

Aplicación del modelo SWAT en los Andes venezolanos: Cuenca alta del río Chama

SWAT Model applied to the Venezuelan Andes:

Chama River upper basin

Barrios Alex G.* y Urribarri Lisbeth A.**

Recibido: octubre, 2008 / Aceptado: septiembre, 2009

Resumen

Se aplicó el modelo SWAT2000 a la cuenca montañosa del río Chama hasta Ejido Mérida-Venezuela, de 1.118 km² de superficie, sin realizar calibraciones y sin hacer ajuste alguno a los parámetros por defecto producidos por la interfaz AVSWAT2000. Los datos de entrada fueron desarrollados bajo las condiciones típicas de escasez de información a nivel nacional y sin realizar mediciones adicionales en campo. SWAT tuvo un desempeño muy bueno en la simulación de la escorrentía mensual ($NSE = 0,76$) para un período de seis años donde se disponía de datos medidos. SWAT simuló de manera satisfactoria cada componente de la escorrentía mensual ($NSE=0,52$ para caudal base y $NSE=0,45$ para escorrentía superficial). A nivel diario, la simulación de SWAT resultó insatisfactoria ($NSE=-0,34$), debido principalmente a una reducida correlación entre los registros diarios de precipitación y los de escorrentía superficial observada; de hecho, el caudal base sí fue simulado de manera satisfactoria por SWAT ($NSE=0,46$).

Palabras clave: Simulación hidrológica; modelos de cuencas; SWAT; escorrentía superficial; caudal base; río Chama.

Abstract

The SWAT2000 model was applied to the Chama mountainous watershed at Ejido Station, Mérida State-Venezuela, which has 1118 km² of drainage area, not making any calibration nor doing any adjustment to the default parameters produced by the AVSWAT2000 interface. The input data were developed under the general conditions of scarce information in Venezuela and without additional measurements in the field. SWAT had a very good performance on the monthly runoff simulation ($NSE = 0.76$) for a six year period with available data. SWAT satisfactorily simulated each component of the monthly runoff (for groundwater flow $NSE=0.52$ and for surface runoff $NSE=0.45$). At the daily scale, SWAT simulation was unsatisfactory ($NSE=-0.34$), mainly due to a reduced correlation between the daily precipitation and the observed surface runoff data; in fact, SWAT satisfactorily simulated the groundwater flow ($NSE=0.46$).

Key words: Hydrologic simulation; basin models; SWAT; surface runoff; groundwater flow; Chama river.

* Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado (CEFAP), Mérida-Venezuela. Correo electrónico: alexb@ula.ve

** Universidad Nacional Experimental del Táchira, Departamento de Ingeniería Ambiental, San Crstóbal-Venezuela. Correo electrónico: lurribarri@unet.edu.ve

1. Introducción

Para una apropiada planificación y desarrollo de los recursos hídricos de una cuenca, estado o región, se tiene que conocer la oferta o disponibilidad de éstos, tanto en cantidad y régimen, como en calidad. La disponibilidad de agua es, por ejemplo, un dato básico para la planificación del abastecimiento a centros poblados y el desarrollo de áreas agrícolas bajo regadío, pero también para el manejo ambiental de un territorio. Cuando en una cuenca hidrográfica de interés no existen mediciones de la escorrentía producida, la opción más ampliamente utilizada en las últimas décadas ha sido la simulación hidrológica.

Hay un significativo número de modelos hidrológicos de cuencas, de tipo continuos, apropiados para estimar la disponibilidad hídrica, tanto en cantidad como en calidad: Hydrologic Simulation Package-Fortran (HSPF), Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems (CREAMS), Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation (ANSWERS), Agricultural Non-Point Source (AGNPS), Simulator for Water Resources in Rural Basins (SWRRB), Soil and Water Assessment Tool (SWAT), Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS), Generalized River Modeling Package-Système Hydrologue Europeen (MIKE-SHE), Cascade two-dimensional (CASC2D), Système Hydrologique Europeen Transport (SHETRAN). Una descripción exhaustiva de modelos se encuentra en Singh y Woolhiser (2002) y en Borah y Bera (2003), entre otros.

Los modelos hidrológicos basados en parámetros físicos y de naturaleza determinística, como los señalados anteriormente, tienen la ventaja de servir como herramientas para predecir los impactos ambientales debidos a cambios de uso y manejo de la tierra, cuestión que no puede hacerse a partir de registros de escorrentía, por muy buenos que estos sean.

SWAT (Arnold *et al.*, 1998; Neitsch *et al.*, 2002a y 2002b) es uno de los modelos paramétricos más utilizados en la actualidad, manteniéndose en continua revisión y expansión, tanto en su uso generalizado, como en la precisión y cantidad de procesos hidrológicos simulados. *“El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es la continuación de cerca de 30 años de esfuerzos de simulación llevados a cabo por el Servicio de Investigación Agrícola (ARS) del Departamento Agrícola de Estados Unidos (USDA). SWAT ha ganado la aceptación internacional como herramienta robusta e interdisciplinaria para el modelaje de cuencas, como se evidencia en conferencias internacionales sobre SWAT, los cientos de artículos relacionados con SWAT presentados en otros encuentros científicos y las docenas de artículos publicados en ‘Journals’ por suscripción. El modelo también ha sido adoptado como parte del paquete informático BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA), y está siendo utilizado por muchas agencias federales y estatales de Estados Unidos, incluyendo USDA, a través del proyecto CEAP (Conserva-*

tion Effects Assessment Project). Hasta el presente, se han identificado más de 250 artículos publicados en revistas por suscripción que reportan aplicaciones de SWAT, revisiones de sus componentes, u otras investigaciones que incluyen a SWAT” (Gassman *et al.*, 2007: 1).

Entre otros avances, Jayakrishnan *et al.* (2005) indicaron que SWAT fue el modelo hidrológico utilizado en HUMUS (Hydrologic Unit Model for the United States), un proyecto de Estados Unidos, a escala nacional, para evaluar el impacto que diferentes escenarios (consumo municipal y agrícola, labranza, sistemas agrícolas, fertilizantes, desechos) tendrían sobre el recurso hídrico.

Señala Gassman *et al.* (2007) que el uso del modelo se ha venido incrementando también en Europa, como lo demuestran cuatro Conferencias Internacionales sobre SWAT; la primera, realizada en Rauischholzhausen-Alemania, de la cual se publicó un número especial de *Hydrological Processes* (volume 19, issue 3: “*Special Issue: SWAT 2000 Development and application*”), y las otras tres, de las que se han publicado *Proceedings*, en Bari-Italia (TWRI, 2003), Zurich-Suiza (EAWAG, 2005) y Delft-Holanda (UNESCO-IHE, 2007). White *et al.* (2005) señalan que SWAT fue el modelo seleccionado, entre nueve modelos evaluados, para ser adoptado por el Consejo Europeo de Industrias Químicas como el componente de fuente difusa que acompaña al proyecto TERRACE (Terrestrial Runoff modeling for Risk Assessment of Chemical Exposure).

Las aplicaciones del modelo SWAT están por todo el mundo, si bien la mayoría responden a necesidades de las agencias gubernamentales, principalmente de Estados Unidos y la Unión Europea, en cuanto a los impactos de las actividades humanas en los recursos hídricos, y a cómo serían afectados por los cambios climáticos; también existen numerosas aplicaciones en Asia, África y el resto de América. Se trata de evaluaciones hidrológicas solas o con agentes contaminantes (sedimentos, nutrientes y biocidas), que cubren una amplia gama de condiciones climáticas, tamaños de cuenca y propósitos del estudio, desde puros aspectos investigativos relacionados con parámetros y variables del modelo hasta elementos de gestión y de apoyo a la toma de decisiones en materia ambiental de cuencas.

Entre otros, en Latinoamérica SWAT se ha aplicado en países como México (Torres-Benites *et al.*, 2004 y 2005; Johannes, 2004); Brasil (Machado, 2002; Machado *et al.*, 2003; Guarda, 2005; Neves *et al.*, 2006); Colombia (Millan e Isaza, 2002; Vahos, 2003); Perú-Ecuador (Oñate y Aguilar, 2003); República Dominicana (Camacho *et al.*, 2003) y Venezuela (Barrios, 1999; Jácome, 2002; Urribarri, 2004; Silva, 2004; UFORGA-SHYQ, 2005; Rodríguez, 2008).

La aplicabilidad de los modelos matemáticos de simulación hidrológica de cuencas, como el caso del modelo SWAT, en los países menos desarrollados ha encontrado dos barreras: la escasez de datos y la desconfianza en modelos desarrollados en otras latitudes. Modelos

como SWAT requieren un elevado volumen de datos de entrada; sin embargo, como señaló Silva (2004: 290), “*los requerimientos de información para el empleo de SWAT pueden ser satisfechos con dificultades sorteables*”. Partiendo del hecho de que a menudo es difícil la obtención de datos con base física para la modelación hidrológica, aún en los países desarrollados, donde los datos de elevada calidad son generalmente recabados y analizados, Jacobs y Srinivasan (2005) aplicaron el modelo SWAT a una cuenca en Kenya con escasez de información (mediante ‘pega de mosaicos’ elaboraron mapas necesarios a partir de información de distintas fuentes), y como la calidad de los datos medidos de escorrentía era mala, optaron por correr el modelo de modo relativo, pudiendo satisfactoriamente evaluar el impacto al recurso hídrico de diferentes escenarios de restauración del bosque. Ndomba *et al.* (2005), probaron en una cuenca de Tanzania que los datos geo-espaciales disponibles en forma gratuita eran apropiados para estimar variables hidrológicas usando SWAT en una cuenca sin registros de escorrentía. Di Luzio *et al.* (2005) demostraron, en una cuenca pequeña (23.1 km²), usando datos SIG fácilmente disponibles, que aún sin calibración SWAT, en conjunto con una interfaz ArcView, produce resultados razonables tanto en escorrentía como en producción de sedimentos.

Considerando que en Venezuela la mayor parte de sus cuencas no tienen registros de escorrentía, que cada vez hay mayor acceso a datos georeferenciados a escala mundial, incluyendo un número

considerable de mapas locales en proceso de digitalización, se planteó como objetivo del presente estudio la aplicación del modelo SWAT (Neitsch *et al.*, 2002a y 2002b), con el apoyo de la interfaz ArcView AVSWAT2000 (Di Luzio *et al.*, 2005), a una cuenca de montaña sin realizar calibración alguna y construyendo la base de datos de entrada a partir de información típica disponible, sin realizar mediciones de campo adicionales.

2. Breve descripción del modelo SWAT

Gassman *et al.* (2007) hacen una excelente y completa descripción del modelo, sin emplear formulación matemática alguna. Un resumen parcial enfatizando los aspectos hidrológicos se presenta a continuación. SWAT es un modelo a escala de cuencas, operando de manera continua en el tiempo a intervalos diarios, diseñado para predecir en cuencas sin mediciones, el impacto que tienen las actividades de manejo en la producción de agua, sedimentos y químicos de la agricultura. El modelo se fundamenta en procesos físicos; es computacionalmente eficiente con capacidad para realizar simulaciones sobre largos períodos de tiempo. Entre los principales componentes se incluye clima, hidrología, propiedades y temperatura del suelo, crecimiento de las plantas, nutrientes, biocidas, bacterias- patógenos y manejo de la tierra.

En SWAT, una cuenca se divide en subcuencas y éstas, a su vez, se subdividen en unidades de respuesta hidrológica (HRUs), las cuales son unidades homo-

géneas en uso y manejo de la tierra y en las características del suelo. Las HRUs representan porcentajes del área de una subcuenca y no tienen identificación espacial dentro de una simulación SWAT. Alternativamente, una cuenca puede dividirse solamente en subcuencas caracterizadas por el tipo de suelo y por el uso y manejo de la tierra dominantes.

SWAT requiere datos climáticos diarios de entrada, incluyendo precipitación, temperatura máxima y mínima del aire, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento, los cuales pueden ser registros medidos o generados por el mismo modelo; si tiene que generarlos, los calcula de una tabla que contiene 13 variables climáticas mensuales introducidas por el usuario, estimadas a partir de mediciones de largo plazo de los registros climáticos. SWAT realiza un balance hidrológico general para cada HRU, en el cual la precipitación, más riego y deshielo, se divide en escorrentía superficial e infiltración, redistribución del agua en el perfil del suelo, evapotranspiración, flujo subsuperficial lateral proveniente del perfil del suelo y flujo de retorno desde los acuíferos superficiales. La recarga debajo del perfil del suelo se distribuye entre los acuíferos superficial y profundo. Desde el primero, además del flujo de retorno, también puede ocurrir evapotranspiración por plantas con raíces profundas (término llamado '*revap*'); el agua que va al acuífero profundo, se asume que sale del sistema.

3. Materiales y métodos

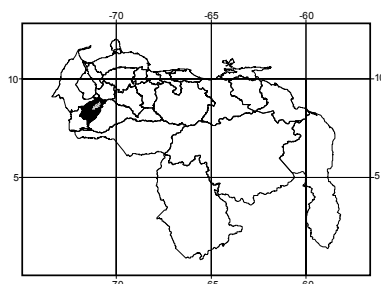
3.1 Área de estudio

SWAT se aplicó a la cuenca del río Chama, hasta la estación hidrográfica de Ejido, la cual cubre una superficie de 1.118 km², ubicada en la cordillera andina del estado Mérida, Venezuela (Figura 1). Se trata de una cuenca de montaña alargada, de profundos y estrechos valles, la mayoría con forma típica en 'V', con altitudes entre 1.000 y 4.980 msnm y fuertes pendientes (media de 45%). La precipitación anual promedio (período 1980-1986), disminuye desde la salida de la cuenca hacia aguas arriba, desde 1.900 mm, en la estación Mérida-Aeropuerto, 1.500 mm en la estación Valle Grande, hasta 900 mm en la estación Mucuchíes. Las temperaturas medias varían entre 17 °C, en el tercio inferior de la cuenca, hasta 11 °C en el tercio superior.

Predominan suelos superficiales, de texturas medias y gruesas, bien drenados, principalmente Ultisoles, Entisoles, Inceptisoles y Molisoles (Mogollón y Comerma, 1994); con extensas áreas de afloramientos rocosos. Los tipos predominantes de vegetación para la década del setenta eran: páramo (43%), selva nublada (22%), pastos (17%), cultivos anuales (10%), cultivos permanentes (4%), matorral (3%), urbano (1%). Cifras que han variado ligeramente, pues aunque tiene sectores fuertemente intervenidos por uso agrícola y pecuario, la mayor parte de la cuenca está bajo la figura de Parques Nacionales.



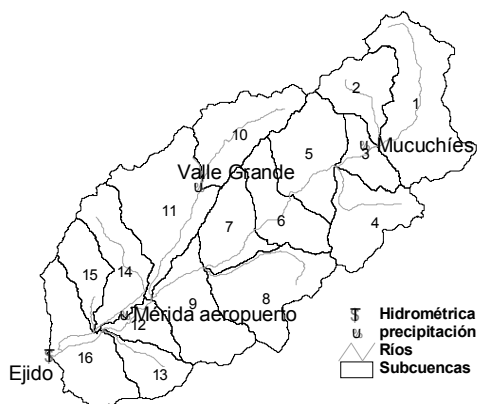
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 1. Localización geográfica de la cuenca en estudio: (a) en Suramérica; (b) en Venezuela y (c) en el estado Mérida; (d) división en subcuencas y localización de estaciones de medición

3.2 Preparación de los datos de entrada al modelo

Se elaboró, siguiendo a Felicísimo (2001), un modelo digital de elevaciones (MDE) a partir de curvas de nivel digitalizadas (equidistancia de 40 m) de planos topográficos de Cartografía Nacional a escala 1:100.000, provenientes de tres estudios diferentes (Pacheco, 2003; Rosales, 2004; y Urribarri, 2004). De la misma

manera, se dispuso de la hidrografía digital de la cuenca. Usando la delineación automática de AVSWSAT2000, con la opción de 'quemado de ríos' activada, se dividió la cuenca del río Chama hasta Ejido en 16 subcuencas (Figura 1).

Se elaboró un mapa de suelos combinando información de tres fuentes diferentes: Castillo (1965) a 1:25.000, MARNR (1983), a 1: 250.000, y Calderón (1997), 1:25.000; las dos primeras en

formato analógico y la tercera en digital. A objeto de uniformizar los diferentes niveles de escala y detalle de cada estudio, fue necesario simplificar la información. El mapa resultante consistió en unidades espaciales de suelo agrupadas por clase textural solamente. A cada unidad se asoció una calicata extraída de Castillo (1965) y Calderón (1997), a objeto de disponer de las propiedades a lo largo del perfil del suelo. Las propiedades hidráulicas y granulométricas de cada horizonte del suelo se determinaron de valores medios tabulados para cada clase de textura (Arnold *et al.*, 1990; Rawls *et al.*, 1982).

Se utilizó un mapa de cobertura y uso de la tierra a escala 1:100.000 (Universidad de Los Andes, 1972), digitalizado por Rosales (2004). Las coberturas se agruparon en 6 clases de vegetación (páramo, selva nublada, pastos, cultivos anuales, cultivos permanentes, matorral y urbano), las cuales se reclasificaron según las clases de cultivo de la base de datos SWAT, considerando comportamientos hidrológicos similares (Russian Wildrye, Forest-Evergreen, Pasture, Agricultural Land-Row Crops, Orchard, Forest-Mixed, Urban). El único parámetro modificado de la base de datos original fue el número de curva, CN2, los cuales se asignaron siguiendo aquellos tabulados por USDA (1986) y mediante juicios de valor basados en el conocimiento de la cuenca. También se asignaron valores locales a la rugosidad 'n' de Manning en cada clase de cobertura (archivos.hru), en función de valores tabulados por USDA (1986).

Datos diarios de precipitación se obtuvieron de los registros oficiales del

Ministerio del Ambiente, seleccionándose tres estaciones (Figura 1): Mérida-Aeropuerto, Valle Grande y Mucuchíes. Sólo Mérida-Aeropuerto tenía registros completos; las otras dos estaciones tenían datos 'englobados', los cuales se desagregaron diariamente siguiendo el patrón ocurrido en la estación más cercana. El período de datos fue 1980 a 1986, en concordancia con las mediciones de escorrentía del río Chama en la estación de Ejido (datos oficiales del MARNR). Se utilizaron datos diarios de temperatura máxima y mínima para el mismo período, disponibles en la estación Santa Rosa, operada por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias de la Universidad de Los Andes, ubicada en el cuadrante suroeste de la cuenca.

3.3 Criterios de evaluación del desempeño del modelo

Los resultados del modelo se compararon gráficamente con datos medidos de escorrentía en la estación limnigráfica de Ejido, donde se disponen de caudales mensuales y diarios desde 1980 hasta 1986 (datos oficiales del MARNR, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales). Aunque se simuló todo el período, las comparaciones entre observados y simulados se realizaron de 1981 a 1986, dejándose fuera el año inicial (1980), a manera de 'precalentamiento' o preparación de las variables de estado usadas por SWAT durante la simulación hidrológica. Para evaluar el desempeño del modelo se calcularon el *coeficiente de determinación* (R^2) y el *coeficiente de Eficiencia*

de *Nash-Sutcliffe* (*NSE*, Nash-Sutcliffe Efficiency), los cuales son señalados por Gassman *et al.* (2007) como los estadísticos que más ampliamente se han utilizado en hidrología para la calibración y validación de modelos. Adicionalmente, siguiendo las recomendaciones de Moriasi *et al.* (2007), se calcularon tres estadísticos más, basados en medidas adimensionales del error (diferencias entre observados y simulados), tales como *Sesgo porcentual* (*PBIAS*, Percent Bias), *Persistencia de la eficiencia del modelo* (*PME*, Persistence Model Efficiency) y la *Relación entre la raíz del error medio cuadrático y la desviación estándar de las observaciones* (*RSR*, RMSE-observations Standard deviation Ratio). *PBIAS* y *PME* fueron aplicados y descritos también por Kannan *et al.* (2007) y Obeng (2005). Los estadísticos se determinaron mediante las siguientes expresiones:

Kannan *et al.* (2007) indican que *PBIAS* mide la tendencia promedio de que los valores simulados sean mayores o menores que los observados; el valor óptimo es cero, un valor positivo mide el grado de sub-estimación, y un valor negativo el grado de sobre-estimación. *PME* es una medida relativa de la relación entre la varianza de los residuales y la varianza del error obtenida de un sencillo modelo de persistencia; valores mayores a cero indican desempeño aceptable, pero el valor ideal es 1. *NSE* mide la relación entre la varianza de los residuales y la varianza de los valores observados, su valor óptimo es 1, aunque mayores a cero indicarían desempeño aceptable. Moriasi *et al.* (2007) concluyeron que para escorrentías mensuales la simulación de un modelo puede considerarse satisfactoria si $NSE > 0.50$ y $RSR < 0.70$ y $-25\% < PBIAS < 25\%$; propusieron, además, el

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^n (q_t^{obs} - q_t^{sim})}{\sum_{t=1}^n q_t^{obs}} \times 100 \quad (1)$$

$$PME = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2}{\sum_{t=1}^n (q_t^{obs} - q_{t-1}^{obs})^2} \quad (2)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{StDev_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^n (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (q_t^{obs} - q_m^{obs})^2}} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2}{\sum_{t=1}^n (q_t^{obs} - q_m^{obs})^2} \quad (4)$$

donde: q_t^{obs} y q_t^{sim} , son las escorrentías diarias observada y simulada, respectivamente; q_m^{obs} , es la media de las escorrentías diarias observadas; y n es el número de datos.

esquema de evaluación que se muestra en el cuadro 1.

Debido al número significativo de trabajos que han reportado deficiencias del modelo SWAT en la simulación del agua subterránea (Silva, 2004; Geza y McCray, 2007; Kannan *et al.*, 2007; Barlund *et al.*, 2007; entre otros), en el presente estudio, además de la comparación de la escorrentía total, se compararon individualmente las escorrentías superficial y subterránea simuladas con las correspondientes escorrentías observadas. Para separar los componentes superficial y subterráneo de las escorrentías totales observadas, se utilizaron varios pro-

gramas: HYSEP (Sloto y Crouse, 1996), BaseFlow (Arnold *et al.*, 1995) y WHAT (Lim *et al.*, 2005). Aplicando distintos métodos de separación de caudales, disponibles en los programas anteriores, se obtuvieron resultados similares con cada uno, seleccionándose para la evaluación del desempeño de SWAT los hidrogramas diarios generados por HYSEP con la opción 'local minimum method' (Figura 2).

3.4 Modelación inicial y ajustes

Los primeros resultados obtenidos con SWAT indicaban componentes hidroló-

Cuadro 1. Esquema de valoración de Moriasi *et al.* (2007) para evaluar el desempeño de un modelo a través de estadísticos que comparan datos observados y simulados a intervalos mensuales

Valoración del desempeño	Estadísticos recomendados				
	RSR	NSE	PBIAS%		
			Escorrentía	Sedimento	N,P
Muy Buena	[0,0-0,5]	(0,75-1,00]	$< \pm 10$	$< \pm 15$	$< \pm 25$
Buena	(0,5-0,6]	(0,65-0,75]	$[\pm 10 - \pm 15]$	$[\pm 15 - \pm 30]$	$[\pm 25 - \pm 40]$
Satisfactoria	(0,6-0,7]	(0,50-0,65]	$(\pm 15 - \pm 25)$	$(\pm 30 - \pm 55)$	$(\pm 40 - \pm 70)$
Insatisfactoria	$> 0,7$	$< 0,50$	$> \pm 25$	$> \pm 55$	$> \pm 70$

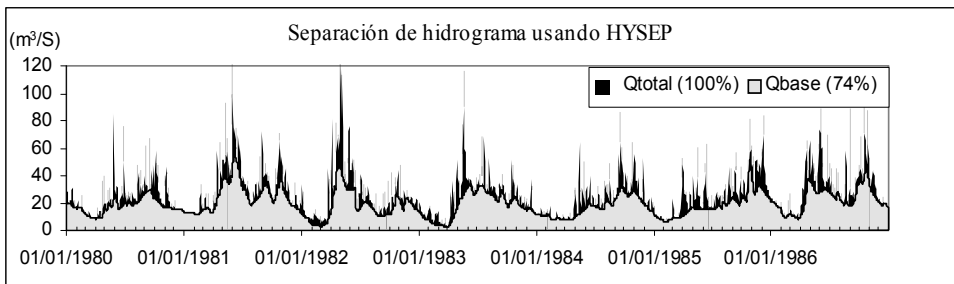


Figura 2. Separación de la escorrentía observada en dos componentes: superficial y base

gicos en proporciones irreales a las condiciones de la cuenca: 5% de flujo superficial (SUP), 94,5% de flujo subsuperficial o interflujo (LAT), y 0,5% de flujo subterráneo (GW). Una primera revisión de los datos de entrada identificó un valor anómalo de 0.5 m producido por la interfaz AVSWAT para el parámetro SLSUBBSN (longitud promedio del flujo en vertientes) en cada una de las 16 subcuencas. Este valor fue modificado manualmente, sustituyéndose por 50 m, en la tabla de atributos del archivo de subcuencas (tema con la etiqueta 'subbasins' producido durante el delineado automático de subcuencas) generado por AVSWAT, reiniciando luego los pasos del proceso de elaboración de archivos de entrada. Ningún ajuste posterior fue realizado.

4. Resultados

Los valores anuales promedios producidos por SWAT, relacionados con el balance hídrico, se ilustran en la figura 3, los cuales se consideran apropiados a las condiciones climáticas, hidrológicas y de uso de la cuenca, válidas para el período 1980 a 1986, más aún si se considera que ni siquiera las condiciones iniciales de humedad en el suelo fueron ajustadas. Se observa que del total de lluvia precipitada sobre la cuenca, 45% vuelve a la atmósfera vía evapotranspiración (ET) y 52% sale en forma de escorrentía por los cauces (Qtotal): 22% de tipo superficial (SupQ) y 78% en forma subsuperficial (LatQ) y subterránea (SubtQ); 1% pasa a formar parte de la recarga a los acuíferos profundos y sale del sistema.

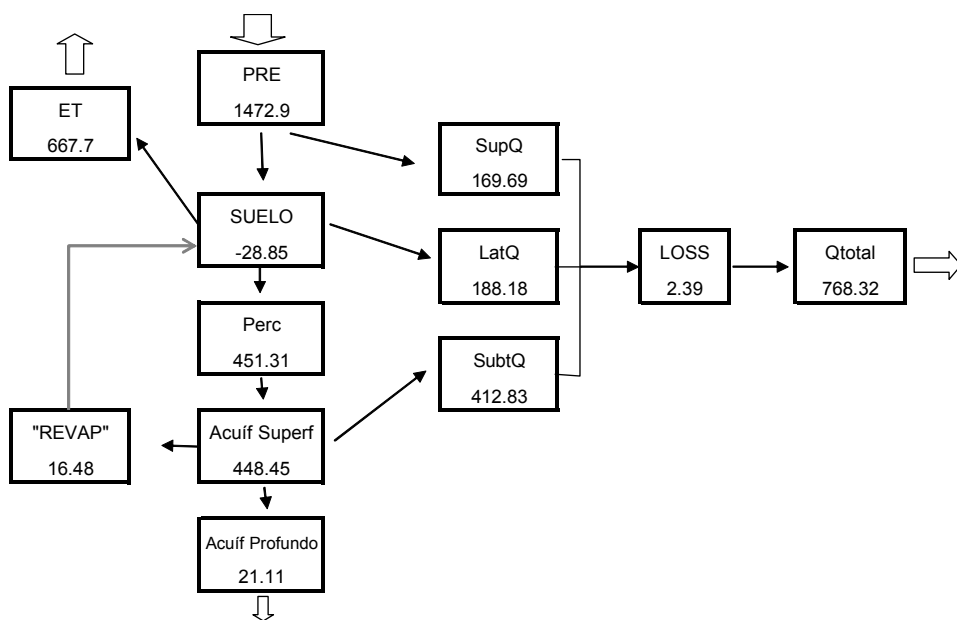


Figura 3. Balance hídrico simulado por SWAT, período de validez: 1980-1986 [mm/año]

Una comparación de la escorrentía anual promedio, simulada y observada, se resume en el cuadro 2, donde se indica que SWAT sobreestimó en 8% la escorrentía total, producto de haber sobrestimado el flujo base en 15% y subestimado la escorrentía superficial en 11%. Cifras aceptables considerando que no hay ningún tipo de calibración o de ajustes de parámetros iniciales.

Cuadro 2. Promedios anuales de la escorrentía simulada y observada (1981-1986)

	Escorrentía total (mm)	Flujo Base (mm)	Flujo superficial (mm)
Observada	751	552	200
SWAT	813	637	178

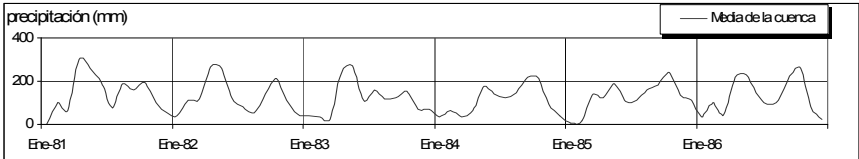
Una comparación gráfica de las escorrentías mensuales, observadas y simuladas, se presenta en la figura 4, mientras que en el cuadro 3 se muestran los valores calculados de los estadísticos que miden el desempeño del modelo. La figura 4 nos indica que SWAT predijo satisfactoriamente la magnitud y periodicidad de la escorrentía total, tal como lo confirman los estadísticos calculados, los cuales cumplen con el criterio de Moriasi *et al.* (2007) para calificar el desempeño del modelo como *muy bueno* ($NSE > 0.5$ y $RSR < 0.5$ y $-10\% < PBIAS < 10\%$). También, el valor de PME (0,70) indica un buen desempeño del modelo, así como el R^2 (0,88).

Cuadro 3. Estadísticos para escorrentía mensual simulada

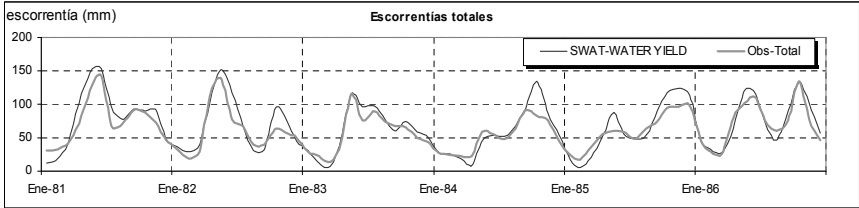
Escorrentía total y componentes	Estadísticos del desempeño del modelo				
	RSR	PBIAS	NSE	PME	R^2
Total	0,49	-8,18	0,76	0,70	0,88
Base	0,69	-15,47	0,52	0,26	0,84
Superficial	0,74	11,09	0,45	0,59	0,59

Contrario a lo esperado, según resultados de otros trabajos encontrados en la revisión de literatura, tanto de la figura 4 como de los estadísticos del cuadro 3, se infiere que SWAT tuvo un buen desempeño en la simulación de la escorrentía base, mejor incluso que el de la escorrentía superficial. Los valores de $NSE > 0,5$; $RSR < 0,7$; y $-20\% < PBIAS < 20\%$, indican un desempeño *satisfactorio* para la simulación de la escorrentía base. En cambio, los mismos estadísticos para escorrentía superficial pasan ligeramente la frontera del desempeño *satisfactorio* hacia el desempeño *insatisfactorio*, incluso el R^2 es bastante inferior.

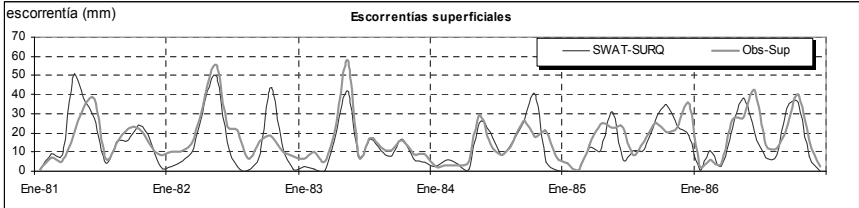
A nivel diario, los resultados de SWAT fueron estadísticamente *insatisfactorios*, usando el criterio de Moriasi *et al.* (2007), según se aprecia en el cuadro 4; lo cual indicaría la necesidad de calibración. No obstante, un análisis detallado revela que a nivel diario el desempeño del modelo se ha visto afectado por falta de representatividad de la precipitación registrada.



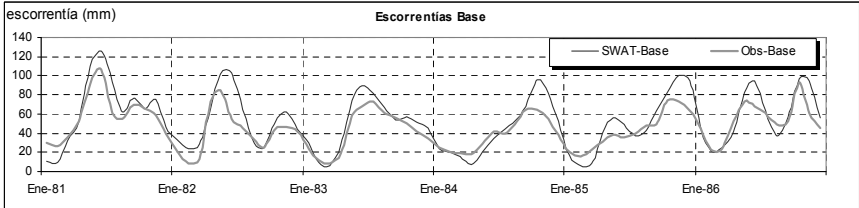
(a)



(b)



(c)



(d)

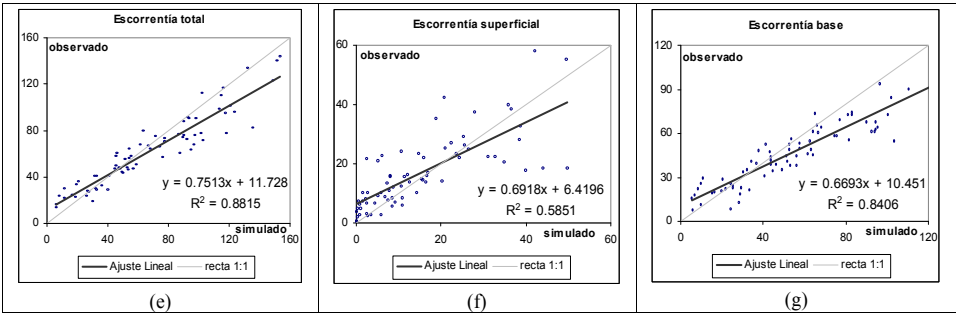


Figura 4. Escorrentías mensuales simuladas y observadas y comparación gráfica estadística

Cuadro 4. Estadísticos para escorrentía diaria simulada

Escorrentía total y componentes	Estadísticos del desempeño del modelo				
	RSR	PBIAS	NSE	PME	R ²
Total	1,16	-8,18	-0,34	-5,17	0,48
Base	0,73	-15,47	0,46	-131,97	0,77
Superficial	1,74	11,09	-2,03	-4,47	0,21

En la figura 5 se observa que la escorrentía base está simulada de manera casi *satisfactoria* (NSE igual a 0,46), pudiendo haberse mejorado si parámetros físicos relacionados con el agua subterránea se hubiesen estimado a partir de los datos escorrentía observados (la constante de recesión, ALPHA_BF, por ejemplo). La principal discordancia está en la escorrentía superficial y, si bien una causa siempre probable está en el número de curva (CN2), cuyos valores se asignaron de manera subjetiva, un análisis comparativo de las lluvias diarias registradas reveló inconsistencias con los datos medidos de escorrentía superficial.

SWAT produjo escorrentía superficial respondiendo a las lluvias diarias registradas (Figura 5), y algunos eventos de mayor magnitud parecieran estar respondiendo a la precipitación de la estación Mérida-aeropuerto, que define la lluvia del tercio inferior de la cuenca. Estos eventos sobrestimaron significativamente a los observados, debido a que las precipitaciones en Mérida-aeropuerto son las mayores de la cuenca y no representan a todo el tercio inferior de la cuenca, la que de esta manera tiene más precipitación de la real.

No obstante que los eventos grandes están sobreestimando la escorrentía observada, el resultado global fue que SWAT subestimó (178 mm/año) la escorrentía superficial observada (200 mm/año). Investigando a fondo se pudo detectar que, por ejemplo, de 600 días donde simultáneamente no se registró lluvia en ninguna de las 3 estaciones utilizadas en la simulación, en más de la mitad de ellos se midieron escorrentías mayores a 0,5 m³/s en la estación registradora a la salida de la cuenca. Este es otro hecho que impide juzgar con rigor el comportamiento del modelo en el ámbito diario mediante estadísticos que se basen en la comparación de valores observados y simulados.

Al no ser buena la relación entre las lluvias registradas en las estaciones climáticas utilizadas en el modelamiento y la escorrentía superficial medida en la estación limnigráfica patrón, no se puede esperar que los valores simulados produzcan estadísticos indicando un buen ajuste con los observados. Una simple regresión lineal entre precipitación media diaria y escorrentía observada obtuvo un R² de sólo 0.37, mientras que con la escorrentía simulada el coeficiente R² fue 0.69, lo que apunta a una deficiente consistencia entre los datos de lluvia y las escorrentías diarias medidas.

5. Conclusiones

1. SWAT realizó una simulación *muy buena* de la escorrentía mensual de la cuenca (NSE = 0,76), en una situación donde no hubo calibración ni se me-

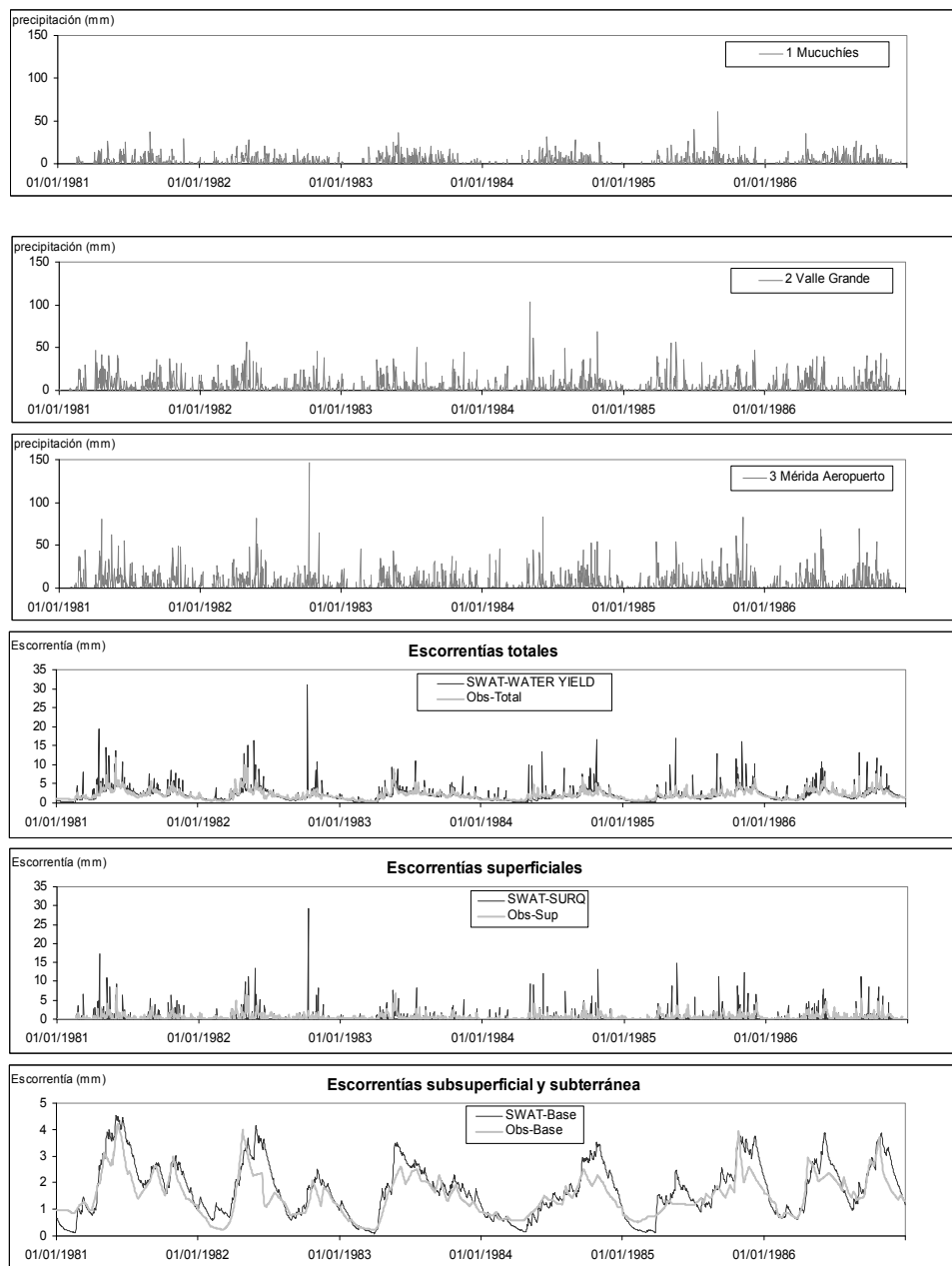


Figura 5. Escorrentías diarias simuladas y observadas

por ningún parámetro (sólo valores por defecto de la interfaz AVSWAT, excepto por la corrección del error en SLSUBBSN), y en condiciones de escasez de información para una mejor estimación de parámetros de base física importantes: CN2 (número de curva), Ksat (conductividad hidráulica saturada del suelo), AWC (agua disponible en el suelo), entre otros.

2. Contrario a varios resultados encontrados en la literatura, SWAT simuló de manera *satisfactoria* la escorrentía base (interflujo más agua subterránea), tanto a escala mensual (NSE = 0,52) como diaria (NSE = 0,46).
3. SWAT mostró un bajo desempeño en la simulación de la escorrentía diaria, pero la causa no pudo atribuirse completamente al modelo: una clara inconsistencia entre la lluvia diaria registrada en las estaciones y la escorrentía superficial observada, también fue una causa importante.
4. Se recomienda la aplicación del modelo SWAT en otras regiones del país. Para la cuenca del río Chama, mejorar el desempeño diario del modelo mediante calibración y estimación de parámetros claves apoyándose en mediciones de campo.

6. Referencias citadas

- ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; NICKS, A. D. & N. B. SAMMONS. 1990. **SWRRB - A basin scale simulation model for soil and water resources management**. Texas A & M Univ. Press, College Station.
- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; MUTTIAH, R. & G. BERNHARDT. 1995. *Automated base flow separation and recession analysis techniques*. **Ground Water** 33(6): 1010-1018. *Baseflow* [Programa On line]: http://www.brc.tamus.edu/swat/sofa_baseflow.html. [Consulta: enero 21, 2008].
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S. & J. R. WILLIAMS. 1998. *Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development*. **J. American Water Resour. Assoc.** 34(1):73-89
- BARLUND, I.; KIRKKALA, T.; MALVE, O. & J. KAMARI. 2007. *Assessing SWAT model performance in the evaluation of management actions for the implementation of the Water Framework Directive in a Finnish catchment*. **Environmental Modelling & Software**. 22: 719-724.
- BARRIOS, A. 1999. *Modelos de simulación hidrológica (basados en USLE) para manejo de cuencas, con énfasis en calidad de agua. Aplicación a la cuenca del río Burbusay, estado Trujillo*. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Trabajo de Ascenso.
- BORAH, D. K. & M. BERA. 2003. *Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of mathematical bases*. **Transactions of the ASAE**, 46(6): 1553-1566.
- CALDERÓN G., C. A. 1997. *Caracterización espacial del suelo a partir de imágenes TM-Landsat*. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado (CEFAP). Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Tesis M.Sc.
- CAMACHO R.; CÓRDOVA, J. R. y R. PEPÍN. 2003. Montaje y aplicación del modelo

- hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) en la cuenca del río Nizao en la República Dominicana para la evaluación de alternativas en manejo de cuencas. *3er Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Arequipa-Perú.
- CASTILLO, J. B. 1965. *Estudio de los suelos de las partes altas de las cuencas de los ríos Chama y Santo Domingo*. Instituto de Geografía y Conservación de Recursos Naturales. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela.
- DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. G. & R. SRINIVASAN. 2005. *Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations*. **Hydrol. Process.** 19: 629-650.
- EAWAG. 2005. *Proc. 3rd International SWAT Conference*. Zurich, Switzerland: Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. [On line] Disponible en: <http://www.brc.tamus.edu/swat/3rdswatconf/SWAT%20Book%203rd%20Conference.pdf>. [Consulta: enero 6, 2008].
- FELICÍSIMO, A. M. 2001. *Modelos Digitales del Terreno. Prácticas con ARCVIEW 3.1 con Spatial Analyst y 3D Analyst*. [On line]: <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>. [Consulta: enero 25, 2008].
- GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H. & J. G. ARNOLD. 2007. *The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future research directions*. **Transactions of the ASABE**, 50(4): 1211-1250.
- GEZA, M. & J. E. MCCRAY. 2007. *Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions*. **Journal of Environmental Management** (Apr 30).
- GUARDA, T. 2005. *Evolução do uso das terras e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Jundiá-Mirim*. Curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical do Instituto Agrônomico. Campinas (SP)-Brasil. Tese de Mestre.
- JACOBS, J. H. & R. SRINIVASAN. 2005. Application of SWAT in developing countries using readily available data. *Proc. 3rd International SWAT Conference*, Zurich-Switzerland. [On line]: www.brc.tamus.edu/swat/3rdswatconf/SWAT%20Book%203rd%20Conference.pdf. [Consulta: enero 6, 2008].
- JÁCOME, A. 2002. *Evaluación del efecto del cambio de cobertura y uso de la tierra sobre la producción de sedimentos en la cuenca del río Caramacate (Subcuenca portante del embalse Camataqua)*. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Caracas-Venezuela. Trabajo de Ascenso.
- JAYAKRISHNAN, R.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C. & J. G. ARNOLD. 2005. *Advances in the application of the SWAT model for water resources management*. **Hydrol. Process.** 19: 749-762.
- JOHANNES, M. H. A. 2004. *Revision of an existing hydrological model and application to the Río Turbio aquifer, Mexico*. Wageningen University. [On line]: <http://www.dow.wau.nl/iwe/Thesis/abstract%20Martine%20Johannes.doc>. [Consulta: enero 25, 2008]. M.Sc. Thesis.
- KANNAN, N.; WHITE, S. M.; WORRALL, F. & M. J. WHELAN. 2007. *Hydrological modelling of a small catchment using SWAT-2000: Ensuring correct flow partitioning*

- for contaminant modelling. **Journal of Hydrology**. 334: 64-72.
- LIM, K. J.; ENGEL, B. A.; TANG, Z.; CHOI, J.; KIM, K.; MUTHUKRISHNAN, S. & D. TRIPATHY. 2005. *Automated Web GIS Based Hydrograph Analysis Tool, WHAT*. **Journal of the American Water Resources Association** 41(6):1407-1416. [On line]: http://cobweb.ecn.purdue.edu/~what/faq/Automated_Web_GIS_based_Hydrograph_Analysis_Tool_WHAT_JAWRA_Dec_2005.pdf [Consulta: enero 21, 2008].
- MACHADO, R. E. 2002. *Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento*. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ). Universidade de São Paulo. [ON line]: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-10072002-61200/publico/ronalton.pdf> [Consulta: enero 25, 2008]. Trabajo de grado de Doctorado.
- MACHADO, R. E.; VETORAZZI, C. A. & A. C. XAVIER. 2003. *Alternative scenario simulation of land use in a watershed through geoprocessing and modeling techniques*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 27(4): 727-733. [On line]: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832003000400017&lng=en&nrm=iso. [Consulta: 2008, enero 25].
- MARNR. 1983. *Proyecto Sistemas Ambientales Venezolanos. Sub-Región Natural 7B*. Dirección General Sectorial de Planificación y Ordenación del Ambiente, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Caracas-Venezuela.
- MILLAN, J. y J. ISAZA. 2002. *Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para la evaluación del efecto de la cobertura del suelo sobre el comportamiento de la producción de caudales sólidos y líquidos en la subcuenca de la quebrada Aguamona, cuenca alta del río Dagua, Valle del Cauca, Colombia*. Universidad del Valle. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira. [On line]: www.fidar.org/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=14. [Consulta: enero 25, 2008]. Trabajo de Grado (Ingeniero Agrícola).
- MOGOLLÓN, L. y J. COMERMA. 1994. **Suelos de Venezuela**. Gerencia Corporativa de Asuntos Públicos-Palmaven. PDVSA. Caracas-Venezuela.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D. & T. L. VEITH. 2007. *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. **Transactions of the ASABE**. 50(3): 885-900.
- NDOMBA, P. M.; MTALO, F. W. & A. KILLINGTVEIT. 2005. *The suitability of SWAT model in sediment yield modeling for ungauged catchments: a case of Simiyu river subcatchment, Tanzania*. [On line]: www.brc.tamus.edu/swat/3rdswatconf/SWAT%20Book%203rd%20Conference.pdf. [Consulta: enero 6, 2008].
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. & K. W. KING. 2002a. *Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Version 2000*. GSWRL Report 02-01; BRC Report 02-05; TWRI Report TR-191. College Station, Texas. [On line]: <http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2000theory.pdf>. [Consulta: enero 6, 2008].
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R. & J. R. WILLIAMS.

- 2002b. *Soil and Water Assessment Tool. User's Manual. Version 2000*. GSWRL Report 02-02; BRC Report 02-06; TWRI Report TR-192. College Station, Texas. [On line] <http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swatuserman.pdf>. [Consulta: enero 6, 2008].
- NEVES, F.; SILVA, F. y S. CRESTANA. 2006. *Uso do modelo AVSWAT na avaliação do aporte de nitrogênio (N) e fósforo (P) aos mananciais de uma microbacia hidrográfica contendo atividade avícola*. **Eng. sanit. Ambient.** 11(4):311-317. Rio de Janeiro. [On line]: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522006000400003&lng=en&nrm=iso. [Consulta: enero 25, 2008].
- OBENG B. E. 2005. *Application of a hydrological model in a data-poor tropical West African catchment: a case study of the Den-su Basin of Ghana*. Cranfield University at Silsoe. Institute of Water and Environment. PhD Thesis.
- ONATE, F. y G. AGUILAR. 2003. Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo. *3er Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográfica*. Arequipa-Perú (8-13, junio). [On line]: http://sig.utpl.edu.ec/sigutpl/Staftpro/hidrologia/swat_catamayo.pdf. [Consulta: enero 25, 2008].
- PACHECO, C. 2003. *Evaluación de factores de escala y métodos de interpolación en la elaboración de un modelo digital de elevaciones (MDE) en cuencas montañosas*. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado (CEFAP). Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Tesis M.Sc.
- RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK D. L. & K. E. SAXTON. 1982. *Estimation of soil water properties*. **Transactions of the ASAE**. 25(5): 1316-1328.
- RODRÍGUEZ, M. J. 2008. *Determinación de la capacidad de regadío en la cuenca alta del río Chama a través de modelamientos hidrológicos y agronómicos con el modelo SWAT*. Mérida – Venezuela. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado (CEFAP). Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Tesis M.Sc.
- ROSALES, S. C. A. 2004. *Validación de dos modelos de simulación hidrológicos de crecidas en la cuenca del río Chama hasta Ejido*. Escuela de Geografía. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Trabajo de Grado (Geógrafo).
- SILVA, O. 2004. *El modelo SWAT en una cuenca pequeña de altas pendientes: simulación de la producción de agua*. **Agronomía Trop.** 54(3): 275-291. [On line]: http://www2.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2004000300002&lng=pt&nrm=iso&tlng=es. [Consulta: enero 6, 2008].
- SINGH, V. P. & D. A. WOOLHISER. 2002. *Mathematical modeling of watershed hydrology*. **Journal of Hydrologic Engineering**. 7(4): 270-292.
- SLOTO, R. A. & M. Y. CROUSE. 1996. *HYSEP: A Computer Program for Stream Flow Hydrograph Separation and Analysis*. U. S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 96-4040, 46 pp. Reston, Virginia.
- TORRES-BENITES, E.; FERNÁNDEZ-REYNOSO, D. S.; OROPEZA-MOTA, J. L. & E. ME-

- JÍA-SAENZ. 2004. *Calibration of the hydrologic model SWAT in the watershed "El Tejocote", Atlacomulco, State of Mexico*. **Terra** 22 (4), 437-444. [On line]: <http://www.chapingo.mx/terra/contenido/22/4/437.pdf>. [Consulta: enero 25, 2008]
- TORRES-BENITES, E.; MEJÍA-SÁENZ, E.; CORTÉS-BECERRA, J.; PALACIOS-VÉLEZ, E. y A. EXEBIO-GARCÍA. 2005. *Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México*. **Agrociencia** 39 (5), 481-490. [On line]: <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2005/sep-oct/art-1.pdf> [Consulta: enero 25, 2008].
- TWRI. 2003. *SWAT2003: Proc. 2nd Intl. SWAT Conference*. TWRI Technical Report No. 266. College Station, Tex.: Texas Water Resources Institute, Texas A&M University. [On line]: http://www.brc.tamus.edu/swat/pubs_2ndconf.html. [Consulta: enero 6, 2008].
- UFORGA-SHYQ. 2005. *Programa para el manejo integral de los procesos erosivos y sedimentarios de la cuenca aportante al embalse Yacambú*. Estudio Técnico. Unidad de Prestación de Servicios y Proyectos Forestales, Geográficos, Agropecuarios y Ambientales, Universidad de Los Andes-Sistema Hidráulico Yacambú-Quíbor. Mérida-Venezuela.
- UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. 1972. *Estudio integral de la cuenca de los ríos Chama y Capazón, Subproyecto-Vegetación*. Tomo 3. Instituto de Geografía y Conservación de Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela.
- UNESCO-IHE. 2007. *4TH International SWAT conference: Book of abstracts*. Delft, Netherlands: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Institute for Water Education. [On line]: <http://www.brc.tamus.edu/swat/4thswatconf/docs/BOOK%20OF%20ABSTRACTS%20final.pdf> [Consulta: enero 6, 2008].
- URRIBARRI, L. A. 2004. *Validación del modelo hidrológico SWAT, con interfaz ArcView, en la cuenca alta del río Chama, estado Mérida*. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado (CEFAP). Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Tesis M.Sc.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). 1986. *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Soil Conservation Service. Engineering Division. Technical Release 55.
- VAHOS M. J. D. 2003. *Generación de modelos digitales hidrológicos y de pérdida de suelo y su comparación con métodos tradicionales en la cuenca del río claro (Suroeste Antioqueño)*. Departamento de Ciencias Forestales, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín -Colombia. [On line]: http://www.agro.unalmed.edu.co/agrodocs/index.php?link=ver_docs&id=23. [Consulta: enero 25, 2008]. Trabajo de Grado (Ingeniero Forestal).
- WHITE, S. M.; KANNAN, N.; BEAUDIN, I; HOLLIS, J.; YOUNG, A. R.; KELLER, V. & M. WHELAN. 2005. The TERRACE Project: SWAT application for diffuse chemical pollution modeling. En: *Proc. 3rd International SWAT Conference*. Switzerland. [On line]: <http://www.brc.tamus.edu/swat/3erdsawatconf/SWAT%20Book%203rd%20Conference.pdf> [Consulta: enero 6, 2008].