

Implementation of a model to estimate water erosion with distributed parameters applied to watersheds

Implementación de un modelo para estimar la erosión hídrica con parámetros distribuidos aplicados a cuencas

Palmira Bueno-Hurtado*¹; Miguel A. Velásquez-Valle¹; Armando López-Santos²; Ignacio Sánchez-Cohen¹; José Luis González-Barrios¹

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. km 6.5 Margen Derecha Canal Sacramento, Gómez Palacio, Durango, C. P. 35140, México.

bueno.palmira@inifap.gob.mx (*Corresponding author)

²Universidad Autónoma Chapingo. Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Bermejillo, Durango, México.

Abstract

Soil loss due to erosion by water is a problem that causes significant economic losses; for this reason, the aim of this study was to quantify soil loss in the Agustín Melgar watershed in Hydrologic Region number 36 by applying the Revised Universal Soil Loss Equation. A geographic information system was used to obtain distributed parameters of the studied equation. The results show that there are different soil loss levels in the watershed under study, ranging from “very low” (losses lower than 5 t·ha⁻¹) to “extreme” (losses greater than 200 t·ha⁻¹).

Keywords: RUSLE, soil loss, Durango

Resumen

La erosión hídrica del suelo es un problema que causa pérdidas económicas significativas, es por eso, que en el presente estudio se planteó como objetivo cuantificar la pérdida de suelo mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada en la subcuenca Agustín Melgar de la Región Hidrológica 36. Se recurrió al uso de un Sistema de Información Geográfica con el fin de obtener parámetros distribuidos de la ecuación estudiada. Los resultados muestran que existen distintos niveles de pérdida de suelo en la cuenca en estudio, que van desde “muy reducida” (pérdidas menores a 5 t·ha⁻¹) a “extrema” (pérdidas mayores de 200 t·ha⁻¹).

Palabras clave: RUSLE, pérdida de suelo, Durango

Introduction

Soil loss due to water erosion affects the productivity of all ecosystems, such as agricultural areas, forests and grasslands (Pimentel, 2006). In Mexico, 52.86 % (1,027,611.50 km²) of the land area is affected by water erosion. Also, there have been losses of 3 to 4 tons per hectare in the third year of cultivation with slight water erosion in maize (Contreras-Hinojosa et al., 2005), which results in losses from \$16.2 to \$32.4 per hectare, while the cost of replacing lost nutrients amounts to \$22.1 per hectare (Cotler, López, & Martínez-Trinidad, 2011).

Quantifying water erosion *in situ* involves taking a sample of suspended sediment by dipping a container into the stream at a point where it is well mixed, such as downstream from a weir or rock bar. The sediment contained in a measured volume of water is filtered, dried and weighed. This gives a measure of the concentration of sediment and when combined with the rate of flow gives the rate of sediment discharge. Besides measuring suspended sediments, the bottom trawling should be recorded, which become difficult (Hudson, 1997).

Estimating soil loss from measurements of sediment movement in streams and rivers faces a number of problems. Taking the measurements is time consuming and expensive, their accuracy is likely poor, and even if there are good data on the movement in a stream it is not known where the soil came from and when (Hudson, 1997).

Because of these problems, it is useful to model the water erosion process, which is an alternative way of obtaining reliable data without having to measure in detail the actual process.

The Universal Soil Loss Equation (USLE) is an erosion model that was developed to estimate long-term soil loss in certain land areas, under specific crop conditions and management practices (Brea & Balocchi, 2010). The USLE was first described in 1965, and it was designed to provide a convenient working tool for conservationists. The objectives of the equation were that each factor could be represented by a single number and could be predicted from meteorological or soil research data for each site. However, the use of USLE should be limited to situations in which its factors can be accurately measured and to conditions for which it can be reliably applied (Renard, Foster, Weeseis, McCool & Yoder, 1997).

After the introduction of USLE, the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) was created, considering the effect of stoniness in the soil erodibility factor (K). Five factors are involved in the RUSLE: the "R" factor indicates the two most important characteristics of rainfall erosivity, the amount of rainfall and peak intensity sustained

Introducción

La pérdida de suelo debida a erosión hídrica afecta la productividad de todos los ecosistemas, tales como agricultura, bosques y pastizales (Pimentel, 2006). En México, el 52.86 % (1,027,611.50 km²) de superficie territorial se encuentra afectada por erosión hídrica. Asimismo, se han observado pérdidas de 3 a 4 toneladas por hectárea al tercer año de cultivo con erosión hídrica leve en el cultivo de maíz (Contreras-Hinojosa et al., 2005), lo cual origina pérdidas desde 16.2 a 32.4 dólares por hectárea, mientras que el costo de reemplazo de los nutrientes perdidos asciende a 22.1 dólares por hectárea (Cotler, López, & Martínez-Trinidad, 2011).

De manera práctica, la forma de cuantificar la erosión hídrica *in situ*, consiste en tomar una muestra de sedimentos en suspensión al sumergir un recipiente en la corriente, en un punto en el que esté bien mezclada, como aguas abajo de un vertedero o de escollos de rocas. El sedimento contenido en un volumen medido de agua se filtra, se seca y se pesa. Esto da una medida de la concentración del sedimento y cuando se combina con el caudal se obtiene la tasa de descarga de sedimentos. Además de medir los sedimentos en suspensión, también debe contabilizarse el arrastre de fondo, lo cual resulta difícil (Hudson, 1997).

El cálculo de la pérdida de suelo a partir de la medida del movimiento de los sedimentos en las corrientes y los ríos, tropieza con varios problemas. La realización de las mediciones lleva tiempo y resulta cara, su precisión puede ser baja, incluso si se dispone de datos correctos sobre el movimiento de una corriente, no se sabe de dónde procede el suelo y cuándo se produjo el movimiento (Hudson, 1997).

Debido a este tipo de problemas, resulta útil modelar el proceso de erosión hídrica, que es una alternativa para obtener datos confiables sin tener que medir detalladamente el proceso en la realidad.

La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE), es un modelo de erosión que fue desarrollado para la estimación de la pérdida de suelo a largo plazo en áreas determinadas de terreno, bajo condiciones específicas de cultivos y prácticas de manejo (Brea & Balocchi, 2010). La USLE fue descrita por primera vez en 1965, se diseñó para proveer una herramienta adecuada a los conservacionistas. Los objetivos de la ecuación fueron: que cada factor pudiera ser representado por un solo número y pudieran ser predichos a partir de datos meteorológicos, o suelo, producto de la investigación para cada sitio. Sin embargo, el uso de USLE deberá estar limitado a situaciones en las cuales sus factores puedan ser precisamente medidos y a condiciones en las cuales pueda ser aplicado de forma fiable (Renard, Foster, Weeseis, McCool & Yoder, 1997).

over an extended period of time; rainfall erosivity is the kinetic energy of raindrop's impact and the rate of associated runoff (European Commission [EC], 2015); the "K" factor represents the susceptibility of soil to erosion and the amount and rate of runoff, as measured under the standard unit plot condition (erosion plot 72.6 feet long on a 9 % slope); the "LS" factor represents the relationship of the actual slope to standard conditions; the "C" factor represents the effect of plants, soil cover, soil biomass and soil disturbing activities; finally, the "P" factor refers to the impact of soil conservation practices (USDA & NRCS, 2000).

The aim of this study was to implement a model to estimate water erosion with distributed parameters applied to the Agustín Melgar watershed by the RUSLE equation.

Materials and methods

This work was performed for the Agustín Melgar watershed, located in the middle of Hydrologic Region 36 between 24° 0' 0" and 26° 0' 0" north latitude and 104° 0' 0" and 105° 0' 0" west longitude; it covers an area of 11,570 km², and the volume of water available at the output is about 276.22 million cubic meters (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2008).

The RUSLE was applied to calculate soil erosion, being:

$$E = R * K * LS * C * P$$

where *R* is the rainfall erosivity index (MJ·mm·ha⁻¹·h⁻¹); *K* is the inherent soil erodibility (t·ha⁻¹ per unit of *R*); *LS* is the slope length and steepness factor (dimensionless); *C* is the crop factor (dimensionless), and *P* is the conservation practices factor (dimensionless).

The rainfall erosivity index was obtained from map algebra with ArcGIS 9.3; average monthly rainfall maps for the years 1903 to 2011, published in the Digital Climate Atlas of UNAM's Information Technology Unit for Atmospheric and Environmental Sciences (UNIATMOS, 2015), were added up together. Once the average annual rainfall map was obtained, it was introduced into the following equation (Cortés, 1991; Figueroa, 1991):

$$R = 3.6752P - 0.001720P^2$$

where *R* is the rainfall erosivity index (MJ·mm·ha⁻¹·h⁻¹) and *P* is the average annual rainfall in the region.

The inherent soil erodibility was calculated from the percentage of organic matter and textural class according to Stewart, Woolhiser, Wischmeier, Caro, & Frere (1975). Sampling points were obtained from 15 soil maps printed at 1:50000 scale (Instituto Nacional

Posterior a la introducción de USLE, se realizó la Revisión de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE, por sus siglas en inglés), considerando el efecto de la pedregosidad en el factor erodabilidad del suelo (*K*). En la resolución de la RUSLE están implicados cinco factores: el factor "R" indica dos de las más importantes características de la erosividad de la lluvia, la cantidad e intensidad máxima de la lluvia durante un periodo prolongado de tiempo, la erosividad de la lluvia es la energía cinética del impacto de las gotas y la tasa asociada al escurrimiento (European Commission [EC], 2015); el factor "K" representa la susceptibilidad del suelo a la erosión y la cantidad y tasa de escurrimiento, como medida bajo condiciones estándar (lote de escurrimiento de 72.6 pies de largo, con 9 % de pendiente); el factor "LS" representa la relación de la actual condición de pendiente referida a las condiciones estándar; el factor "C", representa el efecto de la vegetación, cobertura del suelo, biomasa del suelo y actividades que causan disturbio en el suelo; por último el factor "P" se refiere al impacto de las prácticas de conservación del suelo (USDA & NRCS, 2000).

El objetivo del presente estudio fue implementar un modelo para estimar la erosión hídrica con parámetros distribuidos aplicado a la subcuenca Agustín Melgar mediante la ecuación RUSLE.

Materiales y métodos

El presente trabajo se realizó para la subcuenca Agustín Melgar que se ubica en la parte media de la Región Hidrológica 36 entre 24° 0' 0" y 26° 0' 0" latitud norte y 104° 0' 0" y 105° 0' 0" longitud oeste, tiene una superficie de 11,570 km², el volumen de agua disponible a la salida es de aproximadamente 276.22 millones de metros cúbicos (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2008).

Se aplicó la RUSLE para calcular la erosión de suelo siendo:

$$E = R * K * LS * C * P$$

donde *R* es el índice de erosividad de la lluvia (MJ·mm·ha⁻¹·h⁻¹); *K* es la erodabilidad inherente al suelo (t·ha⁻¹ por unidad de *R*); *LS* es el factor de longitud y orientación de la pendiente (adimensional); *C* es el factor de cultivo (adimensional), y *P* es el factor de las prácticas de conservación (adimensional).

El índice de erosividad de la lluvia fue obtenido a partir de algebra de mapas con ArcGIS 9.3, se sumaron los mapas de precipitación promedio mensual de los años 1903 a 2011 publicados en el Atlas Climático Digital de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS, 2015) de la UNAM. Una vez obtenido el mapa de precipitación anual promedio, se introdujo a la siguiente ecuación (Cortés, 1991; Figueroa, 1991):

Table 1. Percentages of clay, silt, sand and O.M. used for estimating the K factor.
Cuadro 1. Porcentajes de arcilla, limo, arena y M.O. empleados para el cálculo del factor K.

Map/ Carta	Point No./ Núm. punto	UTM coordinates/ Coordenadas UTM		Clay (%)/ Arcilla (%)	Silt (%)/ Limo (%)	Sand (%)/ Arena (%)	OM (%)
		x	y				
G13A78	1	441026.9	2928424.56	36	18	46	0.1
G13B84	2	612851.813	2903862.47	26	30	44	0.5
G13B84	3	605942.571	2897158.07	28	26	44	0.6
G13B84	4	627553.454	3215310.84	36	34	30	0.8
G13B85	5	690894.141	2895914.11	34	32	34	0.1
G13B85	6	672003.537	2887894.31	16	30	52	0.9
G13B85	7	682881.09	3099704.48	48	28	28	0.9
G13B85	8	683789.778	3106368.48	44	22	34	0.2
G13B85	9	685842	3100827.58	48	26	26	0.5
G13B85	10	691970.704	2892605.73	46	30	24	0.8
G13C17	11	632983.048	2811344.63	54	10	36	1
G13C87	12	424991.691	2884820.73	18	24	58	1.2
G13D14	13	609079.86	2863831.68	16	38	46	1
G13D15	14	653326.164	2862180.83	18	20	62	0.4
G13D15	15	642410.921	2852088.35	22	26	62	0.8
G13D15	16	633983.708	2983797.64	8	64	38	0.8
G13D16	17	669129.048	3098394.39	48	18	38	1.1
G13D16	18	680234.837	2871355.02	12	42	46	4.3
G13D16	19	692822.376	2966833.22	24	40	36	1.3
G13D16	20	685194.994	2874778.98	28	20	54	1.3
G13D16	21	681539.047	2851429.53	52	34	14	1.9
G13D17	22	721243.127	2875338.7	48	26	26	0.9
G13D17	23	729341.088	2872122.36	48	28	24	0.7
G13D17	24	709642.495	2850768.24	34	16	46	1
G13D24	25	617370.568	2848519.18	36	42	22	2
G13D24	26	619228.542	2861827.57	36	42	26	1.8
G13D24	27	603526.97	2822898.9	22	52	26	2.7
G13D25	28	652296.231	2862168.86	32	44	24	0.3
G13D25	29	660394.377	2855587.26	34	40	28	1.8
G13D25	30	666771.496	2826892.88	44	18	38	1.5
G13D25	31	639328.581	2951726.88	18	52	30	1.1
G13D25	32	633380.814	2949478.08	12	36	52	0.6
G13D27	33	730804.601	2956416.79	28	26	46	1
G13D27	34	727520.859	2859899.38	44	22	34	0.8
G13D27	35	715679.961	2849757.21	52	28	22	1.8
G13D51	36	516843.922	2744042.88	22	20	58	3.3
G13D74	37	606826.491	2688768.04	30	38	32	1.5
G13D82	38	550549.414	2669078.24	46	22	32	0.9

de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 1978) (Table 1). Textural classes were obtained by the USDA texture triangle.

As to the slope length and steepness factor, the following equations were used:

$$L = (m + 1) \left(\frac{\lambda_A}{22.1} \right)^m$$

where L is the slope length factor at some point of the land; λ is the surface flow area; m is an adjustable factor dependent on the susceptibility of the soil to erosion and 22.1 is the standard runoff length.

$$S = \left(\frac{\sin (0.01745 \times \theta_{\text{deg}})}{0.09} \right)^n$$

where S is the slope in degrees; 0.09 is the constant of the slope gradient, and n is an adjustable value that depends on the susceptibility of the soil to be eroded.

The values for the exponents m and n can be found in the literature (Mitasova et al., 1996; Oliveira et al., 2013). For typical agricultural and pastoral areas, $m = 0.4$ and $n = 1.4$ are used with low susceptibility to rill erosion.

Since slope is calculated in degrees (as ArcGIS does it), it needs to be transformed into radians when calculating the sine function; this is accomplished by multiplying by 0.01745.

The C factor that was used is shown in Table 2, which was obtained from two different information sources. To locate irrigated and rainfed crops in each of the municipalities in the

$$R = 3.6752P - 0.00172P^2$$

donde R es el índice de erosividad de la lluvia ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), y P es la precipitación promedio anual de la región.

La erodabilidad inherente al suelo se calculó a partir del porcentaje de materia orgánica y clase textural de acuerdo a Stewart, Woolhiser, Wischmeier, Caro, & Frere (1975). Los puntos de muestreo fueron obtenidos a partir de 15 cartas edafológicas impresas escala 1:50000 (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 1978) (Cuadro 1). Se obtuvieron las clases texturales mediante el triángulo de texturas de la USDA.

En cuanto al factor de longitud y orientación de la pendiente, se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$L = (m + 1) \left(\frac{\lambda_A}{22.1} \right)^m$$

donde L es el factor de longitud de la pendiente en algún punto del terreno; λ_A es el área del flujo superficial; m es un factor ajustable que depende de la susceptibilidad del suelo a erosión y 22.1 es la longitud de escurrimiento estándar.

$$S = \left(\frac{\sin (0.01745 \times \theta_{\text{deg}})}{0.09} \right)^n$$

Donde S es la pendiente en grados; 0.09 es la constante del gradiente de pendiente, y n es un valor ajustable que depende de la susceptibilidad del suelo a ser erosionado.

Los valores para los exponentes m y n pueden ser encontrados en la literatura (Mitasova et al., 1996; Oliveira et al., 2013). Para zonas típicas agrícolas

Table 2. Factor for the type of vegetation in the watershed.

Cuadro 2. Factor para el tipo de vegetación de la cuenca.

Type of vegetation / Tipo de vegetación	C factor / Factor C	Source / Fuente
Oats / Avena	(0.10;0.15)* 0.38 ^y	CONAFOR, 2010
Maize / Maíz	0.54* (0.62;0.80) ^y	CONAFOR, 2010
Bean / Frijol	0.48	CONAFOR, 2010
Sorghum / Sorgo	0.43	CONAFOR, 2010
Human settlements / Asentamientos humanos	0	
Pine-oak forest / Bosque de encino-pino	0.01	López-Santos et al., 2012
Mesquite forest / Bosque de mezquite	0.65	López-Santos et al., 2012
Microphyll desert scrub / Matorral desértico micrófilo	0.25	López-Santos et al., 2012
Submontane scrub / Matorral submontano	0.35	López-Santos et al., 2012
Induced pasture / Pastizal inducido	0.02	López-Santos et al., 2012
Natural pasture / Pastizal natural	0.07	López-Santos et al., 2012
Without apparent vegetation / Sin vegetación aparente	1	

*Values under irrigated conditions; ^yValues under rainfed conditions.

*Valores en condiciones de riego; ^yValores en condiciones de temporal.

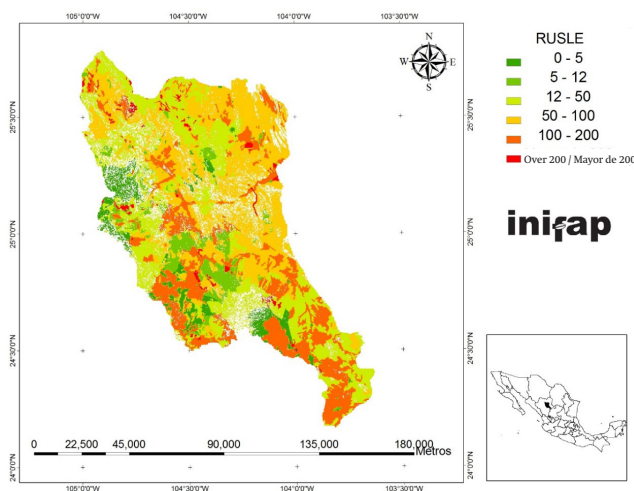


Figure 1. Distribution of soil loss in $t\cdot ha^{-1}$ within the watershed under study.

Figura 1. Distribución de la pérdida de suelo en $t\cdot ha^{-1}$ dentro de la cuenca en estudio.

watershed, information of the *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera* (SIAP, 2011) system.

In regards to the “P” factor, soil conservation practices were not considered.

Results and discussion

Soil loss due to water erosion in the watershed studied ranges from 0 to over 200 $t\cdot ha^{-1}$. In general there is no single soil loss classification that predominates in regard to area coverage (Figure 1), rather the classification of greater than 200 $t\cdot ha^{-1}$ is the one with the least coverage.

It should be remembered that the erosion level is very low with losses under 5 $t\cdot ha^{-1}$, low with losses between 5 and 12 $t\cdot ha^{-1}$, moderate between 12 and 50, very high between 100 and 200, and extreme with losses of more than 200 $t\cdot ha^{-1}$. Regarding the soil loss result obtained, López-Santos, Sánchez, Esquivel, and González (2012) calculated, for the total area of the state of Durango, soil loss values of up to 163 $t\cdot ha^{-1}\cdot year^{-1}$.

Rainfall erosivity ranged from 888.77 to 1,669.33 $MJ\cdot mm^{-1}\cdot ha^{-1}\cdot h^{-1}$ (Figure 2). These results are very similar to those obtained by López-Santos et al. (2012), since they obtained values from 1,336.8 to 1,963.2 $MJ\cdot mm^{-1}\cdot ha^{-1}\cdot h^{-1}$ only at state level.

As for the “LS” factor, most values ranged between 0 and 1, and presented similar coverage in terms of the 1-5, 5-10, 10-20 and 20-30 classifications (Figure 3). The “LS” factor means that the greater the slope of the land the higher the value of this factor (Ibáñez, Moreno & Gisbert, 2012).

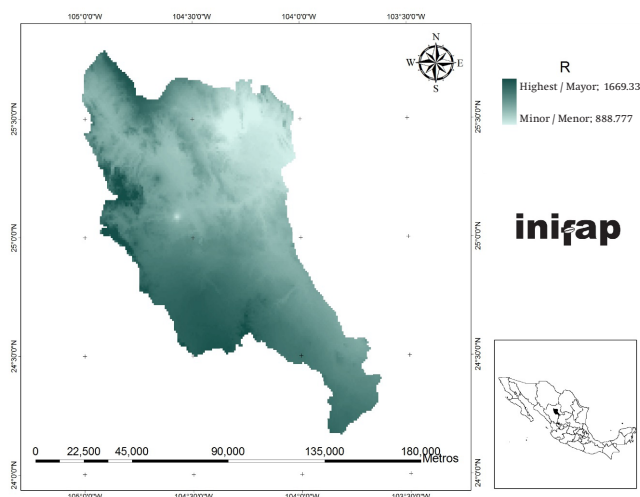


Figure 2. Spatial distribution of R factor in the watershed under study.

Figura 2. Distribución espacial del factor R en la cuenca de estudio.

y ganaderas se emplea $m = 0.4$ y $n = 1.4$ con baja susceptibilidad a la erosión en surcos.

Ya que la pendiente está calculada en grados (tal cual lo hace ArcGIS), es necesario transformarla a radianes al momento de calcular la función seno; esto se logra al multiplicar por 0.01745.

El factor C que se empleó se observa en el Cuadro 2, que se obtuvo de dos fuentes de información distintas. Para ubicar los cultivos de riego y temporal en cada uno de los municipios de la cuenca se recurrió a consultar información del sistema del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2011)

En lo que se refiere al factor “P”, no fueron consideradas prácticas de conservación de suelo.

Resultados y discusión

La pérdida de suelo debido a erosión hídrica en la cuenca estudiada varía de 0 a más de 200 $t\cdot ha^{-1}$. En general no se observa dominio en cuanto a cobertura del área, de ninguna de las clasificaciones de pérdida de suelo (Figura 1); más bien la clasificación de mayor de 200 $t\cdot ha^{-1}$ es la que presenta menor cobertura.

Cabe recordar que el nivel de la erosión es de muy reducido con pérdidas menores de 5 $t\cdot ha^{-1}$, reducido con pérdidas entre las 5 y 12 $t\cdot ha^{-1}$, moderadas entre 12 y 50, muy elevadas entre 100 y 200, y extremas con pérdidas de más de 200 $t\cdot ha^{-1}$. Respecto al resultado de pérdida de suelo obtenido, López-Santos, Sánchez, Esquivel, y González (2012) calcularon para la superficie total del estado de Durango, valores de pérdida de suelo de hasta 163 $t\cdot ha^{-1}\cdot año^{-1}$.

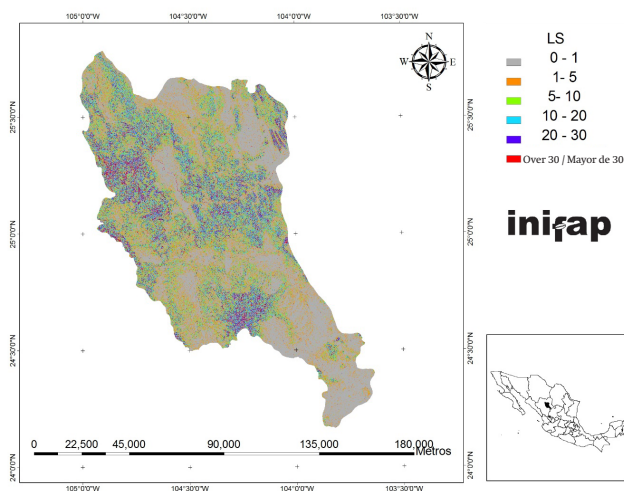


Figure 3. LS factor in the watershed under study.
Figura 3. Factor LS en la cuenca de estudio.

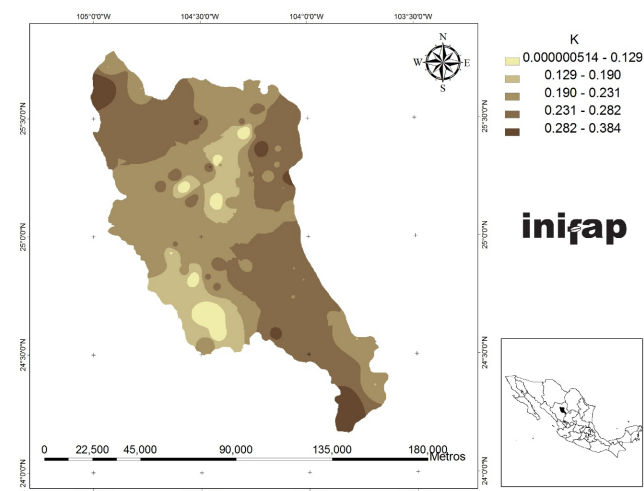


Figure 4. K factor in the watershed under study.
Figura 4. Factor K en la cuenca de estudio.

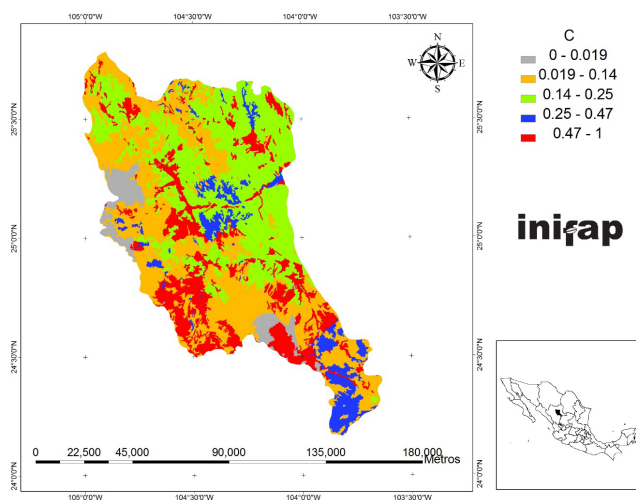


Figure 5. Distribution of the C factor in the watershed under study.
Figura 5. Distribución del factor “C” en la cuenca de estudio.

As for the K factor, it ranged from 0 to 0384 t·ha⁻¹, which means that the larger this factor is the greater the susceptibility of the soil to be eroded. Figure 4 shows that the 0.190-0.231 and 0.231-0.282 classifications dominate in terms of area.

The “C” factor indicated that in the largest part of the study area the values 0.14-0.25 and 0.19-0.14 predominated. The areas with values close to 1 are those susceptible to greater runoff (Figure 5).

Conclusions

Soil loss in the “Agustín Melgar” watershed was calculated by modeling processes using RUSLE. The results showed that there are different soil loss

La erosividad de la lluvia varió de 888.77 a 1,669.33 MJ·mm⁻¹·ha⁻¹·h⁻¹ (Figura 2), si comparamos estos resultados con los obtenidos por López-Santos et al. (2012), son muy similares, pues ellos obtienen valores de 1,336.8 a 1,963.2 MJ·mm⁻¹·ha⁻¹·h⁻¹ solo que a nivel estatal.

En cuanto al factor “LS”, la mayoría de los valores, oscilaron entre 0 y 1, y presentó una cobertura similar en cuanto a las clasificaciones de 1-5, 5-10, 10-20 y 20-30 (Figura 3). El factor “LS” significa que a mayor pendiente del terreno se encuentra un valor mayor de dicho factor (Ibáñez, Moreno & Gisbert, 2012).

En cuanto al factor K, varió desde 0 a 0.384 t·ha⁻¹, lo cual significa que, mientras mayor sea dicho factor, mayor es la susceptibilidad del suelo a ser erosionado. En la Figura 4, se observa que predomina en superficie las clasificaciones de 0.190-0.231 y 0.231-0.282.

El factor “C” indicó que en la mayor superficie del área estudiada predominaron los valores de 0.14-0.25 y 0.19-0.14. La zonas con valores cercanos a 1 son las susceptibles a que exista mayor escurrimiento (Figura 5).

Conclusiones

Se calculó la pérdida de suelo de la subcuenca “Agustín Melgar”, mediante modelación de procesos empleando la RUSLE. Los resultados mostraron que existen distintos niveles de pérdida de suelo en el área de estudio, que van desde el nivel “muy reducido” a “extremo”, aunque esta última clasificación ocupa muy poca superficie en la subcuenca de estudio. Cabe mencionar que el uso de este modelo debe ser calibrado con mediciones *in situ*, para corroborar la sensibilidad de los resultados.

Fin de la versión en español

levels in the study area, ranging from “very low” to “extreme,” although the latter classification accounts for very little area in the watershed under study. It is worth mentioning that the use of this model should be calibrated with *in situ* measurements to corroborate the sensitivity of the results.

End of English version

References / Referencias

- Brea, J. D., & Balocchi, F. (2010). Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas-Volumen 1. UNESCO. *Documentos Técnicos del PHI-LAC*, N° 22.
- Contreras-Hinojosa, J., Volke-Haller, V., Oropeza-Mota, J., Rodríguez-Franco, C., Martínez-Saldaña, T., & Martínez-Garza, A. (2005). Reducción del rendimiento de maíz por la erosión del suelo en Yanhuitlán, Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana*, 23(3), 399-408.
- Cortés Torres, H. G. (1991). *Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados*. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México
- Cotler, H., López, C., & Martínez-Trinidad, S. (2011). ¿Cuánto nos cuesta la erosión de suelos?. *Investigación ambiental*, 3(2), 31-43.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2010). Coordinación general de producción y productividad. Gerencia de silvicultura comunitaria. Programa de Desarrollo Forestal Comunitario. Estudios técnicos especializados para la recuperación de áreas degradadas por disturbios y/o perturbaciones antropogénicas. Retrieved from <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/1/40TDR-RESTAURACION%202010.pdf.pdf>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2008). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas Río Sextín, Presa Lázaro Cárdenas, Agustín Melgar, Presa Francisco Zarco, Los Angeles, Canal Santa Rosa, Arroyo Cadena, Laguna de Mayrán, Presa Santa Rosa, Presa Leobardo Reynoso, Presa Cazadero, San Francisco, Presa La Flor, Nazareno, Laguna de Viesca, mismas que forman parte de la región hidrológica número 36 denominada Nazas-Aguanaval. Diario Oficial de la Federación de 22 de septiembre de 2008 página 93.
- European Commission (EC). (2015). Rainfall erosivity factor. European Commission. European Soil Portal – Soil Data and Information Systems. Retrieved from <http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/library/themes/erosion/RainfallErosivity/>
- Figueroa, S. B. (1991). *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Colegio de Postgraduados. 116 p.
- Hudson, N. W. (1997). *Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía*. Boletín de Suelos de la FAO – 68. Retrieved from [http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s07.htm#estimación de la carga en suspensión](http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s07.htm#estimación%20de%20la%20carga%20en%20suspensión)
- Ibáñez, A. S., Moreno, R. H., & Gisbert, B. J. M. (2012). *El factor LS de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE)*. Universitat Politècnica de València. Departamento de Producción Vegetal. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural.
- Instituto Nacional de Estadística, y Geografía e Informática (INEGI). (1978). Carta Edafológica Escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística, y Geografía e Informática. México D.F.
- López-Santos, A., Sánchez C. I., Esquivel, A. G., & González, B. J. L. (2012). Evaluación de la vulnerabilidad de los suelos de estado de Durango, México en el contexto del cambio climático. *Agrociencia Uruguay, Special Issue*, 6 (3), 117-127.
- Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., & Iverson, L. R. (1996). “Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS,” *International Journal of GIS*, 10(5), 629-641.
- Oliveira, A. H., Aparecida da Silva, M., Silva, M. L. N., Curi, N., Neta, G. K. & França de Freitas, D. A. (2013). Development of Topographic Factor Modeling for Application in Soil Erosion Models In Soriano, M. C. H. (Ed.), *Soil Processes and Current Trends in Quality Assessment*, (pp. 111-138).
- Pimentel, D. (2006). Soil erosion: a food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability*, 8,119-137. doi: 10.1007/S10668-005-1262-8
- Renard, K.G., G. R. Foster, G.A. Weesies, D. K. McCool, & D.C. Yoder. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to conservation planning with de Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. U. S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703, 404.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2011). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Información Anual. Cultivos de riego y temporal. Retrieved from <http://www.siap.gob.mx/>
- Stewart, B. A., Woolhiser, D. A., Wischmeier, W. H., Caro, J. H., & Frere, M. H. (1975). Control of Water Pollution from Cropland, Volume 1-A Manual for Guideline Development, *Report ARS-H-5-1*. USDA, Washington, D.C.
- Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS). (2015). Climatología continental. Precipitación promedio (1902-2011). *Centro de Ciencias de la Atmósfera*. Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from <http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml/>
- United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service (USDA - NRCS). (2000). *RUSLE Erosion Prediction*. Retrieved from http://soilandwater.ohiodnr.gov/portals/soilwater/pdf/soil/RUSLE_Erosion_Prediction.pdf