

APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO-SWAT-EN UNA MICROCUENCA AGRÍCOLA DE LA PAMPA ONDULADA

FELIPE BEHRENDTS KRAEMER^{1*}; CELIO IGNACIO CHAGAS¹; GABRIEL VÁZQUEZ AMÁBILE²;
ESTEBAN ANSELMO PALACÍN¹; OSCAR JOSÉ SANTANATOGLIA¹; MARIO GUILLERMO CASTIGLIONI¹
& MARCELO JUAN MASSOBRIO¹

1 Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos. Facultad de Agronomía UBA. Av. San Martín 4453, (1417). Buenos Aires. Argentina.

2 Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de La Plata. Diag 113 N°469 3er P. CP 1900. La Plata.

* Autor para correspondencia: filipebk@agro.uba.ar.

Recibido: 01-01-10

Aceptado: 13-04-11

RESUMEN

El modelado hidrológico es a menudo el primer paso en el desarrollo de sistemas de decisión espacial para identificar áreas vulnerables a la contaminación por nutrientes, pesticidas así como también a contaminantes biológicos. En este sentido el SWAT (Soil and Water Assessment Tool) fue desarrollado para predecir impactos de las prácticas de manejo de las tierras en las aguas, sedimentos y agroquímicos en cuencas hidrográficas con diferentes suelos, usos y prácticas en largos períodos de tiempo. Aunque el mismo está siendo aplicado en todo el mundo, todavía no está difundido su uso en la Argentina, no encontrándose al momento reportes al respecto. Este modelo se utilizó en una microcuenca agrícola de la Pampa Ondulada (Argentina) y fue calibrado y validado utilizando los valores de escurrimientos medidos *in situ*. Se encontraron buenas eficiencias a escala diaria (R^2 : 0,55; R^2_{ENS} : 0,52) y pobres a escala mensual (R^2 : 0,34; R^2_{ENS} : 0,04). En la calibración, los escurrimientos fueron sobreestimados en un 31,8% y 32,6% para la escala mensual y diaria respectivamente, mientras que en la validación se sobreestimó un 42,5% para los valores mensuales y un 41,2% para los diarios. La aplicación del SWAT en esta microcuenca agrícola resultó auspiciosa y conduce a la inclusión de dicho modelo en futuros trabajos.

Palabras clave. Modelización hidrológica, escurrimiento, contaminación agropecuaria siembra directa.

APPLICATION OF THE HYDROLOGIC MODEL – SWAT – ON A MICRO AGRICULTURAL BASIN OF THE ROLLING PAMPA

ABSTRACT

A hydrological model is often the first step for the development of spatial decision systems in order to identify vulnerable areas to the pollution by nutrients, pesticides as well as biological contaminants. The SWAT model was developed to predict the impact of land management on water, agrochemicals and sediments in hydrographical basins with different soils, land uses and practices for long time periods. This model is being used all over the world but it has not been applied in Argentina until present.

The SWAT model was used in an agricultural microbasin in the Rolling Pampa (Argentina) and was calibrated and validated using runoff values measured *in situ*. Good efficiencies were found in a daily scale (R^2 : 0.55; R^2_{ENS} : 0.52) and poor efficiencies in a monthly scale (R^2 : 0.34; R^2_{ENS} : 0.04). During the calibration period, runoff was overestimated by 31.8% and 32.6% for the monthly and daily scale, respectively, while in the validation period, runoff was overestimated by 42.5% for the monthly scale and by 41.2% for the daily scale. The application of the SWAT model in this agricultural microbasin has been successful and leading to the inclusion of this model in future experiments.

Keywords. Hydrological modeling, runoff, agricultural pollution, no-tillage.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la actividad agropecuaria constituye una importante fuente de contaminación de las aguas ya que aporta cantidades importantes de sedimentos, nutrientes, agentes patógenos y plaguicidas a través de erosión hídrica (Ongley, 1997). Por su parte, Solsona (1999) reseña algunas de las acciones humanas que han tenido efecto sobre la calidad del agua: la construcción de presas, canales, caminos, la tala de bosques, el uso

indiscriminado de tierras para cultivos, las emanaciones de la industria y el propio asentamiento humano. Ongley (1997) destaca la necesidad de estudiar la contaminación agrícola del agua a nivel de cuenca ya que a partir de su comportamiento hidrológico es posible predecir su capacidad de generación y exportación de contaminantes. Esto permitiría diseñar estrategias de atenuación de dicha fuente de contaminación (Santanatoglia *et al.*, 2006). Como soporte a la toma de decisiones, a dicha escala, tanto la

erosión y el escurrimiento, como la dinámica de los contaminantes químicos y biológicos pueden ser cuantificados mediante modelos hidrológicos de base física. El modelado hidrológico es a menudo el primer paso en el desarrollo de sistemas de decisión espacial para identificar áreas vulnerables a la contaminación por nutrientes, pesticidas (Lim *et al.*, 2001) así como también contaminantes biológicos. Modelos hidrológicos como el SWAT (Soil and Water Assessment Tool) fueron desarrollados para predecir impactos de las prácticas de manejo de las tierras en las aguas, sedimentos y agroquímicos en cuencas hidrográficas con diferentes suelos, usos y prácticas en largos períodos de tiempo. Este modelo en particular, aunque esté siendo aplicado en todo el mundo, todavía su uso no está difundido en la Argentina, no encontrándose al momento reportes sobre dicho modelo.

La falta de estaciones de monitoreo de la calidad de aguas conjuntamente con la creciente intensificación productiva principalmente en la zona bajo estudio, propicia un ambiente de riesgo para la salud humana y animal. Si bien los estándares de calidad de agua para la Argentina son incipientes, existen niveles guías para calidad de agua para bebida humana y animal, para recreación y para la conservación de la biota en los cuales descansar para realizar una mejor gestión del territorio. En este marco, la utilización de modelos computacionales será trascendental como soporte de decisiones tanto productivas como ambientales.

Por ello, el objetivo del trabajo fue evaluar el comportamiento del modelo hidrológico SWAT en una microcuenca de la Pampa Ondulada.

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo SWAT

El Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un modelo hidrológico distribuido, continuo y de paso diario, diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas A&M (Arnold *et al.*, 1990). Este modelo permite simular la generación de escurrimiento y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que tienen las prácticas agronómicas, incluyendo el uso de pesticidas, fertilizantes y derivados biológicos, sobre la calidad del agua de dichas cuencas.

El ciclo hidrológico simulado por el SWAT está basado en la ecuación del balance hídrico:

$$SW_t = SW + \sum (R_i - Q_i - ET_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

Donde, SW_t es la cantidad final de contenido de agua en el suelo (mm), SW es la cantidad inicial de contenido de agua en el suelo (mm), t es el tiempo en días, R_i es la cantidad de lluvia caída

en el período de análisis (mm), Q_i es la cantidad de escorrentía (mm), ET_i evapotranspiración (mm), P_i percolación (mm), QR_i flujo de retorno (mm). Una vez que el SWAT determina las cargas de sedimentos, nutrientes y pesticidas en el agua del cauce principal, las mismas son ruteadas a través de la red de canales de la cuenca.

En el presente trabajo se utilizó la versión AVSWAT 2000 versión que corre como una extensión en ArcView desarrollada por Di Luzio *et al.* (2001).

Ubicación de la microcuenca bajo estudio

La microcuenca bajo estudio posee una superficie de 300 ha y está ubicada en la vertiente norte de la cuenca media del Arroyo del Tala (33°50' Latitud Sur, 60° Longitud Oeste), en la localidad de San Pedro, provincia de Buenos Aires (Chagas *et al.*, 1993).

Datos meteorológicos

Las precipitaciones, temperatura máxima y mínima, humedad media e intensidad de vientos se midieron en forma automática mediante una estación meteorológica provista de un pluviógrafo de lectura a intervalos de 30 minutos y de otros sensores específicos. Esta estación meteorológica está ubicada en el Establecimiento «Los Patricios» (UBA) en el tercio medio de la cuenca del Tala, próxima al punto de cierre de la microcuenca analizada. Para completar algunos vacíos de información, se utilizaron datos provistos por la estación meteorológica del INTA - San Pedro la cual se encuentra a 15 km al norte de microcuenca.

Para ser empleadas en el modelo SWAT, todas las variables meteorológicas fueron expresadas tanto en forma de valores diarios como mensuales. En la Figura 1 se muestran los valores de precipitación mensual correspondientes al período de análisis (enero de 2000 – diciembre de 2005).

Modelo de elevación Digital (DEM),

Suelos y Uso de la tierra

El relieve de la microcuenca se caracterizó a través de la digitalización de las cartas topográficas IGM 1:50.000 y posterior interpolación de las curvas de nivel obtenidas, para poder generar el DEM (TIN, ArcView 3.3) (Fig. 2.a)

Los suelos dominantes en la microcuenca corresponden a fases por erosión y sedimentación de la serie Ramallo (Argiudol vértico) (Fig. 2.b). El horizonte superficial del mismo es de textura franco arcillo limosa teniendo en promedio 15% de arena, 60% de limo y 25% de arcilla. En las áreas con pendiente los gradientes de: 0-0,5%; 0,5-1%; 1-2% ocupan una superficie del 22%; 35% y 34% respectivamente, mientras que los sectores de vaguada abarcan el 9% de la superficie total de esta microcuenca. Este último sector está ocupado por las fases ligeramente erosionada y engrosada de la serie Ramallo (INTA 1973; Chagas *et al.*, 1993). Los parámetros edáficos no descriptos por el INTA fueron estimados a través del programa Soil Water Characteristics v.1.0.103 (Saxton & Rawls, 2006) introduciendo como variable de entrada la textura, pedregosidad y salinidad.

El uso de la tierra durante el período de análisis (2000-2005), fue predominantemente agrícola con alta presencia de cultivos de verano. Previo al año 1999 dichos cultivos se implantaban ma-

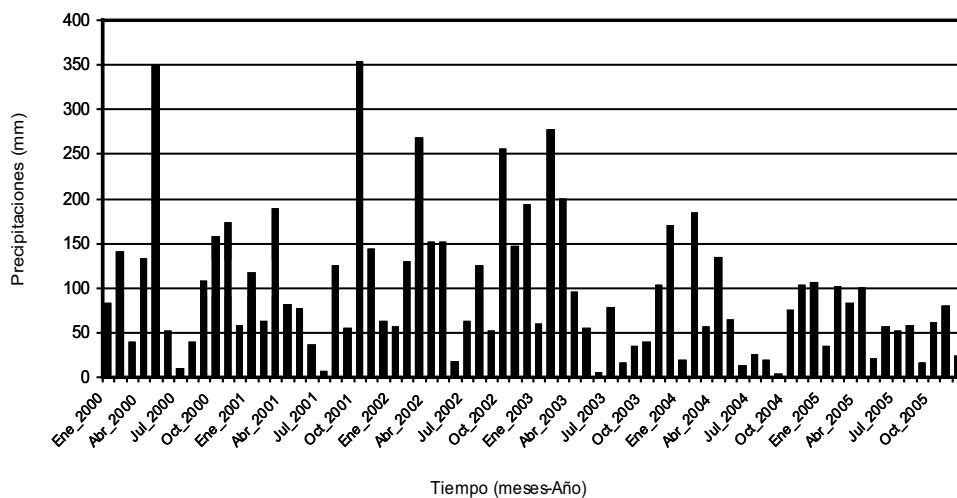


Figura 1. Precipitaciones utilizadas en las simulaciones para los períodos analizados (2000-2005). Los datos fueron provistos por la estación meteorológica «Los Patricios» y por la unidad experimental San Pedro-INTA.
 Figure 1. Rainfall used in the SWAT simulations for the analyzed periods (2000-2005). Data were provided by «Los Patricios» meteorological station and by San Pedro experimental unit-INTA-.

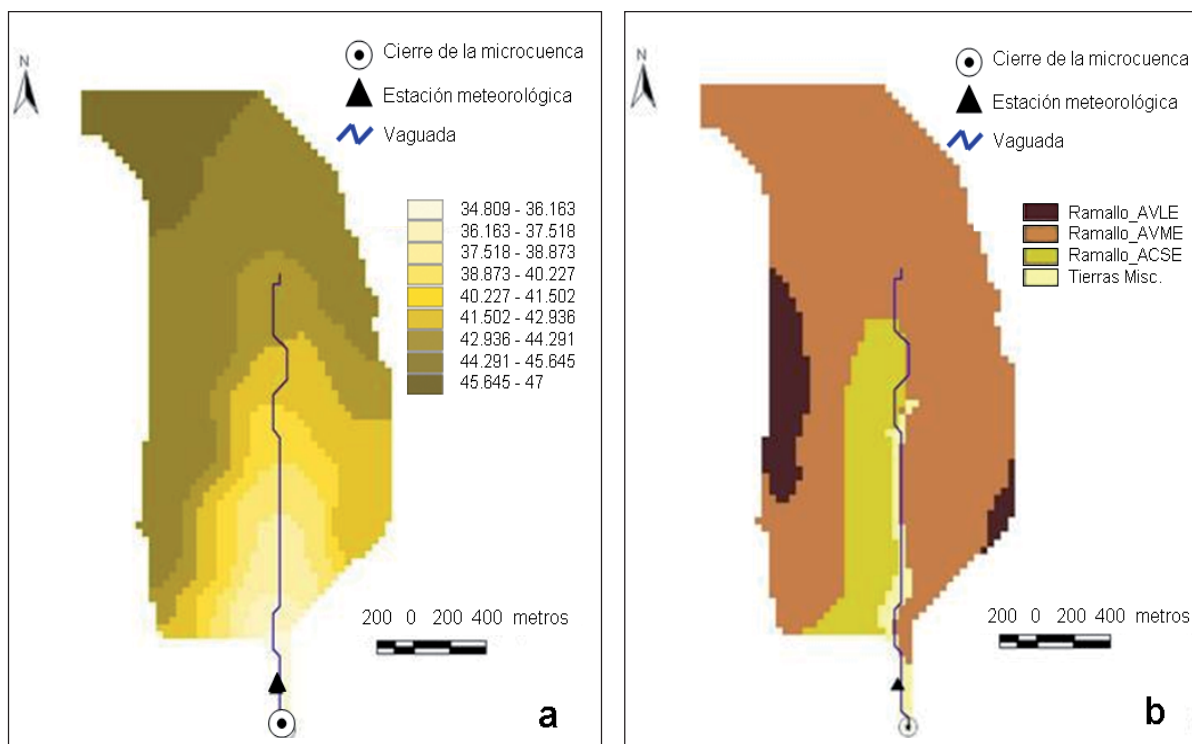


Figura 2. a) Elevación digital (m) y b) Suelos de la microcuenca «Los Patricios».
 Figure 2. a) Digital elevation (m) and b) Soils of «Los Patricios» microbasin.

yormente en forma convencional (arado de reja y vertedera, ras- tra de discos y ras- tra de dientes), mientras que a partir del 1999 el sistema de labranza empleado fue la siembra directa. Para el período de análisis se estableció una rotación con alternancia anual de maíz y soja, en los cuales el modelo calculó índices de área foliar promedio de 1,2 y 2,8, respectivamente. Otros parámetros calculados como la eficiencia del uso de la radiación y la altura del canopeo y profundidad radical corresponden a los valores informados por Kiniry *et al.*, 1991 y Kiniry *et al.*, 1995.

Métodos de cálculo seleccionados

El modelo calcula un gran número de procesos y en algunos de ellos permite seleccionar más de un método de cálculo. En este caso, para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ET), se optó por el método de Penman-Monteith, ya que se contó con registros diarios de precipitación, temperatura, radiación, humedad relativa y velocidad del viento. Para el cálculo del escurrimiento se optó por el método del Número de Curva (NC) (Soil Conservation Service, 1973). Los detalles de las subrutinas del modelo están extensamente explicados en la documentación provista por los autores en Neitsch *et al.*, 2001.

Calibración y validación

La calibración y validación del modelo fueron efectuadas a través de los escurrimientos medidos *in situ*. Los mismos se registraron en forma automática mediante un limnógrafo piezo-resistivo a intervalos de 30 minutos (Chagas *et al.*, 1993). La expresión de los valores de escurrimiento empleados para los períodos de calibración y validación fue realizada en base diaria y mensual. Para el período de calibración (2000-2002) (Tabla 1), se incluyeron sólo tres variables, el Número de Curva (Soil Conservation Service, 1975), la intercepción del canopeo y el tiempo «retardo» de escurrimiento superficial. La elección de estas tres variables se debió a que las mismas son las que comúnmente se ajustan en la corrida de dicho modelo (Vázquez Amábile, comun. pers.).

Análisis estadístico

Para evaluar la eficiencia del modelo se utilizó el coeficiente de determinación (R^2) y la medida de eficiencia de Nash-Sutcliffe (ENS) (Nash & Sutcliffe 1970). El indicador de eficiencia ENS indica cuan bien el set de datos observados *vs.* simulados ajusta

la relación 1:1. Donde,

$$R^2_{ENS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Sim_i - obs_i)^2}{\sum_{i=1}^n (obs_i - Obs_{media})^2}$$

Ramanarayanan *et al.* (1997) sugiere que el modelo de predicción se considera aceptable o satisfactorio si el $R^2 > 0,6$ y ENS $> 0,5$. Moriasi *et al.* (2007) clasificó la eficiencia de los modelos como excelente (ENS $> 0,9$), muy buena (ENS = 0,75 a 0,89), buena (ENS = 0,50 a 0,74) aceptable (ENS = 0,25 a 0,49), pobre (0 a 0,24) y no satisfactorio (ENS < 0).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La media anual de precipitaciones de los años analizados (enero de 2000 a diciembre de 2005) fue de 1.103 mm, prácticamente igual a la media histórica (1.074 mm). A su vez la variabilidad inter e intraanual de las lluvias resultó semejante a la informada por INTA-San Pedro (2010). Por ende, las simulaciones fueron realizadas bajo un período representativo de lluvias.

En la Tabla 2 se observan los valores de R^2 y R^2_{ENS} diarios y mensuales para el período de calibración y validación. A su vez, la Figura 3a y 3b muestra de forma gráfica la eficiencia del modelo para ambas escalas de tiempo, destacándose una mejor eficiencia en escurrimientos de mayor magnitud. La eficiencia resultó adecuada en base a los criterios de Ramanarayanan *et al.* (1997) y de Moriasi *et al.* (2007). Por su parte los valores de R^2 indican que el modelo explicó entre el 33% y el 74% de la variabilidad analizada. El máximo ajuste se logró en el período de calibración con la escala mensual. A su vez, durante el período de validación, el máximo ajuste le correspondió a la escala diaria. Las Figuras 4a. y 4b muestran en detalle el comportamiento del modelo para ambos períodos a escala diaria. En valores absolutos, la simulación sobreestimó los

Tabla 1. Valores de entrada del SWAT modificados en el proceso de calibración.
Table 1. SWAT entry values modified during the calibration process.

Parámetro	Descripción	Input File	Valor de calibración
CN2	Número de Curva	.Mgt- subbasin (Calibration tool)	Se disminuyó 5 unidades para todas las HRUs
CNMAX	Intercepción canopeo	.HRU	Se ajustó a 10 mm
SURLAG	Tiempo de «retardo» del escurrimiento superficial	Basin Input File	Se ajustó a 1 día

Tabla 2. Eficiencia de Nash-Sutcliffe y R^2 para la predicción de escurrimientos diarios y mensuales para el período de calibración (2000-2002) y validación (2003-2005).

Table 2. Nash-Sutcliffe model efficiency and R^2 for daily and monthly runoff predictions for the calibration (2000-2002) and validation period (2003-2005).

Microcuenca «Los Patricios» (300 ha)	Diarios		Mensual	
	R^2	R^2 ENS	R^2	R^2 ENS
Calibración (2000-2002)	0,33	0,33 (aceptable)	0,74	0,64 (buena)
Validación (2003-2005)	0,55	0,52 (buena)	0,34	0,04 (pobre)

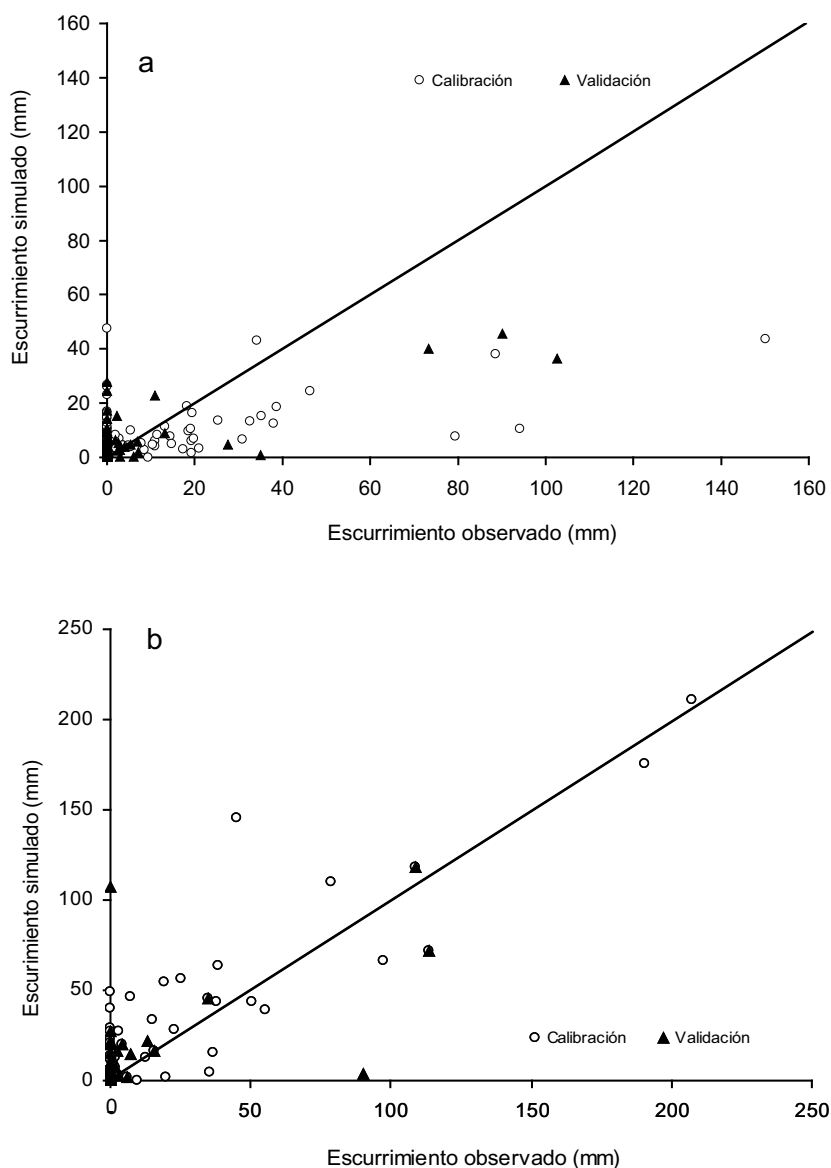


Figura 3. Distribución de los pares de escurrimiento (mm) observado y simulado para la calibración (círculos vacíos) y validación (círculos llenos) en la escala diaria (a) y mensual (b) en relación a la recta 1:1.

Figure 3. Distribution of observed and simulated runoff pairs (mm) for calibration (empty circles) and validation (full circles) at daily (a) and monthly (b) period, related to the 1:1 line.

escurrimientos en ambos períodos para las dos escalas temporales. En la calibración los escurrimientos fueron sobreestimados en un 31,8% y 32,6% para la escala mensual y diaria respectivamente, mientras que en la validación fueron sobreestimados 42,5% para los valores mensuales y 41,2% para los diarios. En general, se observó una adecuada eficiencia del modelo SWAT y un buen ajuste de los valores simulados respecto de los observados. Un resultado llamativo fue la mayor eficiencia del modelo a escala diaria en la validación en relación a los datos diarios obtenidos en la calibración y los datos mensuales de la validación. En ambos casos se esperaba que la eficiencia diaria de la validación fuera menor a la encontrada en la calibración y menor a la escala mensual. Estos resultados podrían explicarse por la importante

diferencia en los eventos de lluvia entre ambos períodos. Durante la fase de validación existió una gran cantidad de días sin lluvias resultando en escurrimientos muy bajos o nulos y aumentando de esta forma la eficiencia del modelo (Figs. 3b, 4a y 4b). Algunos autores como Vázquez Amábile *et al.* (2005) también encontraron períodos de validación con eficiencias superiores al de calibración.

Uno de los factores determinantes en la exactitud del SWAT es la información meteorológica. Así, la cercanía de las estaciones meteorológicas al límite de la microcuenca fue un factor que presumiblemente haya influido en las importantes eficiencias que muestra la Tabla 2. Debe destacarse que este ajuste se logró aún en una microcuenca de bajas dimensiones, lo que no permitiría la compensación de errores. De la misma forma Arnold & Allen (1996)

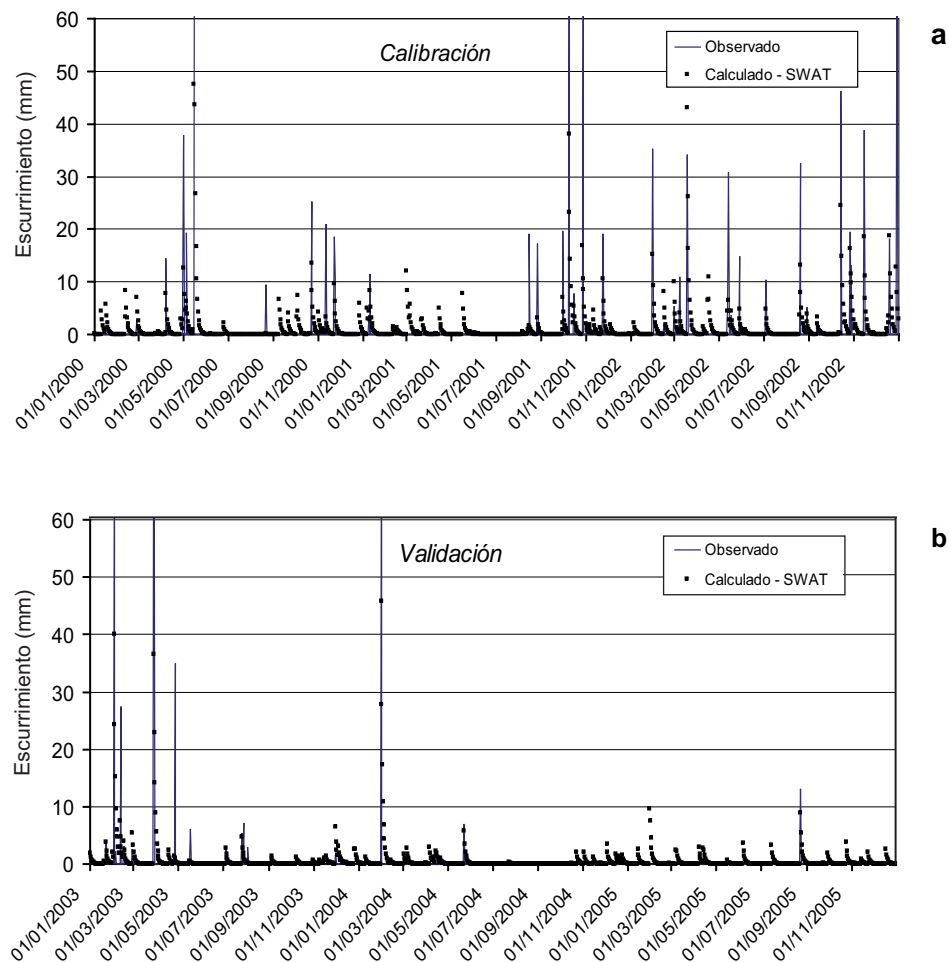


Figura 4. Escorrimento observado y predicho por SWAT a escala diaria para el período de calibración (2000-2002) (a) y para el período de validación (2003-2005) (b).

Figure 4. Observed and SWAT-predicted daily runoff for the calibration period (2000-2002) (a) and for the validation period (2003-2005) (b).

usando mediciones de tres cuencas en Illinois con tamaños de 122 a 246 km², pudieron validar el escurrimiento superficial, el flujo de agua subterránea y la evapotranspiración entre otros parámetros. En el otro extremo Santhi *et al.* (2001) realizaron validaciones extensivas de caudales para dos cuencas de Texas con un tamaño de 4.000 km². Arnold & Allen (1999) por su parte evaluaron caudales y producción de sedimentos en la cuenca del Golfo de Texas con áreas de drenaje de 2.253 a 304.260 km².

Por otro lado, un mejor ajuste del modelo podría haber sido logrado mediante la utilización de informaciones altimétricas de mayor resolución. Es posible que la diferencia entre cotas de 2,5 m presentada por la carta topográfica del IGM (1:50.000) fuese insuficiente para simular correctamente la pendiente de la vaguada. También un número más elevado de datos observados de escurrimiento podrían haber mejorado el ajuste de los caudales simulados vs caudales observados.

CONCLUSIONES

El modelo evaluado SWAT se comportó de forma satisfactoria tanto a escala diaria como mensual. Los resultados obtenidos son muy auspiciosos teniendo en cuenta que es la primera vez que se emplea dicho modelo en la Argentina con datos reales pertenecientes a una microcuenca agropecuaria aforada de Pampa Ondulada. En etapas posteriores se deberá evaluar su comportamiento predictivo frente a variables asociadas con la contaminación física, química y biológica de los cursos de agua de la Pampa Ondulada y de otras regiones del país.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado a través de los proyectos de investigación UBACyT G045 y G016.

BIBLIOGRAFÍA

Arnold, JG; JR Williams; AD Nicks & NB Sammons. 1990. SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A&M Univ. Press, College Station, TX.

Arnold, JG & PM Allen. 1996. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *J. Hydrol.* 176: 57-77.

Arnold, JG & PM Allen. 1999. Automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from stream flow records. *J. Amer. Water Resour. Assoc.* 35(2): 411-424.

Chagas, CI; OJ Santanatoglia. & E Rienzi. 1993. Análisis del escurrimiento de una microcuenca utilizando distintas metodologías. *Revista Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetales. (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España)* 8 (2):177-190.

Di Luzio, M; R Srinivasan & JG Arnold. 2001. ArcView Interface for SWAT2000, User's Guide. Temple, Texas: Blackland Research Center-Texas Agricultural Experiment Station. <http://www.brc.tamus.edu/swat/swatdoc.html>.

INTA. 1973. Carta de Suelos. Hoja 3360-33. Pérez Millán. E=1:50.000. 45 PP.

INTA. San Pedro. 2010. Información agrometeorológica diaria. <http://www.inta.gov.ar/sanpedro/info/meteor.htm>

Kiniry, JR; WD Rosenthal; BS Jackson & G Hoogenboom. 1991. Chapter 5: Predicting leaf development of crop plants. p. 30-42. *In: Hodges (ed.) Predicted crop phenology.* CRC Press, Boca Raton, FL.

Kiniry, JR; DJ Major; RC Izaurralde; JR Williams; PW Gassman; M Morrison; R Bergentine & RP Zentner. 1995. EPIC model parameters for cereal, oilseed, and forage crops in the northern Great Plains region. *Can. J. Plant Sci.* 75: 679-688.

Lim, KJ; B Engel & A Hetzroni 2001. Incorporation and evaluation of a river quality model to NAPRA WWW decision support system. ASAE Paper No. 012127, presented at the 2001 ASAE Annual International Meeting. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Moriasi, DN; JG Arnold; MW van Liew; RL Bingner; RD Harmel & TL Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50(3): 885-900.

Nash, JE & JV Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models, part 1. A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10(3): 282-290.

Neitsch, SL; JG Arnold; JR Kiniry & JR Williams. 2001. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation version 2000. Temple, Texas: Blackland Research Center-Texas Agricultural Experiment Station. Disponible en <http://www.brc.tamus.edu/swat/swatdoc.html>.

Ongley, ED. 1997. Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. Estudio FAO Riego y Drenaje n° 55, FAO, Roma. 116 PP.

Ramanarayanan *et al.* 1997. Using APEX to Identify Alternative Practices for Animal Waste Management: Part II. Model Application. ASAE, St. Joseph, MI.

Santanatoglia, OJ; A de Iorio; CI Chagas; MJ Massobrio & A Rendina *et al.*, 2006. Escurrimiento, sólidos totales y propiedades químicas del agua del arroyo del Tala (San Pedro, Buenos Aires, Argentina). *Rev. Facultad de Agronomía (Argentina)*, 26: 121-131.

Santhi, C; JG Arnold; JR Williams; LM Hauck & WA Dugas. 2001. Application of a watershed model to evaluate management effects on point and nonpoint source pollution. *Trans. ASAE* 44(6): 1559-1570.

Saxton, KE & WJ Rawls. 2006. Soil water characteristics estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1569-1578.

- Soil Conservation Service. 1973. A method for estimating Volume and Rate of Runoff in small watersheds. SCS-TP-149. U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington DC.
- Soil Conservation Service. 1975. Engineering Field Manual for Conservation Practices. U.S. Department of Agriculture.
- Solsona, F. 1999. Cantidad y calidad de las aguas en el mundo y en el Mercosur. Taller sobre normas de calidad de agua para distintos usos en el Mercosur. Rosario Argentina, 9 y 10 de diciembre de 1999. PP 9-12.
- Vázquez Amábile, G & BA Engel. 2005. Use of SWAT to compute groundwater table depth and stream flow in Muscatatuck River Watershed. *Transaction of the ASAE* 48(3): 991-1003.