

MODELADO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO MIXTECO EN EL ESTADO DE OAXACA, MÉXICO

HYDROLOGICAL MODELLING OF MIXTECO RIVER WATERSHED IN THE STATE OF OAXACA, MÉXICO

Rodiberto Salas-Martínez¹, Laura A. Ibáñez-Castillo¹, Ramón Arteaga-Ramírez¹,
M. Roberto Martínez-Menes², D. Salvador Fernández-Reynoso²

¹Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo, Estado de México. (libacas@gmail.com). ²Hidrociencias. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Estado de México.

RESUMEN

La cuenca del Río Mixteco en el estado de Oaxaca, México, presenta degradación fuerte de sus recursos naturales, suelo, agua y vegetación. El objetivo del presente estudio fue calibrar y validar el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para usarse como herramienta de predicción mensual de la producción de biomasa, escurrimientos y sedimentos en la cuenca del Río Mixteco en Oaxaca, México. Los datos utilizados para la calibración y validación de modelo son del periodo de 1986 a 1990 y fueron obtenidos en la estación hidrométrica Mariscal; los tres primeros años se seleccionaron para la calibración y para la validación los dos años restantes. En la calibración de biomasa el coeficiente de determinación (R^2) fue 0.72. Para la producción de sedimentos sólo se realizó calibración pero no validación, debido a la disponibilidad limitada de sedimentos medidos en la estación hidrométrica. En la calibración de sedimentos R^2 fue 0.71 y la pendiente de la recta de los valores medidos contra los simulados fue 1.18. En la calibración de producción de escurrimientos el R^2 anual fue 0.94 y R^2 mensual 0.83; en la validación de la misma variable R^2 anual fue 0.93 y R^2 mensual fue 0.82.

Palabras clave: SWAT biomasa, calibración SWAT, producción de escurrimientos, producción de sedimentos.

INTRODUCCIÓN

Los modelos de cuenca simulan los procesos naturales del flujo de agua, sedimentos, sustancias químicas, nutrientes y organismos microbiológicos dentro de las cuencas y cuantifican el

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: septiembre, 2013. Aprobado: diciembre, 2013.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 48: 1-15. 2014.

ABSTRACT

Mixteco river basin in the state of Oaxaca, México, has a strong degradation of its natural resources, soil, water and vegetation. The aim of this study was to calibrate and validate the hydrological model SWAT (Soil and Water Assessment Tool), to serve as a tool for predicting biomass production, runoff and sediment on a monthly basis in the Mixteco river basin in Oaxaca, México. The data used for the model's calibration and validation are from the period 1986 to 1990 and were obtained from the hydrometric station Mariscal; the first three years were selected for calibration and the remaining two years for validation. In biomass calibration the coefficient of determination (R^2) was 0.72. For sediment yield only calibration was performed but not validation due to the limited availability of sediments measured at the gaging station. In the calibration of sediments, R^2 was 0.71 and the slope of the line of the values measured against the simulated was 1.18. In the calibration of runoff production the annual R^2 was 0.94 and the monthly R^2 0.83; in the validation of the same variable annual R^2 was 0.93 and monthly R^2 was 0.82.

Key words: SWAT biomass, SWAT calibration, runoff production, sediment production.

INTRODUCTION

Watershed models simulate natural processes of water flow, sediments, chemicals, nutrients and microbiological organisms within watersheds and quantify human impact on these processes (Singh and Frevert, 2005). Among the basin models, the hydrological and particularly rainfall-runoff are distinguished by trying to systematize their historical evolution and therefore offer constructive criticism to improve

impacto humano en estos procesos (Singh y Frevert, 2005). Entre los modelos de cuenca, los hidrológicos y en particular los de lluvia-escurrimiento, se distinguen por intentar sistematizar su cambio histórico y por tanto realizar una crítica constructiva para mejorar sus metodologías (Todini, 1988; Loague, 2010; Bedient *et al.*, 2012).

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo para cuencas desarrollado por el Departamento de Agricultura de EE.UU. (USDA-ARS, 2013) a través del Servicio de Investigación Agrícola (ARS), y se ha aplicado en varias cuencas del mundo. Torres-Benites *et al.* (2005) con el modelo SWAT enfatizaron la calibración y validación sólo en los escurrimientos para el Río la Laja, Guanajuato, en la Región Hidrológica No. 12 del Río Lerma cuya cuenca cubre 7016 km². Shen *et al.* (2009) usaron SWAT para modelar la erosión de la cuenca que drena hacia la presa Tres Gargantas en China, con una superficie de 40 005 km²; el modelo fue calibrado y validado solamente a la salida, con calibraciones de escurrimientos y sedimentos. Rivera-Toral *et al.* (2012) usaron SWAT para modelar la cuenca Ixtapan del Oro, Estado de México, con una superficie de 140 km², dando énfasis especial al cálculo de la erosión hídrica, no calibraron el modelo y reportaron que el factor topográfico, LS de la ecuación de pérdida de suelo, es subestimado por el SWAT en subcuencas con pendiente media mayor de 25 %, por lo cual se debe revisar este parámetro cuando se calibra el modelo. Según Zhang *et al.* (2008), el número de curva de escurrimiento y la capacidad del suelo disponible para almacenar agua son parámetros sensibles al momento de calibrar y validar un modelo. Hay un software especial para calibrar los modelos SWAT, el SWAT-CUP, basado en un algoritmo de optimización múltiple que demanda mucha memoria de computadora y tiempo de ejecución, pero que todavía se encuentra en una etapa de prueba (Arnold *et al.*, 2012). En estudios posteriores se pudiera calibrar los modelos SWAT mexicanos con el SWAT-CUP.

Un punto clave en esta investigación para probar si el modelo SWAT representa correctamente diversos procesos en la cuenca, será cuantificar la precisión de sus simulaciones. Moriasi *et al.* (2007) muestran varios parámetros estadísticos que miden tal ajuste, como la pendiente de la relación lineal entre valores simulados y medidos, el coeficiente de determinación de tal relación lineal (R^2) y el coeficiente de eficiencia

their methodologies (Todini, 1988; Loague, 2010; Bedient *et al.*, 2012).

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) is a model for basins developed by the U.S. Department of Agriculture (USDA-ARS, 2013) through the Agricultural Research Service (ARS) and has been applied in several basins of the world. Torres-Benites *et al.* (2005) emphasized the SWAT model calibration and validation only in runoffs for the La Laja river, Guanajuato, in Hydrological Region No. 12 of Rio Lerma, whose basin covers 7016 km². Shen *et al.* (2009) used SWAT to model the erosion of the watershed that drains into the Three Gorges dam in China, with an area of 40,005 km². The model was calibrated and validated only in the outlet, with runoff and sediment calibrations. Rivera-Toral *et al.* (2012) used SWAT to model the Ixtapan del Oro basin, Estado de México, with an area of 140 km², and gave special emphasis to the calculation of water erosion; they did not calibrate the model and reported that the topographic factor, LS of the soil loss equation was underestimated by SWAT in subbasins with an average slope higher than 25 %; so this parameter should be checked when the model is calibrated. According to Zhang *et al.* (2008), the runoff curve number and soil capacity available to store water are parameters sensitive to time to calibrate and validate a model. There is a special software to calibrate the models SWAT, SWAT-CUP, based on a multiple optimization algorithm that takes a lot of computer memory and is time-consuming in its use but is still in a test phase (Arnold *et al.*, 2012). Subsequent studies could include calibrating the Mexican SWAT models with SWAT-CUP.

A key point in this research for testing whether the SWAT model correctly represents various processes in the watershed, will be to quantify the accuracy of its simulations. Moriasi *et al.* (2007) show several statistical parameters that measure such adjustment, as the slope of the linear relationship between simulated and measured values, the coefficient of determination of such linear relationship (R^2) and the coefficient of efficiency by Nash-Sutcliffe. These authors also mention that when the slope of this relationship is closer to 1.0 the model reproduces the magnitudes of the measured data. According to Moriasi *et al.* (2007) and Ross (2000), the R^2 values close to 1.0 indicate good model adjustment and the values of $R^2 > 0.5$ are acceptable. Nash-Sutcliffe

de Nash-Sutcliffe. Estos autores también mencionan que cuando la pendiente de esta relación está más cercana a 1.0 indica que el modelo reproduce las magnitudes de los datos medidos. Según Moriasi *et al.* (2007) y Ross (2000) valores de R^2 cercanos a 1.0 indican un buen ajuste del modelo y valores de $R^2 > 0.5$ son aceptables. Valores del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe entre 0.0 y 1.0 son aceptables y el óptimo se acerca a 1.0, mientras que un valor < 0.0 indica que la media es un mejor predictor que el modelo (Nash y Sutcliffe, 1970; Moriasi *et al.*, 2007).

El objetivo del presente estudio fue calibrar y validar manualmente el modelo hidrológico SWAT en la cuenca del Río Mixteco en el estado de Oaxaca, para la producción de biomasa de las asociaciones vegetales dentro de la cuenca, además de la producción de escurrimientos y sedimentos que fluyen hasta la estación hidrométrica Mariscala, cuya área de la cuenca es 6539 km².

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la cuenca

La cuenca del Río Mixteco se encuentra en la región hidrológica 18 (Balsas), en la cuenca general del Río Atoyac y en la subcuenca del Río Mixteco, en 18° 02' 57" N y 98° 16' 48" O, 17° 03' 36" S y 97° 22' 25" E, su superficie es 6539 km² y abarca 91 municipios del estado de Oaxaca. A la salida de la cuenca se localiza la estación hidrométrica Mariscala sobre el cauce del Río Mixteco, en 17°51'45" N y 98°08'58" O.

Software usado

Para este estudio se usó SWAT, versión para ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008), en la versión SWAT 93.7.b (Stone Environmental Inc, *et al.*, 2011), disponible gratuitamente en la página web del SWAT Texas A&M University (USDA-ARS and Texas A&M AgriLife Research, 2013).

Información empleada

Topográfica

Para alimentar el modelo SWAT se usó el modelo digital de elevaciones del INEGI con una resolución de pixel de 30 m (INEGI, 2011). Dentro del área de estudio las altitudes van de 1034 a 3365 m, con una pendiente media de 31.45 %, la cual es estimada por el propio SWAT.

efficiency coefficient values between 0.0 and 1.0 are acceptable and the optimal approaches to 1.0, while a value < 0.0 indicates that the mean is a better predictor than the model (Nash and Sutcliffe, 1970; Moriasi *et al.*, 2007).

The aim of this study was to manually calibrate and validate the SWAT hydrological model in Mixteco river basin in the state of Oaxaca, for the production of biomass of plant communities within the basin, besides the production of runoff and sediments flowing to the Mariscala hydrometric station, whose catchment area is 6539 km².

MATERIALS AND METHODS

Basin description

Mixteco River Basin is in hydrologic region 18 (Balsas) in the Río Atoyac general basin and in the subbasin of the Río Mixteco, at 18° 02' 57" N and 98° 16' 48" W, 17° 03' 36" S and 97° 22' 25" E; the area is about 6539 km² and includes 91 municipalities in the state of Oaxaca. At the outlet of the basin is the Mariscala hydrometric station on the bed of the Mixteco river, at 17° 51' 45" N and 98° 08' 58" W.

Software used

For this study, SWAT, ArcGIS version 9.3 (ESRI, 2008), the SWAT version 93.7.b (Stone Environmental Inc., *et al.*, 2011) was used; it is available free of charge on the website of the SWAT Texas A & M University (USDA-ARS and Texas A&M AgriLife Research, 2013).

Information employed

Topographic tool

To feed the SWAT model we used the digital elevation model by INEGI, with a resolution of 30 m pixels (INEGI, 2011). Within the study area altitudes ranged from 1034 to 3365 m, with an average slope of 31.45 %, which is estimated by SWAT itself.

Soil and vegetation use

The information of land use and vegetation for the calibration and validation period was obtained from the vector dataset of the Charter Land Use and Vegetation Series II, scale 1:250 000, E1409 key for the study area (INEGI, 1993a), and identified

Uso de suelo y vegetación

La información de uso de suelo y vegetación para el periodo de calibración y validación se obtuvo del conjunto de datos vectoriales de la Carta de Uso de Suelo y Vegetación de la serie II, escala 1:250 000, clave E1409 para el área de estudio (INEGI, 1993a), y se identificaron 14 usos de suelo y vegetación. El modelo SWAT, para su sub-modelo de crecimiento vegetal, requiere los parámetros fisiotécnicos de las especies vegetales representativas. El SWAT, internamente contiene una base de datos de dichos parámetros fisiotécnicos por especie. Entre esos parámetros están los siguientes: altura de la planta, temperaturas máxima y mínima en la cual crece, profundidad de raíces, índice de área foliar, el valor de coeficiente C para la ecuación universal de pérdida de suelo, el valor del número de curva de escurrimiento, índice de cosecha, y otros (Neitsch *et al.*, 2011).

Suelos

La modelación hidrológica de la cuenca requirió, para las Unidades de Suelo reportadas por INEGI (1993b), los datos de la Carta Edafológica E1409, escala 1:250 000 de la serie II, generar perfiles de suelo tipo y se obtuvieron muestras de suelos para los diferentes horizontes pedológicos observados en campo; se muestrearon 25 sitios y en cada sitio a diferentes profundidades se tomaron entre 1 y 3 muestras. Para elegir los sitios de muestreo se tomó como punto de partida la información de la carta edafológica (INEGI, 1993b), la cual da una idea de la variación espacial de las propiedades de los suelos de la cuenca.

El modelo SWAT, para efectuar el balance hidrológico y calcular la producción de sedimentos, requiere para cada tipo de suelo 18 parámetros físicos y químicos: textura, estructura, conductividad hidráulica, pH, conductividad eléctrica, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente, densidad real, contenido de materia orgánica, contenido de carbono orgánico y porosidad. Dichas propiedades fueron determinadas en laboratorio usando las muestras de suelo.

Clima

La información de clima para la alimentación del modelo se obtuvo de la base de datos CLICOM del SMN (2010). Dentro de la cuenca se identificaron 18 estaciones climatológicas (Cuadro 1) de las cuales se obtuvieron datos climáticos diarios de precipitación, temperaturas máximas y mínimas correspondientes al periodo 1986-1990. Esos datos entran al programa en archivos de texto: uno para precipitación y otro para temperaturas máximas y mínimas. La evapotranspiración es un proceso importante en el balance hidrológico diario que realiza el SWAT y fue

14 soil and vegetation uses. For the plant growth submodel, the SWAT model requires the physio-technical parameters of the representative plant species. The SWAT internally contains a database of the physio-technical parameters per species. Among these parameters are the following: plant height, maximum and minimum temperatures in which it grows, root depth, leaf area index, the value of coefficient C for the universal soil loss equation, the value of the number of runoff curve, harvest index, among others (Neitsch *et al.*, 2011).

Soils

The hydrological modeling of the basin for the Soil Units reported by INEGI (1993b) required having access to the data of the edaphological Charter E1409, 1:250,000 scale, series II, as well as generating soil type profiling. Soil samples were obtained from the different pedological horizons observed in the field; 25 sites were sampled and one to three samples were taken on each at different depths. To choose the sampling sites the information of the pedological charter (INEGI, 1993b) was used as a starting point, which gives an idea of the spatial variation of soil properties in the basin.

To perform water balance and calculate sediment production the SWAT model requires for each soil type 18 physical and chemical parameters: texture, structure, hydraulic conductivity, pH, electrical conductivity, field capacity, permanent wilting point, bulk density, real density, organic matter content, organic carbon content and porosity, among others. These properties were determined by examining soil samples in the laboratory.

Climate

Climate information to feed the model was obtained from the SMN CLICOM data base (2010). Within the basin 18 weather stations (Table 1) were identified, from which daily climate data on precipitation and maximum and minimum temperatures for the 1986-1990 period was collected. These data were introduced into the program in text files, one for rain and one for maximum and minimum temperatures. Evapotranspiration is an important daily water balance performed by SWAT and was determined by the method of Penman-Monteith through data of solar radiation and wind speed process. In addition, SWAT can generate lost data through a method of time series, *i.e.*, it can internally, through monthly weather information, generate synthetically some data not available on a daily basis for several simulated years, such as solar radiation, wind speed and precipitation. The water balance performed by SWAT is daily, but in this study calibration was performed every month.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas en el área de estudio.
Table 1. Weather stations in the study area.

Número	Clave	Nombre	Longitud (grados)	Latitud (grados)	Periodo de registro		Elevación (msnm)
					Inicio	Final	
1	20013	San Lucas Camotlán	-97.6833	17.9000	1986	1990	1849
2	20028	Santa María Chilapa de Díaz	-97.6298	17.5847	1986	1990	1854
3	20051	Juxtlahuaca	-98.0120	17.3333	1986	1990	1683
4	20067	Mariscal de Juárez	-98.1410	17.8596	1986	1990	1080
5	20103	San Andrés Lagunas	-97.5228	17.5721	1986	1990	2296
6	20108	San Francisco	-97.8178	17.7428	1986	1990	1510
7	20125	Santa Catarina	-97.8142	17.5555	1986	1990	1911
8	20133	Santiago Chilixtlahuaca	-97.8927	17.9034	1986	1990	1700
9	20137	Santiago Teotongo	-97.5368	17.7221	1986	1990	2079
10	20141	Silacayoapan	-98.1437	17.4976	1986	1990	1684
11	20142	Silacayoapan	-98.1400	17.5030	1986	1990	1684
12	20159	San Pedro y San Pablo Teposcolula	-97.4825	17.5013	1986	1990	2183
13	20163	Tezoatlán de Segura y Luna	-97.8000	17.3333	1986	1990	2023
14	20167	Santa María Asunción	-97.6830	17.2670	1986	1990	2065
15	20190	Zapotitlan Palmas	-97.8079	17.8855	1986	1990	2000
16	20275	Huajuapán de León	-97.7774	17.8046	1986	1990	1581
17	20310	San Miguel Tlacotepec	-98.0060	17.4540	1986	1990	1700
18	20375	Santiago del Río	-98.0890	17.4560	1986	1990	1641

Servicio Meteorológico Nacional, 2010.

determinada por el método de Penman-Monteith, para lo cual requirió datos de radiación solar y velocidad del viento. Además, internamente, el SWAT genera datos perdidos por un método de series de tiempo, esto es, internamente el SWAT, mediante normales climatológicas mensuales puede generar de manera sintética algunos datos no disponibles a nivel diario para los varios años simulados, como la radiación solar, velocidad del viento y datos perdidos de precipitación. El balance hidrológico que realiza el SWAT es diario, pero en este estudio la calibración se realizó cada mes.

Datos hidrométricos

Del sistema de Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales, BANDAS, (CONAGUA, 2012) se obtuvieron los aforos mensuales de producción de agua (gastos medios y máximos) y sedimentos de la estación hidrométrica para el período 1961-1992. De esta serie de datos se seleccionaron 1980 a 1984, período en el cual está la serie mensual más completa de datos. Por tanto, los tres primeros años se utilizaron para la calibración y para la validación los dos años restantes.

Metodología

El principio básico de funcionamiento interno del SWAT, desde el punto de vista de las bases teóricas, es el

Hydrometric data

From the National Database of Surface Water system, BANDAS (CONAGUA, 2012), monthly gauging of water production (average and maximum flows) and sediments from the gaging station were obtained for the 1961-1992 period. From this data set those from 1980 to 1984 were selected, a period comprising the most comprehensive monthly data series. Therefore, the first three years were used for calibration and the remaining two years for validation.

Methodology

The basic principle of SWAT internal functioning from the point of view of the theoretical basis is the daily water balance of the basin (Neitsch *et al.*, 2011) and although its calculation time interval is daily, the software also generates monthly and annual reports. The hydrological processes included in such balance sheet report results in millimeters. Among the hydrological processes included are evapotranspiration and runoff and there is the option to choose various methods of calculation for each one of them. In this study the methods of Penman-Monteith and the runoff curve number were chosen for evapotranspiration and runoff, respectively. After the water balance, other calculations relevant to this study were performed like the calculation of sediment yield by the method of the Modified Universal Soil

balance hidrológico diario de la cuenca (Neitsch *et al.*, 2011) y aunque su intervalo de tiempo de cálculo es diario, el software también genera reportes mensuales y anuales. Los procesos hidrológicos incluidos en tal balance reportan resultados en láminas en milímetros. Entre los procesos hidrológicos incluidos están la evapotranspiración y los escurrimientos y da la opción de elegir varios métodos de cálculo para cada uno de ellos. En este estudio se eligieron los métodos de Penman-Monteith y número de curva de escurrimiento para la evapotranspiración y los escurrimientos, respectivamente. Una vez realizado el balance hidrológico efectúa otros cálculos relevantes a este estudio, como el cálculo de la producción de sedimentos por el método de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE). El manual teórico del SWAT (Neitsch *et al.*, 2011) describe detalladamente el sustento teórico de todos los procesos del ciclo hidrológico modelados en SWAT.

Para este estudio se siguió una serie de pasos desde la recopilación de la información hasta la calibración y validación del modelo (Figura 1). Para la calibración manual del modelo se puso especial interés en calibrar tres productos de salida del SWAT de los cuales hay valores de medición para comparar biomasa, volúmenes de escurrimiento anual y mensual, y producción de sedimentos. Aunque para los volúmenes, en los resultados se muestran láminas de escurrimiento, en realidad es lo mismo ya que volumen entre área de la cuenca es igual a láminas escurrida.

Arnold *et al.* (2012) señalan que entre los parámetros más sensibles que afectan los valores de volúmenes escurridos está el parámetro de Número de Curva de Escurrimiento (NC). Internamente, el SWAT tiene la tabla de valores de NC del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), el cual es asignado según el tipo de suelo y su cobertura vegetal. Pero Arnold *et al.* (2012) también señalan que estos valores pueden variar en $\pm 10\%$, considerado un rango de error aceptable de los valores de NC reportados en las tablas del SCS. De hecho, los mismos autores señalan que ajustar los parámetros en $\pm 10\%$ es una práctica aceptable para ajustar los valores estimados con el SWAT con los valores observados. Para la calibración de los sedimentos se consideró lo señalado por Rivera-Toral *et al.* (2012) de que la longitud de pendiente es un parámetro sensible en el momento de calcular los sedimentos con la ecuación MUSLE. Otro documento clave en el proceso de la calibraciones es el de Arnold *et al.* (2001) quienes guían al usuario de cuales parámetros son los más sensibles y que pueden ser ajustados. Para calibrar la biomasa, los parámetros más sensibles son conversión de energía en biomasa, índice de cosecha, e índice de área foliar. Al igual que para la base de datos interna del SWAT para los números de curva de escurrimiento, el software trae la base de datos con valores promedio reportados para las especies vegetales que están en la cuenca. Por lo que dichos valores son ajustados de nuevo en $\pm 10\%$.

Loss Equation (MUSLE). The theoretical SWAT manual (Neitsch *et al.*, 2011) describes in detail the theoretical basis of all the hydrological cycle processes modeled by SWAT.

In this study, a series of steps was followed, from gathering information to the calibration and validation of the model (Figure 1). For the manual calibration of the model special emphasis was placed on calibrating three products of SWAT output, of which there are measurement values to compare biomass, annual and monthly volumes of runoff and sediment yield. Although for volume are shown in results runoff sheets, the information provided is actually the same as the volume between areas of the basin is equal to runoff sheets.

Arnold *et al.* (2012) note that among the most sensitive parameters affecting the values of runoff volumes is the runoff curve number (NC). Internally, SWAT has the NC Soil Conservation Service (SCS) table, which is assigned by the type of soil and vegetation cover. But Arnold *et al.* (2012) also point out that these values may vary $\pm 10\%$, considering an acceptable range of error of the NC values reported in the SCS tables. Indeed, the same authors indicate that adjusting the parameters in $\pm 10\%$ is acceptable in order to adjust the values estimated by SWAT with those observed. For the calibration of sediments, the results reported by Rivera-Toral *et al.* (2012) were considered: that the slope length is a sensitive parameter at the time of calculating the sediments with the MUSLE equation. Another key document to the process of calibration is that by Arnold *et al.* (2001), which guides the user as to which are the most sensitive parameters that can be adjusted. To calibrate the biomass, the most sensitive parameters are energy conversion into biomass, harvest index, and leaf area index. As for SWAT internal database for runoff curve numbers, the software brings the database with average values reported for the plants that are in the basin. Therefore, these values are set again in $\pm 10\%$.

RESULTS AND DISCUSSION

The SWAT starts delimiting the basin from the MDE and the basin outlet indicated; parallel to the boundary, it divides the basin into sub-basins and subdivides each into the hydrological response units (UHR). This division is done to ensure uniformity of hydrological response in the calculations; then the effects are added or crossed or both. In this study, the basin of 6539 km² was divided into 92 sub-basins whose surface varied between 5 and 170 km² with an average subbasin slope between 10 and 50 % (Figure 2).

The model exhibits results of daily, monthly or yearly water balance. In this study, calibration was

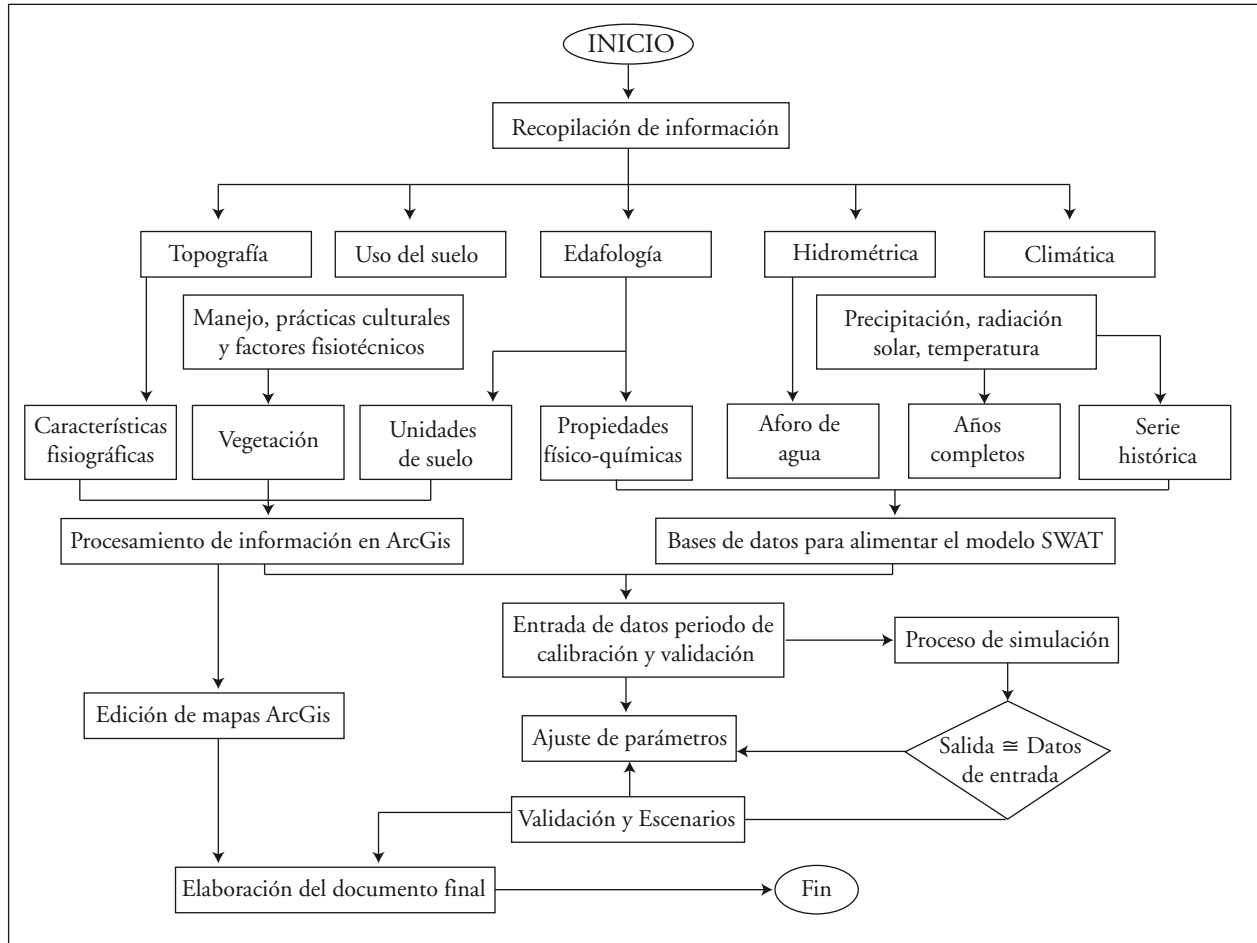


Figura 1. Diagrama de flujo metodológico.
 Figure 1. Diagram of methodological flow.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El SWAT parte de delimitar la cuenca a partir del MDE y la salida de la cuenca que se le indique; de manera paralela a la delimitación, divide a la cuenca en subcuencas y cada subcuenca la divide en unidades hidrológicas de respuesta (UHR). Esta división se efectúa para garantizar una uniformidad de respuesta hidrológica en los cálculos y después los efectos son sumados o transitados o ambos. En este estudio la cuenca de 6539 km² fue dividida en 92 subcuencas cuya superficie varía entre 5 y 170 km² con pendiente media de subcuenca entre 10 y 50 % (Figura 2).

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

based on monthly data, and reporting the monthly and annual results was chosen, due to the ease of data manipulation.

Calibration period

Biomass production

First the production of biomass was calibrated for the different plant associations present within the basin under study. It is a difficult task to calibrate this SWAT result, since the calibration of volumes and sediments is easier because there are measured data on the BANDAS database. In the case of biomass, there is no official database, there is only data measured in the field in Mexico in several articles (Masera *et al.*, 2005; CIRCE, 2006, Acosta-Diaz *et al.*, 2009). Table 2 shows the comparison between the values measured

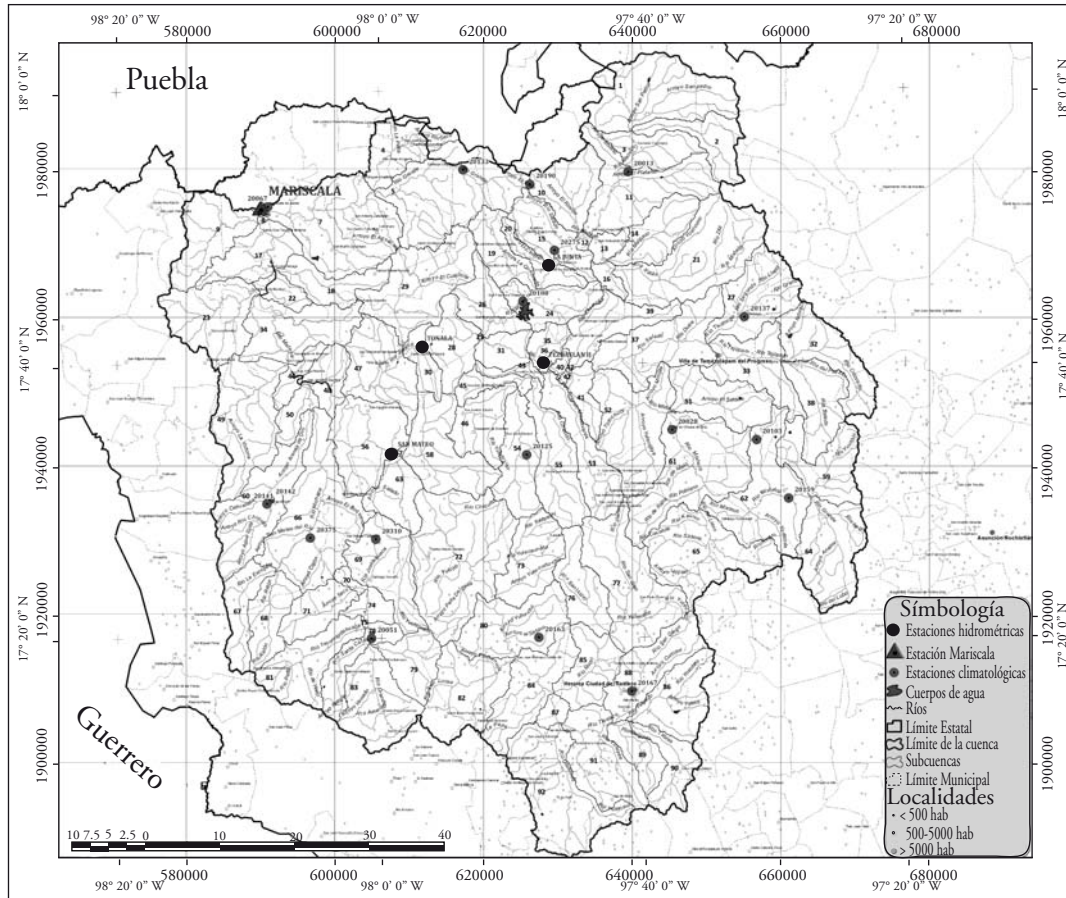


Figura 2. Delimitación de la cuenca del Río Mixteco y su subdivisión en subcuencas.
Figure 2. Delimitation of Mixteco river basin and its division into sub-basins.

Periodo de calibración

Producción de biomasa

Primero se calibró la producción de biomasa para las diferentes asociaciones vegetales presentes dentro de la cuenca en estudio. Es una tarea difícil calibrar este resultado SWAT, respecto a que la calibración de volúmenes y sedimentos es más fácil porque existen datos medidos en la base de datos BANDAS. En el caso de la biomasa, no hay una base de datos oficial; sólo hay datos medidos en campo en México en varios artículos (Masera *et al.*, 2005; CIRCE, 2006; Acosta-Díaz *et al.*, 2009). En el Cuadro 2 se muestra la comparación entre los valores medidos en campo por los autores previamente citados y los estimados en SWAT. En caso de requerir una aclaración de lo que significa cada grupo de uso de suelo, se recomienda

in the field by the authors previously cited and the estimates in SWAT. Should you require clarification of what each group of land use means, consult the guide for map interpretation (INEGI, 2012).

With the expected average and simulated data, we performed a regression analysis. The slope of the line (1.078) and the coefficient of determination R^2 (0.720) indicate that the production of biomass simulated by the model compares favorably with the expected data (Figure 3), which are considered acceptable (Moriassi *et al.* 2007). Figure 3 is the way in which usually a comparison between observed and simulated values is conducted (Moriassi *et al.*, 2007; Shen *et al.*, 2009).

Runoff production

Runoff was calibrated for the years 1986, 1987 and 1988, and a comparison was carried out

consultar la guía para la interpretación de cartografía (INEGI, 2012).

Con los datos promedio esperados y simulados se realizó un análisis de regresión. La pendiente de la recta (1.078) y el coeficiente de determinación R^2 (0.720) indican que la producción de biomasa simulada por el modelo se compara favorablemente con los datos esperados (Figura 3), los cuales se consideran aceptables (Moriassi *et al.*, 2007). La comparación entre valores observados y simulados se realiza con figuras como la Figura 3 (Moriassi *et al.*, 2007; Shen *et al.*, 2009).

Producción de escurrimientos

Los escurrimientos fueron calibrados para los años 1986, 1987 y 1988, y se realizó una comparación entre los valores anuales medidos en la estación hidrométrica Mariscala y los simulados por el modelo SWAT (Cuadro 3).

Entre las láminas escurridas medidas y simuladas por el modelo se realizó un análisis de regresión. El valor de R^2 (0.935) y la pendiente de la recta (0.983) indican que la producción de agua simulada por el modelo se compara favorablemente con los datos medidos en la estación hidrométrica (Figura 4).

Los valores de escurrimientos mensuales medidos en la estación hidrométrica mariscala y los simulados por el modelo SWAT se compararon para el periodo de calibración (Cuadro 4).

between the annual values measured in the Mariscala hydrometric station and those simulated by the SWAT model (Table 3).

Between the measured and simulated runoff sheets by the model a regression analysis was performed. The R^2 value (0.935) and the slope of the line (0.983) indicate that the production of water simulated by the model compares favorably with the data measured in the hydrometric station (Figure 4).

The monthly runoff values measured at the hydrometric station Mariscala and those simulated by the SWAT model (Table 4) were compared for the calibration period.

Simulated monthly values resemble those measured at the hydrometric station (Figure 5), and for small values of measured runoff the model tends to underestimate this variable.

In the regression analysis, for the monthly data the value of R^2 was 0.834 and 0.939 for the slope of the line (Figure 6), both considered acceptable. The slope of the line value indicates that the model underestimates the runoff within the basin.

Sediment production

For sediment calibration, the one and only year of data recorded in the BANDAS database for the basin (1986) was used. BANDAS reports the volume of sediment in thousands of m^3 , which when affected by the specific weight of the sediment, considering the basin area, leads to a monthly sediment reported in $t\ ha^{-1}$ (Table 5).

Cuadro 2. Comparación entre biomasa esperada y simulada.
Table 2. Comparison between expected and simulated biomass.

Uso de suelo y vegetación	Biomasa (t MS ha ⁻¹ año ⁻¹)* esperada			Biomasa (t MS ha ⁻¹ año ⁻¹) Modelo SWAT
	Mínimo	Promedio	Máximo	
Agricultura de riego	7	8.5	10	6.79
Agricultura de temporal	3	4.5	6	6.48
Bosque de encino	10	11	12	11.41
Bosque de encino-pino	11	12	13	12.32
Bosque de pino	13	14	15	17.78
Bosque de pino-encino	12	13	14	13.6
Bosque de táscate	8	9	10	7.71
Bosque mesófilo de montaña	14	16	18	15.64
Chaparral	5	6	7	11.95
Palmar inducido	6	7	8	7.71
Pastizal inducido	3	4	5	3.21
Selva baja caducifolia	5	7	9	8.52

MS: materia seca.

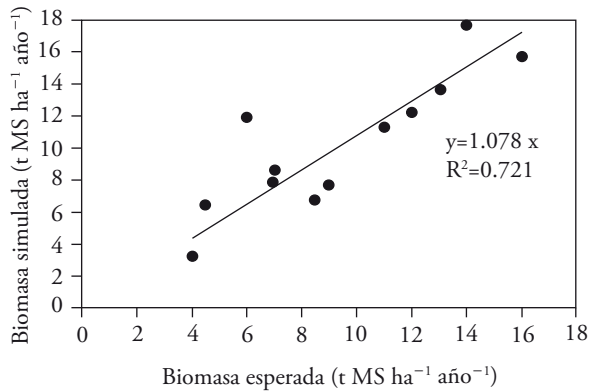


Figura 3. Relación entre biomasa esperada y biomasa simulada por el modelo SWAT.
Figure 3. Relation between expected biomass and biomass simulated by the SWAT model.

Los valores mensuales simulados se asemejan a los aforados en la estación hidrométrica (Figura 5) y para valores pequeños de escurrimientos medidos el modelo tiende a subestimar esta variable.

En el análisis de regresión para los datos mensuales el valor de R^2 fue 0.834 y 0.939 para la pendiente de la recta (Figura 6), los cuales son aceptables. El valor de la pendiente de la recta indica que el modelo subestima los escurrimientos dentro de la cuenca.

Producción de sedimentos

Para la calibración de sedimentos se usó el único año de información registrada en la base de datos BANDAS para la cuenca (1986). BANDAS reporta el volumen de sedimentos en miles de m^3 , el cual al afectarse por el peso específico del sedimento y considerando el área de la cuenca, se llega a un sedimento mensual reportado en $t\ ha^{-1}$ (Cuadro 5).

Cuadro 3. Comparación entre láminas de escurrimiento medido y simulado anual.
Table 3. Comparison between annual measured and simulated runoff sheets.

	Año		
	1986	1987	1988
Medido (mm)	89.33	131.14	111.50
Simulado (mm)	91.91	130.90	104.03

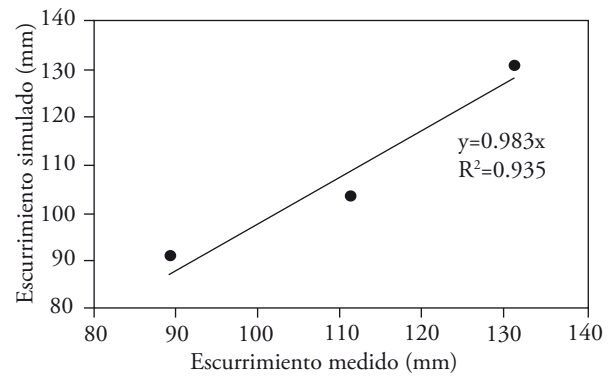


Figura 4. Relación entre el escurrimiento medido y simulado por el modelo SWAT a nivel anual.
Figure 4. Relation between annual runoff measured and simulated by the SWAT model.

From the analysis of gauging, also a product of the simulation with SWAT, in July 1986 the amount of sediment was not consistent with the levels of precipitation and runoff recorded (Figure 5): twice as much sediment cannot be produced in July because rain by then was 20 % less than in June. In addition, the month of July seems to be the only datum outside the range of values reported (Table 5).

Cuadro 4. Comparación entre láminas escurridas medidas y simuladas con el modelo SWAT.
Table 4. Comparison between runoff measured sheets and those simulated by the SWAT model.

Mes		Enero mm	Febrero mm	Marzo mm	Abril mm	Mayo mm	Junio mm	Julio mm	Agosto mm	Sept. mm	Octubre mm	Nov. mm	Dic. mm	Total mm
Mariscalá	1986	5.94	2.15	0.97	3.10	11.31	12.04	17.74	10.58	10.87	6.27	4.22	4.14	89.33
Simulado	1986	0.01	1.4	0.22	3.97	15.61	15.83	17.78	13.51	12.56	7.93	1.31	1.78	91.91
Mariscalá	1987	1.59	0.81	1.98	0.88	3.45	13.03	45.43	19.40	25.02	12.40	3.63	3.52	131.14
Simulado	1987	0.46	0.1	1.34	1.8	7.59	26.85	38.68	11.47	30.01	8.94	2.63	1.03	130.90
Mariscalá	1988	2.46	1.95	1.39	0.50	1.18	9.12	24.18	13.69	41.87	7.49	4.66	3.01	111.50
Simulado	1988	0.62	0.22	0.32	0.26	2.71	18.39	23.11	17.5	32.25	6.14	1.81	0.7	104.03

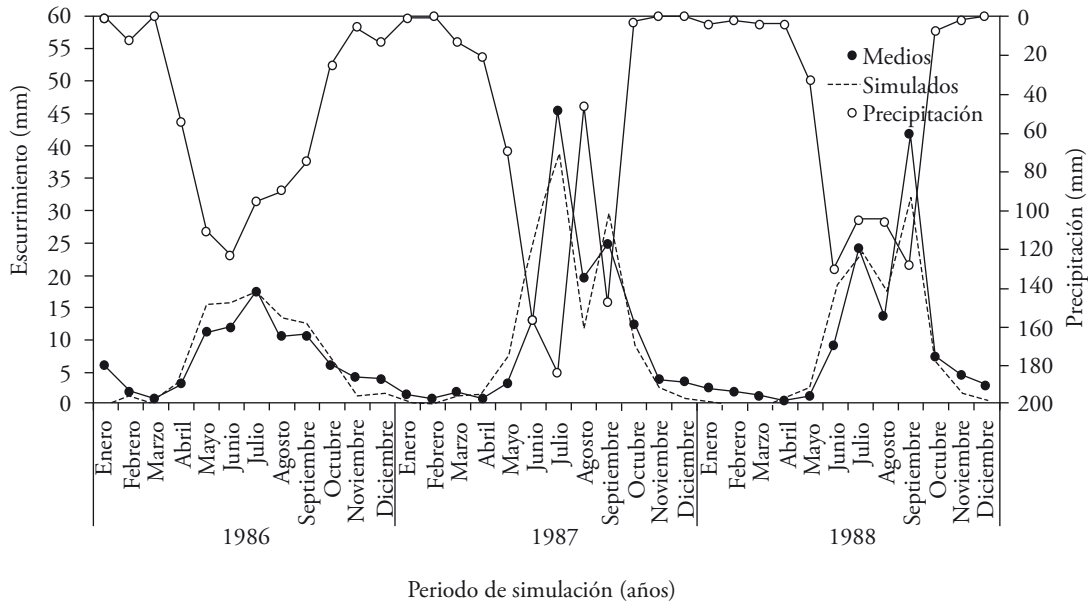


Figura 5. Ecurrimientos mensuales medidos y simulados y precipitaciones para el periodo de calibración.
Figure 5. Monthly measured and simulated runoff and precipitation for the validation period.

Del análisis de los aforos, producto también de la simulación con SWAT, para julio de 1986 la cantidad de sedimentos no concordó con los niveles de precipitación y escurrimiento registrados (Figura 5): no se puede producir el doble de sedimentos en julio porque la lluvia fue 20 % menor respecto a junio. Además, el mes de julio parece ser el único dato fuera del orden de valores reportados (Cuadro 5).

En el análisis de regresión para sedimentos (Figura 7) los valores 0.706 para R^2 y 1.189 para la pendiente

In the regression analysis for sediments (Figure 7), the values 0.706 for R^2 and 1.189 for the slope of the line indicate a satisfactory calibration of the model provided that July is not included. If that dubious datum is included the R^2 would go down to 0.46, damaging the good work done in the other 11

Cuadro 5. Comparación mensual de sedimentos medidos y simulados en 1986.

Table 5. Monthly comparison of measured and simulated sediments in 1986.

Mes	Mariscala (t ha ⁻¹)	Simulado (t ha ⁻¹)
Enero	0.00	0.00
Febrero	0.00	0.16
Marzo	0.06	0.00
Abril	0.67	0.15
Mayo	1.64	1.94
Junio	1.70	1.83
Julio	3.00*	1.19
Agosto	0.54	0.62
Septiembre	0.74	1.51
Octubre	0.32	1.39
Noviembre	0.04	0.00
Diciembre	0.02	0.00
Total	8.72	8.79

*Dato dudoso ♦ Dubious data.

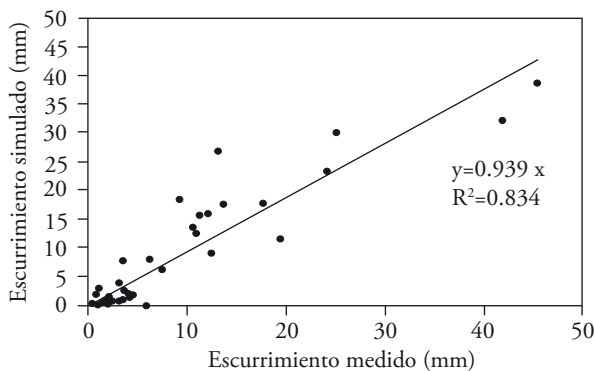


Figura 6. Relación mensual entre escurrimientos medidos y simulados para el periodo de calibración.

Figure 6. Monthly relation between measured and simulated runoff.

de la recta indican una calibración satisfactoria del modelo, si no se incluye el mes de julio. Si ese dato dudoso se incluyera bajaría el R^2 a 0.46, dañando el buen trabajo realizado en los otros 11 meses. Estos indicadores muestran que la producción de sedimentos simulada se compara satisfactoriamente con los datos medidos, aunque en menor grado que para la producción de escurrimientos.

La calibración del modelo SWAT se realizó para tres años consecutivos; en el caso del ajuste de la producción de biomasa los resultados fueron satisfactorios. Respecto a la producción de escurrimientos y sedimentos, se resumen los valores de los coeficientes de calibración en el Cuadro 6.

Periodo de validación

La validación del modelo se realizó sólo para la producción de escurrimientos ya que es la única variable con datos para ello. Los años validados fueron 1989 y 1990, pero la calidad de los datos de escurrimientos para 1989 es dudosa. Para observar la incongruencia de estos datos, en la Figura 8 se muestra la dinámica de precipitación y los escurrimientos medidos dentro de la cuenca a nivel mensual para el periodo de calibración y validación. El año 1989 es el único donde el comportamiento de los escurrimientos no conserva la misma tendencia aleatoria de la precipitación, y para julio el valor de escurrimiento es mayor al de la precipitación. Por tal razón en la validación anual se excluye este año para su análisis y para la validación mensual no se consideraron los datos correspondientes de julio, septiembre y octubre por ser los meses con la mayor incongruencia entre lo que llueve y lo que escurre (Figura 8).

Para cuantificar el nivel de certeza con que los escurrimientos son simulados en el modelo SWAT,

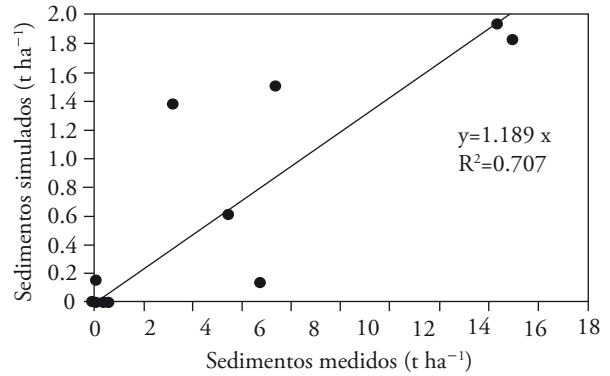


Figura 7. Relación entre sedimentos medidos y simulados mensualmente.

Figure 7. Relation between montly measured and simulated sediments.

months. These indicators show that the production of simulated sediments can be satisfactorily compared with the measured data, though to a lesser degree than for runoff production.

The SWAT model calibration was carried out for three consecutive years. In the case of setting the biomass production results were satisfactory. Regarding the production of runoff and sediment, are summarized the values of the calibration coefficients in Table 6.

Validation period

The model was validated only for the production of runoff because it is the only variable with this information. The validated years were 1989 and 1990, but the quality of runoff data for 1989 is uncertain. To observe the inconsistency of these data, Figure 8 shows the dynamics of precipitation and runoff

Cuadro 6. Resumen de los coeficientes de calibración del modelo SWAT.
Table 6. Summary of the calibration coefficients of the SWAT model.

	Desviación estándar medida	Desviación estándar simulada	R^2	Pendiente de la recta	Índice de Nash y Sutcliffe
Anual					
Escurreimientos (mm)	17.08	16.29	0.9349	0.9831	0.93
Mensual					
Escurreimientos (mm)	10.57	10.46	0.8337	0.9391	0.83
Producción de sedimentos (mm)	0.90	0.75	0.7078	1.1895	0.76

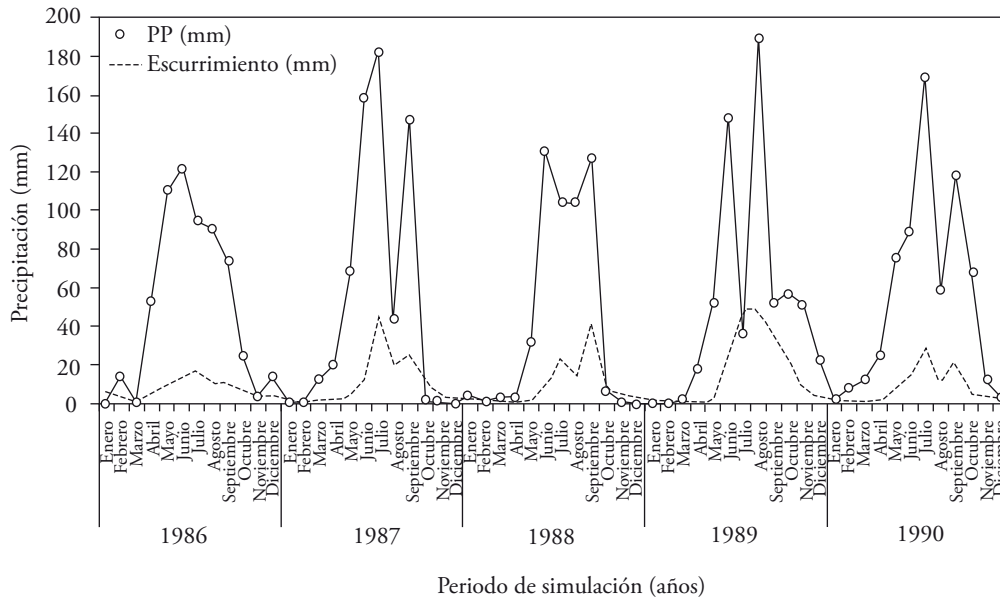


Figura 8. Comparación entre la precipitación observada en la cuenca y los escurrimientos medidos.
Figure 8. Comparison between rainfall recorded in the basin and runoff measured.

se validaron los parámetros calibrados (sin ningún ajuste adicional) usando datos hidrométricos de escurrimiento por un periodo adicional de dos años consecutivos. Los valores de escurrimiento medidos y simulados se compararon para el periodo de validación (Cuadro 7), pero la incongruencia previamente mencionada en los datos medidos en 1989, dificulta un ajuste satisfactorio del modelo.

En el análisis anual el coeficiente de la pendiente de la recta fue 0.934, 0.975 para R^2 y 0.90 para el índice Nash-Sutcliffe, lo cual indica un ajuste aceptable de los datos simulados con respecto a los medidos. En el análisis mensual los valores fueron 0.829 para R^2 , 0.861 para la pendiente de la recta (Figura 9), y 0.79 para el índice de Nash-Sutcliffe.

measured monthly within the basin for the period of calibration and validation. The year 1989 is the only one where the behavior of runoff did not retain the same random trend of precipitation, and the value for July runoff was greater than precipitation. For this reason, the analysis of the annual validation of that year was excluded, and for the monthly validation the data for July, September and October, was not considered for being the months with the greatest disparity between rainfall and runoff (Figure 8).

To quantify the level of certainty with which runoffs are simulated in the SWAT model, the calibrated parameters (without any additional adjustment) were validated using runoff hydrometric data for an additional period of two consecutive years.

Cuadro 7. Comparación entre escurrimientos medidos y simulados con SWAT para el periodo de validación (1989-1990).
Table 7. Comparison between runoff measured and simulated with SWAT for the validation period (1989-1990).

Mes		Enero mm	Febrero mm	Marzo mm	Abril mm	Mayo mm	Junio mm	Julio mm	Agosto mm	Sept. mm	Octubre mm	Nov. mm	Dic. mm	Total mm
Mariscala	1989	2.04	1.71	1.07	0.45	1.57	23.05	48.63*	49.74	34.57*	25.33*	7.14	3.40	198.70*
Simulado	1989	0.27	0.12	0.14	1.15	4.39	15.58	5.46	30.66	9.53	7.96	10.6	3.8	89.66
Mariscala	1990	1.60	1.03	1.00	0.99	7.77	14.18	28.36	10.00	22.76	5.70	4.38	2.61	100.38
Simulado	1990	0.51	0.83	1.11	2.07	6.9	10.99	27.58	11.65	18.98	10.29	3.15	0.97	95.03

*Dato dudoso ♦ Uncertain datum.

CONCLUSIONES

En términos de las producciones de agua, sedimentos y biomasa el modelo SWAT fue calibrado y validado satisfactoriamente para la cuenca del Río Mixteco. El modelo se puede usar como una herramienta en la toma de decisiones sobre como priorizar la problemática de la cuenca, o incluso como herramienta que predice lo que pasaría en la cuenca ante la implementación de prácticas de conservación de suelos en la cuenca del Río Mixteco.

El modelo de crecimiento vegetativo fue calibrado satisfactoriamente, lo cual permite una buena estimación de producción de biomasa de las asociaciones vegetativas en la cuenca porque su coeficiente de determinación indica un ajuste aceptable con tendencia al ajuste óptimo entre los datos simulados y los esperados.

La dinámica y magnitud de producción de escurrimientos mensual fueron estimados por el modelo SWAT con precisión aceptable, como lo muestran los coeficientes de determinación para la calibración y validación anual, para la calibración mensual y para la validación mensual.

El modelo SWAT permite estimar en forma aceptable la producción de sedimentos en la cuenca del Río Mixteco, aunque en menor grado comparado con la producción de escurrimientos, porque su coeficiente de determinación está dentro de los límites recomendados. Aunque si hubiera más datos disponibles en la base de datos BANDAS la simulación mejoraría, pero en muchas estaciones de aforo del país no se miden sedimentos y en otros no se miden escurrimientos. Mientras no haya medición de calidad, los modelos no serán calibrados satisfactoriamente.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Díaz, E., J. A. Acosta-Gallegos, M. D. Amador-Ramírez, y J. S. Padilla-Ramírez. 2009. Efecto del riego suplementario en la producción de biomasa y grano de frijol de temporal en Zacatecas, México. *Agric. Téc. Méx.* 35: 157-167.
- Arnold J. G. S. L. Neitsch, and J. R. Williams. 2001. *Soil and Water Assessment Tool User's Manual*. Version 2000. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experimental Station. Temple, TX. 472 p.
- Arnold, J. G., D. N. Moriasi, P. W. Gassman, K. C. Abbaspour, J. J. White, R. Srinivasan, C. Santhi, R. D. Harmel, A. van Griensven, M. W. Van Liew, N. Kannan, and M. J. Jha. 2012. SWAT: Model use, calibration and validation. *Trans. ASABE*. 55: 1491-1508.

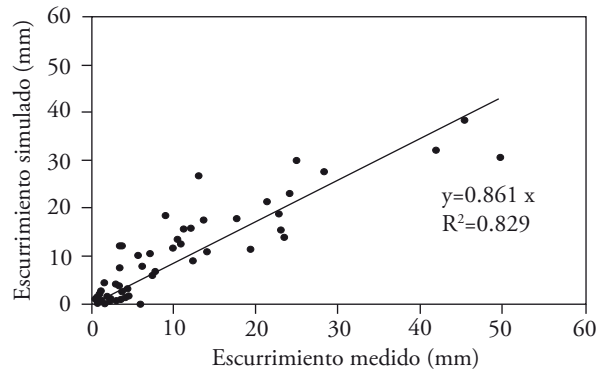


Figura 9. Relación entre el escurrimiento medido y simulado por el modelo SWAT a nivel mensual para el periodo de calibración y validación.

Figure 9. Relation between the runoff measured and the simulated for SWAT model on a monthly basis, for the calibration and validation period.

The measured and simulated runoff values for the validation period were compared (Table 7), but the aforementioned inconsistency in the data obtained in 1989 hampered a satisfactory model adjustment.

In the annual analysis, the slope of the line coefficient was 0.934, 0.975 for R^2 and 0.90 for the Nash-Sutcliffe index, indicating an acceptable adjustment of the simulated data with respect to the measured. In the monthly analysis values for R^2 were 0.829, 0.861 for the slope of the line (Figure 9), and 0.79 for the Nash-Sutcliffe index.

CONCLUSIONS

In terms of the production of water, sediment and biomass the SWAT model was successfully calibrated for Mixteco river basin. The model can now be used as a tool in making decisions on how to prioritize the problems of the basin, or even as a tool to predict what would happen in the Río Mixteco basin with the implementation of soil conservation practices

The vegetative growth model was successfully calibrated, allowing a good estimate of biomass production of vegetative associations in the basin because its coefficient of determination indicates an acceptable adjustment, with a tendency to be optimal between the simulated and expected data.

The dynamics and magnitude of monthly runoff production was estimated with the SWAT model with acceptable accuracy, as shown by the coefficients

Bedient P. B., W. C. Huber, and B. E. Vieux. 2012. *Hydrology and Floodplain Analysis*. 5th Ed. Ed. Pearson Upper Saddle River, NJ, U.S.A. 801 p.

CIRCE. 2006. Evaluación del potencial de biomasa residual en los ecosistemas forestales y los medios agrícolas. Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos en España. 36 p.

CONAGUA. 2012. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales, BANDAS. Sitio web: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS> (Consulta: noviembre 2012).

ESRI. 2008. Software ArcGIS 9.3. Redlands, CA. USA.

INEGI. 1993a. Carta de Vegetación y Uso de Suelo E1409, Serie II, formato shape. Obtenida directamente en un centro de distribución INEGI.

INEGI. 1993b. Carta Edafológica E1409, Serie II, formato shape. Obtenida directamente en un centro de distribución INEGI.

INEGI. 2011. Continental-Continuo de Elevaciones Mexicano, CEM, 1:50,000, Versión 2.0. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx>. (Consulta: noviembre 2011).

INEGI. 2012. Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación, escala 1:250, 000, Serie 4. 126 p.

Loague K. 2010. Rainfall-Runoff Modeling. *Bechmark Papers in Hydrology*. International Association of Hydrological Sciences. 512 p.

Masera, O., R. J. Aguillón, y B. Gamino. 2005. Estimación del Recurso y Prospectiva Tecnológica de la Biomasa como Energético Renovable en México. UNAM. 118 p.

Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50: 885-900.

Nash, J. E. and 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, and J.R. Williams. 2011. Soil and Water Assessment Tool. *Theoretical Documentation*. 618 p.

Rivera-Toral E., S. Pérez-Nieto, L. A. Ibáñez-Castillo, y F. R. Hernández-Saucedo. 2012. Aplicabilidad del Modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. *Agrociencia* 46: 101-105.

Ross, S. M. 2000. *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. 2nd Ed. Harcourt Academic Press. San Diego, CA, U.S.A. 578 p.

Servicio Meteorológico Nacional, SMN. 2010. Sistema de Información Climática Computadorizada, CLICOM. Base de

of determination for the annual calibration and validation, for monthly calibration and monthly validation.

The SWAT model allowed to acceptably estimate sediment yield in the basin of Rio Mixteco, though to a lesser degree compared to the production of runoff because its coefficient of determination is within the recommended limits. Though if there were more data available on the BANDAS database simulation would be better, but many gauging stations in the country do not measure sediments, neither runoff. If there is no quality measurement, the models will not be calibrated successfully.

—End of the English version—



datos proporcionada directamente en las oficinas del SMN, en Observatorio.

Shen Z. Y., Y. W. Gong, Y. H. Li, Q. Hong, L. Xu, and R. M. Liu. 2009. A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area. *Agric. Water Manage.* 96: 1435-1442.

Singh V. P., and D. K. Frevert. 2005. *Watershed Models*. CRC Press. 512 p.

Stone Environmental Inc, Texas A&M Spatial Sciences Laboratory and Blackland Research and Extension Center. 2011. Software ArcSWAT Version 93.7.b.

Todini E. 1988. Rainfall-runoff modeling- Past, present and future. *J. Hydrol.* 100: 341-352.

Torres-Benites. E., E. Mejía-Sáenz, J. Cortés-Becerra, E. Palacios-Vélez, y A. Exebio-García. 2005. Adaptación de un modelo hidrológico a la cuenca del Río Laja, Guanajuato, México. *Agrociencia* 39: 481-490.

USDA-ARS and Texas A&M AgriLife Research. 2013. <http://swat.tamu.edu>. (Consulta: septiembre 2010 y junio 2013).

Zhang, X., R. Srinivasan, K. Zhao, and N. Van liew. 2008. Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model. *Hydrol. Process*. Published online in Wiley InterSciences. 12 p.