

APLICABILIDAD DEL MODELO SWAT PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE MÉXICO

APPLICABILITY OF SWAT MODEL FOR ESTIMATING WATER EROSION IN MÉXICO'S WATERSHEDS

Francisco Rivera-Toral¹, Samuel Pérez-Nieto², L. Alicia Ibáñez-Castillo^{3*}, F. Raúl Hernández-Saucedo²

^{1 y 3}Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, ²Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo, Estado de México. (libacas@gmail.com).

RESUMEN

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) puede ser una herramienta de gran ayuda en la estimación de sedimentos y escurrimientos, sin embargo, su aplicación tiene algunas limitantes. En este estudio se revisó la aplicabilidad del modelo de simulación hidrológica SWAT en las cuencas de México, aplicándolo a la cuenca Ixtapan del Oro, Estado de México, para estimar la pérdida de suelo, comparando los resultados con los valores estimados mediante la técnica del álgebra de mapas. Se encontró que SWAT subestima el factor topográfico en las subcuencas, sobre todo cuando la pendiente es mayor de 25 %, ya que realiza una mala estimación de la longitud de la pendiente, asignándoles valores constantes de 0.05 m. Ese valor se puede corregir si se estima fuera del modelo y se introduce manualmente. Se calculó que 88.7 % (13 138.8 ha) de la cuenca se encuentra en las clases de erosión incipiente y ligera, lo cual muestra una buena conservación de su vegetación y sus suelos; además 75.4 % (11 150.7 ha) de su superficie está cubierta por bosque. Con estas consideraciones se concluye que el modelo SWAT se puede usar para estimar la pérdida de suelo en las cuencas de México.

Palabras clave: SWAT, erosión, factor topográfico, Ixtapan del Oro.

INTRODUCCIÓN

Cuando se evalúa la erosión en cuencas usando la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS), el mayor inconveniente es el cálculo del factor topográfico *LS*, lo cual se debe al concepto original basado en lotes experimentales uniformes en pendiente y longitud de flujo superficial.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: mayo, 2011. Aprobado: enero, 2012.

Publicado como NOTA en *Agrociencia* 46: 101-105. 2012.

ABSTRACT

The SWAT model (Soil and Water Assessment Tool) can be a very helpful tool for estimating sediments and runoffs; however, its application has some limitations. In this study, we revise the applicability of the SWAT hydrologic simulation model in México's watersheds, by applying it to the watershed in Ixtapan del Oro, Estado de México, to estimate soil loss, and comparing it to results from values estimated using the algebraic mapping technique. It was found that SWAT underestimates the topographic factor in sub-basins, particularly when the slope is greater than 25 %, since it performs a wrong estimate of the slope length, assigning constant values of 0.05 m. This value can be corrected if it is estimated outside the model and introduced manually. It was calculated that 88.7 % (13 138.8 ha) of the watershed is found in the incipient and mild erosion classes, which shows a good conservation of its vegetation and soils; in addition, 75.4 % (11 150.7 ha) of its surface is covered by forest. With these considerations, we conclude that the SWAT model can be used to estimate soil loss in México's watersheds.

Keywords: SWAT, erosion, topographic factor, Ixtapan del Oro.

INTRODUCTION

When watershed erosion is evaluated using the universal soil loss equation (USLE), the greatest inconvenience is calculating the *LS* topographic factor, due to the original concept based on experimental plots uniform in slope and length of superficial flow.

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is a program for hydrologic modeling developed by Dr. Jeff Arnold from University of Texas for the United States Department of Agriculture (ARS-USDA). This model allows simulating the water and sediment production in watersheds, as well as the effect that

El Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un programa de modelación hidrológica desarrollado por el Dr. Jeff Arnold de la Universidad de Texas para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Americanos (ARS-USDA). Este modelo permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que las prácticas agronómicas tienen en la calidad del agua por el uso de pesticidas y fertilizantes. El modelo SWAT se aplicó en cuencas costeras del estado de Chiapas, México, por la CONAGUA (2006) para estimar la erosión. Los valores fueron bajos, lo cual se atribuyó que no estaba creado para cuencas con características físicas como las de México; además, habría una subestimación del factor topográfico (LS), por ser cuencas con un alto grado de pendiente.

Uribe *et al.* (2002) consideran que la erosión es el principal problema edáfico en gran parte de los terrenos agrícolas de México debido a las características de su clima tropical, y el relieve accidentado. Al respecto, Vergara y Etchevers (2006) aconsejan que el manejo del suelo en condiciones de ladera requiere cuidados especiales por los riesgos de erosión y degradación; en esos terrenos el uso de la tierra varía desde bosques primarios a intensivo agrícola y son frecuentes los cambios de uso.

El factor topográfico LS

Neitsch *et al.* (2002) describen el factor topográfico LS como la relación esperada de la pérdida de suelo por unidad de área de un campo con pendiente, con respecto a un terreno de 22.1 m de longitud, con 9 % de inclinación, y se calcula con la expresión (1), donde L_h es la longitud de la pendiente (m), m es un término exponencial (adimensional) y α_h es el ángulo de la pendiente (grados). A su vez, el término exponencial m se calcula con la expresión (2), donde Sh es la pendiente de la Subcuenca o Unidad de Respuesta Hidrológica (URH) expresada como elevación sobre distancia (en $m\ m^{-1}$) obtenida de la expresión (3).

$$LS = \left(\frac{L_h}{22.1} \right)^m (65.41 \times \sin^2 \alpha_h + 4.56 \times \sin \alpha_h + 0.065) \quad (1)$$

$$m = 0.6 [1 - \exp(-35.835 \times Sh)] \quad (2)$$

$$S_h = \tan \alpha_h \quad (3)$$

agronomic practices have on water quality from the use of pesticides and fertilizers. The SWAT model was applied to coastal watersheds in the state of Chiapas, México, by CONAGUA (2006) to estimate erosion. The values were low, which was attributed to the fact that it was not created for watersheds with physical characteristics such as those in México; also, there could have been an underestimation of the topographic factor (LS), because they are watersheds with a high degree of inclination.

Uribe *et al.* (2002) consider that erosion is the principal soil problem in most of the agricultural land in México, due to its characteristics of tropical climate and rugged relief. In this regard, Vergara and Etchevers (2006) suggest that soil management in hillside conditions requires special care because of risks of erosion and degradation; in those soils, land use varies from primary forest to intensive agricultural and changes in use are frequent.

The LS topographic factor

Neitsch *et al.* (2002) describe the LS topographic factor as the relationship expected from soil loss per area unit in a field with inclination, compared with a plot 22.1 m long, with 9 % slope, and it is calculated with expression (1), where L_h is the slope length (m), m is an exponential (dimensionless) term, and α_h is the slope angle (degrees). In its turn, the exponential term m is calculated with expression (2), where Sh is the slope of the sub-basin or Hydrologic Response Unit (HRU) expressed as elevation over distance (in $m\ m^{-1}$) and obtained from expression (3).

$$LS = \left(\frac{L_h}{22.1} \right)^m (65.41 \times \sin^2 \alpha_h + 4.56 \times \sin \alpha_h + 0.065) \quad (1)$$

$$m = 0.6 [1 - \exp(-35.835 \times Sh)] \quad (2)$$

$$S_h = \tan \alpha_h \quad (3)$$

The slope length (L_h) is defined as the distance from the milestone or point of origin of the superficial runoff to the point where the slope gradient decreases provoking the deposit, or else where the runoff reaches a superficial current of a defined flow. Therefore, the adequate selection of L_h is difficult and is in function of the precision of identification of the natural flows and the points where deposits

La longitud de la pendiente (Lh) se define como la distancia del parteaguas o punto de origen del escurrimiento superficial al punto donde el gradiente de la pendiente disminuye provocando el depósito o bien donde el escurrimiento llega a una corriente superficial de un cauce definido. Por tanto, la selección adecuada de Lh es difícil y está en función de la precisión de la identificación de los cauces naturales y de los puntos donde ocurre el depósito. Al respecto, Barrios (2000) concluye que hay un elevado riesgo de sobrestimar el factor LS a escala de cuencas cuando se considera la distribución espacial de la longitud de pendiente y en su lugar se recurre a procedimientos más simples, como asumir longitud de pendiente constante e igual a 100 o usar una relación general en LS y pendiente. Según Röder (2006), la EUPS no fue desarrollada para aplicarse en escenarios extremos de topografía; no obstante, permite identificar y evaluar de manera aproximada el estado de peligro o riesgo de áreas susceptibles a la erosión.

El objetivo del presente estudio fue encontrar la causa por la cual SWAT subestima la erosión y revisar su aplicabilidad a las cuencas de México, con principal interés en el factor LS , especificando sus limitaciones y proponer una alternativa de solución.

MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca se localiza al oeste del Estado de México, entre 19° 14' 26.8" y 19° 24' 15.8" N, y entre 100° 10' 51.4" y 100° 19' 20.9" O, con una superficie de 148.064 km². El clima predominante en la región de acuerdo con García (1987) es el templado húmedo con lluvias en verano (Cw). La precipitación media anual en la cuenca, estimada mediante polígonos de Thiessen, es 906.5 mm y la temperatura media anual es 16.9 °C.

La siguiente información fue registrada: Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se obtuvo del sitio electrónico de INEGI para delimitar la cuenca; carta topográfica E14A36 del INEGI (1994) se usó para identificar las carreteras y poblados principales; unidades de suelo y propiedades físico-químicas, lo cual se obtuvo de muestreos en campo; los usos del suelo se obtuvieron mediante imágenes de satélite SPOT 5; los datos climáticos que el modelo requirió fueron precipitaciones diarias, temperaturas máximas y mínimas, obtenidas del IMTA (2006). Con la información descrita se alimentó el modelo y se realizó la primera corrida. Y con la información recabada se elaboró un SIG para estimar la tasa de erosión de la cuenca con la técnica del álgebra de mapas usando la extensión Sistema de Evaluación y Diagnóstico Ecológico para el Ordenamiento del Territorio (SEDEOT)

occur. In this regard, Barrios (2000) concludes that there is a high risk of overestimating the LS factor at the watershed scale when the spatial distribution of the slope length is not considered and simpler procedures are used in its place, such as assuming that the slope length is constant and equal to 100 or using a general relation for LS and slope. According to Röder (2006), the USLE was not developed to be applied in extreme topographic scenarios; however, it allows to approximately identify and evaluate the state of danger or risk in areas susceptible to erosion.

The objective of this study was to find the reason why SWAT performs an underestimation of erosion and revise its applicability to watersheds in México, with particular interest in the LS factor, specifying its limitations and proposing an alternative for solution.

MATERIALS AND METHODS

The watershed is located west of Estado de México, between 19° 14' 26.8" and 19° 24' 15.8" N, and between 100° 10' 51.4" and 100° 19' 20.9" W, with a surface of 148.064 km². The predominant climate in the region, based on García (1987), is temperate humid with summer rains (Cw). Average annual precipitation in the watershed, estimated through Thiessen polygons, is 906.5 mm and the average annual temperature is 16.9 °C.

The following information was gathered: Digital Elevation Model (DEM) obtained from the INEGI website to delimit the watershed; topographic chart E14A36 from INEGI (1994) was used to identify the principal roads and towns; soil units and physical-chemical properties, which were obtained from sampling in the field; land uses were obtained through SPOT 5 satellite images; climate data that the model required were daily precipitations, maximum and minimum temperatures, and they were obtained from IMTA (2006). With the information described, the model was fed and the first run was performed. And with the information gathered a SIG was elaborated to estimate the erosion rate in the watershed with the algebraic mapping technique, using the Sistema de Evaluación y Diagnóstico Ecológico para el Ordenamiento del Territorio (SEDEOT) extension for ArcView 3.x, to evaluate the USLE, and they were compared with the soil loss values estimated with the SWAT model.

In estimating the erosion with SWAT, this model calculated the rain erosivity index through the EI_{30} (Wischmeier, 1959), defining it as the product from rain's total kinetic energy (E) by the maximum intensity in 30 min (I_{30}). With algebraic mapping, because of the lack of data for rain intensity, erosivity was estimated through expression (4) proposed by Cortés (1991)⁴,

para ArcView 3.x, para evaluar la EUPS, y se compararon con los valores de pérdida de suelo estimados con el modelo SWAT.

Al estimar la erosión con SWAT, este modelo calculó el índice de erosividad de la lluvia por medio del EI_{30} (Wischmeier 1959), y lo definió como el producto de la energía cinética total de la lluvia (E) por la intensidad máxima en 30 min (I_{30}). En el álgebra de mapas por falta de datos de intensidad de lluvia, la erosividad se estimó mediante la expresión (4) propuesta por (Cortés, 1991)⁴, donde R es el índice de erosividad de la lluvia ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1}$) y P es la precipitación media anual (mm):

$$R=3.4880P-0.000188P^2 \quad (4)$$

En la segunda corrida del modelo se tomaron los valores de LS estimados del álgebra de mapas y tomando los datos de pendiente estimados con SWAT, se despejó la longitud de pendiente de la ecuación (1) y se introdujeron al SWAT. De esta forma se obtuvieron nuevos valores de erosión y se compararon con la EUPS del álgebra de mapas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del cálculo de la erosión con la técnica del álgebra de mapas tomando valores por pixel se encontró que 87.7 % de la cuenca se encuentra en clase de erosión incipiente y ligera. De la simulación del SWAT se obtuvieron 35 subcuencas. En la primera corrida del modelo se realizó la prueba estadística de comparación de medias del factor LS del SWAT y del álgebra de mapas, y se encontró que las medias de los LS eran diferentes ($p \leq 0.1$).

Se encontró que SWAT presenta dificultades para estimar la longitud de la pendiente (L_p) sobre todo cuando las pendientes son mayores del 25 %, ya que les asigna por defecto un valor de 0.05 m, lo que causa una subestimación de LS . La corrección de L_p consistió en modificar los dichos valores en la tabla de atributos del archivo "subbasins.shp", en el campo " Sll ", y se corrió nuevamente el modelo. Con los valores obtenidos de EUPS del SWAT y los del álgebra de mapas se aplicó la prueba estadística de comparación de medias y se concluyó que las medias son similares ($p > 0.1$).

En 22 de las subcuencas (114.3 km²) la pendiente fue mayor a 25 %, lo que indica que en 77.2 % de la cuenca se subestimaba gravemente la erosión. Con la corrección del LS se obtuvieron 10 subcuencas

where R is the rain erosivity index ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1}$) and P is the average annual precipitation (mm).

$$R=3.4880P-0.000188P^2 \quad (4)$$

In the second model run LS values were taken, which were estimated from algebraic mapping, and taking the slope data estimated with SWAT, the equation's slope length (1) was defined and introduced into SWAT. In this way, new erosion values were obtained and compared with the USLE from algebraic mapping.

RESULTS AND DISCUSSION

From the erosion calculation with algebraic mapping technique, taking values per pixel, it was found that 87.7 % of the watershed is found in the incipient and mild erosion class. From the SWAT simulation 35 sub-basins were obtained. In the first run of the model, the statistical test comparing LS factor averages from the SWAT and from algebraic mapping was carried out, and LS averages were found to be different ($p \leq 0.1$).

It was found that SWAT presents difficulties for estimating the slope length (L_p), particularly when slopes are over 25 %, since they are assigned by default a value of 0.05 m, causing an underestimation of LS . The correction for L_p consisted in modifying these values in the attribute table of file "subbasins.shp" in the " Sll " field, and the model was run again. The statistical test of means comparison was applied with values obtained from the SWAT USLE and from algebraic mapping, with the conclusion that averages are similar ($p > 0.1$).

In 22 of the sub-basins (114.3 km²) the slope was greater than 25 %, indicating that in 77.2 % of the watershed, erosion was seriously underestimated. With the LS correction, 10 sub-basins were obtained (3878.0 ha) that represented 26.2 % with moderate and severe erosion problems, while with algebraic mapping and assigning an average erosion value, 27.7 % have moderate and severe erosion problems, which is very similar.

CONCLUSIONS

SWAT estimates incorrectly the slope length (L_p), especially when the slope is greater than 25 %.

⁴ Cortés T., H. G. 1991. Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 168 p.

(3878.0 ha) que representan 26.2 % con problemas de erosión moderada y severa, en tanto que con el álgebra de mapas y asignando un valor promedio de erosión, un 27.7 % tiene problemas de erosión moderada y severa, lo cual es muy similar.

CONCLUSIONES

SWAT estima incorrectamente la longitud de la pendiente (L_p), sobre todo cuando la pendiente es mayor de 25 %. Sin embargo, es posible corregir los valores de longitud de pendiente mal estimada realizando su cálculo externamente mediante otras herramientas computacionales e incorporándolo de forma manual a la tabla de atributos del archivo “subbasins.shp”. Respecto a la cuenca, se puede concluir que sus suelos están en buen estado de conservación teniendo en cuenta que 88.7 % tiene erosión incipiente y ligera; esto si se considera el cálculo de la erosión por el álgebra de mapas, ya que es más detallado debido a sus valores por píxeles y no ponderados por subcuencas.

LITERATURA CITADA

- Barrios R., A. G. 2000. Distribución especial del factor LS (RUSLE) usando procedimientos SIG compatibles con Idrisi aplicación en una microcuenca Andina. *Rev. For. Venezolana* 44 (1): 57-64.
- CONAGUA. 2006. Evaluación de los efectos del cambio de cobertura y de uso del suelo en la erosión hídrica y las relaciones precipitación-escurrimiento en las cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, del estado de Chiapas. 1ra. Edición. Universidad Autónoma Chapingo para la Comisión Nacional de Agua. Chapingo, México. 225 p.
- García E., 1987. Modificaciones al Sistema de Clasificación de Köppen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. 4ª. Edición. México D. F. 217 p.
- INEGI. 1994. Carta topográfica, E14A36 Villa de Allende, escala 1:50 000. Aguascalientes. Aguascalientes, México.
- However, it is possible to correct the slope length values that are incorrect by carrying out an external calculations through other computer tools and manually incorporating them into the attribute table of the “sub-basins.shp” file. With regards to the watershed, it can be concluded that its soils are in a good state of conservation, taking into account that 88.7 % have incipient and mild erosion; this, when erosion calculation is considered through the algebraic mapping technique, since it is more detailed due to its values in pixels and not pondered as sub-basins.
- End of the English version—
- *—
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2006. Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III). Jiutepec, Mor. México.
- Neitsch S., L., J. Arnold G., J. Kiniry R., and J. Williams R. 2002. Soil and Water Assessment Tools; Theoretical Documentation; version 2000. Grassland, Soil and Water Research Laboratory of Agricultural Research Service and Blackland Research Center of Texas Agricultural Experiment Station. Texas, USA. 506 p.
- Röder J., G. Villavicencio R., y V. Zarazúa P. 2006. Aplicación de la ecuación de pérdida de suelo “USLE” en SIG para estimar riesgo potencial de erosión en el área protegida “Sierra de Guila”. XVII Semana de la investigación científica. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Zapopan, Jalisco. Artículo 7 p.
- Uribe G., S., F. Nicolás N., y F. Turrent A. 2002. Pérdida de suelo y nutrimentos en un entisol con prácticas de conservación en los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia* 36: 161-168.
- Vergara S., M. A. y J. D. Etchevers B. 2006. Relación entre el uso de la tierra y su fertilidad en las laderas de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia* 40: 557-567.
- Wischmeier W., H. 1959. A rainfall erosion index for universal soil equation. *Soil Sc. Soc. Am. Proc.* 23: 246-249.