

## Evaluación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca media del río Pao en Venezuela

Oscar Silva

Instituto de Agronomía, Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Apdo. 4579. Maracay 2101, Aragua. Venezuela.

### RESUMEN

La simulación de la producción de agua con el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) se evaluó en la cuenca media del río Pao (1 552 km<sup>2</sup>), definida como prioritaria por abastecer agua a varias ciudades en la región central de Venezuela. Por insuficiente concordancia entre los registros pluviométricos e hidrométricos, las simulaciones mensuales efectuadas con los valores de precipitación del período 1977-1991 se calibraron contra la producción de agua registrada de 1952 a 1965, según su distribución de frecuencias. La validación se efectuó mediante valores mensuales simulados y registrados, correspondientes a un período común (seis años: 1967 a 1983, sin considerar 1969). Sin calibración (parámetros de agua subterránea iguales a cero), la producción de agua mensual y su flujo base se subestimaron notablemente. Con el ajuste de parámetros, se obtuvieron simulaciones con diferencias entre 2 y 16% en los percentiles 25, 50 y 75. La validación resultó satisfactoria con Eficiencia de Simulación: 0,55; Índice de Concordancia: 0,90, Error Medio Absoluto: 7,13 mm; Coeficiente de Correlación: 0,86, y pendiente e intercepto de regresión: 1,02 y 4,05 mm, respectivamente. Esta ligera sobrestimación se atribuyó a sobrevaloración del Número de Curva y subvaloración del agua aprovechable y conductividad hidráulica saturada del suelo. Tal como fue calibrado, SWAT puede ser empleado como apoyo en la gestión de la cuenca media del río Pao y servir como referencia para usuarios del modelo en cuencas similares. La calibración adecuada para el escenario base es imprescindible para obtener estimados confiables de la producción de agua en órdenes de magnitud y tendencias en escenarios hipotéticos.

**Palabras clave:** simulación hidrológica, calibración, validación, producción de agua, flujo base.

### Evaluation of the hydrologic SWAT model in the middle basin of the Pao river in Venezuela

### ABSTRACT

The simulation of water production with the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model was evaluated in the middle basin of the Pao River. The studied area comprises 1 552 km<sup>2</sup> and it supplies water to several cities in the Central Region of Venezuela. There is no overlap of time measurement between the records of rainfall and water production. Hence, the simulations based on rainfall records for the period 1977 - 1991 were calibrated against the records of water production in the period 1952 - 1965, according to their frequency distribution. A validation was performed using monthly values, simulated and recorded during a common period of six years (1967 to 1983, excluding 1969). Without calibration (groundwater parameters equal to zero) the production of monthly water and base flow is notably underestimated. By adjusting parameters, simulations were obtained with differences between simulated and recorded values ranging from 2 to 16%, in the percentiles 25, 50 and 75, and in average and sum of values. The validation was

---

\*Autor de correspondencia: Oscar Silva

E-mail: silva@agr.ucv.ve

successful, with simulation efficiency 0.55, concordance index 0.90, mean absolute error 7.13 mm, correlation coefficient 0.86, regression slope 1.02 and intercept 4.05 mm. There is a slight overestimation of water production values in the rainfall season. This is attributed to overvaluation of the Curve Number and undervaluation of the available water and the saturated hydraulic conductivity of the soil. As calibrated in this study, SWAT can be used to support managing decisions in the middle basin of the Pao River. It also can serve as a reference to use the model in similar watersheds.

**Key words:** hydrologic simulation, calibration, validation, water yield, base flow.

## INTRODUCCIÓN

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) ha sido desarrollado para evaluar el impacto del uso y manejo de la tierra sobre la producción y calidad de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas (Arnold *et al.*, 1998; Neitsch *et al.*, 2005). Se considera una herramienta útil para la investigación de estrategias alternativas de manejo, en cuanto a los efectos sobre la hidrología y calidad del agua (White y Chaubey, 2005). Ha sido exitosamente empleado en simulaciones de flujo de largo plazo, erosión y transporte de sedimentos y nutrientes en áreas de diferente tamaño y condiciones edáficas, de cobertura vegetal, climáticas y geológicas (Borah y Bera, 2004; Bekiarisi *et al.*, 2005; Schuol y Abbaspour, 2006).

Además, el SWAT es un modelo de tipo funcional que combina bases físicas y conceptuales con procedimientos empíricos. Permite desagregar la cuenca en unidades homogéneas de respuesta hidrológica (URH), según clima, vegetación, suelo, uso e hidrología. Las salidas de uso más frecuentes son producción de agua y sus componentes (principalmente escorrentía superficial y flujo de base), producción de sedimentos, carga de nutrientes y biocidas. Las simulaciones se efectúan sobre base diaria y pueden alcanzar decenas de años, haciendo uso de valores climáticos obtenidos de los registros ó generados por el modelo o una combinación de ambas opciones (Arnold *et al.*, 1998; Neitsch *et al.*, 2005). La escorrentía es estimada diariamente mediante modificaciones del método de número de curva (USDA-SCS, 1972), con ajustes según pendiente y humedad del suelo. La infiltración se valora como la diferencia entre la precipitación y la escorrentía, mientras que el flujo de agua subterránea se rige por una serie de parámetros en los que influyen las tasas con las que el agua infiltrada al suelo puede evaporarse hacia la superficie, fluir desde el perfil humedecido del suelo hacia el acuífero superficial, evaporarse desde el acuífero superficial hacia los estratos suprayacentes, fluir desde el acuífero superficial hacia el cauce como flujo de base o infiltrar profundamente o perderse hacia el acuífero profundo.

Aunque el uso de modelos de simulación es extendido a los fines de análisis hidrológicos, está sujeto a una serie de limitaciones conceptuales y prácticas y, en general, la incertidumbre en cuanto a la representación de los procesos (no considerados por el modelo e imprecisiones debidas a sobre-simplificación), así como al valor de los parámetros de entrada, se traducen en fuentes de error de mayor o menor grado en las simulaciones (Yáng *et al.*, 2008). Adicionalmente, modelos como SWAT incluyen una gran cantidad de parámetros con los que se representa la heterogeneidad espacial de los factores y procesos que ocurren en una cuenca, los cuales son de determinación incierta debido a su variabilidad espacial, limitaciones de presupuesto o dificultades de acceso a algunas partes de la geografía considerada (Lenhart *et al.*, 2002).

La calibración y validación de los modelos son procedimientos claves para reducir la incertidumbre y, consecuentemente, aumentar la confianza del usuario en cuanto a las capacidades de estimación y hacer efectiva su aplicación (White y Chaubey, 2005). La evaluación de modelos de simulación comprende el análisis científico y operacional. El primero, relativo a lo consistente de las estimaciones con respecto a la teoría científica prevaleciente. El segundo, asociado a la evaluación de la exactitud (cuánto se aproximan las salidas simuladas a sus correspondientes valores reales) y la consistencia (el grado en que dichas salidas se aproximan a una función lineal de los valores reales). Una evaluación exitosa de un modelo de simulación debe comprender ambos análisis, aunque con frecuencia, el análisis operacional aporta los medios más tangibles de establecer su grado de credibilidad (Willmott *et al.*, 1985).

El establecimiento de valores adecuados de parámetros relevantes para SWAT servirá de referencia o línea base para ser empleado por investigadores y planificadores en el análisis de los impactos que sobre la producción de agua ocasionarían el cambio de uso, manejo y ordenamiento de la tierra en una cuenca determinada. En este sentido, el presente estudio evalúa el modelo SWAT en el marco de la simulación de la producción de agua en la cuenca media del río Pao, ubicada en la región central de Venezuela.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se efectuó en la cuenca media del río Pao (1522 km<sup>2</sup>), ubicada en el noreste del estado Cojedes y suroeste del estado Carabobo, en la región central de Venezuela (MARNR, 1989, Escalona y Estrada, 1997; Guillén, 2001). En la cuenca se localiza el embalse La Balsa, el cual surte de agua para consumo doméstico e industrial a los estados Aragua y Carabobo.

En toda la cuenca media la precipitación es estacional, con promedios anuales 1250 a 1500 mm. La mayor parte de la cuenca presenta una temperatura máxima promedio anual de 32°C y una mínima de 20°C (IGSB, 2003). Los suelos son de texturas medias, franco arenosos. El paisaje es fundamentalmente de colinas, con montañas bajas y valles relativamente planos. La altitud varía entre 500 y 1300 m (Guillén, 2001). Predominan formaciones geológicas pertenecientes a edades entre el Paleozoico y el Cuaternario, con litología de gneis, esquistos, filitas y lutitas (MMH, 1976). La vegetación es de matorrales, pastizal natural pastoreado y bosque claro. Existen pocos y dispersos cultivos anuales y permanentes, de subsistencia y comerciales (MARNR, 1989).

### Bases para aplicación del modelo

#### Opciones para control de la simulación

Se empleó la versión SWAT 99,2 para Windows (USDA-ARS, 1999). En todas las simulaciones la precipitación fue leída a partir de registros diarios. Los valores de temperatura y radiación global se generaron a

partir de registros mensuales (promedio y desviaciones), mientras que la evapotranspiración se estimó mediante la opción Priestley-Taylor del modelo. Los valores diarios de producción de agua simulada se acumularon en totales mensuales.

### Representación de la cuenca

La cuenca se simuló mediante 60 URH, el máximo que permite esta versión del modelo, compuestas de subdivisiones de 11 subcuencas según diversas combinaciones de fisiografía y uso de la tierra. Con el objeto de generar estimados adecuados de la entrada de agua a la cuenca media desde la cuenca alta, esta última se representó mediante una URH, calibrada particularmente para la producción de agua registrada en una estación hidrométrica con registros mensuales desde 1960 hasta 1967.

### Clima

El modelo se programó para leer los valores de precipitación diaria de seis estaciones pluviométricas (cuatro dentro de la cuenca y dos periféricas, ubicadas a menos de 15 km de los límites de ésta). Los valores diarios de radiación se generaron para toda la cuenca a partir de la información de una estación. Las temperaturas máximas y mínimas fueron generadas según la información de dos estaciones, asociadas a la cuenca según la altitud. Toda la información climática fue provista por el Sistema Nacional de Información Hidrológica y Meteorológica del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (Cuadro 1).

### Suelos

A cada una las unidades fisiográficas identificadas y delineadas por el MARNR (1989), se le asoció un

**Cuadro 1.** Estaciones climatológicas empleadas en las simulaciones

| Estación       | Serial | Altitud (msnm) | Longitud (°) | Latitud (°) | Elemento                 | Ubicación relativa <sup>1</sup> |
|----------------|--------|----------------|--------------|-------------|--------------------------|---------------------------------|
| Pao Planta     | 2339   | 178            | -68,11       | 9,76        | Precipitación            | a                               |
| Pao Oficina    | 2349   | 128            | -68,05       | 9,65        | Precipitación            | a                               |
| Morita Caserío | 2348   | 122            | -68,26       | 9,66        | Precipitación            | a                               |
| Cachinche      | 2318   | 400            | -68,14       | 9,90        | Precipitación            | a                               |
| Las Dos Bocas  | 0491   | 550            | -67,99       | 9,96        | Precipitación            | b                               |
| Manuare        | 2404   | 640            | -67,81       | 9,97        | Precipitación            | b                               |
| Samán Mocho    | 0450   | 425            | -67,86       | 10,10       | Temperatura              | c                               |
| San Carlos     | 2311   | 120            | -68,56       | 9,69        | Temperatura<br>Radiación | d<br>d                          |

<sup>1</sup> Dentro (a) ó fuera de la cuenca, pero a menos de 6 (b), 16 (c) ó 30 km (d) de su límite

pedón representativo, obtenidos del Módulo de Suelos del Sistema de Información Edafoclimático del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales. Para efectuar esta asociación se consideró la ubicación geográfica, la formación geológica y el tipo de paisaje de los pedones disponibles. Con el sistema SoilPar (Donatelli y Acutis, 2001; Acutis y Donatelli, 2003) se estimó la información de densidad aparente (opción Baumer-EPIC), agua aprovechable y conductividad hidráulica saturada (opción Campbell). Para efectos de la asignación del valor del número de curva, se obtuvo el grupo hidrológico con base en las fracciones texturales del suelo (USDA-NRCS, 2007). Cuando fue procedente, se obtuvieron grupos hidrológicos transicionales según la clase de profundidad y el fracturamiento del horizonte rocoso (Chiang, 1971).

### Cobertura vegetal, uso y manejo de la tierra

Se empleó la cartografía de vegetación de la cuenca del río Pao (MARNR, 1989) a escala 1:100 000. Las 11 clases de vegetación identificadas originalmente se simplificaron en seis (bosque claro, matorrales, cultivos anuales, cultivos de subsistencia, cultivos de ciclo corto en matorrales y herbazales naturales pastoreados), cada una de las cuales fue asociada a un archivo de formación vegetal o de cultivo disponible en la base de datos del modelo. La asignación del valor de número de curva se efectuó según la tabla típica incluida en la interfaz. A los grupos hidrológicos transicionales (Chiang, 1971) se les asignó el valor promedio entre los dos grupos en que se define la transición.

### Calibración y validación

La calibración del modelo se efectuó mediante la modificación de los parámetros de agua subterránea, a partir de los valores propuestos por Carmona (2007) al calibrarlo en una cuenca pequeña. Para evaluar las simulaciones de calibración, se empleó la información de la estación hidrométrica ubicada en el actual sitio del embalse (Paso La Balsa, serial 0335) durante el lapso 1952-1973. Los años posteriores disponibles no se emplearon debido a que la construcción de dos embalses en la cuenca afectaron las mediciones. Dada la falta de correspondencia entre registros de producción de agua (1952 a 1967) y de precipitación (1977 a 1992), la calibración se efectuó comparando la producción de agua simulada en el segundo período, contra la registrada en el primero. Se emplearon los promedios, sumas y desviaciones, así como las curvas de frecuencia acumulada de ambas series de valores (180 meses cada una).

La validación se efectuó según los totales mensuales

de producción simulada y registrada de agua para un período coincidente de cinco años de registros de precipitación y de producción de agua (1967 a 1973, sin 1969 por falta de registro). Para comparar los valores simulados con los registrados, se emplearon índices de regresión y de diferencia, a saber:

### Estimación de índices

Para el caso de los índices basados en regresión, se emplearon el coeficiente de correlación, los valores de la pendiente y del intercepto, y las probabilidades (independientes y conjuntas) de que en la línea de ajuste entre valores simulados y medidos, el intercepto fuese igual a cero y la pendiente igual a uno. Como índices basados en diferencia, se consideró la eficiencia de simulación (EF) (Nash y Sutcliffe, 1970), el índice de concordancia (d) (Wilmott *et al.*, 1985) y el error medio absoluto (MAE), estimados a partir de las siguientes ecuaciones:

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M - E)^2}{\sum_{i=1}^n (M - \bar{M})^2}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E - M)^2}{\sum_{i=1}^n (|E - \bar{M}| + |M - \bar{M}|)^2}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (M - E)}{N}$$

Donde:

N= número de pares de valores medidos y estimados

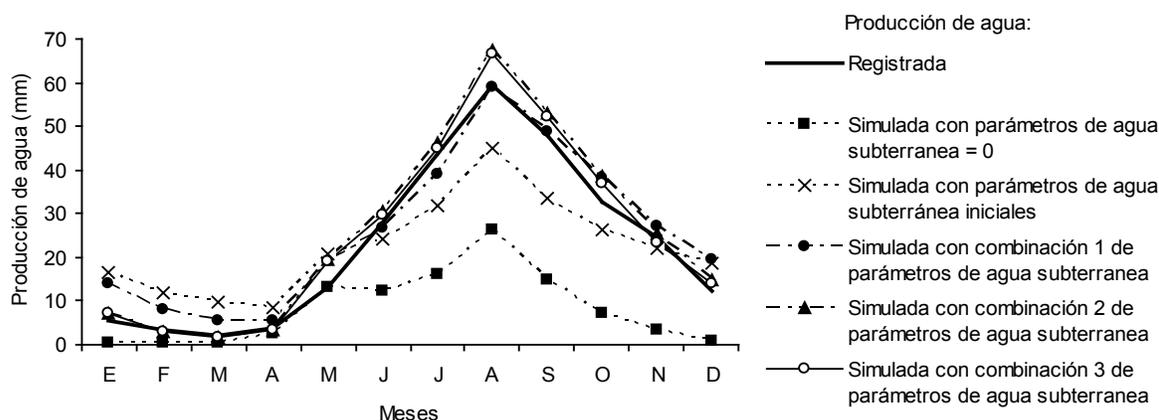
M= valor medido

E= valor estimado o simulado para cada evento i.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Calibración del modelo

El régimen simulado de producción de agua fue muy sensible a las diversas combinaciones empleadas de parámetros de agua subterránea. Destacó el ajuste deficiente obtenido con el empleo de parámetros de agua subterránea iguales a cero. En cambio con ligeras modificaciones a los



**Figura 1.** Producción de agua promedio mensual registrada y simulada con diversas combinaciones de parámetros de agua subterránea (fase de calibración).

parámetros de agua subterránea obtenidos por Carmona (2007), se obtuvo un ajuste satisfactorio (Figura 1).

En el Cuadro 2 se presentan los valores de parámetros de agua subterránea empleados en cada una de las combinaciones. Con valores de agua subterránea iguales a cero, la producción de agua se subestimó marcadamente durante todo el año, con registros extremadamente bajos en la época seca. En este caso, el agua que infiltra al suelo no aporta al flujo base y es drenada directamente a los acuíferos profundos. Al emplear valores de factor alfa mayores a cero, el agua que infiltra al suelo y que excede su capacidad de almacenamiento, no drena toda al acuífero profundo. Por lo tanto, se aporta al flujo de base y aumenta la producción de agua en la época seca.

Al emplear como referencia de partida los valores de agua subterránea obtenidos por Carmona (2007),

denominados valores iniciales, la producción de agua se sobrestimó notablemente durante la época seca, es decir se sobrestimó el flujo base. Posteriormente, cuando se disminuyó el tiempo de retardo para la recarga del acuífero, incrementó la producción de agua en la época de lluvias y disminuyó en la seca. En la medida que se redujo el valor de almacenamiento revap, aumentó la producción de agua a lo largo del año. Finalmente, al ajustar el flujo base, se sobrestimó la producción de agua en la época de lluvias, es decir, la escorrentía superficial.

Son pocos los estudios que señalan valores para los parámetros empleados al calibrar el modelo, lo cual hace difícil establecer recomendaciones según características de las cuencas. La variabilidad que pueden tener los parámetros de agua subterránea en diversas condiciones (Cuadro 3) enfatiza la necesidad de disponer de valores de referencia de

**Cuadro 2.** Combinaciones de parámetros de agua subterránea empleadas en la calibración del modelo.

| Parámetros de agua subterránea <sup>1</sup>                                                    | Combinación de parámetros      |            |            |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------|------------|------------|
|                                                                                                | Valores iniciales <sup>2</sup> | 1          | 2          | 3          |
| Altura inicial de la mesa de agua (m)                                                          | 0                              | 0          | 0          | 0          |
| Contribución inicial de la mesa de agua al flujo del río (mm/d)                                | 0,06                           | 0,06       | 0,06       | 0,06       |
| Factor alfa del agua subterránea <sup>3</sup>                                                  | 0,1                            | 0,1        | 0,1        | 0,1        |
| Rendimiento específico del acuífero superficial (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>4</sup> | 0,3                            | 0,3        | 0,3        | 0,3        |
| <b>Tiempo de retardo para la recarga del acuífero (d)</b> <sup>5</sup>                         | <b>70</b>                      | <b>50</b>  | <b>30</b>  | <b>30</b>  |
| Coefficiente revap <sup>6</sup>                                                                | 0,5                            | 0,5        | 0,5        | 0,5        |
| Coefficiente de percolación al acuífero profundo <sup>7</sup>                                  | 0,1                            | 0,1        | 0,1        | 0,1        |
| <b>Almacenamiento revap (mm)</b> <sup>8</sup>                                                  | <b>0,6</b>                     | <b>0,6</b> | <b>0,6</b> | <b>0,5</b> |
| Almacenamiento inicial del acuífero profundo (mm)                                              | 0                              | 0          | 0          | 0          |

<sup>1</sup> En negrita se muestran los parámetros modificados, <sup>2</sup> Valores iniciales obtenidos por Carmona (2007), <sup>3</sup> Coeficiente que regula la entrega de agua desde el acuífero superficial al flujo base, <sup>4</sup> Fracción de agua que puede drenar por gravedad desde el suelo saturado hasta el acuífero superficial,

<sup>5</sup> Tiempo que tarda el flujo de agua desde el perfil de suelo hasta el acuífero superficial, <sup>6</sup> Coeficiente que regula la evaporación de agua desde el acuífero superficial hacia horizontes de suelo suprayacentes insaturados, <sup>7</sup> Coeficiente que regula la entrega de agua desde el acuífero superficial al profundo, y

<sup>8</sup> Agua disponible para ser evaporada desde el acuífero superficial o capas de suelo saturadas hacia los horizontes de suelo insaturados suprayacentes.

**Cuadro 3.** Valores de los parámetros de agua subterránea obtenidos para la calibración del modelo por otros autores

| Parámetros                                                    | Heuvelmans <i>et al.</i> (2005) | Reungsang <i>et al.</i> (2005) | Schuol y Abbaspour (2006) | Manoj <i>et al.</i> (2006) | Wu y Johnston (2008) |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------|
| Superficie de la cuenca (km <sup>2</sup> )                    | 2-210                           | 160                            | Más de 10000              | 2440                       | 425-704              |
| Factor alfa del agua subterránea (0 – 1)                      | 0,21-0,34                       | 0,9                            |                           | 0,2                        | 0,0029               |
| Tiempo de retardo para la recarga del acuífero (0 – 500 días) | 16-31                           | 50                             |                           | 60                         |                      |
| Coefficiente revap (0 – 1)                                    | 0,1-0,5                         | 0,04                           |                           | 0,02                       |                      |
| Coefficiente de percolación del acuífero profundo (0 – 1)     |                                 |                                | 0,56-0,70                 |                            |                      |
| Almacenamiento revap (0 – 500 mm)                             | 5-20                            |                                | 1-40                      |                            |                      |

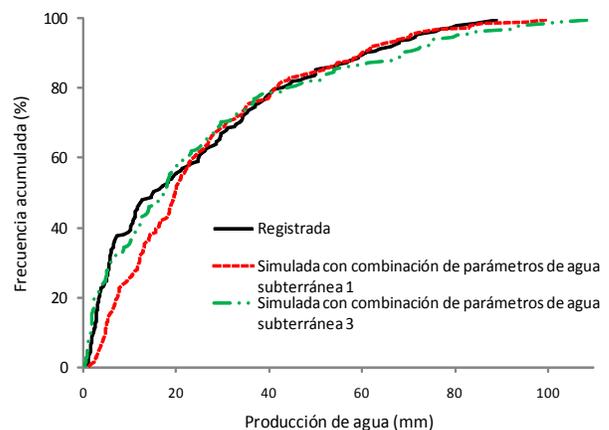
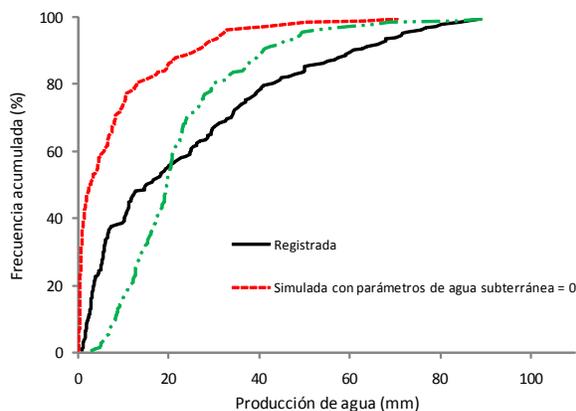
producción de agua con el fin de ajustar las simulaciones, y obtener así regímenes adecuados en magnitud y distribución temporal.

En la Figura 2 se observa que con parámetros de agua subterránea iguales a cero, siempre se simularon valores de producción de agua inferiores a los correspondientes a la misma frecuencia de los valores registrados. Con el empleo de la combinación inicial de parámetros de agua subterránea, para el intervalo de producción de agua inferiores a 20 mm, la probabilidad de ocurrencia de los valores simulados es menor que en los registrados, y a partir de dicho valor, ocurre lo contrario. Finalmente, al disminuir los valores de tiempo de retardo para la recarga del acuífero de 70 a 30 d, y el coeficiente revap de 0,6 a 0,5 (valores empleados en las combinaciones inicial y 3, Cuadro 2), las distribuciones de frecuencias de la producción mensual de agua simulada se asemejan a las de la registrada.

En complemento a lo anterior, en el Cuadro 4 se observa como con la combinación 3 de parámetros de agua subterránea se obtuvieron bajas diferencias (de -4 a 17%)

entre los valores simulados y registrados en cuanto promedio, suma y los asociados a los percentiles 25, 50 y 75. Con los parámetros de agua subterránea iguales a cero, se observó una subestimación de los valores asociados a cada uno de los percentiles y, consecuentemente, en el promedio y suma de estos.

La sobrestimación de la producción de agua durante la época de lluvias podría haberse corregido, en cierta medida, mediante la disminución del número de curva. Sin embargo, tal procedimiento no se consideró conveniente, pues su manipulación debe responder a las condiciones de la cobertura que se pretenda representar. Además, en su estimación se consideró la disminución asociada a grupos hidrológicos transicionales debido a horizontes rocosos fracturados, y a la profundidad del suelo, lo cual implicó una disminución de hasta 10% con respecto a los valores típicos. Sobre esto, diversos autores emplean al número de curva como parámetro de calibración, con variaciones entre 5 y 15% (Benaman *et al.*, 2005; Govender y Everson, 2005; Heuvelmans *et al.*, 2005; Reungsang *et al.*, 2005; Manoj *et al.*, 2006; Stehr *et al.*, 2008).



**Figura 2.** Frecuencias acumuladas de la producción de agua promedio mensual registrada y simulada con diversas combinaciones de parámetros de agua subterránea (fase de calibración).

**Cuadro 4.** Índices de distribución de frecuencias de la producción de agua registrada y la simulada con diversas combinaciones de parámetros de agua subterránea.

| Percentil           | Producción de agua registrada (mm) | Producción de agua simulada (mm) <sup>1</sup> |                           |             |             |             |
|---------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                     |                                    | Parámetros de agua subterránea = 0            | Combinación de parámetros |             |             |             |
|                     |                                    |                                               | Valores iniciales         | 1           | 2           | 3           |
| 25                  | 5,0                                | 0,6 (-88%)                                    | 12,7 (154%)               | 9,6 (90%)   | 5,0 (0%)    | 5,0 (0%)    |
| 50                  | 15,0                               | 2,7 (-82%)                                    | 19,6 (31%)                | 19,7 (31%)  | 19,1 (27%)  | 17,5 (17%)  |
| 75                  | 37,0                               | 10,3 (-70)                                    | 27,0 (-27%)               | 35,0 (-5%)  | 36,7 (-1%)  | 35,6 (-4%)  |
| Promedio            | 23,8                               | 8,2 (-65%)                                    | 22,4 (-6%)                | 25,8 (9%)   | 25,9 (9%)   | 25,2 (6%)   |
| Sumatoria           | 4279,2                             | 1481,9 (-65%)                                 | 4025,6 (-6%)              | 4652,4 (9%) | 4664,7 (9%) | 4533,0 (6%) |
| Desviación estándar | 22,9                               | 11,9 (-48)                                    | 4,3 (-38%)                | 21,3 (-7%)  | 26,0 (13%)  | 25,8 (12%)  |

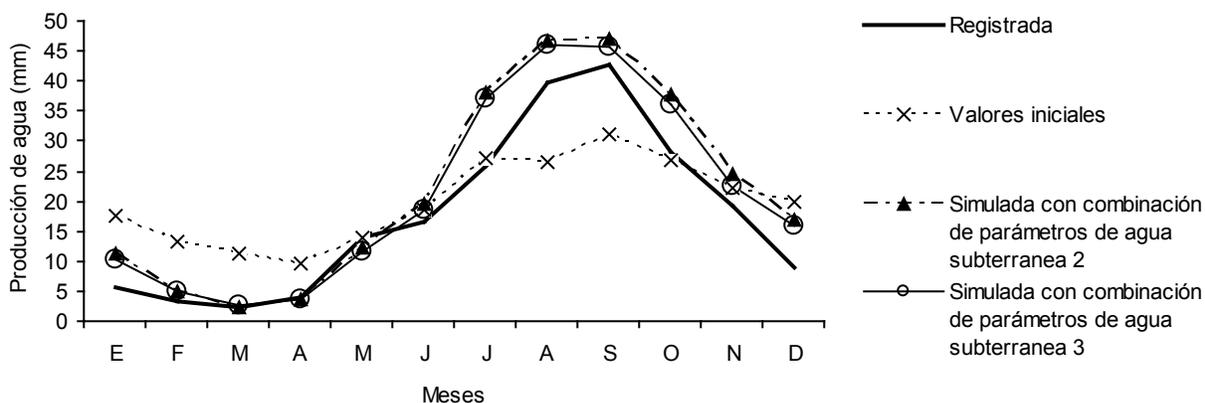
<sup>1</sup> Entre paréntesis la diferencia relativa (%) de cada índice con respecto al de los valores registrados.

### Validación del modelo

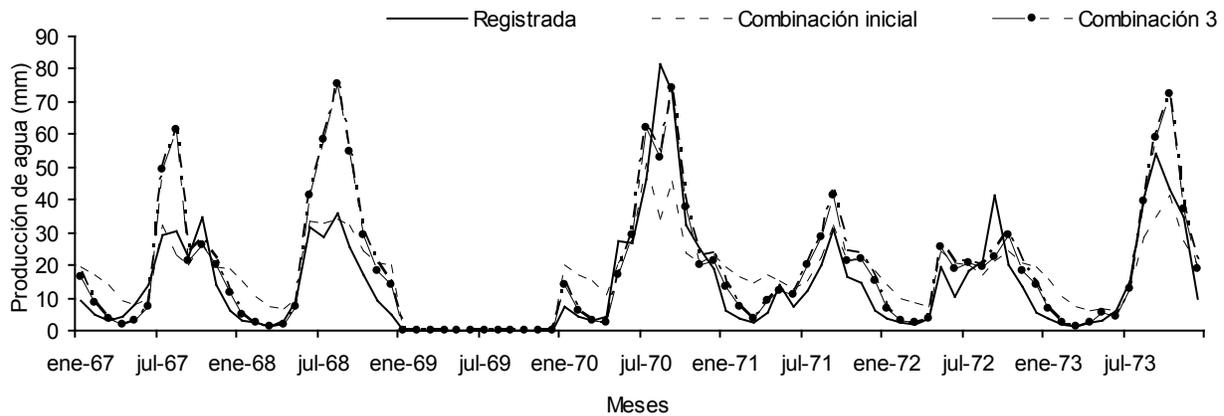
Con la combinación inicial de parámetros de agua subterránea (Carmona, 2007), la producción se simuló con un régimen donde se sobrestima el flujo en la época seca, y se subestima en la húmeda. Con las mejores combinaciones de parámetros de agua subterránea (2 y 3) obtenidas en la fase de calibración, la producción de agua promedio mensual simulada representó acertadamente el régimen anual, pero en general, con ligeras sobreestimaciones de magnitud. Al igual que en la fase de calibración, durante la época húmeda hubo sobrestimación, mientras que los valores de producción promedio de agua en la época seca se simulaban más adecuadamente (Figura 3).

El comportamiento general de los valores promedio también se manifiesta en los valores mensuales a lo largo

del tiempo. En la Figura 4 se observa como la producción de agua simulada con el empleo de la combinación inicial de parámetros de agua subterránea, se sobrestima durante la época seca y se subestima durante la húmeda. Destaca la sobrestimación en magnitudes y duración del período de recesión, es decir, el tiempo en que la producción de agua se reduce a los valores mínimos. Este desbalance se corrige con la disminución del almacenamiento revap y el tiempo de retardo para la recarga del acuífero. Con la combinación 3 (e igualmente con la 2), se ajusta mejor el régimen de producción de agua, pues se obtiene una distribución estacional más concentrada (mayor producción de agua en la época húmeda y reestablecimiento más temprano de los gastos mínimos). No obstante, existen sobrestimaciones a lo largo del año.



**Figura 3.** Producción de agua promedio mensual registrada y simulada con diversas combinaciones de parámetros de agua subterránea (fase de validación).



**Figura 4.** Producción de agua mensual registrada y simulada con diferentes combinaciones de parámetros de agua subterránea (fase de validación).

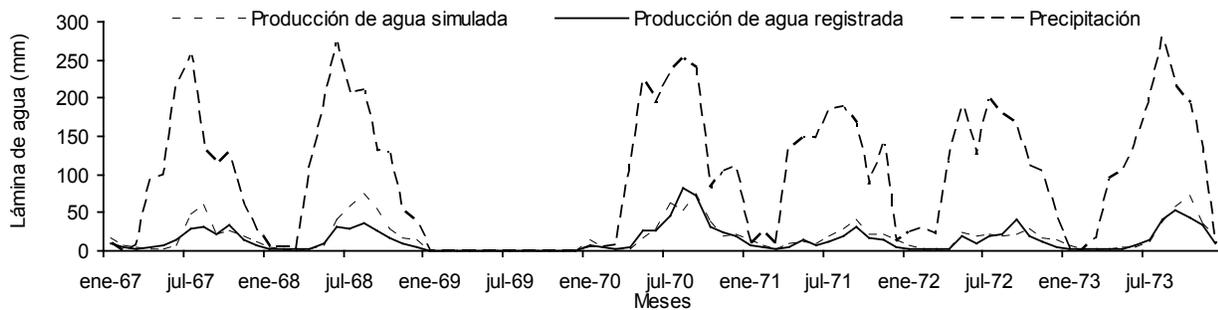
No se observó una relación clara entre la calidad de las simulaciones y la calidad de los datos de precipitación. Por ejemplo, en el año 1970, cuando faltaron todos los datos de dos estaciones que cubren 59% del área, se obtuvo una muy buena simulación. En los años 1967 y 1968, se obtuvieron notables sobrestimaciones de producción de agua, con cantidades de datos faltantes muy disímiles entre ambos años (17 y 33%, respectivamente). En los años 1971 y 1972, con ligeras sobrestimación y subestimación respectivamente, la cantidad de valores faltantes fue similarmente baja (alrededor de 3%).

El régimen de producción de agua simulado con la combinación inicial de parámetros de agua subterránea, implica que en la época de lluvias gran cantidad de agua del perfil de suelo se desplaza al acuífero superficial, dejando así espacio libre en el suelo para permitir infiltración y, consecuentemente, disminuir la escorrentía superficial, con lo que se subestima la producción de agua. Complementariamente, debido al alto valor de retardo para la recarga del acuífero (70 d), el agua desplazada del suelo al acuífero superficial aporta al flujo del cauce meses después, durante la época seca, lo cual es razón de la sobrestimación del flujo. Se debe hacer notar que esta combinación inicial fue sumamente útil para el proceso de ajuste, pues con pequeñas modificaciones (almacenamiento revap modificado de 0,6 a 0,5 mm y tiempo de retardo para la recarga del acuífero modificado de 70 a 30 d), dio origen a la combinación que produjo mejor resultado. Es de destacar el efecto de reducir este último parámetro, pues de simulaciones con una ligera subestimación de la producción de agua en la época húmeda, se pasa a sobrestimarla notablemente.

Aún con las combinaciones de parámetros de agua subterránea de mejor funcionamiento, los resultados indican que en condiciones de mayor humedad de la cuenca, con los valores asignados de número de curva se obtiene una escorrentía superficial mayor a la que realmente ocurre, por lo que habría que reducirlos. Podría ser necesario, al mismo tiempo, aumentar los valores de agua aprovechable y de conductividad hidráulica saturada del suelo. No obstante, como ya se ha indicado, no se consideró conveniente manipular la asignación de dichos parámetros, ya que implicaría forzar la descripción de la cobertura vegetal y del suelo, sin criterios sistemáticos que puedan ser empleados por otros usuarios. En este caso, la disminución del valor del número de curva obtenido para grupos hidrológicos transicionales (Chiang, 1971) parece no haber sido suficiente. Por otro lado, de haber sido subestimadas el agua aprovechable y la conductividad hidráulica del suelo, se pudo causar una menor capacidad de infiltración al suelo y, por lo tanto, mayores tasas de escorrentía.

La cantidad de precipitación pareciera ser una razón para que se sobrestime la producción de agua. En la Figura 5 se observa como en los años con evidente sobrestimación (1967, 1968 y 1973), la precipitación fue de mayor magnitud que en los años de mejor ajuste. Parece que existe un umbral de sensibilidad ante la magnitud de las lluvias donde el agua no puede ser retenida en la cuenca, ni siquiera empleando valores de número de curva que impliquen alta retención en la cuenca.

Además, en cuanto a la sobrestimación de la producción de agua en la época de lluvias debe considerarse



**Figura 5.** Precipitación y producción de agua mensual registrada y simulada con la mejor combinación de parámetros de agua subterránea. Fase de validación.

el efecto de los siguientes factores:

- a) Una posible subestimación de la evapotranspiración, ya que el uso de valores de radiación y temperatura de estaciones fuera de la cuenca para generar los valores diarios, puede acarrear errores por falta de representatividad, además de los errores inherentes a los métodos de estimación de estos factores y de la evapotranspiración. En este caso, se empleó la opción Priestley-Taylor en vez de la opción Penman-Monteith, en razón a la carencia de información necesaria. Por otro lado, se desconoce en que medida el modelo subestima la transpiración de las plantas, bien sea por falta de representatividad de los parámetros de vegetación provistos por el modelo, por una representación poco adecuada de los procesos de la vegetación o ambas condiciones a la vez
- b) La generalización efectuada a fines de establecer los suelos predominantes en la cuenca puede haber sido insuficiente en cuanto a detalle para representar la variabilidad de los procesos hidrológicos del suelo, en especial, la infiltración, la retención y la transpiración
- c) El método de estimación del agua aprovechable y de la conductividad hidráulica del suelo, ya que la opción del sistema SoilPar empleada (Campbell) produce valores intermedios de ambos parámetros, si se le compara con otras opciones de estimación. Haber empleado una opción que estime mayores valores de ambos, hubiese disminuido la escorrentía superficial por aumentar la capacidad de infiltración y almacenamiento de agua del suelo. No obstante, es muy posible que se sobrestime entonces el flujo de base
- d) Si se asume que ha ocurrido retroceso del bosque a lo largo del tiempo y el mismo ha sido sustituido por

coberturas y usos con mayor potencial de escorrentía, la producción de agua sería mayor que la del escenario simulado

- e) El procedimiento de calibración agregado, puesto que la existencia de una sola estación hidrométrica en toda la cuenca media, no hizo posible calibrar el modelo considerando las variaciones en las características de la cuenca.

En el Cuadro 5 se muestran los índices basados en diferencia y regresión correspondientes a la fase validación. De su revisión, se concluye un buen funcionamiento del modelo al emplear las combinaciones 2 y 3 de parámetros de agua subterránea.

Según los valores de Eficiencia de Simulación, las simulaciones de producción de agua mensual para el período de validación califican de buenas según lo indicado por Moriasi *et al.* (2007). Además, destacan los altos valores de coeficiente de concordancia, bajos registros de error medio absoluto (inferiores a la mitad de la desviación estándar), las pendientes de regresión similares a uno y los relativamente bajos valores del intercepto. Con la combinación inicial de valores, a pesar que se obtienen buenos índices de diferencia, se obtienen índices de regresión poco adecuados.

En cuanto a regresión, nótese que con las tres combinaciones se obtuvieron altos coeficientes de correlación, con probabilidad nula de valer cero, es decir, significativos en cualquier caso. Los valores del coeficiente de regresión son similares o ligeramente más altos que los obtenidos por otros autores en fases de calibración (Torres *et al.*, 2000; Reungsang *et al.* 2005) y validación (Bracmort *et al.*, 2006).

**Cuadro 5.** Evaluación de las simulaciones para validación del modelo con diversas combinaciones de parámetros de agua subterránea.

|                                               | Combinación de parámetros |       |       |
|-----------------------------------------------|---------------------------|-------|-------|
|                                               | Valores iniciales         | 2     | 3     |
| Eficiencia de la simulación                   | 0,58                      | 0,52  | 0,55  |
| Coefficiente de concordancia                  | 0,82                      | 0,90  | 0,90  |
| Error medio absoluto (mm)                     | 8,07                      | 7,61  | 7,13  |
| Coefficiente de correlación ( $R$ )           | 0,82                      | 0,86  | 0,86  |
| $P_{(0)} R = 0$ <sup>1</sup>                  | 0                         | 0     | 0     |
| Pendiente de la recta de regresión ( $B_1$ )  | 0,46                      | 1,03  | 1,02  |
| $P_{(0)} B_1 = 1$ <sup>2</sup>                | 0                         | 0,65  | 0,83  |
| Intercepto de la línea de regresión ( $B_0$ ) | 11,87                     | 4,56  | 4,05  |
| $P_{(0)} B_0 = 0$ <sup>3</sup>                | 0                         | 0,011 | 0,023 |

<sup>1</sup> Probabilidad de que el coeficiente de regresión sea cero.

<sup>2</sup> Probabilidad de que la pendiente de la recta de regresión sea uno.

<sup>3</sup> Probabilidad de que el intercepto de la recta de regresión sea cero.

En el caso de la combinación inicial de parámetros de agua subterránea, la pendiente de regresión notablemente menor a uno y el valor alto del intercepto, indican que las simulaciones tenderán a sobrestimar los valores bajos y subestimar los altos. Con las otras dos combinaciones (2 y 3), que presentaron un alto valor de coeficiente de correlación y valores de la pendiente de regresión cercanos a uno, pero intercepto superior a cero, puede inferirse que la producción de agua se simulará consistentemente, pero con alguna desviación de magnitud, en este caso, una ligera sobrestimación. Al respecto, debe tenerse presente que los valores de las estadísticas basadas en diferencia indican que estas sobrestimaciones son de poca magnitud.

## CONCLUSIONES

Con información relativamente rápida y fácil de obtener, fue posible calibrar y validar exitosamente al modelo SWAT en cuanto a producción de agua en la cuenca media del río Pao. Por lo tanto, se estima que este modelo, tal como fue calibrado y validado, pueda ser de utilidad para la evaluación y planificación de esta cuenca. Dado que el modelo tendió a sobrestimar la escorrentía superficial, es conveniente, al momento de asignar los valores de número de curva, considerar criterios adicionales a los expuestos en la metodología tradicional para establecer el tipo hidrológico de suelo, tales como la profundidad del suelo y la presencia de capas rocosas fracturadas. La considerable cantidad de parámetros de SWAT que están sujetos a incertidumbre hace que una calibración adecuada para el escenario de línea base

sea imprescindible para obtener estimados confiables en órdenes de magnitud y tendencia en los escenarios hipotéticos o alternativos. Las limitaciones relativas a la falta de correspondencia temporal entre registros de precipitación y de producción de agua para calibrar y validar las simulaciones, pueden ser superadas mediante el uso combinado de la comparación de las distribuciones de frecuencias en los períodos no concordantes y evaluaciones basadas en diferencia y regresión en los períodos concordantes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acutis, M.; M. Donatelli. 2003. SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. *Eur. J. Agron.* 18: 373-377.
- Arnold, J.G.; R. Srinivasan; R.S. Muttiah; P. M. Allen. 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *J. Am. Water. Resour. As.* 34: 73-89.
- Bekiarisi, I.G; N. Panagopoulos; M.A. Mimikou. 2005. Application of the Swat (Soil And Water Assessment Tool) model in The Ronnea catchment of Sweden. *Global Nest J.* 7: 252-257.
- Benaman, J.; C.A. Shoemaker; D.A. Haith. 2005. Calibration and validation of Soil and Water Assessment Tool on an agricultural watershed in upstate New York. *J. Hydrol. Eng.* 10: 363-374.

- Borah, D.K.; M. Bera. 2004. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of applications. *Trans. ASAE*. 47: 789-803.
- Bracmort, K.S.; M. Arabi; J.R. Frankenberger; B.A. Engel; J.G. Arnold. 2006. Modeling long-term water quality impact of structural BMPs. *Trans. ASAE* 49: 367-374.
- Carmona, A. 2007. Ajuste de la producción de agua simulada por el modelo SWAT y análisis de sensibilidad ante características hidrológicas del suelo en una cuenca pequeña de alta pendiente. Trabajo de Grado. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 122 p.
- Chiang, S.L. 1971. A runoff potential rating table for soils. *J. Hydrol.* 13: 54-62.
- Donatelli, M.; M. Acutis. 2001. SoilPar: Soil Parameter Estimate. V. 2.0 Alpha. Software. ISCI. Bologna, Italia. Disponible en: <http://www.sipeaa.it/ASP/ASP2/SOILPAR.asp> (Consultado: Mayo 26, 2009).
- Escalona, M.; L. Estrada. 1997. Evaluación de las tierras del sector Higuerotal, cuenca media del río Pao, estado Cojedes, con fines de conservación de suelos y aguas. Trabajo de Grado. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 179 p.
- Govender, C.; C.S. Everson. 2005. Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model. *Hydrol. Process.* 19: 683-692.
- Guillén, J. 2001. Determinación de las prioridades de atención conservacionista según los riesgos de erosión actual y potencial en la cuenca media del río Pao, estados Carabobo y Cojedes. Trabajo de Grado. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 139 p.
- Heuvelmans, G.; B. Muys; J. Feyen. 2005. Analysis of the spatial variation in the parameters of the SWAT model with application in Flanders, Northern Belgium. *Hydrol. Earth. Syst. Sc.* 8: 931-939.
- IGSB. 2003. Sistema de Cuencas Hidrográfica, Isoyetas e Isotermas. Instituto Geográfico Simón Bolívar. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Caracas, Venezuela. (versión en CD).
- Lenhart, T.; K. Eckhardt; N. Fohrer; H.G. Frede. 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Phys. Chem. Earth.* 27: 645-654.
- Manoj, J., J.G. Arnold; P.W. Gassman. 2006. Water Quality Modeling for the Raccoon River Watershed using SWAT. CARD Working Paper 06-WP 428. Center for Agricultural and Rural Development. Iowa State University. EUA. 26 p. Disponible en: [http://www.econ.iastate.edu/research/webpapers/paper\\_12656.pdf](http://www.econ.iastate.edu/research/webpapers/paper_12656.pdf) (Consultado: mayo 16, 2009).
- MARNR. 1989. Plan de desarrollo integral conservacionista para la cuenca alta y media del río Pao. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Dirección Regional. Cojedes, Venezuela. 328 p.
- MMH. 1976. Mapa Geológico Estructural de Venezuela. Compilación de A. Belizzia. Ministerio de Minas e Hidrocarburos. Caracas, Venezuela.
- Moriasi, D.N.; J.G. Arnold; M.W. Van Liew; R.L. Bingner; R.D. Harmel; T.L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE*. 50: 885-900.
- Nash, J.E.; J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290.
- Neitsch, S.L.; J.G. Arnold; J.R. Kiniry; J.R. Williams. 2005. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Grassland, Soil and Water Research Laboratory. Agricultural Research Service. Temple, EUA. 475 p. Disponible en: <http://www.brc.tamus.edu/SWAT/downloads/doc/SWAT2005/SWAT%202005%20theory%20final.pdf> (Consultado: mayo 16, 2009).
- Reungsang, P.; R.S. Kanwar; M. Jha; P.W. Gassman; K. Ahmad; A. Saleh. 2005. Calibration and Validation of SWAT for the upper Maquoketa river watershed. Working Paper 05-WP 396. Center for Agricultural and Rural Development. Iowa State University. EUA. 17 p. Disponible en: <http://www.card.iastate.edu/publications/DBS/PDFfiles/05wp396.pdf> (Consultado: mayo 16, 2009).
- Schuol, J.; K.C. Abbaspour. 2006. Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (SWAT) applied to West Africa. *Adv. Geosci.* 9: 137-143.
- Stehr, A.; P. Debels; F. Romero; H. Alcayaga. 2008. Hydrological modelling with SWAT under conditions of limited data availability: evaluation of results from a Chilean case study. *Hydrolog. Sci. J.* 53: 588-601.

- Torres, E.; J.L. Oropeza; D.S. Fernández. 2000. Aplicación del modelo SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, estado de México. X Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 4. Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas. Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación. Chihuahua, México. 22 p.
- USDA-ARS, 1999. SWAT 99.2 Windows Interface. United States Department of Agriculture. Agriculture Research Service. Washington DC, EUA. Disponible en: <http://swatmodel.tamu.edu/software/swat-model/swat992-interfaces> (Consultado: enero 25, 2011).
- USDA-NRCS. 2007. Part 630 Hydrology. National Engineering Handbook. Chapter 7: Hydrologic Soil Groups. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Washington, EUA. 14 p.
- USDA-SCS, 1972. National Engineering Handbook. Section 4. Hydrology. Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Washington, EUA. 548 p.
- White, K.L.; I. Chaubey. 2005. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model. *J. Am. Water. Resour. As.* 41:1077-1089.
- Willmott, C.J.; S. Ackleson; R. Davis; J. Feddema; K. Klink; D. Legates; J. O'Donnell; C. M. Rowe. 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *J. Geophys. Res.* 90: 8995-9005.
- Wu, K.; C.A. Johnston. 2008. Hydrologic comparison between a forested and a wetland/lake dominated watershed using SWAT. *Hydrol. Process.* 22: 1431-1442.
- Yang, J.; P. Reichert; K.C. Abbaspour; J. Xia; H. Yang. 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *J. Hydrol.* 358: 1-23.