

Torres-Benites, Elibeth; Fernández-Reynoso, Demetrio S.; Oropeza-Mota, José Luis; Mejía-Saenz, Enrique
Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México
TERRA Latinoamericana, Vol. 22, Núm. 4, octubre-diciembre, 2004, pp. 437-444
Universidad Autónoma Chapingo
México

Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57311096007>

TERRA
Latinoamericana

TERRA Latinoamericana
ISSN (Versión impresa): 0187-5779
terra@correo.chapingo.mx
Universidad Autónoma Chapingo
México

¿Cómo citar?

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista

CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA “EL TEJOCOTE”, ATLACOMULCO, ESTADO DE MÉXICO

Calibration of the Hydrologic Model SWAT in the Watershed "El Tejocote ", Atlacomulco, State of Mexico

Elibeth Torres-Benites^{1‡}, Demetrio S. Fernández-Reynoso¹, José Luis Oropeza-Mota¹ y
Enrique Mejía-Saenz¹

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue calibrar el Modelo de simulación SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para el balance hídrico en la cuenca “El Tejocote”, Atlacomulco, y evaluar su capacidad predictiva para simular la producción de agua, sedimentos, gastos medios y producción de maíz en la cuenca. Los escenarios de simulación se construyeron utilizando el Sistema de Información Geográfica ArcView. Los datos utilizados para calibrar el modelo consistieron en cinco años de información climática (1980 a 1984), 62 usos de suelo y 14 unidades de suelo, lo cual resultó en 116 unidades de respuesta hidrológica. Los resultados obtenidos mostraron que el SWAT subestimó en 18% la producción mensual de agua y en 38% la producción mensual de sedimentos. Los coeficientes de determinación para los datos simulados mediante el SWAT fueron de 0.94 y 0.84 para la producción anual, tanto de agua, como de sedimentos. El rendimiento de maíz observado fue de 4302 kg ha⁻¹, el cual se compara favorablemente con 5104 kg ha⁻¹ simulado por SWAT. El modelo simuló con razonable precisión las variables analizadas.

Palabras clave: SWAT, producción de agua, producción de sedimentos, manejo de cuencas.

SUMMARY

The objective of this study was to compare the hydrological capacities of the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model to simulate annual water and sediment discharge and maize biomass production in the watershed "El Tejocote", located in Atlacomulco,

State of Mexico. Before running the model, it was calibrated, adjusting several parameters for the recommendations given in its handbook. The scenarios of simulation were constructed using the Arc-View Geographical Information System. In this study we used data from five years of climatic information (1980-1984), 62 different land uses and 14 soil units. This produced 116 hydrologic response units. Results showed that SWAT underestimated the simulated monthly water yield by 18% and the simulated monthly sediment yield by 38%. SWAT was more precise in simulating the annual water and sediment yield as was evidenced by the determination coefficients of 0.94 and 0.84, respectively. The model simulated grain yield of maize with reasonable precision. The average grain yield observed was 4302 kg ha⁻¹ compared with 5104 kg ha⁻¹ simulated by SWAT. Results obtained by the model were, in general, acceptable since they are within the range reported in similar works. The SWAT model is recommended for sustainable watershed management planning.

Index words: Hydrologic simulation model, SWAT, water and sediment yield, watershed management.

INTRODUCCIÓN

El manejo inadecuado de suelos y aguas en la agricultura provoca degradación de las tierras. México debería redoblar esfuerzos en la promoción de la aplicación de medidas viables para detener la erosión de los suelos y disminuir el transporte de sedimentos en las aguas superficiales (mejores prácticas de manejo agrícola, pecuario y forestal para el control de la erosión). Para tener éxito en este propósito, es preciso contar con un mayor conocimiento de las interacciones entre los principales sistemas de producción y promover su integración con los de restauración natural de las tierras.

¹ Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

[‡] Autor responsable (hely@colpos.mx)

La gestión del agua también es fundamental para la planeación y para el manejo de los recursos naturales con fines de sostenibilidad (Brooks *et al.*, 1991). El conocimiento de la hidrología es necesario para determinar reservas, demandas y suministros de agua, para predecir fenómenos de frecuencia extrema (inundaciones, desbordes, sequías) y para proteger la calidad del agua (Baker *et al.*, 1995).

La forma de abordar un estudio hidrológico de una región debe ser a través de una cuenca, debido a que esta última constituye la unidad física completa donde la entrada es la precipitación y las salidas son el escurrimiento y el sedimento, incluyendo en el proceso la influencia de vegetación, suelo y topografía. El problema de trabajar a escala de cuencas lo representa la manipulación de grandes volúmenes de información, su análisis y la posterior toma de decisiones. En México, la medición de la cantidad y calidad del agua no es realizada de manera periódica y directa a través de estaciones hidrométricas y de monitoreo, respectivamente. Ante esta circunstancia, una alternativa para evaluar la cantidad y calidad del agua en las cuencas y presas que no cuentan con infraestructura de medición, es el uso de los modelos hidrológicos de simulación, debido a su bajo costo y a la estimación razonable de sus resultados.

Los modelos de simulación son un instrumento de predicción basado en procesos de hidrología y erosión. Estos modelos son herramientas valiosas para

evaluar el efecto de prácticas de manejo sobre ambiente, escurrimiento, producción de sedimentos, erosión y productividad (Santos *et al.*, 1996). La importancia de los modelos radica, entre otros aspectos, en la predicción de fenómenos a largo plazo instantáneamente, también permiten obtener relaciones de causa-efecto, sin haber realizado cambios en los sistemas reales (Benavides-Solorio, 2001).

El modelo SWAT se ha probado en dos escalas espaciales de cuencas controladas por el ARS de los Estados Unidos (Riesel, Texas con una superficie de 17.7 km² y Lower Río Colorado con una superficie de 9000 km²), con el objetivo de planear, evaluar y conservar los recursos suelo y agua vinculados con los proyectos económicos nacionales para determinar el suministro y la calidad del agua en 18 cuencas, de los principales ríos de Estados Unidos. Los resultados obtenidos en estas dos cuencas se muestran en los Cuadros 1 y 2, respectivamente.

Los objetivos de este trabajo fueron calibrar el Modelo de simulación SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold *et al.*, 1991) para el balance hídrico de la cuenca “El Tejocote”, Atlacomulco, estado de México, y comprobar su capacidad como una herramienta que agilice el procesamiento de la información con ahorro de tiempo y recursos. Los resultados de este trabajo permitieron pronosticar los efectos de sistemas de manejo actuales, sobre el escurrimiento y producción

Cuadro 1. Producción de agua y sedimentos anuales y mensuales, medidos y simulados para la estación G Riesel, Texas.

	Medido	Simulado	Desv. Est. medida	Desv. Est. simulada	r ²	Pendiente de la regresión	Índice de Nash
Anual							
Producción de agua (mm)	171.20	151.70	128.70	128.70	0.85	1.33	0.79
Producción de sedimentos (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	1.46	1.33	0.93	0.93	0.78	1.15	0.75
Mensual							
Producción de agua (mm)	14.30	12.60	26.60	21.40	0.80	1.13	0.77
Producción de sedimentos (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	0.12	0.11	0.30	0.21	0.75	1.10	0.73

Cuadro 2. Comparación de gastos medios medidos y observados en la cuenca Lower, Río Colorado.

	Observado	Predicho	Observado	Predicho
Gasto medio (m ³ s ⁻¹)	726.40	639.80	60.50	57.80
Desviación estándar (m ³ s ⁻¹)	542.00	317.90	97.60	74.30
r ²		0.72		0.60
Pendiente de la línea de regresión		1.44		1.01
Índice de Nash		0.65		0.60

de sedimentos, lo cual es útil en cuencas que no cuentan con estaciones de aforo o cuando se quiere conocer estos parámetros hidrológicos en una sección específica de un cauce.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la Cuenca

La cuenca “El Tejocote” se localiza en el estado de México, a 99° 54’ 37’’ O y 19° 51’ 22’’ N, dentro del municipio de Atlacomulco, con una superficie de 17 656 ha, altitud promedio de 2608 m, pendiente media de 14.0% y longitud media de la pendiente de 150.3 m.

A la salida de la cuenca, se localiza la estación hidrométrica “El Tejocote”, sobre el cauce denominado río Chiquito, que es un afluente del río Lerma. La estación hidrométrica empezó a operar el 23 de julio de 1962 y las observaciones de sólidos en suspensión se efectuaron del 22 de junio de 1965 (SRH, 1973) hasta finales de 1985. En la zona de estudio se ubican 35 pozos profundos, 10 manantiales y 309 almacenamientos con una capacidad total de 7.5 millones m³ para estos últimos.

Según el sistema de Köppen, modificado por García (1973), el clima es C(W1)(W)b(i), con temperatura y precipitación media anual de 13.35 °C y 838.5 mm, respectivamente.

De acuerdo con el estudio de erosión potencial, con base en la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS), para el DDR 05 Atlacomulco, realizado por Fernández-Reynoso (1999), se reporta que la erosión potencial dentro de la cuenca varía de 160 a 239 t ha⁻¹ año⁻¹.

Del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se obtuvieron los datos climáticos diarios para las ocho estaciones meteorológicas más cercanas a la cuenca (Temascalcingo, Muyeje, San Pedro Potla, Atlacomulco, El Tejocote, Fabela, San Andrés Timilpan y Acambay), correspondientes al periodo de 1961 a 1992.

De la Comisión Nacional del Agua (CNA) se obtuvieron los aforos diarios de producción de agua (gastos medios y máximos) y sedimentos de la estación hidrométrica para el período de 1961 a 1992. De esta serie de datos, únicamente se seleccionaron cinco años (1980 a 1984), debido a que las ocho estaciones meteorológicas presentaban los registros climáticos más completos.

Información Empleada

Para cumplir con los objetivos del presente estudio, la información se procesó para usar la interfase del modelo SWAT con el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcView. La información usada fue la generada por Fernández-Reynoso (1999) para la cuenca en estudio, la cual comprende un período de cinco años (1980-1984), usando el modelo SWRRB. Asimismo, se hizo uso del Modelo de Elevación Digital y datos vectorizados (curvas a nivel, corrientes intermitentes y perennes, carreteras, y poblados) del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática correspondientes a la carta E-14-A17 (INEGI, 1982).

El modelo SWAT, es un modelo matemático para el estudio de cauces, ríos y cuencas hidrográficas, el cual se desarrolló para evaluar el impacto que tienen las prácticas de manejo de suelo, agua, vegetación y cultivos y sus insumos sobre la producción de agua, sedimentos en grandes y complejas cuencas hidrológicas, con diversas estrategias de manejo durante largos períodos de tiempo.

SWAT realiza una división de la cuenca en subcuencas, lo cual permite al modelo reflejar las diferencias en evapotranspiración de varios cultivos y suelos. El escurrimiento superficial lo predice en forma separada por unidad de respuesta hidrológica (URH) y lo concentra para obtener el escurrimiento total de la cuenca.

El modelo SWAT está conformado por un conjunto de modelos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos. El modelo hidrológico está basado en la ecuación general de balance hídrico:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})$$

Donde: SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm H₂O), SW_o es el contenido de agua inicial en el día i (mm H₂O), t es el tiempo (día), R_{day} es la cantidad de precipitación en el día i (mm H₂O), Q_{surf} es la cantidad de escurrimiento superficial en el día i (mm H₂O), E_a es la cantidad de evapotranspiración en el día i (mm H₂O), w_{seep} es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en el día i (mm H₂O), y Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en el día i (mm H₂O) (Arnold *et al.*, 1991).

El SWAT es un modelo de simulación continua, el cual analiza los impactos a largo plazo, es decir, los sedimentos en los almacenamientos en períodos de

10, 15, 50 y 100 años, así como para la programación de las prácticas agrícolas en un año, como: rotación de cultivos, siembra, cosecha, riego, fertilización y aplicación de plaguicidas.

Para cumplir con este objetivo, el modelo está basado en principios físicos, es decir, en lugar de integrar modelos de regresión para describir la relación entre las variables de entrada y de salida, SWAT usa modelos semiempíricos que requieren de datos específicos acerca de clima, propiedades físicas

del suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo, que ocurren en la cuenca.

Metodología de Trabajo

En la Figura 1, se muestran los pasos que se siguieron para la realización de este trabajo. La alimentación de la información al modelo se realizó de acuerdo con las claves de control de la interfase SWAT-ArcView (Arnold *et al.*, 1991).

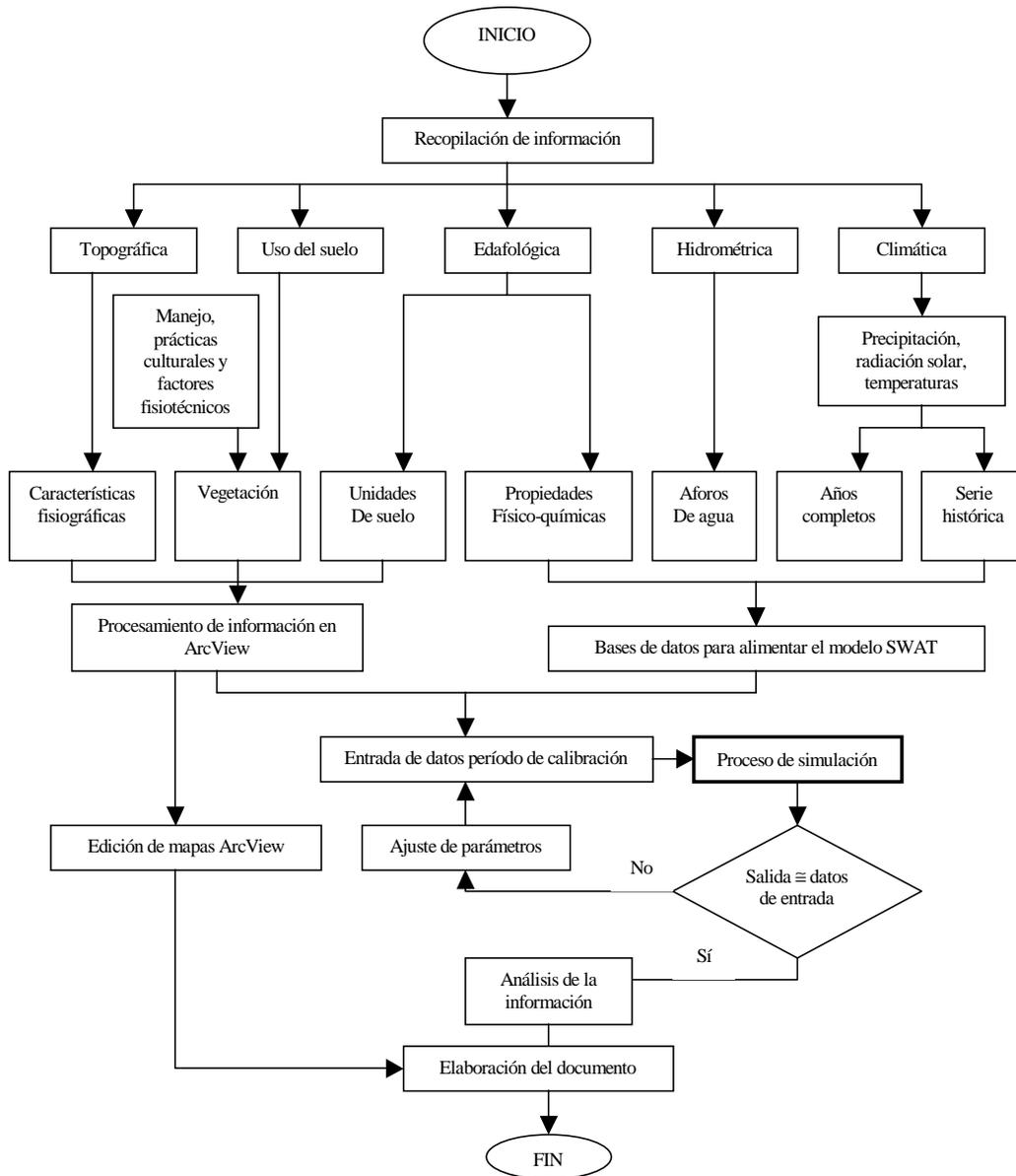


Figura 1. Diagrama de flujo metodológico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo permite la simulación del balance hidrológico a diario, mensual o anual. En el presente estudio, su calibración se basó en datos diarios, sin embargo, se optó por reportar los resultados mensuales y anuales, debido a la facilidad de manipulación de los datos.

Ajuste de Parámetros

El ajuste de parámetros se realizó de acuerdo con el manual del SWAT, el cual indica los parámetros de entrada que más afectan las salidas del modelo y su orden de importancia. Tomando como base los trabajos de Fernández-Reynoso (1999), Benavides-Solorio (2001) y Maldonado-de León (2001), se realizaron corridas con variaciones pequeñas no mayores que 10% en la mayoría de los parámetros. En el Cuadro 3, se reportan los parámetros a los cuales el modelo es más sensible, así como su grado de sensibilidad.

Producción de Agua

La producción de agua que reportan las salidas del SWAT es la suma de los escurrimientos superficiales (SURQ) y subsuperficiales (LATQ y GWQ), menos las pérdidas por transmisión (TLOSS) y las abstracciones de los almacenamientos (WYLD = SURQ + LATQ + GWQ - TLOSS - IRR - SA_IRR - DA_IRR).

La Figura 2 exhibe la dinámica y magnitud de la producción de agua en forma mensual de los valores medidos y simulados por el SWAT; en la gráfica, se aprecia que los valores mensuales simulados se asemejan a los aforados, excepto en octubre y noviembre cuando ocurren las últimas lluvias y el suelo se encuentra húmedo, en los cuales el modelo realiza sobrestimaciones.

Algunos autores consideran que los modelos hidrológicos están sujetos a errores, los cuales pueden ser aleatorios o sistemáticos, y que los análisis de la media, desviación estándar y coeficiente de determinación no son suficientes para poder detectarlos (Aitken, 1973). Los aleatorios ocurren cuando el modelo no muestra tendencias a sobrestimar o subestimar para un número sucesivo de intervalos de tiempo y los sistemáticos se presentan cuando un error tiende a persistir sobre una serie de intervalos de tiempo. Los dos tipos de error pueden ser causados por imperfecciones en la estructura del modelo, pero también pueden tener como causa la toma de datos, por lo cual deben ser reconocidos y tomados en cuenta.

Una manera de determinar si el modelo o los datos presentan errores sistemáticos es a través del coeficiente de eficiencia propuesto por Nash y Sutcliffe (1970). Este coeficiente es semejante al de determinación y su cálculo es parecido, pero no son iguales; en éste, se utilizan los valores estimados del escurrimiento generados por el modelo y, en el coeficiente de determinación, los valores estimados

Cuadro 3. Parámetros más sensibles que afectan los valores del modelo SWAT.

Parámetro modificado	Significado	Grado de sensibilidad	Parámetro de salida que modifica
CN ₂	Curva numérica en la subcuenca	Alto	Esc. superficial, Esc. Subsuperficial, flujo temporal
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible	Alto	Escorrimento superficial
ESCO	Factor de compensación de la evaporación del suelo	Alto	Escorrimento superficial
GW_REVAP	Coefficiente del "revap" del agua subterránea	Medio	Flujo base
GWQMN	Profundidad umbral del agua en el acuífero somero	Medio	Flujo base
USLE_P	Factor prácticas de labranza	Medio	Producción de sedimentos
SLSUBBSN	Longitud de la pendiente	Medio	Producción de sedimentos
SLOPE	Pendiente de las URH	Medio	Producción de sedimentos
USLE_C	Factor de manejo del cultivo	Alto	Producción de sedimentos
CH_EROD	Erosionabilidad del cauce	Medio	Degradación y deposición en el cauce
CH_COV	Factor cobertura del cauce	Medio	Degradación y deposición en el cauce

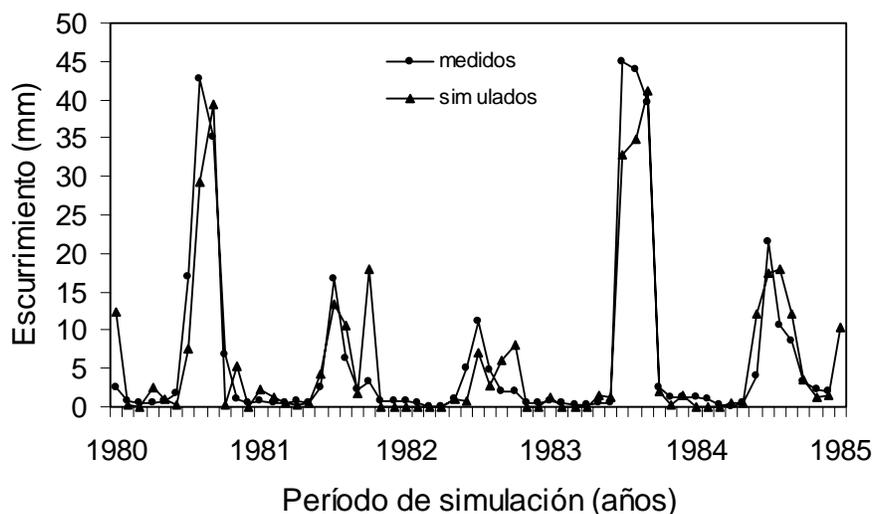


Figura 2. Producción de agua medida y simulada con el SWAT para un período de cinco años.

del escurrimiento obtenidos de la curva de regresión de los valores observados (Aitken, 1973).

En el coeficiente de eficiencia, se presentan la varianza inicial y la varianza residual o no explicada por el modelo, el valor de este estadístico siempre será menor que la unidad. Si los resultados de un modelo son altamente correlacionados pero sesgados, los puntos de dispersión de valores observados y estimados no se ubicarán aleatoriamente en una línea de 45°; como resultado, el valor del coeficiente de eficiencia será mucho menor que el coeficiente de determinación.

En el Cuadro 4, se comparan los valores del coeficiente de eficiencia obtenidos para la cuenca

El Tejocote y otros valores de otras cuencas y modelos similares al SWAT.

Producción de Sedimentos

El modelo predice los sedimentos a diario, de igual forma se aforaron en la estación hidrométrica durante el periodo de simulación; dichos datos se integraron cada mes para hacer las comparaciones correspondientes. En la Figura 3, se presenta la dinámica de la producción mensual de sedimentos medidos y simulados; en la gráfica, se observa que el sedimento simulado, en general, se ajusta favorablemente a los datos observados; sin embargo,

Cuadro 4. Comparación de estadísticos de salida para escurrimientos en diferentes cuencas y modelos, incluyendo el coeficiente de eficiencia.

Cuenca	Área	Modelo	Media		Desv. estándar		Coef. Det.	Coef. Efic.
			Obs.	Est.	Obs.	Est.		
	km ²							
Russina River (USA)	3458	Stanford IV	59.1	58.1	94.1	91.6	0.99	0.99
Dandenong River (Aust.)	270	Porter-MacMahon	17.2	18.1	21.5	19.8	0.76	0.76
Ramu River (Nva Guinea)	881	Ribeny-Drown	91.6	94.1	57.4	56.9	0.78	0.76
Wagga Research C. (Aust.)	0.081	Boughton	2.0	1.7	5.1	4.5	0.41	0.35
River Ray (G.B.)	19	SM 2D (b)	15.9	17.3	20.2	20.3	0.90	0.89
Little Mill Creek (USA)	18.5	USDAHL	24.3	24.4	31.2	29.9	0.81	0.80
El Carrizal (Méx.)	7.89	SWRRB	81.5	93.0	9.7	11.6	0.92	0.90
El Tejocote (Méx.)	176.6	SWRRB	6.1	6.0	11.6	13.1	0.97	0.82
El Tejocote (Méx.)	176.6	SWAT	6.1	6.0	11.6	10.3	0.93	0.85

Obs. = observados, Est. = estimados, Coef. = coeficiente, Det. = determinación, Efic. = eficiencia, Desv. = desviación.

al final de cada año se observan sobrestimaciones, consideradas como no relevantes comparado con el ajuste observado para todo el período de simulación. Esta sobrestimación puede atribuirse a: a) degradación del cauce (depositación), lo cual es significativo en cuencas que sufren cambios en los patrones del uso del suelo de forestal a agrícola y/o a urbano como sucedió en este caso, b) debido a la dinámica y al magnitud de la cobertura del suelo por el dosel de la vegetación, influenciada por el efecto de las distintas fechas de siembra de los diferentes cultivos, lo cual afecta a la curva numérica que es parámetro muy sensitivo del modelo, c) generación y distribución de las URH jerarquizadas por el modelo en función de la interacción entre la cobertura y las unidades de suelo, y d) posibles errores cometidos en el momento de cuantificar los sedimentos en la estación hidrométrica. Asimismo, la regresión lineal de la producción de sedimentos observados sobre los simulados señala que éstos se comparan favorablemente, aunque en menor grado que en el caso de la producción de agua,

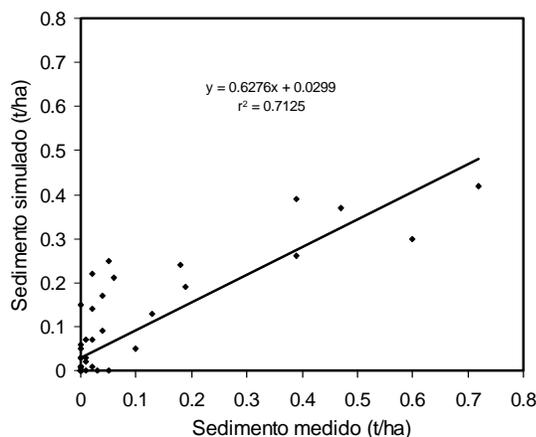
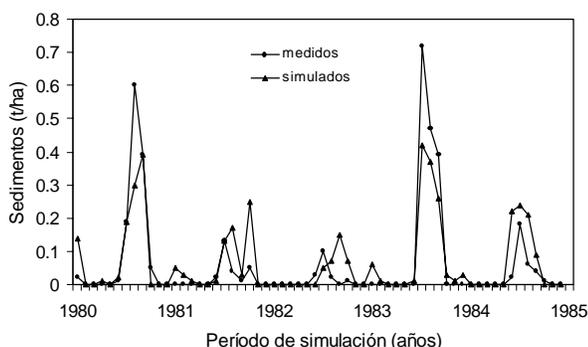


Figura 3. Producción de sedimentos medidos y simulados con el modelo SWAT para 60 observaciones de un período de cinco años.

sin embargo, se consideran satisfactorios, ya que se ubican dentro de límites permisibles según lo reportado en la literatura (Cuadro 1). Los valores de r^2 y pendiente de la recta fueron 0.71 y 0.62, respectivamente.

En el Cuadro 5, se reporta el análisis de regresión realizado a la producción de agua y sedimento anual medido y simulado. Se observa que, en general, el SWAT tiene mayor capacidad predictiva para la producción de agua que para sedimentos. En este trabajo también se encontraron superiores correlaciones mensuales, mayores que las anuales o diarias.

SWAT estima el gasto medio mensual de cada subcuenca, lo cual permite al usuario definir la magnitud de una avenida con un período de retorno de dos años; dicha variable fue subestimada por el modelo en 12%, ya que el gasto medio aforado es de $3.70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y el simulado por SWAT fue de $3.22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Rendimiento de Cultivos

La comparación de la producción de materia seca y grano medida y simulada de maíz por el modelo SWAT se presenta en el Cuadro 6. Se aprecia que los rendimientos estimados por el modelo son similares a las producciones registradas en la cuenca. Este antecedente evidencia que el modelo puede simular con razonable precisión la producción de materia seca y grano de otros cultivos en esta cuenca.

CONCLUSIONES

- Las predicciones de la producción de agua, tanto mensual, como anual, se modelaron con mayor precisión, que la correspondiente a la producción de sedimentos por el modelo SWAT.

Cuadro 5. Parámetros estadísticos anuales de las producciones de agua y sedimento.

	Media	Desv. Est. [†]	R ²	%
Producción de agua (mm)				
Medido	73.03	47.51	0.94	1.21
Simulado	72.14	36.03		
Producción de sedimentos (t ha^{-1})				
Medido	0.70	0.67	0.84	- 15.14
Simulado	0.81	0.34		

[†] Desv. Est. = desviación estándar.

Cuadro 6. Rendimiento simulado y observado de maíz en la cuenca El Tejocote

Condición de siembra	Índice de cosecha	Rendimiento observado en 1984	Biomasa predicha	Rendimiento predicho
			----- kg ha ⁻¹ -----	
Temporal en pendiente	0.25	2613	12 914.10	3228.50
Temporal en valle	0.27	5146	24 050.80	6012.70
Riego	0.27	5143	24 284.30	6071.10

- El modelo mostró un ajuste del coeficiente de eficiencia satisfactorio para la cuenca El Tejocote, graficando los datos, se refleja una buena distribución aleatoria de los puntos, concluyéndose así que no se presentaron errores sistemáticos y que se presentó un buen ajuste.

- De igual manera, el modelo predijo satisfactoriamente los valores de gastos máximos y biomasa de maíz, por lo que se recomienda su uso en otras cuencas para la predicción de estas variables.

- El modelo muestra una alta sensibilidad a la modificación de los valores de la curva numérica CN₂.

- La ventaja de operación del modelo SWAT radica en su interacción con los Sistemas de Información Geográfica y, con ello, el uso de mapas digitales y bases de datos, lo cual hace más fácil el despliegue y análisis de los datos de salida para las posteriores tomas de decisiones.

- La calibración del modelo no representa un aporte científico, pero sí una herramienta de trabajo para la generación del plan de manejo integral de la cuenca El Tejocote, el cual garantizará la sostenibilidad de los recursos de la misma.

LITERATURA CITADA

Aitken, A.P. 1973. Assessing systematic errors in rainfall-runoff models. *J. Hydrology* 20: 121-136.

Arnold, J.G., S.L. Neitsch y J.R. Williams. 1991. Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 99.2. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experimental Station. Temple, TX.

Baker Jr., M.B., J. de D. Benavides-Solorio y E. Talavera-Zuñiga. 1995. Relationship between precipitation and streamflow on El Carrizal watershed, Tapalpa, Jalisco. Partnerships for sustainable forest ecosystem management. General Technical Report RM-GTR-266. Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station. Fort Collins, CO.

Benavides-Solorio, J. de D. 2001. Post-fire runoff and erosion from simulation rainfall on small plots, Colorado Front Range. *Hydrological Processes* 15: 2931-2952.

Brooks, K.N., P.F. Folliot, H.M. Gregersen y K.W. Easter. 1991. Watershed management and upland conservation: Policy framework for sustainable development. Daft policy brief. EPAT/MUCIA. College of Natural Resources, University of Minnesota. St. Paul, MN.

Fernández-Reynoso, D.S. 1999. Aplicación del modelo hidrológico SWRRB en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, estado de México. *Agrociencia* 33: 1-9.

García, E. 1973. Modificación al sistema de clasificación de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1982. Carta topográfica E-14-A17. Escala 1.50 000. México D.F.

Maldonado-de León, O.A. 2001. Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca Itzapa, Guatemala. *Agrociencia* 35: 335-345.

Nash, J.E. y J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. A discussion of principles. *J. Hydrology* 10: 282-290.

Santos, D.V., P.L. Sousa y R.E. Smith. 1996. Model simulation of water and nitrate movement in a level-basin under fertigation treatments. *Agric. Water Manage.* 32: 293-306.

SRH. Secretaría de Recursos Hidráulicos. 1973. Orígenes y Alto Lerma. Tomo II. pp. 11-280.1.01 a la 11-280.5.01. *In: Boletín Hidrológico* 50. Región Hidrológica 12 (parcial). Dirección de Hidrología. México, D.F.