



II CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2016

Chapingo, Edo. de México, del 08 al 10 de septiembre

APLICACIÓN DE LA MUSLE PARA PREDECIR LAS PÉRDIDAS DE SUELO EN UNA CUENCA DE PASTIZAL AL SUR DE ZACATECAS, MÉXICO

Miguel Agustín Velásquez Valle¹; Ignacio Sánchez Cohen²; Gerardo Esquivel Arriaga²; Palmira Bueno Hurtado²; Oscar Ulises Martínez Burciaga¹

¹Campo Experimental Saltillo. INIFAP. Km. 342+119 Carretera Saltillo - Zacatecas. Hacienda de Buena vista. CP. 25315. Saltillo, Coah. México. velasquez.agustin@inifap.gob.mx. (*Autor para correspondencia).

²Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-RASPA). INIFAP. Km. 6.5 Margen derecha Canal Sacramento. 35140. Gómez Palacio, Dgo. México.

Resumen

En cuencas hidrológicas, es conveniente disponer de un método para cuantificar el proceso de erosión (laminar y en áreas de flujo concentrado). La ecuación universal de pérdida de suelo modificada (MUSLE) utiliza el volumen escurrido y el gasto máximo como fuente de energía para causar las pérdidas de suelo a una escala de cuenca. Para comparar la producción de sedimento simulada por la MUSLE se utilizó la información de precipitación, escorrentía y de producción de sedimentos registrada en la cuenca de pastizal La Cruz de 46.8 ha y ubicada al sur de Zacatecas. Los valores observados fueron obtenidos por cubicación aguas debajo de la estación de aforo de la cuenca por evento de precipitación en 24 hr. Para un total de 14 eventos de escurrimiento, la producción de sedimentos observada varió de 2.5 a 19.5 toneladas. Para mejorar el coeficiente de determinación entre los valores observados y los simulados por el modelo se ajustaron los parámetros del modelo original. Con la ecuación ajustada la producción de sedimentos simulada tuvo un rango entre 1.0 y 20.1 toneladas. El coeficiente de determinación (R^2) entre los valores observados y los simulados por la MUSLE fue de 0.83 y el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe fue 0.76. La MUSLE simula de manera aceptable la producción de sedimentos para las condiciones de estudio. Con el ajuste a la ecuación de la MUSLE a esta Cuenca en particular es factible evaluar la respuesta hidrológica de diferentes prácticas de manejo del pastizal.

Palabras clave adicionales: Sedimentos, simulación, validación.



Introducción

El actual deterioro de los recursos naturales es una de las causas de la baja progresiva de la productividad de los agro-ecosistemas. Esta situación ha generado un interés por conocer las relaciones causa-efecto con el propósito de mejorar el uso de los recursos hídricos, el manejo de las cuencas e incrementar la productividad del suelo. Un proceso fuertemente relacionado a la baja en la productividad de los terrenos es la erosión hídrica de los mismos. La erosión provoca una reducción en la capacidad de almacenamiento de humedad y en la fuente de nutrimentos del suelo a las plantas, azolvamiento de canales, lagos o presas, contaminación de suelo y agua por transportes de fertilizantes y pesticidas, etc.

Ante la actual incertidumbre climática, es indispensable disponer, calibrar y validar modelos que nos permitan conocer el comportamiento de variables o respuesta de sistemas a estímulos dinámicos en el tiempo.

Modelación del proceso

Uno de los primeros intentos por modelar el proceso de erosión hídrica del suelo es la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés) la cual fue generada a partir de parcelas de escurrimiento (Wischmeier and Smith 1958; Wischmeier and Smith 1978). Este modelo matemático es empírico, no considera procesos físicamente basados para simular la separación, transporte y sedimentación en forma mecánica. Originalmente este modelo utiliza seis factores “Universales” que rigen las pérdidas de suelo promedio (anual): erosividad de la lluvia (R), susceptibilidad de erosión del suelo (K), largo de la pendiente (L), magnitud de la pendiente (S), cubierta y manejo de cultivos y residuos (C), y prácticas de conservación (P). Esta ecuación fue generada a partir de una gran cantidad de experimentos de campo utilizando parcelas de escurrimiento y bajo condiciones de lluvia natural. Por su conceptualización del proceso en terrenos agrícolas y por considerar sólo la etapa del proceso conocida como laminar, este modelo en su versión original ha tenido limitaciones para ser aplicado en terrenos de pastizal o con uso forestal. Sin embargo, la evolución en la modelación por cambios en la conceptualización del proceso y los avances tecnológicos ha evolucionado con el tiempo. Una de las primeras modificaciones a este modelo fue propuesta por Williams (1975) y Williams, and Berndt, (1977) con el objetivo de estimar la producción de sedimentos en pequeñas cuencas. La producción de sedimentos se define como el total de sedimentos que salen de una cuenca medidos en un punto de referencia y en un periodo de tiempo específico (Singh, 1989). Este modelo considera el volumen escurrido y el gasto máximo como los agentes que proporcionan la energía para llevar a cabo el desprendimiento y transporte de partículas de suelo; en lugar de la energía proporcionada por las gotas de lluvia. La ecuación denominada Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada (MUSLE, por sus siglas en inglés) está representada por la siguiente ecuación:



$$Y = 11.8(Q * q_p)^{0.56} K * LS * C * P \quad (1)$$

donde: Y es la producción de sedimentos por evento de precipitación (ton), Q es el volumen escurrido (m^3), q_p es el gasto máximo ($m^3 \text{ seg}^{-1}$), K es el factor de erosionabilidad del suelo ($\text{ton.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$), LS es el factor de longitud y grado de la pendiente (adimensional), C es el factor de manejo de la cobertura (adimensional) y P es el Factor de prácticas mecánicas de control de erosión (adimensional). Se ha documentado que la producción de sedimentos está relacionada con el contenido de humedad antecedente de la Cuenca; así como de la energía erosiva de la lluvia (Williams, 1975a and 1975b; Williams and Berndt, 1977; Neitsch et al., 2005; Kinnell, 2005). Este modelo determinístico es utilizado como una subrutina en otros Modelos como el SWAT. El objetivo del presente estudio fue ajustar la MUSLE para las condiciones de la Cuenca de pastizal utilizando como criterio índice de eficiencia del modelo de Nash y Sutcliffe.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

La cuenca experimental “La Cruz” se encuentra ubicada en el Municipio de Tabasco en el Estado de Zacatecas y se localiza entre los $102^\circ 59'$ y los $103^\circ 09'$ Longitud Oeste y entre los $21^\circ 51'$ y los $21^\circ 52'$ Latitud Norte y con una altitud de 1700 msnm. El clima se clasifica como semiseco-semicálido (BS1hw (w)). La precipitación promedio anual es de 624 milímetros; de los cuales el 90% se precipita en el periodo entre los meses de junio a noviembre. La vegetación de la cuenca es matorral sub-ierme con pastizal natural (Figura 1). En el estrato arbóreo se presentan especies como ozote (*Ipomea intrapilosa* Rose) y mezquite (*Prosopis* sp.); el estrato arbustivo está representado por especies de los géneros *Tysenhartia* sp. (varaduz) y *Mimosa* sp. (huizcolote) y en el estrato basal se encuentran especies de pastos como navajita (*Bouteloua hirsuta*) y banderita (*B. curtipendula*). Las unidades de suelos presentes en la cuenca son Regosol calcárico y Castañozem háplico (CETENAL, 1974). Los suelos están caracterizados por ser someros, de textura media y con una fase pedregosa (Velásquez y Serna, 1994). La cuenca “La Cruz” cuenta con una estación climatológica ubicada en la parte alta de la misma; así como, una estación de aforo con un vertedor para flujo supercrítico tipo *Santa Rita* y un limnógrafo FUESS de vuelta semanal para estimar el volumen escurrido (Figura 2). La base de datos para evaluar el Modelo MUSLE corresponde a la lámina precipitada y escurrida durante 1990.



Figura 1. Área representativa del tipo de vegetación de selva baja caducifolia dentro de la Cuenca experimental La Cruz, Tabasco, Zac.



Figura 2. Estación de aforo con vertedor para flujo supercrítico tipo *Santa Rita* y limnógrafo FUESS en la cuenca La Cruz, Tabasco, Zac.

Parametrización de la MUSLE

La información requerida para parametrizar la ecuación universal de pérdidas de suelo modificada fue obtenida de datos de campo y documentada. Los valores del factor que acelera el proceso de desprendimiento y transporte de partículas de suelo (volúmenes y gasto máximo) fueron cuantificados directamente en la estación de aforo de los escurrimientos en la cuenca. Para el caso del Factor erosionabilidad del suelo (K), el valor de éste parámetro se obtuvo de información tabular (ARS, 1975) considerando para la cuenca la clase textural (Migajón arenoso) y el contenido de materia orgánica del suelo (2%). El valor tabular del factor K fue ajustado para transformarlo a unidades métricas (Foster *et al.*, 1981). El valor del Factor longitud y grado de la pendiente (LS) se obtuvo directamente de un plano topográfico (esc. 1:2500) de la cuenca en estudio, el valor estimado fue de 4.77. El Factor manejo de la cobertura del suelo para el pastizal de la cuenca fue de 0.09 considerando el tipo y altura de la cobertura aérea (Malezas altas o arbustos con altura promedio de caída de gotas de 0.5 m), un porcentaje de cobertura de 25%, y un 40% de cobertura basal de pastos (Figueroa *et al.*, 1991). Debido a que no existen practicas mecánicas para el control de la erosión dentro de la cuenca, el Factor P fue igual a la unidad.

Para disminuir el grado de incertidumbre en la capacidad predictiva de los modelos es importante realizar la calibración de los mismos. Posteriormente, para medir cuantitativamente el grado de asociación entre los valores observados y los simulados con la MUSLE se considera el coeficiente de determinación (R^2); el cual presenta un rango de 0 a 1 correspondiendo un ajuste perfecto entre los valores observados y los simulados sí el valor de R^2 es igual a 1. Para medir la capacidad de predicción del modelo se utilizó el Índice de Eficiencia propuesto por Nash y Sutcliffe (1970); el cual es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa entre la varianza residual con respecto a aquella de los valores medidos.

$$EI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{iObs} - Q_{iSim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{iObs} - \bar{Q}_0)^2} \quad (2)$$

donde: Q_{iObs} es el i-ésimo valor observado, Q_{iSim} es el i-ésimo valor simulado, \bar{Q}_0 es la media de los valores observados y n es el número total de observaciones (Moriasi *et al.*, 2007).

Resultados y discusión

La relación entre la precipitación pluvial (mm), la lámina escurrida (mm) y el gasto máximo ($m^3 s^{-1}$) con la producción de sedimentos ($r = 0.89, 0.93$ y 0.86 , respectivamente) fue estadísticamente significativa ($P < 0.01$). La relación obtenida es similar a la reportada por Velásquez (1991); en la cual se observó una subestimación de los valores de la producción de sedimentos con el Modelo



utilizado ($R^2 = 0.80$). Estos resultados indican que en la cuenca La Cruz la producción de sedimentos está fuertemente ligada a los agentes que proporcionan la energía para llevar a cabo el desprendimiento y transporte de partículas de suelo como son la precipitación pluvial y el escurrimiento superficial. Por el grado avanzado de deterioro del suelo de la cuenca a causa de la erosión hídrica, es importante hacer notar que para esta cuenca en particular es importante utilizar modelos como la MUSLE para simular la salida de sedimentos a una escala de pequeña cuenca hidrológica. Los resultados de la simulación de la producción de sedimentos por evento con la ecuación 1 en la cuenca de pastizal La Cruz se presentan en el Cuadro 1. Como puede observarse, la simulación de la producción de sedimentos con este modelo es sobreestimada hasta en tres veces el promedio observado o medido en la cuenca. Con la simulación del gasto máximo utilizando la ecuación 1 se obtuvo una correlación positiva ($r = 0.93$) y estadísticamente significativa ($P < 0.01$). sin embargo, el valor del Índice de Eficiencia del modelo resulto negativo; lo que indica que la media tiene una capacidad predictiva más alta que el modelo; es decir, las predicciones de la producción de sedimentos con la ecuación 1 son muy malas.

Considerando lo anterior, y a pesar de que la correlación entre la producción de sedimentos observada y la simulada por la MUSLE fue estadísticamente significativa ($P < 0.01$) se procedió a ajustar los parámetros de la ecuación 1 para mejorar el Índice de eficiencia del modelo (EI).

El resultado de este procedimiento fue utilizar el valor de 9.2 en lugar de 11.8 y 0.46 en lugar del exponente 0.56 en la ecuación 1. Con este ajuste el coeficiente de correlación bivariada entre los valores observados y los simulados fue 0.92 el cual fue estadísticamente significativo ($P < 0.01$) y el Índice de eficiencia del modelo mejoró sustancialmente fue de 0.76. Estos resultados se presentan de manera gráfica en la Figura 3. En esta figura se muestra que la línea de tendencia de los valores simulados es casi similar a la línea $Y=X$; observándose que la mayor dispersión de los valores de la producción de sedimentos se presenta en eventos con baja cantidad de sedimentos (< 10 ton). Esta discrepancia puede ser atribuida a errores de medición de la producción de sedimentos en la cuenca (valores observados). Es importante considerar que la capacidad predictiva de un modelo está en función entre otras cosas de la manera de cálculo o determinación de las entradas del modelo y las escalas de tiempo y espacio utilizadas (Sadeghi, *et al.*, 2014). En este sentido, los posibles *errores de medición* en la producción de sedimentos de la cuenca son atribuibles a la manera de determinación o cálculo de esta variable; es decir, es indispensable disponer de un método de cuantificación más confiable de la producción de sedimentos (en suspensión, saltación y rodamiento) en el sitio de aforo en el cauce de la cuenca.



Cuadro 1. Variables hidrológicas y de producción de sedimentos por evento en la cuenca La Cruz, Zacatecas. 1990.

FECHA	PRECIPITACION PLUVIAL	ESCURRIMIENTO		PRODUCCION DE SEDIMENTOS	
		LAMINA	GASTO MAXIMO	OBS	SIM *
	(mm)	(mm)	(m ³ s ⁻¹)	(ton)	(ton)
JUL - 22	10.2	2.21	0.769	7.9	6.6
JUL - 24	45.2	21.75	2.363	11.3	44.6
JUL - 31	20.9	6.87	1.288	3.9	16.7
AGO - 09	22.3	5.31	0.355	3.9	7.0
AGO - 12	57.5	34	1.824	15.6	49.6
AGO - 13	20.5	2.63	0.081	3.9	2.1
AGO - 14	18	4.79	0.907	5.2	11.2
AGO - 16	65.3	38.68	3.596	19.5	77.9
AGO - 17	29.2	7.66	0.775	5.2	13.3
AGO - 23	16.7	4.46	0.472	3.9	7.5
AGO - 26a	37.3	14.69	2.46	10.4	36.6
AGO - 26b	7	4.55	0.391	3.9	6.8
SEP - 17	18.6	8.4	0.807	2.5	14.3
SEP - 18	13.2	3.13	0.176	6.5	3.5
Promedio				7.40	21.26

* MUSLE (Ecuación 1).

Con respecto a la dinámica en el tiempo de la producción de sedimentos es indispensable tomar en cuenta que al inicio de la época de lluvia se presentan escurrimientos en los cuales los sedimentos en el flujo son más finos que en aquellos eventos que ocurren en la segunda mitad de la época lluviosa donde el material transportado por los escurrimientos generalmente son materiales gruesos (desde arenas gruesas, gravas y material rocoso); lo anterior, obviamente dependiendo de la magnitud del evento de precipitación pluvial.

Ante un escenario climático adverso (reducción del régimen pluviométrico) medido en términos de una reducción de la cobertura del suelo, con lo que se incrementa el valor del Factor C, es decir, pasar de un valor de 0.09 (30% de cobertura basal de pastos y 50% de cobertura foliar de malezas altas o arbustos) a un valor de 0.36 (0% de cobertura basal de pastos y 25% de cobertura foliar de malezas altas o arbustos) el promedio de la producción de sedimentos en la cuenca para ambas condiciones sería de 6.46 y 25.8 toneladas, respectivamente. Es conveniente señalar que el incremento de la variable dependiente es sin considerar un aumento de la erosividad de la lluvia por efecto del cambio en la tendencia de los parámetros climatológicos.

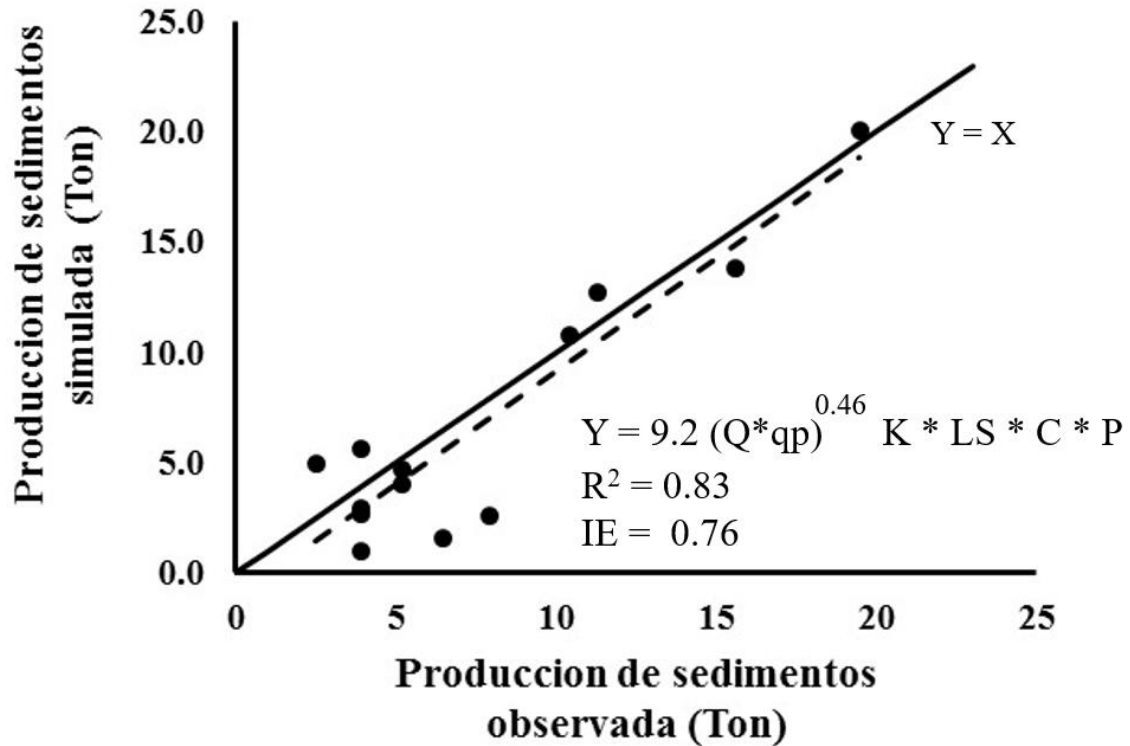


Figura 3. Relación entre la producción de sedimentos observada y la simulada por la MUSLE.

Conclusiones

Dada la importancia regional de los procesos de deterioro de los recursos naturales es indispensable disponer de herramientas para predecir el comportamiento de variables para la toma de decisiones. En el caso de la cuenca de pastizal en el sur del Estado de Zacatecas se logró ajustar los parámetros de la Ecuación Universal de Perdida de Suelo Modificada para 14 eventos de producción de sedimentos. La ecuación ajustada simula de manera adecuada la producción de sedimentos de la cuenca en estudio. El coeficiente de determinación entre los valores observados y los simulados por la MUSLE fue de 0.83 con un Índice de Eficiencia del modelo de 0.76. Para incrementar el grado de asociación entre este tipo de valores se recomienda mejorar la manera de calcular o determinar los valores observados de esta variable en la cuenca de estudio.

Referencias bibliográficas

Figuroa, S. B., A. Amante O., G. H. Cortés T., J. Pimentel, L., E. S. Osuna C., J. M. Rodríguez O. y F. J. Morales F. 1991. Manual de Predicción de Pérdidas de Suelos por Erosión. Colegio de Postgraduados. SARH. México. 150 p.



- Foster, G. R., D. K. McCool, K. G. Renard and W. C. Moldenhauer. 1981. Conversion the universal soil loss equation to SI metric units. *J. Soil & Water Cons.* 36 (6): 355 – 359.
- Kinnell P. 2005. Why the universal soil loss equation and the revised version of it do not predict event erosion well. *Hydrological Process* 19: 851–854.
DOI: 274.10.1002/hyp.5816.
- Moriasi, D.N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. y Veith, T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Vol. 50(3):885-900.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models, part I: A discussion of principles. *J. of Hydrol.* 10: 282 – 290.
- Neitsch S. L., Arnold ,J. G. , Kiniry J. R. , Williams, J. R. and King, K. W. 2005. SWAT theoretical documentation, Grassland, Soil and Water Research Laboratory. 494 pages.
- Sadeghi, S.H.R., L. Gholami, A. Khaledi Darvishan & P. Saeidi. 2014. A review of the application of the MUSLE model worldwide. *Hydrological Sciences Journal*, 59 (2): 365–375.
- Singh, V. P. 1989. Sediment yield. Chapter eleven. In: *Hydrologic systems. Volume II. Watershed modeling*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. Jersey. USA. 201 – 236.
- Velásquez, V., M. A. 1991. El Plateado, un modelo hidrológico de simulación para cuencas de pastizales. Tesis Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. 72 p.
- Velásquez, V., M. A. y A. Serna P. 1994. Caracterización hidrológica de una cuenca de pastizal con pastoreo continuo. *TERRA*. 12: 273 – 281.
- Williams, J. R. 1975. Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. In: *Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources. Proceedings of the Sediment-Yield Workshop*. Oxford: USDA. ARS-S-40. p.244 - 252.
- Williams, J.R., and H. D. Berndt. 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Trans. of the ASAE*. pp 1100-1104.
- Williams, J.R. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resources Bulletin*. 11 (5): 965 - 974.



Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. Transactions, American Geophysical Union. 36: 285 – 291.

Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning. USDA Handbook 537. U S Government Printing Office, Washington, D. C.