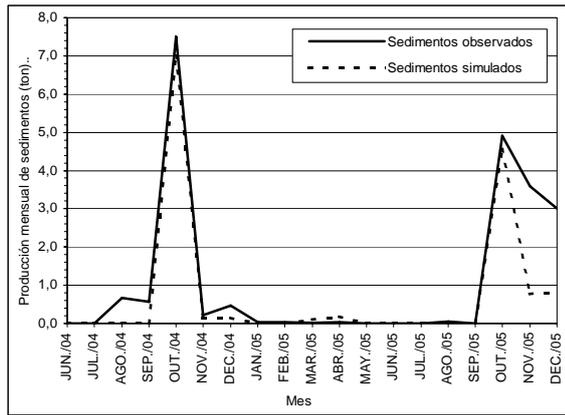


Fig. 9. Comparación entre la producción mensual de sedimentos observada y simulada en la cuenca de estudio.

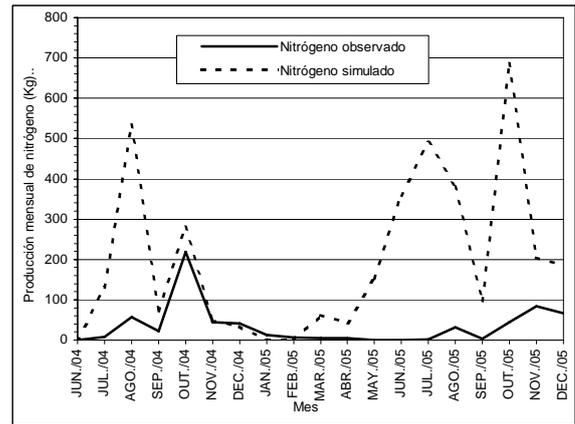


Fig. 11. Comparación entre la producción mensual de nitrógeno observada y simulada en la cuenca de estudio.

El nitrógeno tiene una dinámica diferente a la de los sedimentos en la cuenca, dado que, siendo muy soluble, es transportado tanto con la escorrentía superficial y subsuperficial directa, como con la escorrentía de base, y ello con cualquier caudal. Con la lectura de la Fig. 10, se puede afirmar que los resultados observados y simulados difieren en los períodos de análisis, aunque habiendo remotamente la misma tendencia de los picos de arrastre de estos contaminantes (Fig. 11). Algunas razones pueden ser plausibles para explicar esta diferencia. Desde luego lo relacionado con las muestras de agua: la aproximación de tomar una muestra de agua y tornarla representativa de todo el día merece alguna reserva. También el procedimiento de interpolar los valores de concentración de nitrógeno en los días en que no hay recolecciones de muestras de agua no será del todo adecuado, porque algunos arrastres puntuales pasarán por la sección de control de la cuenca sin que sean medidos. Por último, por supuesto parte de la escasa similitud entre los dos conjuntos de datos hay que achacarla a que las aproximaciones usadas en el modelo AnnAGNPS no se adecuen a las condiciones de la cuenca, o, en sentido más amplio, a las condiciones de este sistema de agricultura.

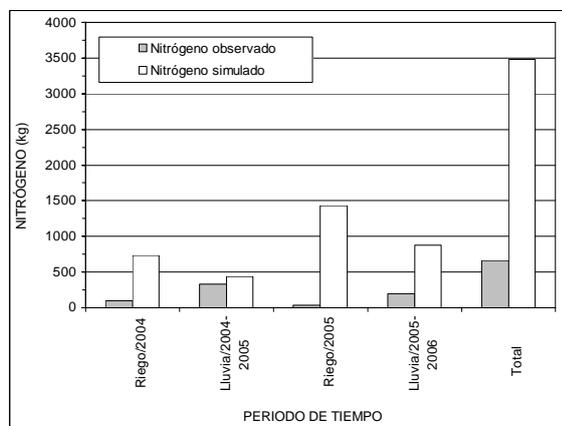


Fig. 10. Comparación entre los valores de nitrógeno observados y simulados, para los periodos de tiempo en análisis.

5.- Conclusiones

El modelo AnnAGNPS es a priori una herramienta que reúne las características que pueden hacerla útil para la simulación y la predicción de la contaminación difusa originada por la actividad agrícola en cuencas de regadío. Los principios en los que se basa el modelo guardan equilibrio entre los fundamentos teóricos y la funcionalidad. La aplicación del modelo a la cuenca de estudio ha demostrado que la escorrentía puede llegar a simularse con precisión razonable. Para ello hace falta contar con un modelo digital de elevación del terreno que cumpla con un mínimo de resolución. Seguramente la calibración de los parámetros relacionados con la escorrentía mejoraría la precisión de sus predicciones. La simulación de la erosión y el transporte de sedimentos también indica que, tras un proceso de calibración, el modelo tendría suficiente capacidad predictiva. La simulación de los flujos de nitrógeno es claramente inadecuada.

Bibliografía

Berry, J. K., J. A. Delgado, R. Khosla, F. J. Pierce. 2003. *Precision conservation for environmental sustainability. Journal of Soil and Water Conservation*, 58, 332-339.

Bingner, R. L., F. D. Theurer. 2005. *AnnAGNPS Technical Processes. Version 3.2.* USDA-ARS, National Sedimentation Laboratory, Oxford.

Bingner, R. L., F. D. Theurer. 2001. *Topographic Factors for RUSLE in the continuous-Simulation, Watershed Model for Predicting Agricultural, Non-Point Source Pollutants (AnnAGNPS).* In: *Proceedings of the Soil Erosion Research for the 21st Century*, 3-5 January 2001, Honolulu.

Bos, M. G., J.A. Replogle, A. J. Clemmens. 1991. *Flow measuring flumes for open channel systems.* ASAE, St. Joseph.

Cronshey, R. G., F. G. Theurer. 1998. *AnnAGNPS-Non Point Pollutant Loading Model.* In *Proceedings First Federal Interagency Hydrologic Modelling Conference*, 19-23 April 1998, Las Vegas.

Duarte, A., C. 2006. *Contaminación difusa originada por la actividad agrícola de riego, a la escala de la cuenca hidrográfica.* Tesis Doctoral, Depto. de Agronomía, Universidad de Córdoba, España.

Duarte. A.C., F. Afonso, L. Mateos, E. Fereres. 2006. *Influência da resolução do modelo Digital do terreno na configuração topográfica de uma bacia hidrográfica.* *Revista Recursos Hídricos*, 27, 7-14.

Ongley, E. D. 1997. *Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos.. Estudios FAO: Riego y Drenaje No. 55.* FAO Roma.

Doorenbos, J., W.O. Pruitt.. 1984. *Crop water requirements.* FAO Irrigation

- and Drainage Paper No. 24. FAO, Roma.
- INAG. 2007. *Boletim de precipitação anual – Estação do Ladoeiro-14N/02U*. Serviço Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), Retrieved January 25, 2007, from the W.W.W: http://snirh.inag.pt/snirhwww.php?main_id=1&item=4.3.
- Kite, G. W., P. Droogers. 2000. *Integrated Basin Modelling. Research Report 43*, International Water Management Institute, Colombo.
- Lal, R., D. Mokma, B. Lowery. 1999. *Relation Between Soil Quality and Erosion*. In: *Soil Quality and Soil Erosion*, Lal, R., Ed., CRC Press, Boca Raton.
- Lorite, I. J., L. Mateos, E. Fereres. 2004. *Evaluating irrigation performance in a Mediterranean environment. I. Model and general assessment of an irrigation scheme*. *Irrig. Sci.* 23, 77-84.
- Mateos, L. 2003. *Irrigation management and fertilizer/pesticide leaching*. En: *Encyclopedia of Water Science*, Trimble, S. W., B. A. Stewart, T. A. Howell, Eds., Marcel Dekker, Nueva York pp. 282-284.
- Novotny, V. 2003. *Water Quality – Diffuse Pollution and Watershed Management, 2ª Ed.*. John Wiley, Nueva York.
- Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool, D. C. Yoder. 1997. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. USDA-ARS, Agr. Hdbk 703, Washington.
- USDA-NRCS. 1986. *Urban Hydrology for Small Watersheds*. T.R. 55, USDA- NRCS, Washington.
- USDA-SCS. 1972. *National Engineering Handbook. Hydrology Section 4*. Washington.