

Aplicación del modelo SWAT para evaluar sequías agropecuarias en la cuenca del río Arrecifes (prov. Buenos Aires)

Sofía Havrylenko¹, José María Bodoque del Pozo², Viviana Zucarelli³ y Pablo Mercuri¹

¹ Instituto de Clima y Agua, Centro de Investigaciones de Recursos Naturales (CIRN) – INTA, Nicolas Repetto y de los Reseros s/n (1686) Hurlingham - Argentina

² Universidad de Castilla La Mancha (UCLM), Camino Pozuelo s/n (16071) Cuenca - España

³ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral (UNL), Ciudad Universitaria. Ruta Nacional N° 168 - Km 472,4. (3000) Santa Fe - Argentina

E-mail: havrylenko.sofia@inta.gob.ar

RESUMEN: Las sequías son una amenaza climática que tiene lugar en casi todas las regiones del mundo; cuyas características de intensidad y frecuencia de ocurrencia dependen de cada región. La actividad agropecuaria es altamente vulnerable a las condiciones meteorológicas, especialmente a los eventos extremos. La expansión de la agricultura en la región pampeana hacia ambientes más frágiles, o marginales, trajo aparejada un incremento en la frecuencia de sequías agrícolas. El objetivo de este trabajo fue evaluar a nivel de cuenca la aptitud del modelo SWAT (The Soil and Water Assessment Tool) para la obtención de una serie histórica de humedad de suelo simulada (HSS). Al efecto, primero se calibró y validó el modelo con caudales observados y, luego, se realizó un análisis de correlaciones entre las anomalías del HSS y del índice de vegetación normalizado (NDVI) derivado de imágenes NOAA-AVHRR. La calibración (NSE 0,67) y validación (NSE 0,72), a escala temporal mensual, indicó un buen desempeño del modelo. En cambio, el análisis de correlaciones mostró valores bajos ($r \sim 0.09-0.46$), consistentes con los obtenidos por otros autores. Los resultados del estudio mostraron que la metodología planteada presenta limitaciones que no permiten evaluar correctamente la aptitud de SWAT en la estimación de HSS.

INTRODUCCIÓN

Las sequías son una amenaza climática que tiene lugar en casi todas las regiones del mundo (Mavi y Tupper, 2004); cuyas características de intensidad y frecuencia de ocurrencia dependen de cada región (Ravelo et al., 1999). La actividad agropecuaria es altamente vulnerable a las condiciones meteorológicas, especialmente a los eventos extremos. La expansión de la agricultura en la región pampeana hacia ambientes más frágiles, o marginales, trajo aparejada un incremento en la frecuencia de sequías agrícolas (Ravelo et al., 1999). Por sequía agrícola se entiende aquella que se origina cuando la humedad en el suelo no alcanza a cubrir las necesidades de los cultivos en un período particular. Se trata de un concepto complejo que incluye factores meteorológicos, agrícolas, ambientales y antropogénicos asociados al uso del suelo (Das et al., 2003). Este tipo de sequías pueden

presentarse frecuentemente en distintas épocas fenológicas de los cultivos, afectando a diferentes áreas y generando mermas significativas en la producción.

La humedad del suelo es un excelente indicador de la sequía agrícola, ya que es una medida que depende de variables meteorológicas, propiedades del suelo, vegetación presente y manejo de la tierra (Narasimhan et al., 2005). Asimismo, es un parámetro hidrológico importante que controla diversos procesos del ciclo hidrológico. En las últimas décadas, se han desarrollado numerosos modelos hidrológicos distribuidos o semidistribuidos, continuos o de eventos y físicamente basados, que se han comenzado a explorar como posible herramienta para estimar el contenido de agua en el suelo. Narasimham et al. (2005), Ming Xing et al. (2010) y Jha (2012), han utilizado SWAT para simular a nivel de subcuenca la humedad del suelo, implementado exitosamente el modelo SWAT en diferentes cuencas y regiones y para un periodo de tiempo suficientemente representativo. Estos autores, al comparar los datos simulados con datos observados o provenientes de otras fuentes (tales como sensores remotos), encontraron que el modelo puede generar datos a largo plazo de humedad del suelo consistentes desde un punto de vista de su variabilidad espacio-temporal.

El estudio se situó en la cuenca del río Arrecifes, el objetivo del mismo fue evaluar a nivel de cuenca la aptitud del modelo SWAT (The Soil and Water Assessment Tool) para la obtención de una serie histórica de humedad de suelo simulada (HSS). Al efecto, se realizó un análisis de correlaciones entre HSS y el NDVI-3g (Pinzón y Tucker, 2014) producida por el grupo Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS), utilizando para ello un periodo común de casi 30 años (desde agosto 1981 a diciembre 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La cuenca del Arrecifes se sitúa al norte de la provincia de Buenos Aires ($33^{\circ}36'$ y $34^{\circ}35'$ S y $59^{\circ}31'$ y $61^{\circ}28'$ O) dentro de la Pampa Ondulada Alta (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA], 2009) (Fig. 1A). El cauce natural primario nace de la unión del río Salto y del arroyo Pergamino, localizándose su confluencia en el río Paraná de las Palmas. La sección de control de la cuenca se ubica en el balneario de la localidad de Arrecifes a $34^{\circ}04'30''$ S y $60^{\circ}06'23''$ O. Siendo la superficie total que comprende el área estudiada, hasta la sección de control, de 8.742 km².

Esta región del país presenta especial interés debido a que posee las condiciones óptimas para la explotación de la actividad agropecuaria. Actualmente, la Red de Información Agropecuaria Nacional (RIAN) la ubica a la cuenca del Arrecifes dentro de la zona VI-J, la cual se corresponde con el “núcleo agrícola” del norte de la provincia de Buenos Aires. Los principales cultivos son la producción de oleaginosas (soja y girasol) y cereales

(maíz y trigo) (RIAN, 2012). Por otro lado, la actividad ganadera se desarrolla sólo en las áreas aledañas a afluentes de agua y cañadas, que presentan suelos de alcalinidad sódica y drenaje deficiente. Esta configuración se da en posiciones topográficamente altas, en las que el suelo presenta cierta acidez en los horizontes superficiales (Gaspari et al., 2006).

El área de estudio tiene una climatología homogénea. Se caracteriza por presentar inviernos secos, siendo los meses más húmedos los comprendidos entre octubre y marzo. El déficit hídrico más acusado se produce durante finales de primavera y principios del verano, como resultado de la mayor evapotranspiración en esta época del año. El régimen hidrológico del río Arrecifes manifiesta picos primaverales y otoñales coincidentes con la época de mayor lluvia (septiembre-mayo). Mientras que los caudales mínimos se producen durante fin del invierno y el mes de enero (que concuerda con el mes de mayor déficit).

Datos de entrada

Los datos requeridos para poder aplicar el modelo SWAT fueron adquiridos de diversas fuentes y se sometieron a diferentes procesamientos antes de ser incorporados al modelo. SWAT requiere de información espacialmente distribuida de suelo; uso del suelo y elevación del terreno. Además, necesita datos climáticos puntuales de precipitación, temperatura; velocidad del viento y radiación solar. Los datos meteorológicos diarios se obtuvieron de dos estaciones meteorológicas pertenecientes al INTA y al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), localizadas a 33°55'48'' S y 60°32'60'' O, y 34°32'60'' S y 61°48'36'' O, respectivamente (Fig. 1A). Ambas series fueron sometidas a un control de calidad para corroborar la homogeneidad y consistencia de los datos, como así también, valores no válidos, ausentes y extremos.

La información topográfica utilizada se derivó del SRTM-C (Farr et al., 2007) en su versión de 1 segundo de arco de resolución (aprox. 30 metros). Estos datos no pueden ser utilizados directamente para aplicaciones hidrológicas debido a que la señal de radar de la banda C es especialmente sensible a la geometría y orientación de las hojas de la vegetación. La energía es fuertemente dispersada y no puede penetrar la vegetación, de manera que el Modelo Digital de Elevación (MDE) generado, no muestra la altura del suelo desnudo sino la altura de la superficie visible; interfiriendo, tanto en el cálculo de la dirección del flujo real como en el flujo acumulado en cada celda, y por tanto, afectando como resultado a la calidad hidrológica de los datos. Es por ello que para poder utilizar esta fuente de datos se removió el ruido ocasionado por la vegetación.

Las coberturas del uso de suelo fueron elaboradas a partir de imágenes satelitales del sensor Landsat 5 sensor thematic mapper (tm), mediante la combinación de los métodos de clasificación supervisada e interpretación visual (Fig. 1B y 1C). Para cubrir la totalidad del área de estudio se utilizaron las escenas con path-row: 226-083/084, 227-083/084, y para representar la variación estacional de los dos periodos agrícolas más característicos (invernal – estival) se adquirieron diferentes fechas comprendidas entre septiembre 2006 – marzo

2007, las que fueron adquiridas en forma gratuita de sitios como U.S. Geological Survey (USGS) <http://glovis.usgs.gov/> y el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>.

Los datos analíticos de los suelos (Fig. 1D) se extrajeron de las hojas 3360: 31–32–33–34 y 3560: 2–3–4–5–7–8–9–10 de las Cartas de suelos de la República Argentina – Provincia de Buenos Aires, escala 1:50:000 publicadas por (INTA; 2009). La cobertura fue adquirida en formato vector, a escala 1:50.000, y para poder utilizarla, al mapa vectorial se le construyó la topología con el fin de que cada elemento tuviera una identificación única. Finalmente, se categorizó cada polígono (ligado a una serie particular) vinculándolo con la información registrada en las hojas de suelo y los documentos descriptivos de cada serie.

La serie de caudales utilizada en la calibración y validación del modelo fue generada a partir de los datos de alturas diarios y de 290 aforos registrados por ADA durante el período 1963-2002 en la sección de control estación río Arrecifes. La serie de alturas es incompleta y presenta algunos años con pocos o incluso sin registros. Con los datos de alturas y aforos se ajustó una curva de descarga con un $r = 0,96$ y un error cuadrático medio e.c.m. = 18,9 m³/s para valores de caudales aforados entre 1,3 y 576 m³/s (Flamenco, 2012), y con posterioridad se calcularon los caudales diarios.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) (Tarpley et al., 1984), surge de la relación entre la diferencia y suma de las bandas del infrarrojo cercano (debido a la estructura celular de la hoja) y rojo (debido a los pigmentos de la clorofila), y del hecho que los espectros del suelo, que carecen de este tipo de mecanismo, en general, no muestran esta gran diferencia espectral (Tucker, 1979). El índice varía entre -1 y 1, los valores cercanos a 1 indican alto contenido de vegetación, los cercanos a 0 indican suelo desnudo, por su parte, los valores negativos se interpretan como áreas no vegetadas tales como cuerpos de agua, hielo y nieve.

Para correlacionar los datos de HSS se utilizó la serie GIMMS-3g NDVI (Pinzón y Tucker, 2014), la misma tiene una longitud de casi 30 años (1981-2011) y una cobertura a nivel mundial. Esta serie fue generada con datos, Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), a bordo de la plataforma National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), utilizando los satélites NOAA-7, -9, -11, -14, -16 y -18. El GIMMS-3g NDVI fue calculado a partir de la banda 1 (Rojo: 550–700 nm) y banda 2 (Infrarrojo cercano: 730–1000 nm). La serie cuenta con una resolución espacial de 8 km y una resolución temporal de 15 días, de imágenes compuestas a partir del máximo valor de cada píxel de las imágenes diarias, y puede ser obtenida gratuitamente del servidor <http://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g/>.

Aplicación del modelo SWAT

La discretización de la cuenca se realizó por subcuenca. La definición de las subcuencas se realizó teniendo en cuenta criterios de homogeneidad en relación a los factores que condicionan la transformación de la lluvia en

escorrentía. A este respecto, se prestó especial atención a las series de suelo, ya que en esta región es el factor más significativo. Los puntos de desagüe automáticos fueron eliminados y en su lugar se ubicaron nuevos puntos manualmente, al objeto de acomodarlos con los límites de las principales series de suelo (Fig. 1D). Finalmente, el cierre o salida de la cuenca se hizo coincidir con la estación río Arrecifes. Se obtuvieron un total de 20 subcuencas.

Las unidades de respuesta hidrológicas (HRUs) se obtuvieron a partir de la integración del tipo de suelo dominante, uso de suelo y pendiente. Esta discretización permite reflejar con mayor precisión la variabilidad espacial del proceso de transformación de la lluvia en escorrentía (Neitsch et al., 2011). El modelo se puede simplificar de tal modo que una sola HRU describa una subcuenca, o bien complicar quedando caracterizada una subcuenca dada por múltiples HRUs. Aquí se incluyeron múltiples HRUs, aunque su tamaño quedó condicionado por la elección de un umbral en porcentaje de área de las coberturas integradoras (2 % para el uso del suelo y 5 % en el tipo de suelo). El número total de HRUs que caracterizó a la cuenca completa fue de 337.

Los parámetros correspondientes a prácticas de manejo de cultivos y red de drenaje fueron modificados. Las prácticas de manejo fueron especificadas a nivel de unidades de respuesta hidrológica (HRUs). Asimismo, se realizaron las siguientes consideraciones: solo se incluyó la práctica de cultivos en secano, el crecimiento de las plantas se definió mediante épocas de siembra y cosecha, se implementaron prácticas de labranza mínima con rastra de discos y, además, se recrearon rotaciones de siembra clásicas de 3 años de duración cuyo propósito fue simular la evolución del uso del suelo mediante 3 escenarios de cobertura vegetal diferente y así mejorar la estimación del modelo. Mientras que los parámetros de la red de drenaje se determinan automáticamente a partir del MDE, dependiendo su precisión de la resolución espacial del modelo (30 m). Debido a la baja resolución del modelo utilizado los parámetros quedaron inicialmente sobreestimados, lo cual obligó a su corrección utilizando para ello secciones transversales provistas por el Instituto Nacional del Agua (INA).

La simulación se realizó para un periodo de 36 años (1975-2011) a escala temporal mensual. Se utilizó un periodo de equilibrio de 5 años (1975-1979), en el cual el modelo no calcula ningún valor y lo utiliza para estimar los valores iniciales del modelo. El método para estimar la evapotranspiración potencial (PET) fue Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972). El Número de Curva (CN) se estimó como función de la permeabilidad del suelo, uso del suelo y condiciones de humedad antecedentes. El CN diario se calculó con el método de la evapotranspiración de las plantas (Neitsch et al., 2011), el cual utiliza esta variable como factor de peso en el coeficiente de retención del agua. Finalmente, la propagación del agua en los cursos de agua fue caracterizada mediante el método de propagación de almacenamiento variable propuesto por Williams en 1969.

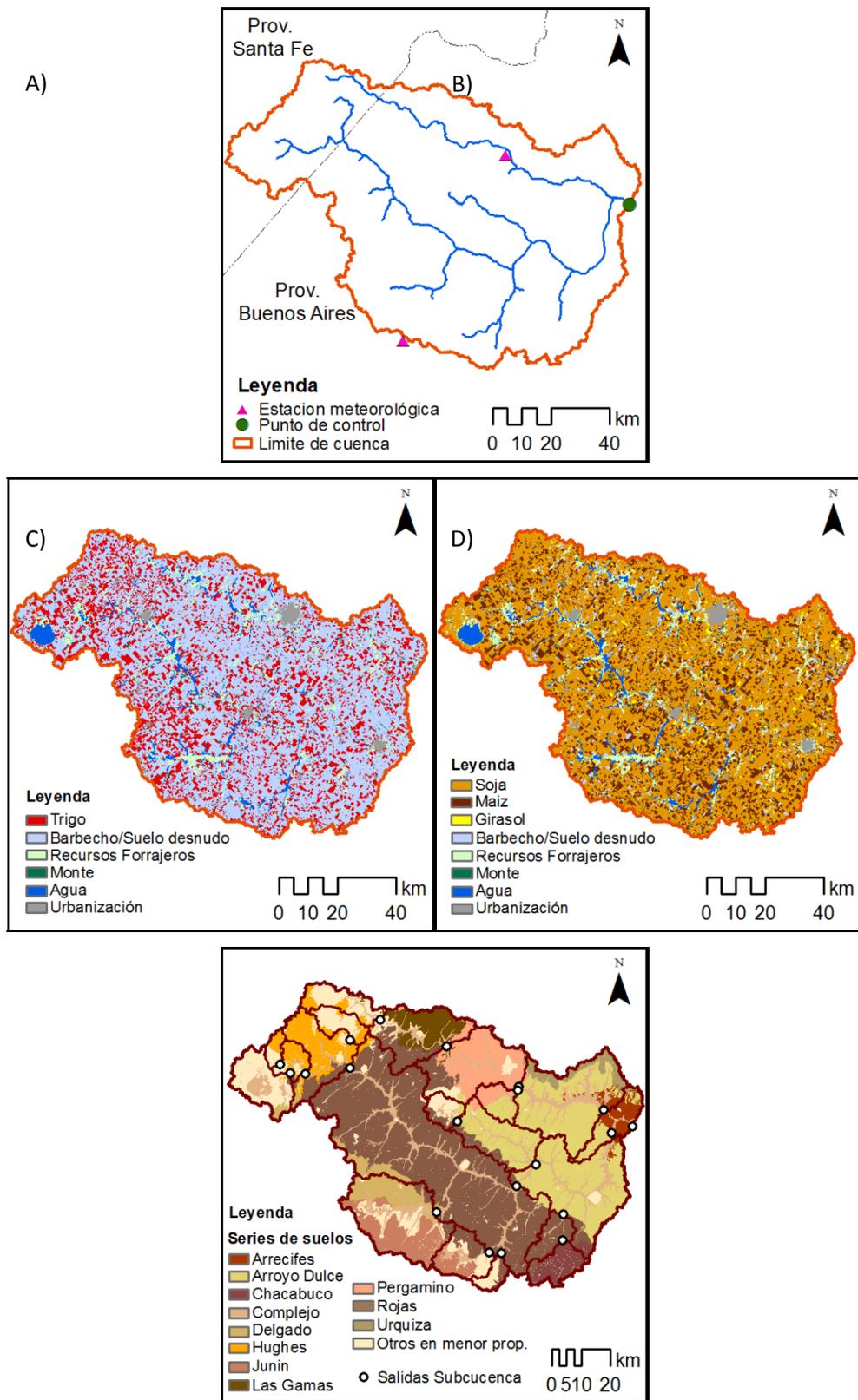


Figura 1. A) ubicación de cuenca. B) Uso de suelo en primavera. C) Uso de suelo en verano. D) Principales series de Suelo.

Calibración, Validación y Análisis de sensibilidad

La evaluación del modelo fue realizada automáticamente mediante la interface SWAT-CUP4. Este programa cuenta con cinco métodos de evaluación, de los que se seleccionó el método *Sequential Uncertainty Fitting ver. 2* (SUFI-2) (Abbaspour *et al.*, 2007). La variable observada que se utilizó para evaluar el funcionamiento del modelo y calibrar fue el caudal diario medido en la sección de control de la cuenca, cuyos valores fueron agregados a escala mensual. La calibración se realizó para un período de 14 años (1 de enero de 1979 al 31 de diciembre de 1992) en el que se representaron tanto periodos húmedos como secos. Mientras que el período de validación se realizó para un período de 6 años (1 de enero de 1993 al 31 de diciembre de 1998).

Los parámetros a calibrar se determinaron mediante el análisis paso a paso (*one-at-a-time*). Este método hace variar un parámetro y deja el resto constante, y permite fijar cuáles de los parámetros de entrada tienen una mayor influencia a la hora de estimar los caudales simulados. Los parámetros seleccionados, a su vez, fueron modificados aplicando uno de los tres modos de cambios propuestos: sustituir un valor por otro (v_x), reducir o aumentar un porcentaje de los mismos (r_x), sumar o restar un valor (a_x). La función objetivo aplicada, para determinar el rango óptimo de los parámetros finales, fue el coeficiente de Nash – Sutcliffe, NS, (1970). El software calcula simultáneamente otros índices de los cuales se eligieron el coeficiente de determinación (R^2), y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE).

La bondad del ajuste fue evaluada mediante dos medidas el P-factor ($0 - 1$) y el R-factor ($0 - \infty$) (Abbaspour *et al.*, 2007). El P-factor, es el porcentaje de los datos medidos en el 95 % de predicción de incertidumbres (95PPU). El 95PPU se calcula a partir de las variables de salida obtenidas a partir del hipercubo latino incluidas dentro del 2.5 % y 97.5 % de los niveles de distribución acumulada, rechazando el 5% de las simulaciones categorizadas como muy malas. Mientras que el R-factor o grado de incerteza se determinó como la distancia promedio entre el nivel superior e inferior del 95PPU. Siendo un resultado perfecto cuando el 100% de las medidas están acotadas en el 95PPU y la distancia R-factor es cercana a 0. Por último, la sensibilidad de los parámetros se determinó mediante el análisis de sensibilidad global (Abbaspour *et al.*, 2007).

Series HSS y NDVI

Para obtener los valores de humedad de suelo simulada (HSS) se corrió nuevamente el modelo considerando el periodo 1975-2011. A continuación, se extrajeron los datos de contenido de agua en el suelo *soil water* (SW) de los archivos de salida *tables out* (.sub) para cada una de las subcuencas y para el periodo de 30 años (1981-2011), obteniéndose de este modo la HSS. Los datos de HSS se filtraron mediante el cálculo de la anomalía estandarizada, con el fin de hacer una apreciación más adecuada de los momentos de déficit y excesos, y así poder relacionarla con el índice NDVI. Los valores de signo negativo de la anomalía indican un contenido de humedad más bajo de lo normal. La anomalía estandarizada se calculó mediante la Ecuación 1.

$$\alpha HSS = \frac{x_t - \bar{x}}{s_t} \quad (1)$$

Donde: x_i indica el valor observado de un mes del HSS, \bar{x} el valor promedio histórico de un mes del HSS y St el desvío estándar histórico de un mes del HSS.

En relación al NDVI, se obtuvo una imagen compuesta cada 15 días de la serie GIMMS-3g NDVI que se promedió en forma mensual para el período 1981-2011. Se determinó un valor medio del NDVI para cada subcuenca y mes mediante operaciones espaciales de capas raster/vector. Previamente y al igual que con los valores de HSS se filtraron los datos mediante el cálculo de la anomalía estandarizada. Los valores de la anomalía se interpretaron de la siguiente manera: los signos negativos indicaron una respuesta de la vegetación más baja de lo normal, mientras que los valores positivos señalaron lo opuesto. La razón que justifica este planteamiento es que los valores por subcuenca parten del promedio de varios pixeles de baja resolución espacial, a lo que se le suma un ciclo anual muy marcado del índice.

RESULTADOS

Evaluación de la performance del modelo

En la Tabla 1 se pueden ver los parámetros seleccionados para la calibración obtenidos del análisis de sensibilidad absoluto (*one-at-a-time*) y el rango final ajustado.

Tabla 1. Parámetros incluidos en la calibración, valor final ajustado y ranking (análisis de sensibilidad global).

| Grupo de parámetros | Parámetro/Tipo modificación | Definición y unidades | Valor ajustado* | Rank |
|---------------------------------------|-----------------------------|---|-----------------|------|
| Evapotranspiración | EPCO (v_) | Factor de compensación para la cantidad de agua captada por las plantas (fracción). | 0,92 | 12 |
| | ESCO (v_) | Factor de compensación para la evaporación del suelo (fracción). | 0,79 | 9 |
| Escorrentía y Tiempo de concentración | SURLAG (v_) | Coefficiente de retardo de la escorrentía superficial (n/a). | 0,50 | 1 |
| | OV_N (r_) | Coefficiente de Manning n de la superficie terrestre. | 0,023 | 4 |
| | CN2 (r_) | Número de Curva inicial para la condición de humedad II (n/a). | -0.097 | 5 |
| | CH_K (1) (v_) | Conductividad hidráulica efectiva de los canales tributarios aluviales (mm/h). | 35,9 | 13 |
| Flujo lateral | LAT_TTIME (v_) | Tiempo de viaje del flujo lateral (días). | 75,6 | 7 |
| Agua subterránea | ALPHA_BF (v_) | Factor alfa de recesión del flujo base (días). | 0,006 | 6 |
| | GW_REVAP (v_) | Coefficiente de revaporización del agua subterránea (días). | 0,095 | |

| | | | | |
|-----------------------------|---------------|--|-------|----|
| Agua en suelo | FFCB (v_) | Almacenamiento inicial de agua | 0,78 | 11 |
| Rutina del agua en el canal | TRNSRCH (v_) | Fracción de la transmisión de pérdidas desde el canal al acuífero profundo (fracción). | 0,48 | 3 |
| | EVERCH (v_) | Factor de ajuste en la evaporación de los cauces (n/a). | 0,69 | 14 |
| | CH_N(2) (v_) | Coefficiente de Manning para canales principales (n/a). | 0,026 | 2 |
| | CH_K (2) (v_) | Conductividad hidráulica efectiva para canales principales (mm/h). | 115 | 10 |

*Los valores ajustados mostrados en la tabla corresponden únicamente a la modificación (v_, r_, o a_) realizada al parámetro, debido a que algunos parámetros tienen un valor único por HRU. Dependiendo de la modificación, algunos parámetros coinciden con su valor final; mientras que en otros casos corresponde al valor final de la modificación, por ejemplo: para el CN se disminuyó el 0,97% del valor calculado originalmente en la discretización de la cuenca.

La calibración mensual dio en la primera iteración un R^2 de 0,52 y un NSE de 0,41. Para llegar a la optimización final de los parámetros se necesitaron 8 iteraciones con 100 simulaciones cada una, ejecutándose un total de 800 simulaciones. Como resultado final de la calibración se obtuvo un R^2 de 0,69, NSE de 0,67 y un RMSE de 13,9. En la Fig. 2 se muestra la evolución del caudal mensual observado y simulado para todo el periodo de calibración considerado.

La bondad del ajuste de la calibración mensual se evaluó mediante la medida de la incertidumbre (Fig. 2). En referencia a los factores P y R se obtuvo un valor 0,70 y 0,54 respectivamente. Mientras que la evaluación del grado de sensibilidad global de los parámetros mostró que los 6 primeros parámetros rankeados, a saber: SURLAG, CH_N2, TRNSRCH, OV_N, CN2, ALPHA_BF tienen mayor grado de sensibilidad en este modelo. Finalmente en la validación se obtuvo un R^2 de 0,75, NSE de 0,72, un RMSE de 15,4, un P-factor de 0,70 y un R-factor 0,55.

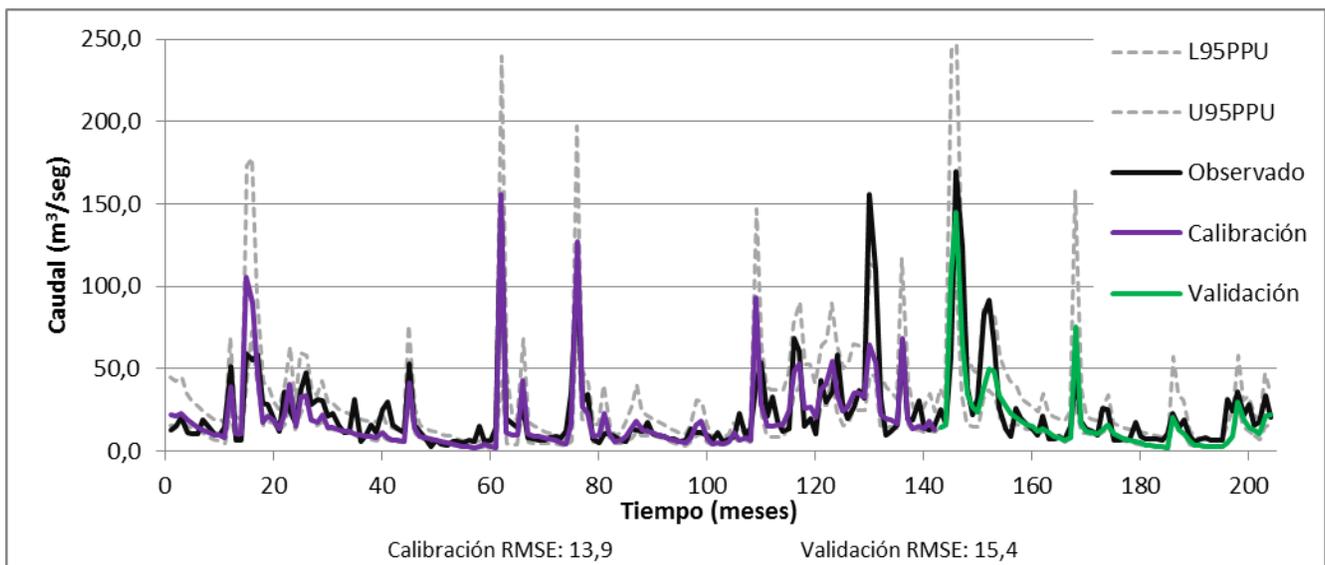


Figura 2. Evolución del caudal mensual observado y simulado en el periodo calibrado/validado.

Correlación y análisis temporal de la variación entre HSS y NDVI

La correlación entre aHSS-aNDVI se estudió a nivel mensual, para cada mes se realizaron 20 correlaciones, una por cada subcuena. En la Fig. 3 A se muestra un diagrama de cajas que resume el grado de correlación entre las variables para cada mes y para todo el periodo de estudio; mientras que en las Fig. 3 B y C se muestran a modo de ejemplo las correlaciones del mes de enero para las subcuenas 5 y 14. Las correlaciones realizadas con un retraso (*lag*) de la aNDVI de 0, 1 y mayores a 1 mes, establecieron que hay un *lag* de 1 mes entre la humedad del suelo y su respuesta sobre la vegetación. Las correlaciones estimadas fueron relativamente bajas y del gráfico se pueden observar los siguientes puntos: i) las correlaciones más altas se distribuyen indistintamente en todas las épocas del año, en general, coincidentes con los momentos de crecimiento de los cultivos de invierno/verano ($> 0,4$ en el inicio y desarrollo del ciclo agrícola), así como también con el período siembra en junio (momento en que casi el 100% de todos los suelos se encuentran desnudos o con rastrojo), ii) las correlaciones menos significativas ($< 0,2$) se observaron en los meses de marzo, abril y septiembre, coincidentes con el momento de la madurez (fin del ciclo agrícola) y cosecha de los cultivos de verano/invierno, cuya fuerte variación anual disminuye el grado de correlación entre humedad e índice de vegetación, iii) el índice NDVI tiene que combinarse con otros indicadores para validar el funcionamiento del modelo como predictor de la humedad del suelo.

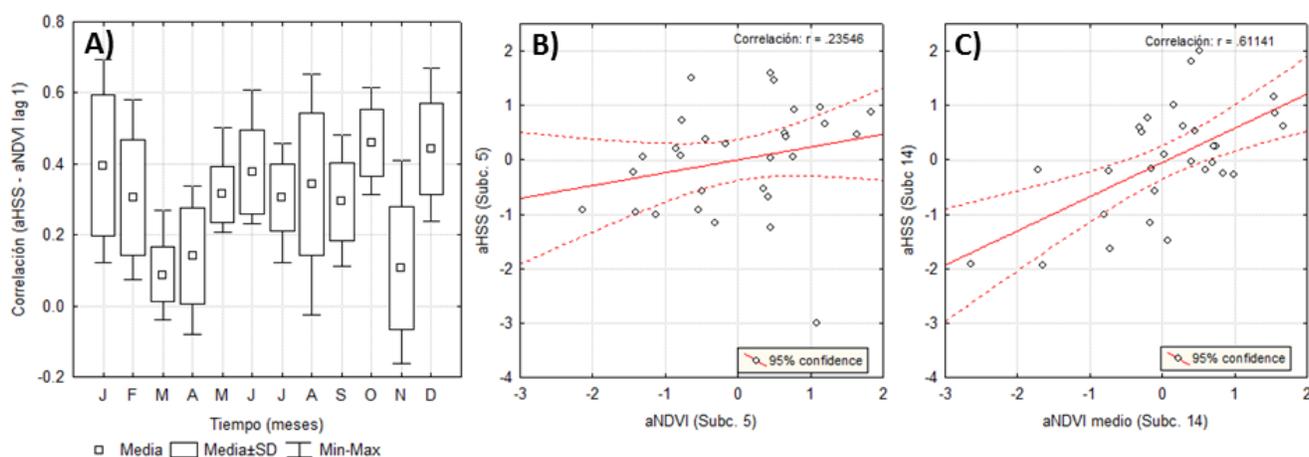


Figura 3. A) Diagrama de cajas que muestra el grado de correlación entre aHSS-aNDVI para el período (1981-2011), en el que para cada mes se incluyen los valores de todas las subcuenas y de cada año. B) y C) Gráficos de correlación entre aNDVI y aHSS, para el mes de enero, de la subcuena 5 y 14 respectivamente.

DISCUSIÓN

En la evaluación de la performance del modelo SWAT, durante la calibración y la validación, se observó un buen ajuste entre las curvas de caudales observados y simulados. Las mayores desviaciones estuvieron asociadas a las mayores crecidas puesto que el modelo subestimó el caudal. Mientras que los caudales medios y mínimos

brindaron mayor exactitud respecto a la estimación de picos de caudal. Esta respuesta del modelo pudo deberse a que la información observada se agregó a nivel mensual y a que la mayoría de los fenómenos correspondieron a caudales medios y bajos, mientras los episodios de picos de caudal fueron relativamente escasos. Por otra parte, la carencia de datos, principalmente la información referente a las precipitaciones (la más sensible a este respecto), produjo que las dos estaciones meteorológicas utilizadas en la cuenca posiblemente no representen adecuadamente la precipitación media en cada subcuenca.

El análisis de las correlaciones entre aHSS y aNDVI mostró resultados poco significativos y permitió evaluar los eventos de sequías agrícolas en forma parcial. Asimismo, para un mismo mes algunas subcuencas tuvieron mejores correlaciones que otras lo que atenuó el resultado global por cuenca. Este comportamiento podría ser asociado tanto al grado como al tipo de uso del suelo de cada subcuenca. Das *et al.* (2003), Mavi y Tupper (2004) y Sivakumar *et al.* (2005) afirman que la sequía agrícola es un concepto complejo que no puede caracterizarse mediante un único indicador. En este sentido, sería recomendable utilizar otros índices para obtener resultados concluyentes. Narasimhan (2004) y Richards *et al.* (2010), correlacionaron HSS y NDVI en diferentes tipos de cultivos y pasturas, encontrando valores significativos únicamente durante el periodo de crecimiento activo de cada cultivo. Por otra parte, Narasimhan (2004) observó que algunos cultivos y pasturas presentan mejores correlaciones que otros; y lo relacionó principalmente con la profundidad a la cual llega el sistema de raíces de las diferentes especies. Es importante notar que SWAT estima el contenido de agua del suelo para todo el perfil, incluso más allá de la profundidad a la cual llegan las raíces de los cultivos presentes en el ámbito estudiado.

Una limitante observada al usar el modelo SWAT es la gran cantidad de parámetros de entrada requeridos, muchos de los cuales están directamente involucrados en los procesos físicos del ciclo hidrológico y de propagación de la escorrentía. Esto trajo aparejado al menos tres inconvenientes: i) la calibración fue compleja; ii) no se dispuso de toda la información para parametrizar adecuadamente la cuenca; iii) los diferentes resultados estimados por SWAT referidos a procesos físicos, por ejemplo, evapotranspiración, contenido de agua en el suelo, infiltración, etc. no poseen la confiabilidad óptima.

CONCLUSIONES

El modelo hidrológico SWAT fue usado para desarrollar una serie de datos de humedad de suelo de 30 años (1981-2011) a una resolución temporal mensual. El resultado de la calibración y validación de los caudales indicó un buen desempeño del modelo. No obstante, éste podría brindar mayor exactitud, en la medida que haya mayor cantidad de datos, especialmente datos de precipitación. Considerando la evaluación global del modelo, este estudio demostró que SWAT es una herramienta integradora que incluye y tiene en cuenta los diferentes componentes naturales del ciclo hidrológico, el uso y el manejo del suelo, el crecimiento de la cobertura vegetal, etc. Se trata de procesos que se dan especialmente en áreas rurales e intervienen fundamentalmente en las

cuencas agrícolas. Con una adecuada parametrización, SWAT podría ser aplicado con menor incertidumbre en la modelización de diferentes procesos relacionados al ciclo hidrológico (ej. HSS), y aplicado en otras cuencas rurales similares de la región pampeana. Si bien la metodología presentó limitantes, se considera que la aplicación de SWAT, para estimar HSS a nivel de subcuenca, contribuiría al estudio de las sequías de la región pampeana al tiempo que aportaría una nueva herramienta para su monitoreo. En este sentido se propone continuar con la evaluación del contenido de agua en el suelo simulado por SWAT en la cuenca del río Arrecifes, en el marco de los proyectos del Programa Nacional de Agua del INTA, explorando el uso de otros indicadores de sequía.

Agradecimientos. Se agradece a los Ingenieros Eduardo Flamenco y Francisco Damiano (INTA) y al Ingeniero Marcelo Uriburu (INA) por sus aportes de conocimientos técnicos. Asimismo, se agradece al ADA e INA por la provisión de información referente a la serie histórica de caudales y de secciones del arroyo Pergamino y río Salto respectivamente.

REFERENCIAS

- Abbaspour, K.C.; Yang, J.; Maximov, I.; Siber, R.; Bogner, K.; Mieleitner, J.; Zobrist, J. y R. Srinivasan. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333, 413-430.
- Das, H. P.; Adamenko, T. I.; Anaman, K. A.; Gommers, R. G. y G. Johnson. 2003. "Agrometeorology related to extreme events". Nota Técnica N° 201. Geneva: World Meteorological Organization N° 943, 152 pp.
- Farr, T. G. y otros. 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Journal of Reviews of Geophysics*, 45pp.
- Flamenco, E. 2012. *Elaboración de la curva H-Q para el río Arrecifes*. Informe inédito. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Gaspari, F. J., Vázquez, M., y J. Lanfranco. 2006. Relación entre la erosión hídrica superficial y la distribución de la pérdida de calcio, magnesio y potasio del suelo. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad de La Plata*, 106 (1), 47-56.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). 2009. "Cartas de suelos de la República Argentina – Provincia de Buenos Aires: Escala 1:50.000". En *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*
- Jha, M. K. 2012. "Quantifying Soil Moisture Distribution at a Watershed Scale". En: M. Hernandez-Soriano (Ed.), *Soil Health and Land Use Management*. Rijeka: InTech, 35-50 pp.
- Mavi, S. H. y G. J. Tupper. 2004. *Agrometeorology: principles and applications of climate studies in agriculture*. New York: Food Products Press, 364 pp.
- Ming Xing, L.; Zhu Guo, M. y D. JiWen. 2010. Regional soil moisture simulation for Shaanxi province using SWAT model validation and trend analysis. *Journal of Science China Earth Sciences*, 53(4), 575-590.
- Narasimhan B., Srinivasan R., Arnold J. G. y M. Di Luzio. 2005. Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data. *Journal of American Society of Agricultural Engineers*, 48(3): 1101-1113
- Narasimhan, B. 2004. *Development of indices for agricultural drought monitoring using a spatially distributed hydrologic model*. Philosophy Doctor Dissertation. College Station, Texas: Universidad de Texas A&M.
- Nash, J. E. y J. V. Sutcliffe. 1970. River Flow Forecasting through Conceptual Models 1. A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.

- Neitsch, S. L.; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R. y J. R. Williams. 2011. "Soil and water assessment tool. Theoretical documentation: version 2009". Reporte Técnico N° 406. College Station, Texas: Texas Water Resources Institute, Texas A&M University, 647 pp
- Pinzon, J.E.; Tucker, C.J. 2014. A non-stationary 1981–2012 AVHRR NDVI3g time series. *Remote Sensing*, under review.
- Priestley, C. H. B. y R. J. Taylor. 1972. On the Assessment of the Surface heat Flux and Evaporation using Large-scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100, 81–92.
- Ravelo, A. C.; Da Porta, W. A. y R. E. Zanvetor. 1999. "Evaluación de las sequías extremas en la región pampeana argentina durante el período 1930–1990". XI Congreso Brasileiro de Agrometeorología, II Reunión Latino-Americana de Agrometeorología. Florianopolis, SC Brasil, 19 al 22 de Julio de 1999.
- Red de Información Agropecuaria Nacional (RIAN). 2012. "Información de seguimiento de sistemas productivos: estado de los cultivos". En *Red de información agroeconómica para la región pampeana*. Buenos Aires: Instituto Nacional de tecnología Agropecuaria.
- Richard, J. 2010. *Drought assessment tools for agricultural water management in Jamaica*. Master Thesis. Quebec, Canada: McGill University, Department of Bioresource Engineering.
- Sivakumar Mannava, V. K.; Motha, R. P. y P. Das Haripada (Eds.). 2005. *Natural disasters and extreme events in agriculture, impacts and mitigation*. Berlin: Springer, 367 pp.
- Tarpley, J.; Schneider, S. y R. Money. 1984. Global vegetation indices from NOAA-7 meteorological satellite. *Journal of Applied Meteorology*, 23, 491-494.
- Tucker, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127–150.