

DIAGNÓSTICO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO TUXPAN, VERACRUZ, MÉXICO.**DIAGNOSIS OF WATER EROSION OF THE TUXPAN RIVER BASIN, VERACRUZ, MÉXICO.**José Isidro Melchor-Marroquín¹; Jorge Luis Chagoya-Fuentes²**Resumen**

En la cuenca del río Tuxpan, las intensas lluvias que ocurren dentro de su área, generan gran cantidad de sedimentos que son transportados y depositados en la parte baja de su cauce que reducen su profundidad, lo cual provoca que sea dragado frecuentemente en los últimos 11 kilómetros antes de desembocar al mar, ya que es utilizado como canal de navegación para barcos de gran calado que arriban al puerto de Tuxpan, el cual es uno de los tres más importantes de Veracruz, México. Por lo anterior y como primer paso para entender el problema de erosión hídrica en la cuenca del río Tuxpan, se realizó el presente estudio cuyos objetivos fueron identificar las áreas con riesgo de erosión hídrica y estimar la pérdida de suelo, mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo ($A=R*K*LS*C$), con la técnica de álgebra de mapas en ARCGIS 10.1. Los resultados indican que el riesgo promedio de erosión hídrica varía de 19.4 a 794.9 Mg ha⁻¹ año⁻¹, valores superiores a la clasificación de los grados de severidad establecidos por la FAO (1980). La erosión actual promedio de la cuenca es ligera en el 2.52 %, moderada en el 71.38 %, alta en el 9.42 % y muy alta en el 16.88 % de su área. Dos subcuencas abarcaron la mayor superficie y riesgo de erosión con 70.4 % y 89.2 %, respectivamente, cuyo grado de severidad fluctuó de 21.5 a 1,971.5 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Las áreas más afectadas son las partes alta y media de la cuenca con mayor pendiente; las menos afectadas son las áreas con vegetación y las partes bajas, planas y zonas pantanosas.

Palabras clave: Ecuación Universal Pérdida Suelo, álgebra de mapas, ArcGis.

Abstract

In the basin of the Tuxpan River due heavy rains large amounts of sediment are generated, which are transported and deposited in the channel bottom, reducing its depth. Since deep-draft ships navigate the river, the last 11 km before the river mouth have to be dredged frequently. This situation is relevant because the height port of Tuxpan is the third more important in Veracruz, México. This study was conducted as a first step to understand water erosion in the river basin and its objectives were to identify areas with a risk of water erosion as well as to estimate soil loss by means of the universal soil loss equation ($A=R*K*LS*C$) with the algebra maps technique in ARCGIS 10.1. The average risk of water erosion in the five sub-basins varied from 19.4 to 794.9 Mg ha⁻¹ yr⁻¹, which are higher values than those indicated by the severity degrees classification of FAO (1980). Current erosion is light in 2.52 %, moderate in 71.38 %, high in 9.42 % and very high in 16.88 %, of the river basin area. Two sub-basins had the greater surface and risk of erosion with 70.4% and 89.2%, respectively. Additionally, their severity levels ranged from 21.5 to 1971.5 Mg ha⁻¹ yr⁻¹. The more affected areas were the upper and middle steepest basin parts. Areas with vegetation cover, lowlands and wetlands were the less affected.

Key words. Universal Soil Loss Erosion, map algebra, ArcGis.

1. INTRODUCCIÓN

En México, la erosión hídrica del suelo está presente en 22.72 millones de hectáreas, que representa el 11.9% del territorio nacional. Este fenómeno, que se origina por la acción del agua sobre una superficie desprovista de cobertura vegetal, es posiblemente el tipo de erosión más importante de todos, ya que es irreversible y de magnitud significativa. Se calcula que para tener un centímetro de suelo mineral en la capa superficial son necesarios entre 100 y 400 años, razón por lo que se considera como un recurso natural no renovable dentro de la escala de tiempo humana. (Montes *et al.*, 2011; SEMARNAT, 2013).

Para la planificación del uso del suelo y desarrollo de estrategias de conservación, es necesario estimar las tasas de erosión e identificar las áreas vulnerables. En general, los métodos para evaluar la erosión se dividen en dos: directos e indirectos; los primeros proporcionan datos precisos pero son laboriosos, requieren mucho tiempo y son costosos, ya que la información se obtiene de mediciones a nivel superficial de la erosión; mientras que los indirectos son modelos basados en relaciones estadísticamente significativas entre variables, cuando se cuenta con una razonable base de datos, destacando entre estos, la Ecuación Universal de

¹ Programa de Investigación Manejo Forestal Sustentable y Servicios Ambientales. Campo Experimental Ixtacuaco. CIRGOC-INIFAP. Tlapacoyan, Veracruz, México. melchor.jose@inifap.gob.mx

² Consultor particular. Área de Servicios Ecosistémicos. Tuxpan, Veracruz. México. chagoyajorge@hotmail.com

Pérdida de Suelo (EUPS), que considera en su análisis que el proceso erosivo de un área es el resultado de la interacción de factores naturales (clima, suelo y topografía) y antropogénicos (uso y manejo de la tierra) (Wischmeier y Smith, 1965). Dado que la EUPS es un método que permite obtener un producto en poco tiempo y a bajo costo, es relativamente fácil de aplicar y se utiliza con sistemas de información geográfica (SIG), ya que los factores que integran la ecuación tienen una clara representación geográfica sobre el territorio, ha resultado ser un modelo práctico y accesible que ha sido utilizado a diferentes escalas en diversas partes del mundo (Orúe *et al.*, 2007; Pastrana, 2014).

A partir de que Figueroa *et al.* (1991) adaptaron la EUPS a las condiciones de México, su aplicación para estimar la erosión hídrica en el país se ha generalizado, mediante la técnica de álgebra de mapas dentro de un SIG. Santacruz (2011), menciona que la ventaja de la EUPS es que el índice de erosividad permite considerar de modo más preciso las diferencias de pluviosidad de una tormenta a otra, o de una estación a otra, cuando se tiene información de la red pluviométrica; mientras que Pérez (2013), señala que el más completo y sofisticado modelo de erosión, es un complejo proceso basado en un programa de computadora llamado Water Erosion Prediction Project (WEPP), el cual calcula sobre una base diaria los procesos hidrológicos, el crecimiento de las plantas y descomposición de los desechos; sin embargo, en su misma complejidad tiene su ventaja y desventaja, ya que si no se cuenta con la información que requiere, se vuelve inoperante y poco confiable. El mismo autor concluye que la EUPS, es un modelo adecuado para estimar la tasa de erosión hídrica, con resultados satisfactorios para la elaboración de planes de manejo y conservación de suelo, razón por la que se aplicó en el presente estudio.

De los estudios realizados sobre la estimación de erosión hídrica para diversas condiciones del país, Arellano (1994), con la aplicación directa de la EUPS y cartografía 1:250,000, estimó que la erosión hídrica actual para la costa de Chiapas, México, era de 123 a 2,148 Mg^{3z} ha⁻¹ año⁻¹. En estudios realizados para estimar la erosión hídrica con la técnica de álgebra de mapas en un SIG, Pando *et al.* (2003), estimaron tasas de 23 a 149 Mg ha⁻¹ año⁻¹, en la microcuenca del Río Potosí, Nuevo León; Flores *et al.* (2003), en la cuenca el Jihuite, Jalisco, estimó de 2.2 hasta 6.7 Mg ha⁻¹ año⁻¹; mientras que López (2005) estimó que la erosión hídrica total en la microcuenca El Calabozo, Michoacán, fue 6235 Mg ha⁻¹ año⁻¹; Cano *et al.* (2007) estimaron que el 58 % de la superficie de la microcuenca Santa Rita, Nuevo León, tuvo de valores de 50 a 200 Mg ha⁻¹ año⁻¹; mientras que Pastrana (2014), menciona un promedio de 3.5 Mg ha⁻¹ año⁻¹, en la cuenca San miguel, Coahuila. La

variabilidad de los datos mencionados, como es de esperarse, se debe a las condiciones particulares de los factores climáticos, uso y manejo del suelo y características físicas del terreno.

En el norte de Veracruz, México, se encuentra la cuenca del Río Tuxpan, que aprovecha la desembocadura del río como canal de navegación (11 km de longitud, 150 m de ancho y 12 m de profundidad), para los barcos de gran calado que arriban al puerto del mismo nombre y que es el tercero más importante de Veracruz. En 2015, el puerto movilizó 10.75 millones de toneladas de carga, que representó 151,543.00 millones de pesos (API-Tuxpan, 2011). Anualmente el río incrementa su caudal por las precipitaciones generadas en su cuenca hidrológica, arrastrando gran cantidad de sedimentos que se depositan en los últimos kilómetros de su cauce y reducen su profundidad, siendo necesario dragarlo anualmente para mantener las condiciones de navegación. Esta situación se vuelve estratégicamente relevante ya que durante el 2016 iniciará actividades el puerto de contenedores donde la profundidad del cauce del río será determinante para la entrada de barcos de gran calado.

Por otra parte, hasta la fecha no se han realizado estudios sobre evaluación del riesgo de erosión hídrica en la cuenca del Río Tuxpan, debido a lo anterior y como primer paso para dimensionar la cantidad de sedimentos generados en la cuenca, se realizó el presente estudio el cual consistió en estimar la pérdida de suelo e identificar las áreas con riesgo de erosión hídrica, mediante la aplicación de la EUPS con la técnica de álgebra de mapas en la cuenca mencionada; la información generada ayudará a la toma de decisiones en planeación y gestión de acciones territoriales para la conservación y recuperación de suelos en las diferentes subcuencas. Todo con el propósito de reducir la erosión hídrica y el arrastre de sedimentos hacia el cauce utilizado como canal de navegación.

2. METODOLOGÍA

2.1. Descripción del Área de Estudio

La cuenca se localiza en la región hidrográfica RH27D, Cuenca Río Tuxpan y está formada por cinco subcuencas (A, B, C, D y E) (Figura 1). Se ubica entre los paralelos 20° 18.45' y 21° 15.88' de latitud Norte y los meridianos 97° 17.9' y 98° 31.03' de longitud Oeste. Tiene una superficie total de 5,887.96 km² y un perímetro de 457.37 km, distribuido en los estados de Veracruz (72%), Puebla (15.34%) e Hidalgo (12.62%). Sus dos afluentes principales son el Río Vinazco, que nace en el estado de Hidalgo, y el Pantepec, que nace en el estado de Puebla, ambos penetran en territorio veracruzano y en el municipio de Temapache, unen sus aguas conformando este río cuyo escurrimiento superficial medio anual es de 2,076 millones de m³ y drena en el Golfo de México.

³ z Mg = ton

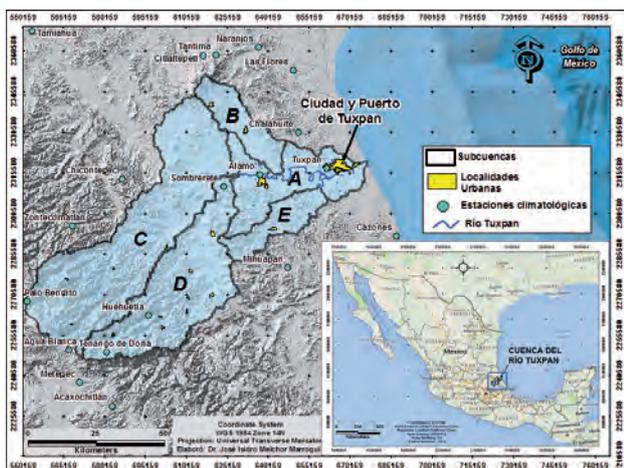


Figura 1.- Ubicación de la Cuenca RH27D, Río Tuxpan y las subcuencas (A, B, C, D y E) que la conforman, en el estado de Veracruz, México.

Con base en la clasificación climática de Koeppen, modificada por García (1978), los clima existentes en la cuenca son el Am(f), que corresponde a cálido húmedo, seguido por el Aw(2)x, cálido subhúmedo; Cf, templado húmedo y (A)C(m)(f) que corresponde a semicálido **húmedo**. Con base en las normales de precipitación de 19 estaciones climatológicas, ubicadas dentro y alrededor de la

cuenca con información de 59 años, se tiene que la precipitación promedio anual es de 1,300.1 mm, con una máxima y mínima de 2,204.5 y 609. mm, respectivamente (Figura 1) (SMN, 2015). El material geológico predominante en la cuenca corresponde a rocas sedimentarias y rocas ígneas intrusivas y extrusivas, constituidas por lutita arenisca, caliza lutita, y arenisca conglomerado. Respecto al relieve, predomina el sistema de topografía de sierra alta escarpada, seguida por el de valle de laderas tendidas con llanura, lomerío típico, valle con llanuras, sierra baja volcánica, meseta típica y meseta compleja con lomeríos; las pendientes varían de 3% al 100% considerando las cinco subcuencas (INEGI, 2015).

2.2. Insumos cartográficos

Se utilizó material cartográfico obtenido de INEGI (2015) (Tabla1), el cual fue procesado con la técnica de algebra de mapas en el marco del software ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012). Esta técnica consiste en crear un mapa raster para cada uno de los componentes de la EUPS; una vez creados los mapas, se realiza una multiplicación entre ellos, mediante la extensión Spatial Analyst de ArcGIS 10.1, por medio del uso de la herramienta Raster Calculator, para finalmente obtener el mapa raster con los valores de erosión hídrica (Colín *et al.*, 2013).

Tabla 1. Cartografía utilizada para la estimación de la erosión hídrica en la cuenca del Río Tuxpan.

Referencia	Escala	Formato
Continuo de Elevaciones Mexicano CEM 3.0	1:50,000	Raster
Red Hidrográfica de México	1:50,000	Shape
Uso del Suelo y Vegetación de México Capa Unión	1:250,000	Shape
Conjunto de Datos Vectoriales Edafológico de México	1:250,000	Shape
Mapa Base de México	1:1,000,000	Shape
Conjunto Vectorial de Entidades de México	1:250,000	Shape

Fuente: INEGI (2015).

2.3. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) fue desarrollada por Wischmeier y Smith (1965) y validada para México por Figueroa *et al.* (1991) para estimar la pérdida de suelo promedio anual. La EUPS es un modelo en el que la pérdida de suelo está expresada como masa por unidad de área por unidad de tiempo y es una función del efecto combinado de seis factores expresados en la ecuación 1:

$$A=R * K * LS * C * P \quad (1)$$

Donde:

A = Promedio anual de pérdida de suelo por hectárea expresado en Mg * ha⁻¹ año⁻¹.

R = Factor de erosividad de la lluvia en MJ * mm⁻¹ / ha⁻¹ hr⁻¹.

K = Factor de erosionabilidad del suelo.

S = Factor del grado de pendiente, es adimensional.

L = Factor del grado de longitud de la pendiente, es adimensional.

C = Factor del manejo de vegetación, es adimensional.

P = Factor de prácticas mecánicas en el manejo de la vegetación agrícola, es adimensional.

La EUPS estima la erosión hídrica actual cuando se incluyen todos los factores que la integran; en cambio si no se incluye el factor P, estima la erosión hídrica potencial, es decir, la cantidad de suelo que se estaría perdiendo sin prácticas de conservación de suelo. La clasificación de la erosión hídrica utilizada fue la propuesta por la FAO (1980) (Tabla 2).

Tabla 2. Niveles de pérdida de suelo por erosión hídrica.

Nivel	Mg * ha ⁻¹ año ⁻¹
Nula	< 2
Ligera	2-10
Moderada	10-50
Alta	50-200
Muy Alta	> 200

Fuente: FAO (1980).

2.3.1. Factor de erosividad de la lluvia (R)

El factor erosividad de la lluvia *R*, definida como la capacidad potencial de ésta para causar erosión, es medida por medio de los índices de erosividad. Este factor se estimó a partir de la regionalización de precipitación hecha por Cortés (1991), quien determinó un mapa de isoerosividad con 14 regiones; así, la cuenca del Río Tuxpan se ubica en la región XIII y le corresponde la ecuación cuadrática (2) para el cálculo del factor *R*:

$$R = [10.7427 (P) - 0.00108 (P^2)] \quad (2)$$

con una $r^2 = 0.97$

Donde:

R = Factor de erosividad de la lluvia en MJ * mm⁻¹/ha⁻¹ hr⁻¹.

P = Normales de precipitación media anual en mm.

r^2 = Coeficiente de determinación.

El factor *R* se determinó para cada subcuenca con el método de isoyetas de las normales de precipitación obtenidas de las estaciones climatológicas ubicadas dentro y alrededor de la cuenca. Posteriormente se generó el mapa raster del factor *R* con el software ARCGIS 10.1 (ESRI, 2012).

2.3.2. Factor de Erodabilidad del suelo (K)

La erodabilidad del suelo se define como la tasa de pérdida de suelo por cada unidad de índice de erosividad, cuando la pendiente y su longitud, la cobertura vegetal y las prácticas de conservación del suelo son constantes e iguales a uno (Figueroa *et al.* 1991). Con base en el conjunto de datos vectoriales edafológico 1:250 mil (INEGI, 2015), los valores del factor *K* se asignaron a cada polígono de unidad de suelo de la cuenca conforme a datos generados por FAO (1980) y actualizados para México por Figueroa *et al.* (1991). El mapa vectorial de suelo de la cuenca con el valor del factor *K* incluido, se transformó a capa "raster" con ARCGIS 10.1 (ESRI, 2012).

2.3.3. Factor topográfico (LS)

La longitud de la pendiente (*L*) y el grado de la pendiente (*S*) expresada en porcentaje, representan

la participación determinante de la topografía en el proceso de pérdida de suelo. A medida que el valor de estos factores aumenta, la pérdida de suelo es mayor. La longitud (*L*) se define como la distancia horizontal entre los puntos donde inicia el escurrimiento hasta aquel donde decrece la pendiente y ocurre la sedimentación. El factor (*S*) representa el efecto de la inclinación en la erosión, ya que la pérdida de suelo se incrementa con pendientes escarpadas (Foster *et al.*, 1977).

El insumo principal para la determinación del factor *LS*, fue el mapa raster de la cuenca obtenido del conjunto de elevaciones mexicano CEM 3.0 (INEGI, 2015). Para el cálculo de los factores *L*, *S* y *LS*, se siguió la metodología de Renard *et al.* (1996), la cual divide a la cuenca en una cuadrícula y asigna atributos ambientales como tipo de suelo, ángulo de la pendiente, precipitación y longitud de la pendiente a cada celda (pixel) de dicha cuadrícula. Con ARCGIS 10.1 (ESRI, 2012) se calcularon los ángulos de la pendiente en el CEM 3.0 (INEGI, 2015), cuyo procedimiento se expone a continuación.

$$L = \left(\frac{o}{22.13}\right)^m \quad (3)$$

Donde:

L = Longitud de la pendiente.

λ = Es la longitud de la pendiente en metros.

m = Es un exponente calculado con modificación hecha por Foster *et al.* (1977).

$$m = \frac{\beta}{\beta+1} \quad (4)$$

Donde:

β = Ángulo medio de la pendiente.

Los valores de β , para condiciones donde los suelos son moderadamente susceptibles a la erosión entre canalillos y en canalillos se obtuvieron mediante la ecuación desarrollada por McCool *et al.* (1989), donde β se toma como el ángulo medio a nivel de subcuadrícula en la dirección de mayor pendiente en el mapa raster.

$$\beta = \frac{\frac{\sin \theta}{0.0896}}{3 + \sin \theta)^{0.8} + 0.56} \quad (5)$$

Donde:

θ = es el ángulo de la pendiente.

El valor de λ se obtuvo a partir de la metodología expuesta por Flores *et al.* (2003), la cual procesa modelos de elevación que representen con más claridad los cambios topográficos y su relación con las condiciones hidrológicas superficiales, considerando el tamaño del pixel del mapa raster.

$$\lambda = \frac{x}{\cos \theta} \quad (6)$$

Donde:

x = Tamaño del pixel.

El factor inclinación de la pendiente (S), se calculó con las siguientes ecuaciones:

$$S = 10.8 \text{ Sen } \theta + 0.03, \text{ para } S < 9\% \quad (7)$$

$$S = 16.8 \text{ Sen } \theta - 0.50, \text{ si } S \geq 9\% \quad (8)$$

2.3.4. Factor de cobertura (C)

El factor C es la capacidad de la vegetación para amortiguar el efecto de desprendimiento de partículas de suelo por las gotas de lluvia e impedir el arrastre de sedimentos con el escurrimiento superficial. Su valor es una función de las combinaciones entre cobertura, secuencia de cultivos, prácticas de manejo y del estado de crecimiento y desarrollo de la cobertura vegetal al momento en que actúa el agente erosivo (Wischmeier y Smith, 1978).

A partir del mapa vectorial de uso de suelo y vegetación Capa Unión Serie V, elaborada para

México por INEGI (2015), se extrajeron los polígonos correspondientes a cada clase de uso de suelo y tipo de vegetación existentes en la cuenca, a los que se les asignó el valor de C , con base a información generada por Figueroa *et al.* (1991) para diferentes regiones del País. Este insumo fue procesado con ARCGIS 10.1 (ESRI, 2012) para obtener el mapa raster del factor C , con la clasificación y superficie de los polígonos mencionados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Características Morfométricas de la Cuenca

El área de drenaje es de 5,887.96 km², por esta razón es considerada como una cuenca grande, ya que se encuentra dentro de la clasificación establecida por Campos (1998), con un área entre 2,500 y 5,000 km². Respecto a la densidad de drenaje, Hernández (2006) considera que valores de 3.5 km * km⁻² o mayores, indican una red de drenaje eficiente. En nuestro caso el promedio de este parámetro fue de 1.68, indicando un drenaje bueno (Tabla 3).

Tabla 3. Características morfométricas de las subcuencas que integran la Cuenca del Río Tuxpan, Veracruz.

Parámetros morfométricos	Subcuenca				
	A	B	C	D	E
Área (Km ²)	903.35	446.20	2,564.78	1,576.89	396.74
Longitud Corriente Principal (Km)	119.6	79.092	142.507	148.04	78.387
Densidad de drenaje (Km * Km ²)	1.465	1.9454	1.6961	1.5439	1.7585
Número de corrientes	1713	1183	5058	2526	987
Índice de Gravelius (adimensional)	2.17	1.61	1.88	1.86	1.83
Elevación máxima en la subcuenca(m)	460	1320	2800	2760	460
Elevación mínima en la subcuenca(m)	0	20	20	20	20
Elevación máxima en corriente principal (m)	371	1206	2540	2366	369
Elevación mínima en corriente principal (m)	20	19	45	40	15
Pendiente media (%)	9.03	11.14	31.67	32.33	18.39

El índice de Gravelius relaciona el perímetro de la cuenca con un círculo de la misma área; a medida que el valor del índice se acerque a la unidad, la cuenca tiende a ser circular y más compacta. En nuestro caso, el promedio de este índice fue de 1.87 por lo que la cuenca tiene una forma oval oblonga a rectangular oblonga, lo que puede intensificar el vigor de las avenidas al menos en las desembocaduras y la onda de crecida que puede manifestarse fuertemente antes del cauce principal (Viramontes *et al.*, 2007. Caro, 2014).

Respecto a la pendiente media de la cuenca, con base a la clasificación de Heras (1976), las subcuencas A y B presentan un relieve accidentado medio, mientras que en las demás es accidentado a fuerte accidentado, que evidentemente favorece la escorrentía.

3.2. Erosividad de la lluvia (R).

El rango de R osciló de 3,887.98 a 18,134.04 MJ * mm/ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ por lo que de acuerdo con la clasificación propuesta por Rivera y Gómez (1991), citado por Castelán *et al.* (2014), la subcuenca tiene clases de erosividad de baja a muy severa, cuya distribución va de las áreas de menor a mayor altitud y precipitación (Tabla 4) en 14 de las estaciones climatológicas; los máximos valores se registraron en Huehuetla (2404.5mm), Zontecomatlán (2,205.8 mm), Tantimá (1752.1 mm), Tenango de Doria (1,733.7 mm) y Ciltlatepetl (1,669.3 m); cabe mencionar que se observó tendencia ($r = 0.6$) de los índices de erosividad con la altitud de las dichas estaciones, la cual varía de 10 a 1,666 metros sobre el nivel del mar, es decir de menor a mayor pendiente (Figura

2). Los índices bajos se asociaron a las estaciones Agua Blanca (609.4 mm) y Palo Bendito (632.3 mm);

en este caso no hubo correspondencia con la altitud a la que se encuentran dichas estaciones.

Tabla 4. Clasificación de la erosividad de las lluvias según el valor de *R*.

Clase	Erosividad <i>R</i> * (MJ * mm ha ⁻¹ h ⁻¹)	Clasificación*	Erosividad Cuenca Río Tuxpan (MJ * mm ha ⁻¹ h ⁻¹)
1	< 1 000	Natural	-
2	1000 – 2500	Muy baja	-
3	2500 – 5000	Baja	3887.98 – 8543.19 8543.2 -11067.1 11067.2 – 12861.87 12861.88 – 15105.35
4	5000 – 7500	Moderada	
5	7500 - 10000	Alta	
6	10000 - 15000	Muy alta	15105.36 – 18134.04
7	15000 - 20000	Severa	
8	> 20000	Extremadamente severa	-

* Rivera y Gómez (2013).

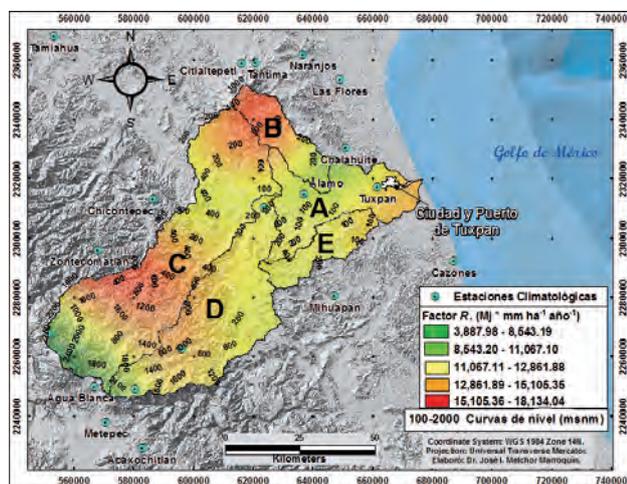


Figura 2.- Distribución espacial del factor *R* en la cuenca del Río Tuxpan, Veracruz.

La situación observada indica que para un área que presenta eventos de precipitación de similar intensidad, el comportamiento de la agresividad de la lluvia está influenciado por el clima y el relieve del área, en sentido estricto, las barreras topográficas; ya que en las regiones planas y de lomeríos cercanas al mar, la precipitación es mayor, a diferencia de aquellas ubicadas en la partes de mayor altitud; en otros casos, el comportamiento del Índice de Erosividad también sufre variaciones cuando para unas mismas condiciones de uso y cobertura del suelo, de pendiente del terreno y de características de los suelos, se presentan eventos lluviosos de diferente intensidad, como ha sido discutido por Galvis (2008) y Castelán *et al.* (2014). Si bien el factor *R* puede ser utilizado para definir la erosividad de la lluvia, su finalidad no es utilizarlo como un indicador de las pérdidas de suelo, y por tanto es necesario tener en cuenta los otros factores de la EUPS para los estudios de predicción de la erosión hídrica.

3.3. Erodabilidad del suelo (*K*)

Con base en el conjunto vectorial edafológico elaborado por el INEGI (2015), en la cuenca existen 19 tipos de suelo; predominando el Feozem háplico, Vertisol pélico, Regosol calcárico, Regosol dístico y Acrisol órtico. En las zonas altas y de mayor pendiente, se encuentran los suelos Cambisol, Feozem, Luvisol y Regosol, que son susceptibles a la erosión hídrica (Zamudio y Méndez, 2011; SEMARNAT, 2013.) los cuales tuvieron el mayor valor de *K* y cuya tendencia es similar a la reportado por Santacruz (2011) y Colín *et al.*, (2013) (Figura 3).

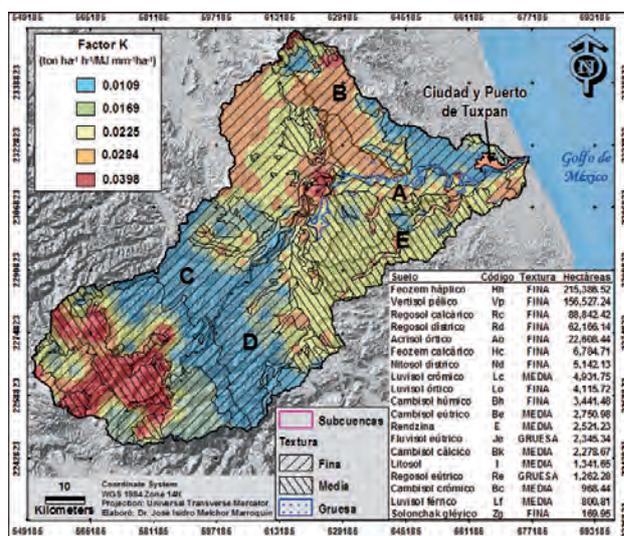


Figura 3.- Tipos de suelo y distribución espacial del factor *K* en la cuenca del Río Tuxpan, Veracruz.

El valor de *K* para la cuenca fluctuó de 0.0109 a 0.0398 ton * ha⁻¹h⁻¹ / MJ * mm⁻¹ha⁻¹, con un promedio de 0.0239 ton * ha⁻¹h⁻¹ / MJ * mm⁻¹ha⁻¹ (Figura 3). Dicho valor corresponde a suelos de textura fina y de acuerdo con Wischmeier y Smith (1978), quienes

establecieron un rango para *K* de 0 a 0.9, se puede argumentar que la cuenca en general presenta baja susceptibilidad a la erosión hídrica; ya que suelos de textura fina con alto contenido de arcilla tienen bajos valores de *K* (0.05-0.15), y por lo tanto son resistentes al desprendimiento; mientras que suelos de textura gruesa tales como suelos arenosos, tienen valores bajos de *K* (0.15-0.2), debido al bajo escurrimiento, aunque estos suelos son fácilmente desprendibles; finalmente, suelos de textura mediana (franco limoso) tienen valores de *K* moderados (0.25-0.4) y son susceptibles al desprendimiento.

3.4. Factor de cobertura (C)

La vegetación es el elemento natural de protección del suelo contra la erosión, ya que controla la energía con la que las gotas de lluvia impactan sobre el suelo, mejora la capacidad de infiltración y disminuye la escorrentía; así mismo, se menciona que las coberturas más efectivas en el control de la erosión hídrica y la sedimentación en una cuenca son las arbóreas y pastizales con un adecuado manejo (Roldán y Gómez 2006; Lianes *et al.* 2009). El análisis en la superficie de la cuenca del Río Tuxpan refleja que el desarrollo de la población se basa en una intensa producción agrícola (49.46%), seguida por la ganadería (23.97%), vegetación secundaria de bosque templado y selva mediana perennifolia y subperennifolia (20.11%), mientras que el bosque natural ocupa sólo 6.46%. Así, el valor de *C* fluctuó de 0 a 0.5, donde los valores bajos se asociaron a las áreas con cobertura de bosque (0.001), vegetación secundaria (0.002 a 0.003) y pastizales (0.004), mientras que el máximo valor fue para la agricultura anual y semipermanente (0.5) (Figura 4). Lo anterior permite intuir que en la cuenca del Río Tuxpan, los suelos dedicados a la agricultura son los que tienen mayor riesgo a la erosión hídrica, seguidos por los cultivados con pastizales y con menor riesgo aquellos con cobertura arbórea.

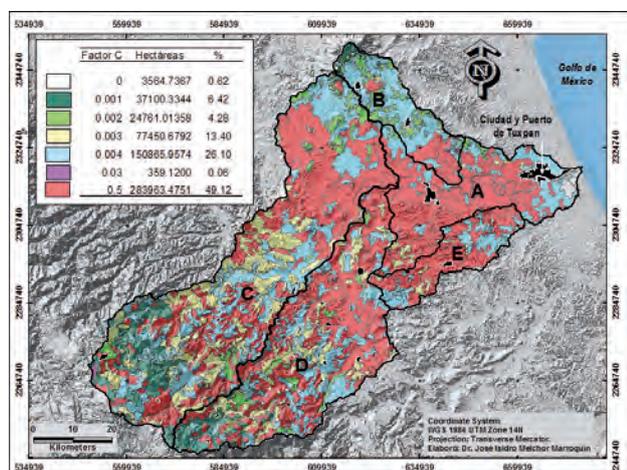


Figura 4.- Distribución espacial del Factor C en la Cuenca del Río Tuxpan, Ver.

3.5. Factor de longitud y grado de la pendiente (LS)

Los resultados obtenidos para el factor *LS* muestran la importancia de la inclinación y la longitud de la pendiente en la susceptibilidad a la erosión hídrica a lo largo de la cuenca. Destaca en general que ésta presenta pendientes altas como corresponde a un medio físico donde predomina una topografía accidentada, lo cual generalmente está asociada a un mayor riesgo a la erosión hídrica. Los valores inferiores de *LS*, oscilan entre 0 y 5 y se presentan en las partes bajas y planas, las cuales tienen poca representación; mientras que los máximos valores de *LS* (65.6-72.6), son los que predominan en la cuenca (Figura 5). De acuerdo con lo anterior y considerando al factor *LS* como uno de los más importantes en el proceso de erosión hídrica (Pérez, 2013), se puede intuir que gran parte de la cuenca está expuesta a ese tipo de erosión, ya que como se aprecia en la figura 5, los máximos valores de *LS*, se asocian a las áreas de mayor pendiente y abruptas de la zona de estudio, lo cual ha sido observado también en diversos estudios como los de Payet *et al.* (2011) y Dumas (2012).

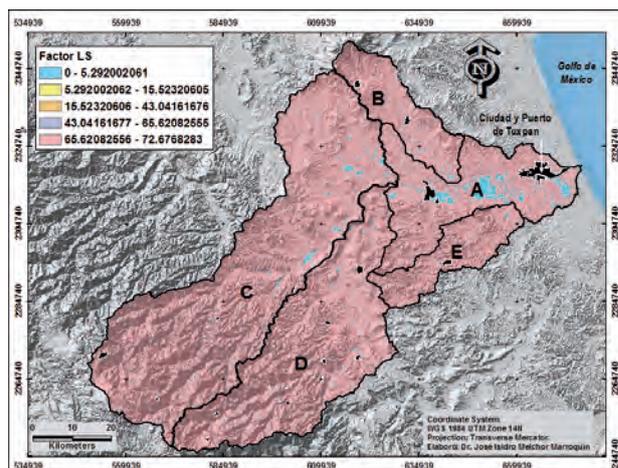


Figura 5.- Distribución espacial del Factor *LS* en la Cuenca del Río Tuxpan, Ver.

3.6. Erosión Hídrica

Considerando las cinco subcuencas, se encontró que los grados de erosión hídrica promedio varían de 19.4 a 794.9 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Tabla 5); llama la atención que estos promedios son superiores a la clasificación de los grados de severidad establecidos por la FAO (1980); así mismo, presentan tendencia con los valores medios de erosión hídrica reportados para México, que varían entre 10 y 200 Mg ha⁻¹ · año⁻¹, en el 22% del territorio del país (Montes *et al.*, 2011), ya que en la cuenca del Río Tuxpan, el 80.8% de la superficie se encuentra dentro del rango mencionado. Es importante mencionar que las subcuencas *C* (2,564.78 km²) y *D* (1,576.89 km²), las cuales son las de mayor superficie, presentaron mayor riesgo

de erosión hídrica promedio con 788.6 y 629.2 Mg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente (Tabla 5). Al respecto, el factor LS fue determinante ya que el análisis de correlación permitió conocer su peso relativo con un

coeficiente de 0.87, lo cual se atribuye a que estas subcuencas presentan altitudes de 2,540 y 2,236 m, respectivamente, lo cual es acorde a lo reportado por Orué *et al.* (2007) y Ramírez (2010) con coeficientes de 0.82 y 0.98 respectivamente.

Tabla 5. Erosión hídrica en las subcuencas que integran la Cuenca del Río Tuxpan, Veracruz

Subcuenca	Grado de erosión hídrica (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)					Total	Promedio
	1	2	3	4	5		
A	23.00	44.00	38.50	34.00	140.00	279.50	55.9
B	16.00	28.50	34.00	31.00	109.50	219.00	43.80
C	34.50	69.00	380.50	1,487.50	1,971.50	3,943.00	788.60
D	21.50	43.00	517.00	991.50	1,573.00	3,146.00	629.20
E	2.00	78.50	34.00	66.00	180.50	361.00	72.20
Erosión Total	97.00	263.00	1,004.00	2,610.00	3,974.50	7,948.50	
Erosión Promedio	19.4	52.6	200.8	522	794.9	1,589.7	

La erosión hídrica total y promedio estimada para la cuenca fue de 7,948.5 y 1,589.7 Mg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente (Tabla 5). Estos resultados contrastan con los obtenidos en otros estudios y con la misma técnica utilizada en el presente estudio, ya que superan a lo observado por García *et al.* (2010), quienes reportan una erosión hídrica total de 5,770 Mg ha⁻¹ año⁻¹, para la cuenca alta del Río Lerma, en Toluca, México; pero inferiores a lo encontrado por Retureta y Ascanio (1998) en la cuenca del Río Atopa, Veracruz, México, con 16,925.5 Mg ha⁻¹ año⁻¹, y, Santacruz (2011) con 16,270.8 Mg ha⁻¹ año⁻¹, en la cuenca del Río Cohoacan, Chiapas, México. La diferencia observada en los datos reportados con los obtenidos en este estudio, puede atribuirse a la diversidad de las condiciones físicas y bióticas, así como por las prácticas de manejo del suelo existentes en cada región, por lo tanto, la información generada para la cuenca del Río Tuxpan, pueden considerarse como una primera estimación que permite visualizar la magnitud del problema de erosión hídrica en esta región.

Al agrupar los promedios de erosión hídrica actual con base en los grados de severidad establecidos por la FAO (1980), se estimó que la erosión hídrica actual promedio de la cuenca es ligera en el 2.52 %, moderada en el 71.38 %, alta en el 9.42 % y muy alta en el 16.88 % de su área; en cambio el grado nulo no se presentó (Tabla 6). El análisis realizado permite inferir que la cuenca del Río Tuxpan presenta problemas de erosión hídrica de moderada a muy alta, lo cual en la mayoría de los casos es originado por el cambio de uso del suelo y prácticas inadecuadas de conservación de suelos en los sistemas de producción agropecuaria. No obstante que la estimación de pérdida de suelo procesada directamente con la EUPS permite conocer el nivel de degradación del suelo, la aplicación de la ecuación en el ambiente del SIG ubicó espacialmente las áreas sujetas a erosión hídrica. Así, de las 30 municipalidades que se encuentran dentro de la cuenca, el 53 % presentan erosión hídrica promedio de 208.8 a 794.9 Mg ha⁻¹ año⁻¹, cuyas áreas pueden ser ubicadas y jerarquizar acciones de conservación, orientando los programas de control preferentemente a las regiones de mayor riesgo.

Tabla 6. Niveles de erosión hídrica en la cuenca del Río Tuxpan, Veracruz.

Clasificación de erosión hídrica (FAO, 1980)			Erosión hídrica actual promedio	
No.	Grado	Mg ha ⁻¹ · año ⁻¹	Superficie (ha)	%
1	Nula	< 2	0	0.0
2	Ligera	2 a 10	14,749.87	2.52
3	Moderada	10 a 50	417,793.44	71.38
4	Alta	50 a 200	55,141.91	9.42
5	Muy alta	> 200	97,659.75	16.88

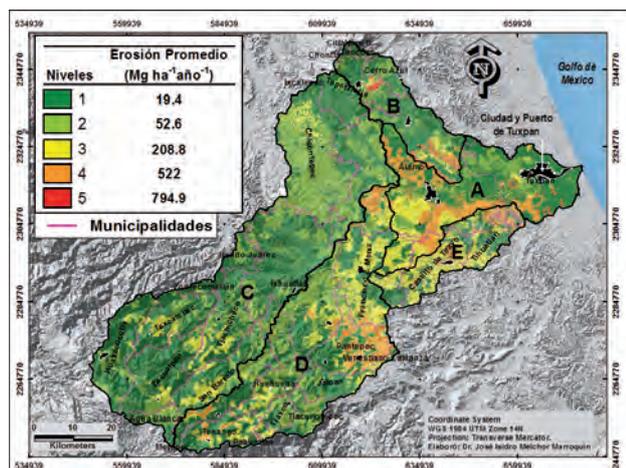


Figura 6.- Distribución espacial de la erosión hídrica en la Cuenca del Río Tuxpan, Veracruz, México.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos para la cuenca del Río Tuxpan, permiten dar una visión general del riesgo de erosión hídrica al que está expuesta dicha cuenca. Así mismo, como se ha reportado en otros estudios, uno de los factores más importantes en la evaluación de la erosión hídrica mediante la EUPS en un ambiente SIG, es la longitud y grado de pendiente (LS). Mediante la aplicación de los sistemas de información geográfica (SIG) se logró estimar las pérdidas del suelo a través del análisis multiplicativo de la Ecuación Universal de Perdida de Suelo (EUPS), donde se visualizaron y localizaron las áreas de mayor susceptibilidad de una manera más práctica a escala de cuenca hidrográfica.

Los resultados obtenidos señalan la urgente necesidad de realizar una adecuada planeación del territorio que conforma la cuenca del río Tuxpan, la cual involucre a todas las dependencias gubernamentales relacionadas con el manejo de cuencas, para realizar acciones que reduzcan la degradación del recurso suelo, entre las que se pueden mencionar las obras de conservación del suelo en áreas agrícolas y la implementación de la agroforestería para disminuir la presión hacia los bosques, retener el suelo y mejorar sus características físicas y químicas.

Finalmente, se considera que la información presentada es una primera estimación del problema de erosión hídrica en la cuenca estudiada, por lo que se considera que puede ser utilizada como una base para iniciar la elaboración de planes, programas y proyectos específicos para la mitigación de pérdida de suelo y control de erosión hídrica en la cuenca, que conduzcan a prolongar la vida útil del canal de navegación del río Tuxpan. Sin embargo, es recomendable realizar estudios más detallados por dependencias gubernamentales y de investigación, con el propósito de validar o actualizar la información generada en el presente estudio.

Referencias Bibliográficas

- Administración Portuaria Integral-Tuxpan (API-Tuxpan). 2011. Programa Maestro de Desarrollo Portuario de Tuxpan 2011-2016. 372 p.
- Arellano, M.J. 1994. La degradación del suelo por erosión hídrica en Chiapas. Evaluación y principios tecnológicos para su control. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Campos, A. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México. Tercera Reimpresión. 456 p.
- Cano, A., O.U. Martínez & A. Quiñonez. 2007. Caracterización y diagnóstico del medio físico de la microcuenca Santa Rita del municipio de Arteaga, Coahuila. Publicación Especial No. 13. INIFAP. México. 62 p.
- Caro, B.J.L. 2014. Ordenamiento urbano y territorial visto desde el manejo de cuencas a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) en la Cuenca El Ahogado, Jalisco. Ciencia Ergo Sum. 21(1): 55-65.
- Castelán, V.R., V. Tamariz, G. Linares & A. Cruz. 2014. Agresividad de las precipitaciones en la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. Investigaciones Geográficas. 83:29-41.
- Castro, M.I. 2013. Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. 34: 3-16.
- Colín, G.G., L.A. Ibañez, J. Reyes & R. Arteaga. 2013. Diagnóstico de la erosión hídrica de la cuenca del río Pichucalco. Ingeniería Agrícola y Biosistemas. 5(1): 23-31.
- Cortés, T. (1991). Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. México. 168 p.
- Dumas, S.A. 2012. Riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río mundo. Trabajo de fin de Máster. Universidad Complutense. Madrid, España. 48 p.
- Environmental Systems Research Institute, Inc (ESRI). 2012. ARcGis 10.1 for Desktop. California, USA.
- FAO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia. 86 p.
- Figueroa, S.B., A. Amante, H.G. Cortes, J. Pimentel, E.S. Osuna, J.M. Rodríguez & F.J. Morales. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. SARH-Colegio de Postgraduados. México. 150 p.

- Flores, L.H. E., M. Martínez, J.L. Oropeza, E. Mejía & R. López. 2003. Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlán, Jalisco, México. *Terra* 21: 233-244.
- Foster, G. R., L.D. Meyer & C.A. Onstad. 1977. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. *Trans. ASAE*. 20 (4): 683-687.
- Galvis, M. D. X. 2008. Estimación de la Generación de Sedimentos en la cuenca hidrográfica del Río Sisga con base en la ecuación universal de pérdida de suelo. Universidad de la Salle, facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Bogotá.
- García, E. 1978. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 91 p.
- García, J.A., C. Díaz, M. Hernández & E. Quentín. 2010. Erosión y sedimentación en el Curso Alto del río Lerma, Estado de México. *Aqua-LAC*. 2(2): 45-55.
- Heras, R.R. 1976. Hidrología y Recursos Hidráulicos en Capítulo 1 de Estadística Aplicada en Hidrología, tema 5: relación entre elementos hidrológicos y elementos físicos geográficos. Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid España. pp. 78-79.
- Hernández, L.G. 2006. Modelación de la interacción río-acuífero y su aplicación a un caso práctico. Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey, Nuevo León. 100 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Conjunto de datos vectoriales de edafología, uso del suelo, topográficos, hidrología y geología. México. 25/11/2015.
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). México. 09/04/2015. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reecat/default.aspx>, e-mail: atencion.usuarios@inegi.org.mx.
- Lianes, E., M. Marchamalo & M. Roldán. 2009. Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 33(2): 217-235.
- López, G.A.D. 2005. Estimación de la erosión hídrica para diferentes escenarios de manejo en la microcuenca "El Calabozo" municipio de Morelia, Michoacán. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 114 p.
- McCool, D. K., G.R. Foster, C.K. Mutchler & L.D. Meyer. 1989. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Trans. ASAE*. 32 (5): 1571-1576.
- Montes, L.M.L., E.M. Uribe & E. García. 2011. Mapa Nacional de erosión potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 2: 5-17.
- Orué, M.E., P. Littera & F. Cabria. 2007. Expansión de la Frontera Agrícola en Argentina y Erosión Hídrica: Mapas de Riesgo Utilizando el Modelo USLE con Apoyo de SIG. *En: TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. Ed. Martin. Argentina. pp. 185-192.
- Pando, M., M. Gutiérrez, A. Maldonado, J.L. Palacio & A.E. Estrada. 2003. Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. UNAM*. 51: 23-36.
- Pastrana, O.O. 2014. Determinación de la erosión hídrica potencial y actual a través de los sistemas de información geográfica. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 127 p.
- Payet, E., P. Dumas & G. Pennober. 2011. Modélisation de l'érosion hydrique des sols su un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana. *Vertigo- La revue électronique en sciences de l'environnement*, 11(3), 1-26.
- Pérez, N.S. 2013. Erosión hídrica en cuencas costeras de Chiapas y estrategias para su restauración hidrológico-ambiental. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 356 p.
- Ramírez, L.L. 2010. Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la cuenca del Río Juramento-Salta. Tesina de Grado. Universidad Nacional de Salta. Argentina. 104 p.
- Renard, K.G., L.D. Meyer & G.R. Foster. 1996. Chapter 1. Introduction and history. pp. 1-18. *In: Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with revised universal soil erosion equation*. Agriculture Handbook 703. US Department of Agriculture-ARS. Tucson, AZ.
- Retureta, A. A. & G.M. Ascanio. 1998. Obtener y aplicar factores de la ecuación universal por uso del suelo en la subcuenca del río Atopa municipio de Coatepec, Veracruz, México. Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Tapachula, Chiapas. México. 350 p.
- Roldán, M. y Gómez, V. 2006. *Aplicación de la RUSLE v.1.06 en la evaluación de la pérdida de suelo en la cuenca alta del río Cega. Comparación de factores RUSLE-USLE*. Revista de Edafología (SECS), Vol.10 (3): 11-19
- Santacruz, D.L.G. 2011. Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso de suelo en la Cuenca del Río Cahoacán. *Mexico. Aqua-Lac*. 3 (1): 45-54.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2013. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de

estadísticas ambientales. Indicadores clave y de desempeño ambiental. México D.F. 360 p.

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Normales de Precipitación. 25/11/2015.

[http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75,](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75)

e-mail: Webmaster.SMN@conagua.gob.mx

Viramontes, O., L.F. Escoboza, C. Pinedo, A. Pinedo, V.M. Reyes, J.A. Román & A. Pérez. 2007. Morfometría de la cuenca del río San Pedro, Conchos, Chihuahua. *TECNOCENCIA*. 3:21-31.

Wischmeier W. H. & D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. *Agr. Handbook 537*. U.S. Dept. Agr. Washington, D.C. 67 p.

Wischmeier, W. H. & D.D. Smith. 1965. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture Handbook, No. 282. 47 p.

Zamudio, V. & E. Méndez. 2011. La vulnerabilidad de erosión de suelos agrícolas en la región centro-sur del estado de Nayarit, México. *Ambiente y Desarrollo*. 15(28):11-40.