

DIAGNÓSTICO DE LA EROSIÓN DINÁMICA DE LA CUENCA DEL MEDIO BALSAS: PRESA HIDROELÉCTRICA EL CARACOL

Diagnosis of Erosion Dynamics in the Balsas Basin: El Caracol
Hydropower Dam

Olga Segura Jiménez^{1*}, Enrique González Sosa^{1*}

¹Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia

*olgasegura92@gmail.com

*egs@uaq.mx

RESUMEN

La erosión del suelo se presenta de manera natural tanto en las cuencas como en los cauces de los ríos debido al impacto de las gotas de lluvia y el escurrimiento que ocurre posteriormente. Aunado a esto, la actividad humana ha acelerado los procesos erosivos al modificar la cobertura del suelo y al romper el equilibrio que hay entre erosión y sedimentación; por ejemplo, mediante la interrupción del paso de los ríos para la construcción de obras hidráulicas, como las presas hidroeléctricas. En el presente trabajo se hace un análisis con base en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE) y los datos de estaciones hidrométricas dentro de la cuenca de estudio para el periodo 1984-2006. De esta manera se busca comprobar que el comportamiento de la erosión y escurrimiento se ve reflejado en las mediciones directas de sedimentos. De acuerdo con los resultados, se encontró que gran parte de la cuenca El Caracol se encuentra expuesta a una erosión severa. Por otro lado, con el análisis de la doble curva masa de cinco estaciones hidrométricas, se observa que desde el año 1992 el material de lavado en suspensión ha tendido a disminuir con el paso de los años.

Palabras clave: erosión, sedimentos, escurrimiento, cuenca, RUSLE

ABSTRACT

Soil erosion occurs naturally in both river basins and riverbeds due to the impact of raindrops and the subsequent runoff. In addition, human activities have accelerated erosive processes by modifying the soil cover and breaking the balance between erosion and sedimentation through the interruption of river flows for the construction of hydraulic facilities such as hydroelectric dams. In the present work, an analysis is made based on the Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and on data from hydrometric stations within the

basin studied for the period 1984-2006. The intention is to verify that the behavior of erosion and runoff is reflected in the direct measurements of sediments. According to the results, it was found that a large part of the El Caracol Basin is exposed to severe erosion. On the other hand, with the analysis of the double mass curve of five hydrometric stations, it is observed that from 1992 the suspension washing material tends to decrease over the years.

Keywords: erosion, sediments, runoff, basin, RUSLE

INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores problemas en los embalses es la reducción de su capacidad de almacenamiento debido a los sedimentos que se depositan en su interior. Esto sucede cuando la construcción de una presa rompe el equilibrio entre la erosión y la sedimentación con la interrupción del paso del río, lo que aumenta los niveles de agua y a menudo causa desbordamientos. Si la sedimentación es muy alta, existe la posibilidad de que se bloquee la tubería por donde se libera el agua, lo que reduce el tiempo de vida útil.

La erosión del suelo se da a través de un proceso de tres etapas: desprendimiento, transporte y deposición.

Comienza con el desprendimiento de las partículas del suelo causado por el impacto de las gotas de lluvia o el arrastre del agua. Estas partículas desprendidas son transportadas por el flujo de agua y se depositan cuando la velocidad del agua disminuye por el efecto de la pendiente, la cobertura del suelo o alguna obstrucción. El tamaño de las partículas transportadas es directamente proporcional a la velocidad del agua, mientras que la deposición está relacionada con la concentración y densidad del tamaño de los sedimentos. [1]

La intensidad de la lluvia y el volumen de escurrimiento son los principales determinantes de la erosión, sin embargo, la principal



causa de erosión en pendientes pronunciadas o en áreas con escasa cobertura vegetal es el flujo concentrado, cuya tasa se ve determinada por la capacidad de transporte. [2] Si se toman en cuenta las pendientes fuertes junto con precipitaciones torrenciales dentro de la cuenca, se generan grandes avenidas en tiempos muy cortos que, junto con la deforestación, provocan erosión y transporte de sedimentos considerables. Esta erosión trae consigo impactos ambientales, como la perturbación en la regulación del ciclo hidrológico, degradación de la cubierta vegetal, pérdida de biodiversidad, disminución de la vida útil de las obras hidráulicas, sedimentos en el lecho de los ríos y desestabilización de laderas, que ponen en riesgo a personas, viviendas e infraestructura. [3]

Muchos estudios han reportado que la precipitación, los cambios en la temperatura y las intervenciones humanas como medidas de conservación de suelos desempeñan un papel importante en las reducciones de escorrentía y la carga de sedimentos en los tramos medios del río [4]. Por otro lado, la deforestación, desertificación y urbanización provocan un aumento de las inundaciones, mayor ocurrencia de sequías y la degradación de suelo relacionada con la erosión hídrica. El aumento en la temperatura del aire provoca un aumento en el vapor de agua en la atmósfera, alterando la ocurrencia e intensidad de la precipitación, lo que influye en la erosión, debido a que ésta se da principalmente como resultado de eventos de precipitación extremos en un tiempo corto. Por tales motivos, es importante tomar en cuenta los impactos del clima y los cambios de uso de suelo en los procesos hidrológicos y el rendimiento de sedimento. [5]

En general, los modelos digitales de terreno interesan para conocer aspectos del relieve, tales como las elevaciones de cualquier punto, la pendiente, los desniveles y las áreas factibles de inundación, entre otros, por lo que son de gran utilidad en estudios del medio ambiente. En los últimos años los SIG han sido utilizados para desarrollar mo-

delos distribuidos espacialmente de los procesos hidrológicos de las cuencas a partir del modelo digital de elevaciones (MDE), mapas de vegetación y uso de suelos, entre otros. Estos modelos permiten la creación de escenarios que facilitan la toma de decisiones fundamentadas. [6] Debido al desarrollo a mediados del siglo XX en México, se propuso que el camino más viable para mejorar las condiciones de los espacios rurales era a través de la infraestructura hidroeléctrica para el aprovechamiento de las cuencas. El conjunto de estas presas para la generación de energía eléctrica construido sobre el río Balsas representa el segundo sistema hidroeléctrico más grande de México [7].

En México existe una enorme cantidad de ríos con dimensiones y características hidrológicas diferentes. Aunado a esto, las actividades humanas ha acelerado los procesos erosivos al modificar la cobertura del suelo; como consecuencia, en los cauces de los ríos se incrementa el transporte de sedimentos y, al aumentar la velocidad los escurrimientos o después de un evento fuerte de precipitación, la corriente los arrastra aguas abajo y deposita los materiales en lugares donde la misma corriente ya no puede transportarlos más. Este transporte de sedimentos muchas veces es la causa de desastres naturales [8].

En el presente trabajo se hace un análisis con base en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés) y datos de estaciones hidrométricas dentro de la cuenca de estudio para comprobar que el comportamiento de la erosión y escurrimiento se ve reflejado en las mediciones directas de sedimentos.

METODOLOGÍA

Descripción zona de estudio

Dentro de la cuenca de estudio se encuentra la Presa Hidroeléctrica El Caracol, formalmente llamada Presa Ingeniero Carlos Ramírez Ulloa. Es una presa ubicada en el cauce

del río Balsas, en el municipio de Apaxtla, Guerrero. Fue construida aguas arriba de El Infiernillo, sobre la sierra de Teloloapan, cuenta con una capacidad de 1 860 millones de m³ de agua, mide 50 km de largo y cuenta con una cortina de 126 m de elevación. Fue puesta en operación en 1986 y posee una central hidroeléctrica que tiene capacidad de generar 600 mega watts de energía eléctrica. La cuenca El Caracol se encuentra en ocho estados del país, su área se distribuye un 35.82 % por el estado de Puebla, 28.37 % por Guerrero, 15.36 % por Oaxaca, 8.66 % por Morelos, 5.29 % por Tlaxcala, 5.04 % por Toluca, 1.12 % por Veracruz y 0.33 % por la Ciudad de México (Fig. 1).

Estudio de Erosión de la cuenca

Para la evaluación de los procesos de erosión hídrica, se requiere el empleo de varios tipos de datos: climáticos, hidrológicos, to-

pográficos y botánicos, así como de tipo de suelo y prácticas de conservación. Mediante el procesamiento de estos datos se obtienen los parámetros de la USLE y se calcula la pérdida anual de suelo producida por la erosión hídrica sin estimar el transporte de sedimentos en los cauces [9].

La ecuación que describe el proceso de erosión es:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

Donde A es el promedio anual de pérdida de suelos (t/ha.año), R es el factor de erosividad de la lluvia (MJ.mm/ha.h.año), K es el factor de erosionabilidad del suelo (t.ha.h/MJ.mm.ha), L es el factor de longitud de la pendiente (adimensional), S es el factor de grado de la pendiente (adimensional), C es el factor de manejo de cultivos (adimensional) y P es el factor de prácticas mecánicas de control de erosión (adimensional).

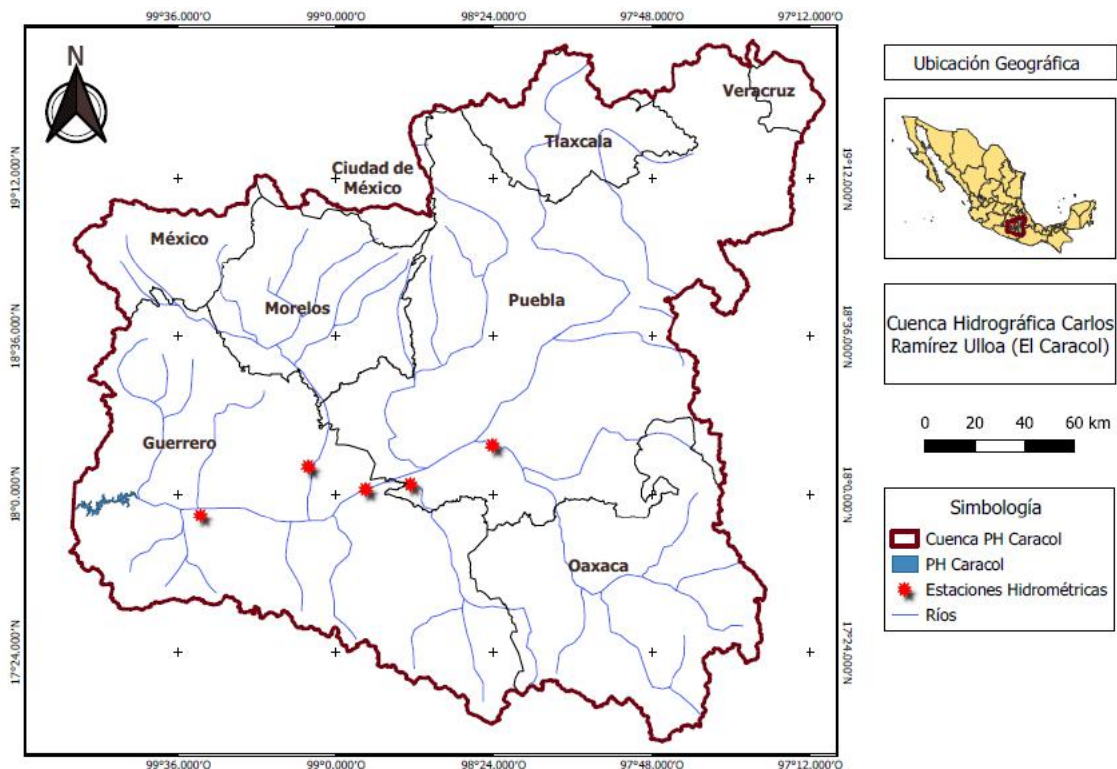


Figura 1. Ubicación Geográfica de la cuenca de estudio.



Factor R

El factor R es de tipo climático e indica el potencial erosivo de las precipitaciones. Para obtener este factor, primero se bajaron los datos de las estaciones climatológicas de CONAGUA y CFE que se encuentran en la zona de estudio; posteriormente, se hizo una ponderación con polígonos de Thiessen para ver el efecto de cada estación y su zona de influencia dentro de la cuenca. A partir de los datos de Precipitación Media Anual

(PMA) de las estaciones climatológicas se aplicaron las ecuaciones de erosividad (Fig. 2 y Tabla 1) asociadas con las 14 diferentes regiones de la república mexicana determinadas por Cortés Becerra (1997).

Según la regionalización nacional del Factor R, la cuenca cae dentro de dos regiones diferentes, por esta razón se utilizó la ecuación correspondiente a las zonas 5 y 8 de la tabla anterior para el cálculo del factor R.

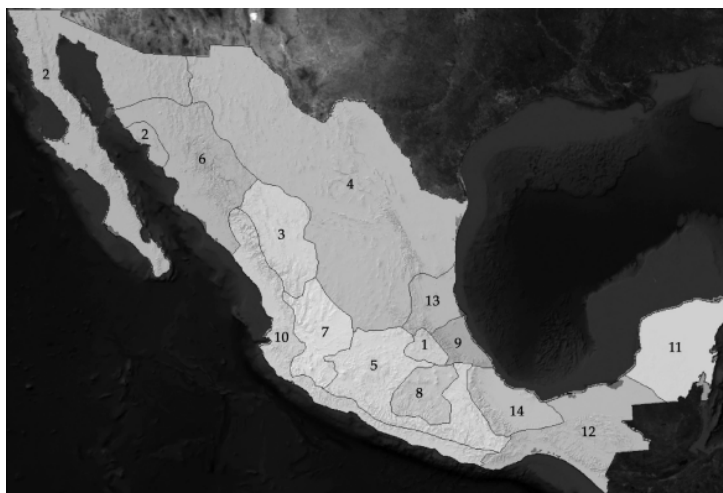


Figura 2. Mapa de regionalización nacional de factor R (Becerra, 1997).

Tabla 1. Ecuaciones regionalizadas para la república (Becerra, 1997).

Región	Ecuación	R ²
1	$1.2078 * P + 0.002276 * P^2$	0.92
2	$3.4555 * P + 0.006470 * P^2$	0.93
3	$3.6752 * P - 0.001720 * P^2$	0.94
4	$2.8959 * P + 0.002983 * P^2$	0.92
5	$3.4880 * P - 0.000188 * P^2$	0.94
6	$6.6847 * P + 0.001680 * P^2$	0.90
7	$-0.0334 * P + 0.0061 * P^2$	0.98
8	$1.9967 * P + 0.003270 * P^2$	0.98
9	$7.0458 * P - 0.002096 * P^2$	0.97
10	$6.8938 * P + 0.000442 * P^2$	0.95
11	$3.7745 * P + 0.004540 * P^2$	0.98
12	$2.4619 * P + 0.006067 * P^2$	0.96
13	$10.7427 * P - 0.001008 * P^2$	0.97
14	$1.5005 * P + 0.002640 * P^2$	0.95

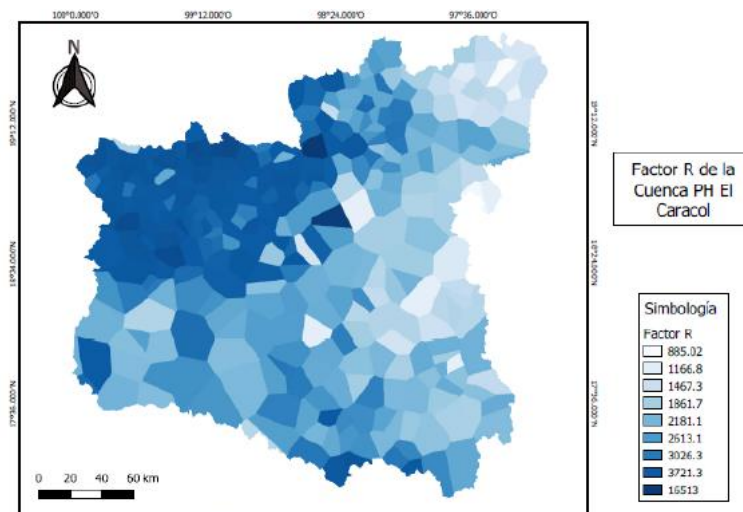


Figura 3. Mapa espacial del factor R de erosividad de la lluvia en la cuenca.

Factor K

La erosionabilidad del suelo es una compleja propiedad que se entiende como la facilidad con la cual el suelo se desprende por el salpicado, durante una lluvia o por flujo superficial.

Esta propiedad del suelo está relacionada al efecto integrado de la lluvia, el escurrimiento y la infiltración.

Para obtener este factor se utilizó la información edafológica más reciente del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI): Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250 000, Serie II (Continuo Nacional), Edición 2013.

De acuerdo con la clasificación de suelos del WRB (*World Reference Base for Soil Resources*) del tipo de suelo y de su textura (gruesa, media o fina), se asigna un factor K a cada tipo de suelo de la cuenca (Tabla 2).

Tabla 2. Factor K para los tipos de suelo dentro de la cuenca.

Suelo	Área (%)	Textura	Factor K
Acrisol	0.1	Media	0.04
Andosol	6.5	Media	0.04
Cambisol	7.7	Media	0.04
Castaozem	0.4	Media	0.04
Chernozem	0.1	Media	0.02
Feozem	6.0	Media	0.02
Fluvisol	1.0	Gruesa	0.026
Gleysol	0.0	Media	0.04
Litosol	18.8	Media	0.02
Luvisol	2.5	Media	0.04
Regosol	46.3	Media	0.04
Rendzina	5.2	Media	0.02
Solonchak	0.2	Fina	0.013
Vertisol	3.9	Fina	0.026
Xerosol	0.3	Media	0.079
Poblado	0.1	-	-
Cuerpo de agua	0.8	-	-

Cabe mencionar que en los cuerpos de agua se considera un valor igual a 1.0.

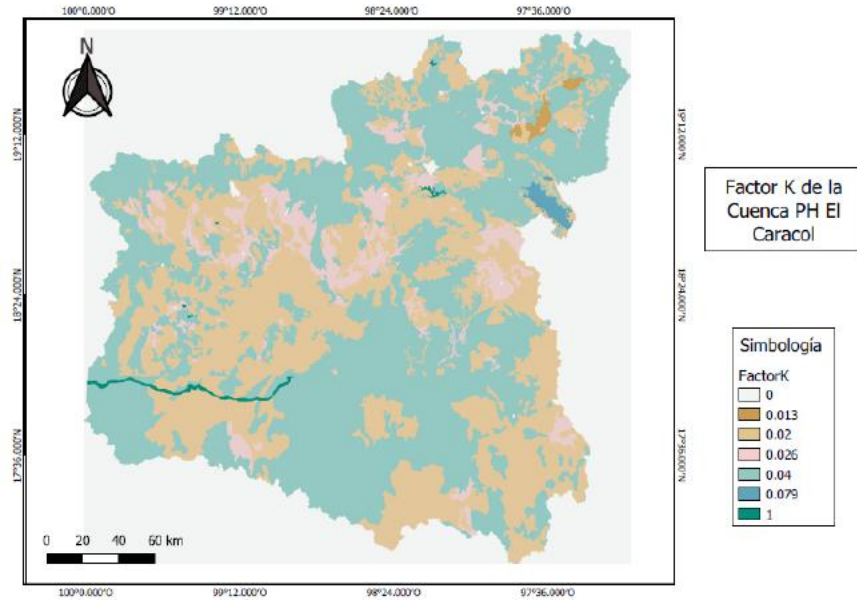


Figura 4. Mapa del factor K de susceptibilidad del suelo a la erosión en la cuenca.

Factor LS

El efecto de la topografía sobre la erosión está representado por los factores longitud (L) y grado de pendiente (S). Para la determinación de este factor se utilizó el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) escala 1:50 000 en su versión más reciente, proporcionado por INEGI. Para el caso de la cuenca, el cál-

culo del factor LS se llevó a cabo a partir del MDE, y con ayuda de la herramienta SAGA → *Terrain Analysis-Hydrology* → LS factor.

Un LS alto está asociado con los niveles donde se presentan las pendientes más pronunciadas y un valor bajo en las zonas de planicie (Fig. 5).

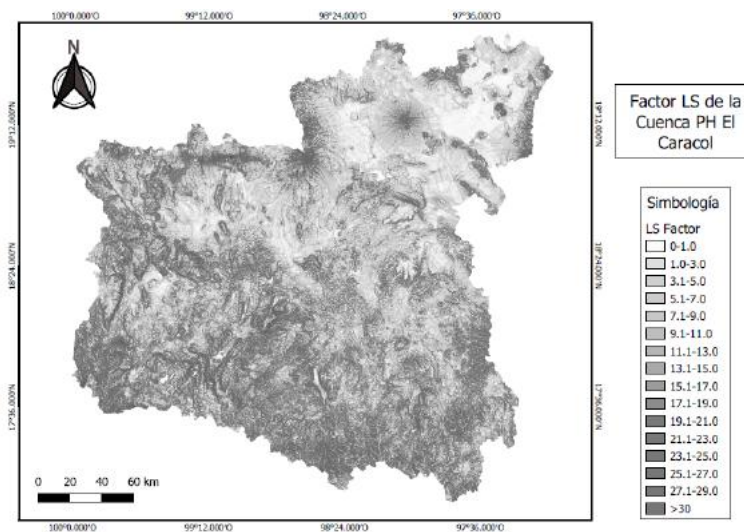


Figura 5. Factor topográfico LS que involucra el efecto de longitud y grado de pendiente para la cuenca.

Factor C

El valor de C es igual a 1 cuando el suelo se encuentra totalmente desprotegido y disminuirá a medida que haya una mejor cobertura vegetal sobre el terreno; para un suelo totalmente protegido se tendrá un valor muy cercano a cero. Para generar el mapa del fac-

tor C, se utilizaron los mapas de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI y se utilizó la tabla de factores para vegetación y/o uso de suelo de acuerdo con Montes-León *et al.* (2011), de Mapa Nacional de Erosión Potencial. En la Tabla 3 se presenta el valor C para cada tipo de vegetación y/o uso de suelo dentro de la cuenca.

Tabla 3. Valores de C según el Uso de Suelo y Vegetación para la cuenca.

Uso de Suelo y Vegetación	Área (%)	Factor C
Agricultura	39.2	0.75
Agua	0.2	1.00
Bosque	11.8	0.01
Chaparral	0.5	0.65
Matorral crasicaule	2.5	0.65
Palmar inducido	0.9	0.75
Pastizal cultivado	7.6	0.02
Pradera	0.2	0.05
Área sin vegetación	0.2	1.00
Selva baja caducifolia	2.3	0.50
Zona urbana	2.0	0.01
Vegetación secundaria	32.6	0.35

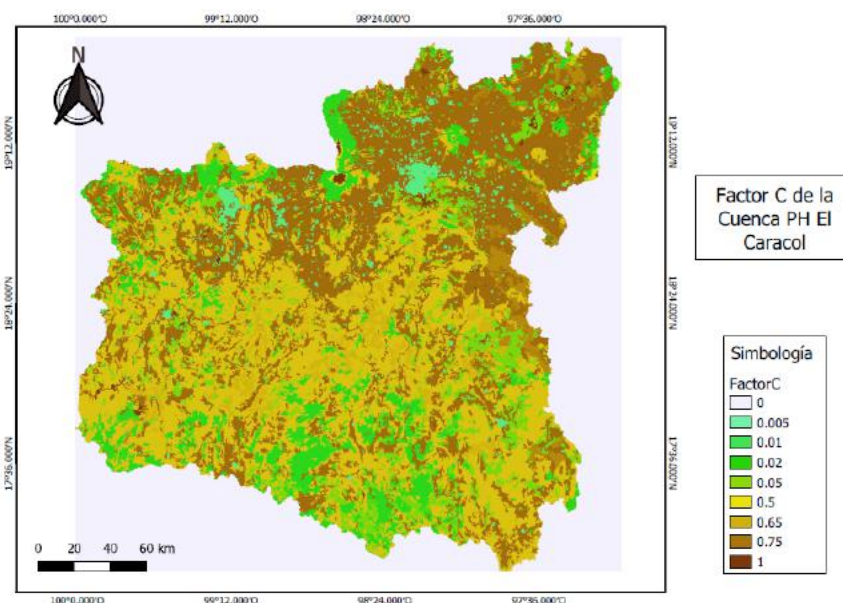


Figura 6. Mapa del factor C que involucra el tipo de cobertura en la cuenca.



Factor P

Este factor indica el efecto de las prácticas de conservación contra la erosión, como pueden ser las terrazas y el cultivo en contorno, entre otras. Los valores del factor P son adimensionales (0 - 1), donde un valor igual a la unidad implica que no se llevan a cabo prácticas de conservación [9].

Erosión

Una vez que se obtuvieron cada uno de los factores que conforman la USLE, se realizó el producto para obtener la erosión hídrica. Para estimar la erosión se realizó la multiplicación de los mapas en QGIS de los factores R, K, LS y C (Fig. 7).

Base de datos y análisis de los volúmenes de escurrimientos y sedimentos

Se recopiló información de cinco estaciones hidrométricas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), las cuales miden volúmenes de escurrimiento y de sedimentos para el periodo 1984-2006; la información de las estaciones hidrométricas de la CFE se pudo obtener a través de la colaboración y apoyo que brindó el personal técnico que labora en las Divisiones Hidrométricas con que cuenta el país. La ubicación de las estaciones hidrométricas que influyen en las subcuencas se muestra en la Fig. 8.

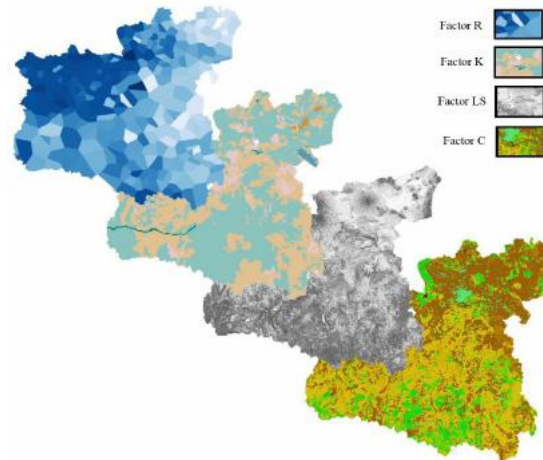


Figura 7. Multiplicación de los factores para el cálculo de la erosión.

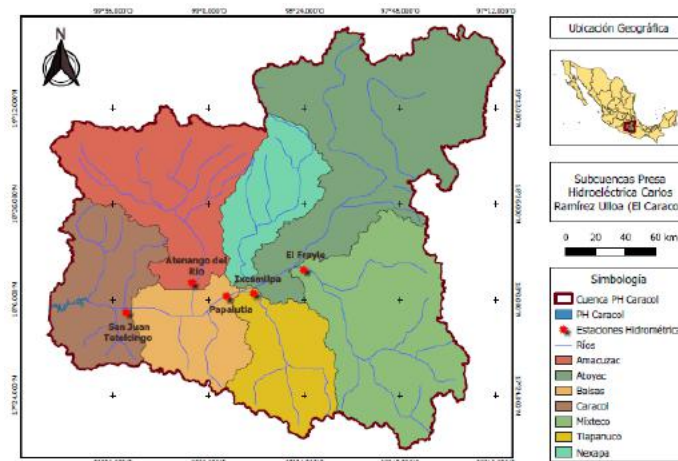


Figura 8. Ubicación de estaciones hidrométricas que se encuentran en las subcuencas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 9 se observa el Mapa de Erosión Hídrica, donde se encontró, de acuerdo con los resultados con la metodología descrita, que el 39.7 % del área de la cuenca El Caracol se encuentra expuesta a la ero-

sión severa, en la Tabla 4 se observa el resto de la clasificación. Los valores de la erosión obtenidos se dividieron de acuerdo con los Rangos de clasificación de la Erosión Hídrica propuestos por Montes-León *et al.* (2011), de Mapa Nacional de Erosión Potencial.

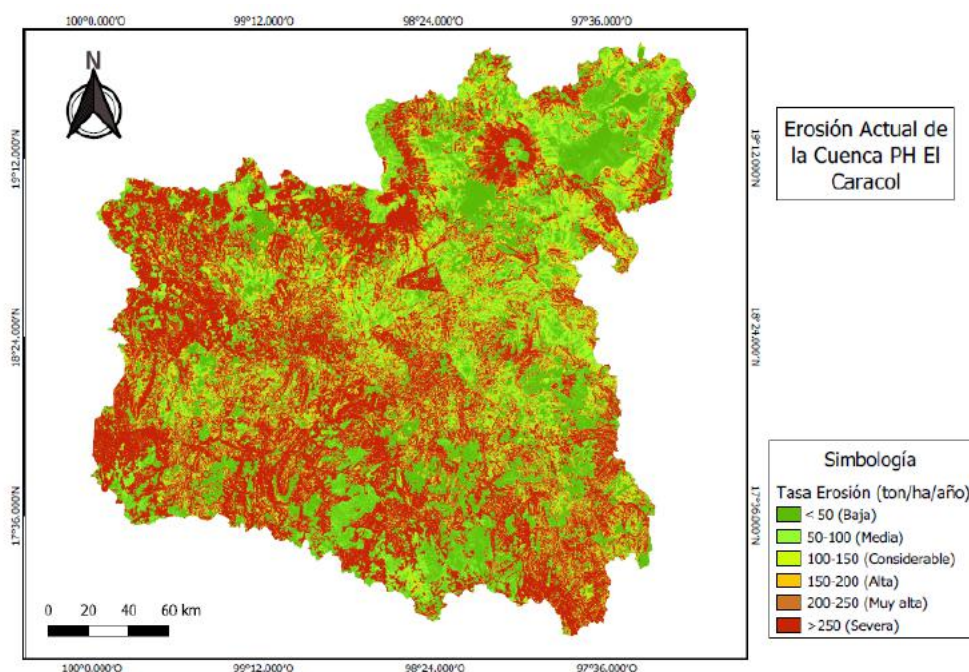


Figura 9. Mapa de erosión en la cuenca en condiciones actuales.

Tabla 4. Rangos de clasificación de la erosión hídrica.

Clasificación	Rango (ton/ha/año)	Área (%)
Baja	< 50	28.6
Media	50-100	11.4
Considerable	100-150	8.2
Alta	150-200	6.6
Muy Alta	200-250	5.5
Severa	> 250	39.7

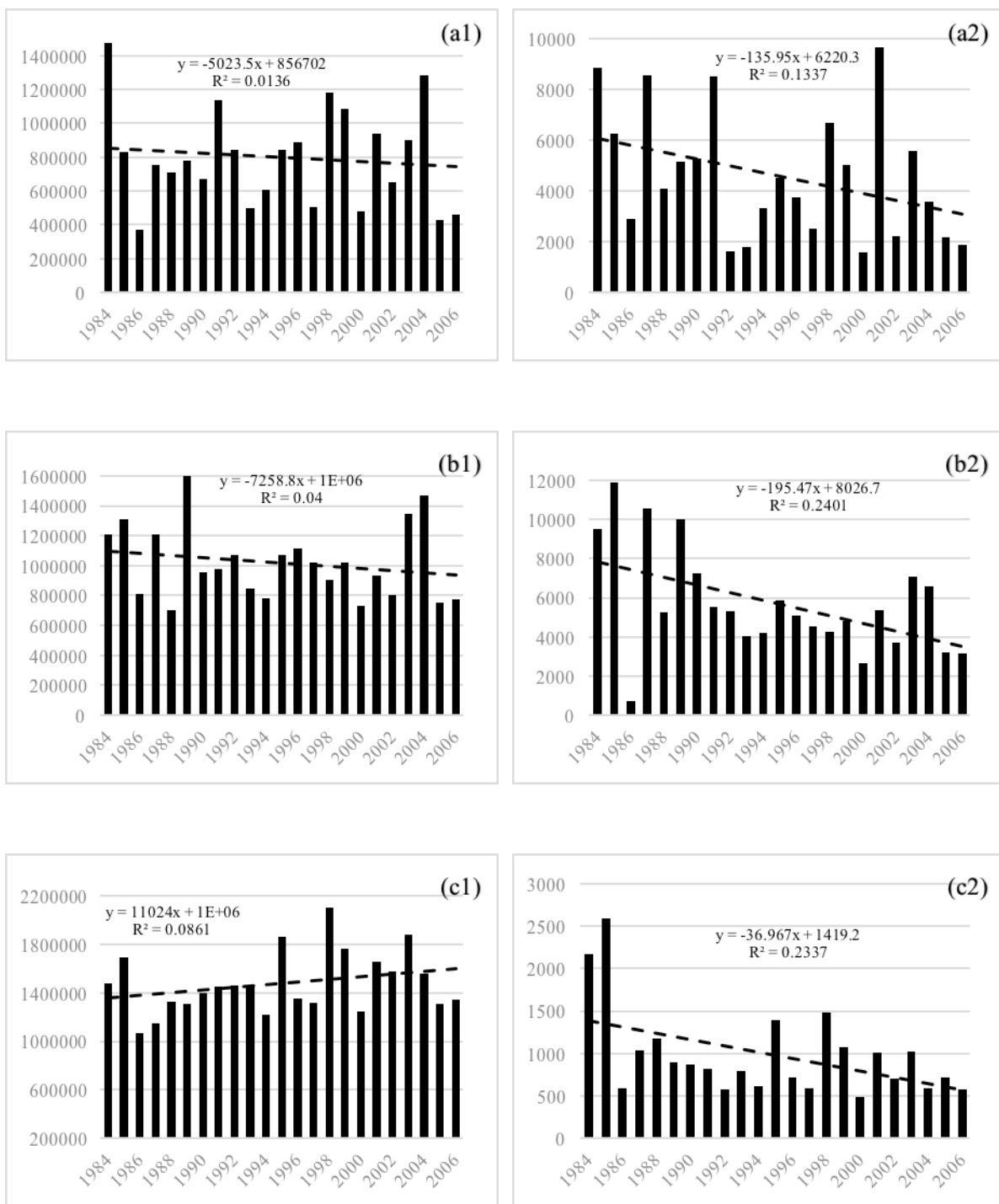


Figura 10. Volúmenes en miles de m³ de escurrimento y sedimentos de Estación Hidrométrica, periodo 1984-2006: a1. Esgurrimento El Frayle; a2. Sedimentos El Frayle; b1. Esgurrimento Ixcamilpa; b2. Sedimentos Ixcamilpa; c1. Esgurrimento Atenango del río; c2. Sedimentos Atenango del río.

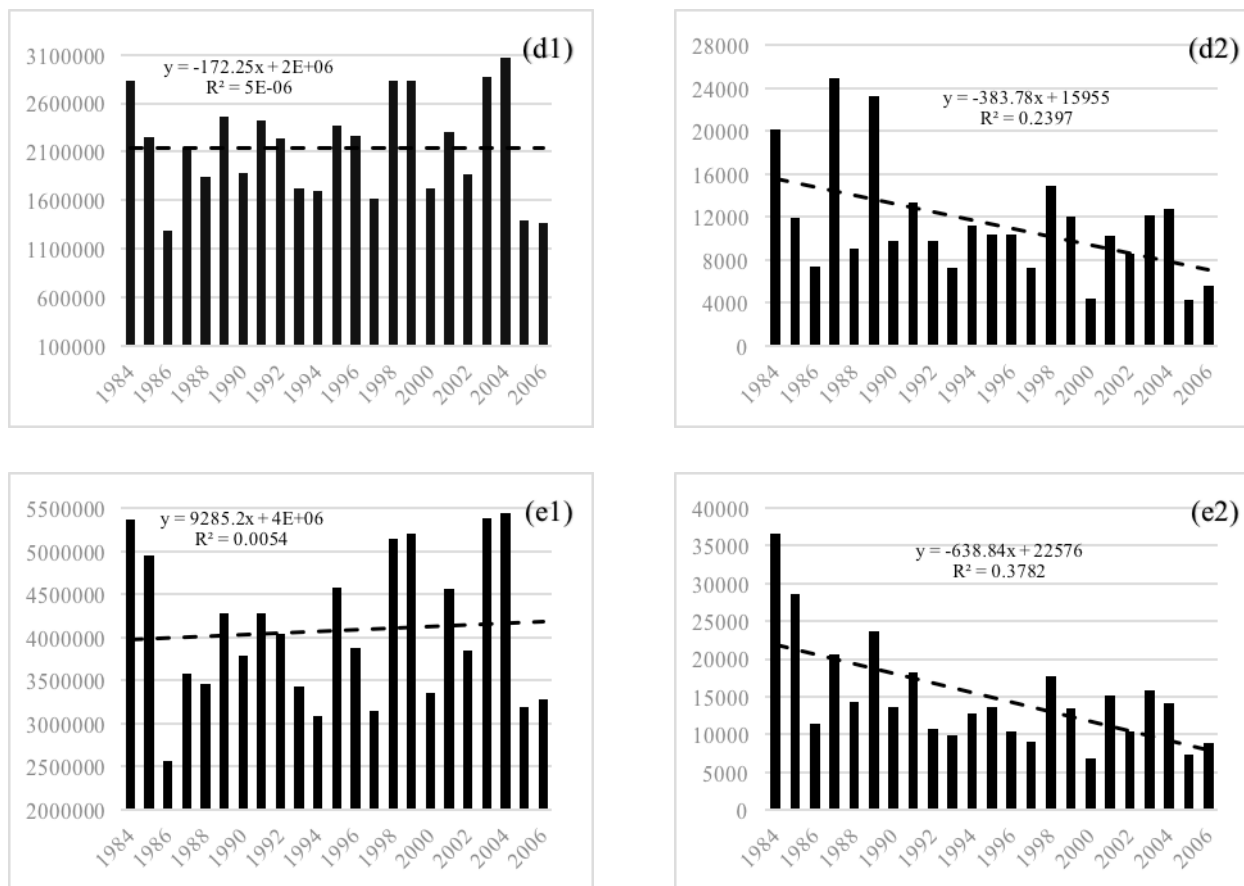


Figura 11. Volúmenes en miles de m³ de escurrimiento y sedimentos de Estación Hidrométrica, periodo 1984-2006: d1. Escurrimiento Papalutla; d2. Sedimentos Papalutla; e1. Escurrimiento San Juan Tetelcingo; e2. Sedimentos San Juan Tetelcingo.

Tabla 5. Factor de correlación para volúmenes de escurrimiento y sedimentos de las estaciones hidrométricas, periodo 1984-2006.

Estación	R ²	
	Escurrimiento	Sedimentos
El Frayle	0.0136	0.1337
Ixcamilpa	0.0400	0.2401
Atenango del río	0.0861	0.2337
Papalutla	5E-06	0.2397
San Juan Tetelcingo	0.0054	0.3782



De acuerdo con los datos de las estaciones hidrométricas, se observa que las pendientes de cambio son insignificantes en los escurrimientos, por tanto, puede considerarse que no hay cambios en los patrones de lluvia. Por el contrario, las pendientes de cambio de los volúmenes de sedimentos son decrecientes, indicador de que hay una disminución en la

tasa de erosión (Fig. 11 y Tabla 5). Otra forma de verificar la tendencia de la erosión a la disminución es de acuerdo con la doble curva masa de las cinco estaciones hidrométricas. Para todas las estaciones se observa que a partir del año 1992 el peso de material de lavado tiende a disminuir (Fig. 12).

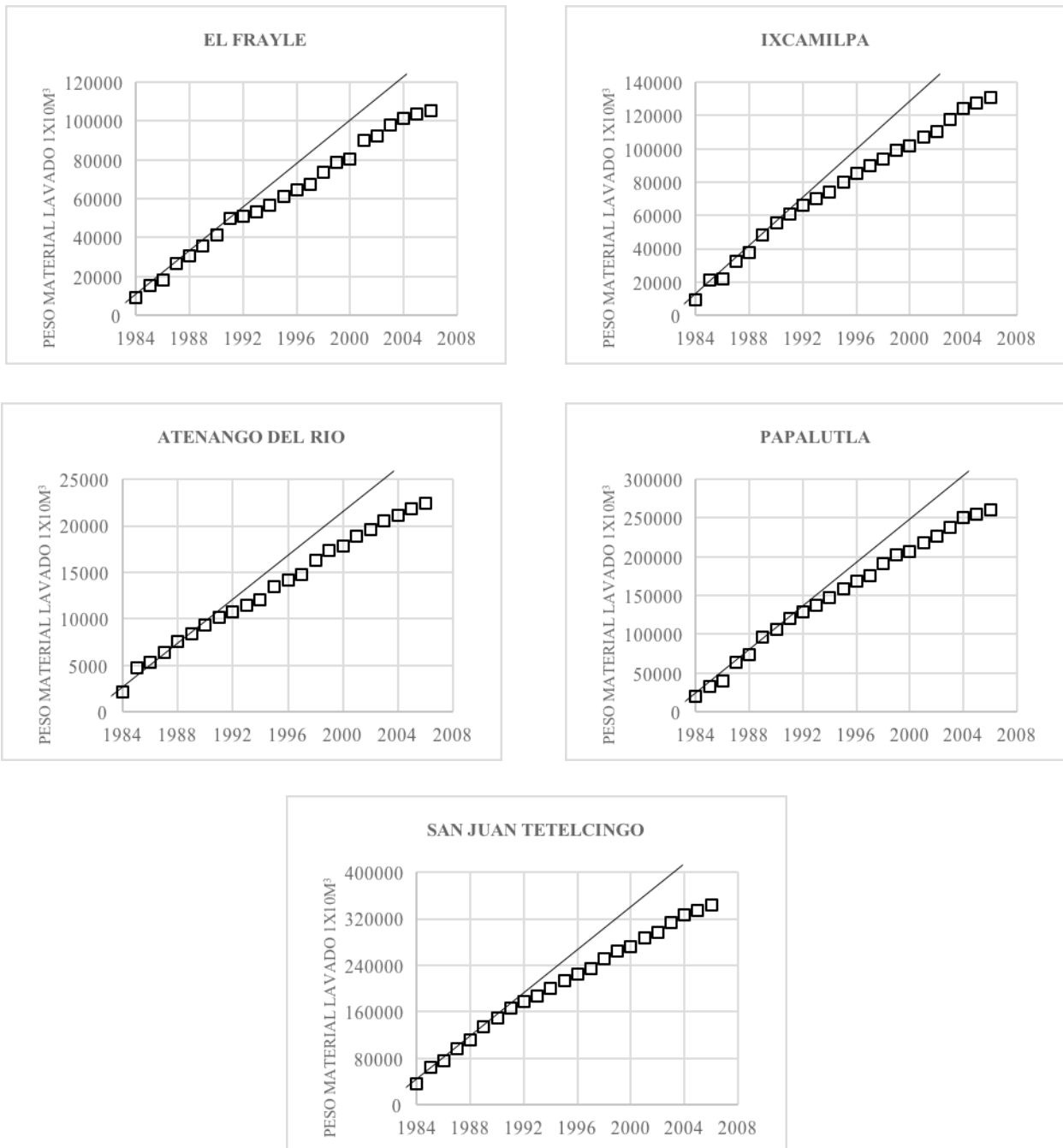


Figura 12. Doble curva masa de las estaciones hidrométricas, periodo 1984-2006.

Por otra parte, hay fenómenos hidrometeorológicos particulares, como los huracanes, que producen lluvias de gran intensidad por arriba de los valores históricos asociados a la variabilidad climática anual y tienen un gran potencial erosivo. Una intensa precipitación después del año de 1992 pudo haber ocasionado abundantes escurrimientos que ocasionaron una erosión laminar y arrastre significativo de todo tipo de material del suelo (arcilla, arena, rocas).

De acuerdo con el sistema meteorológico nacional, la temporada de huracanes de 1992 ha sido considerada como la más hipereactiva en la historia del Pacífico. Las costas del pacífico mexicano se vieron afectadas por el huracán Virgil (1992) y el huracán Calvin (1993).

De acuerdo a Matías (1998), el huracán Paulina en octubre de 1997 tuvo una extensión de la zona nubosa con diámetro de 650 km de N-S, abarcando los estados de Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Morelos, Puebla, Tlaxcala y Veracruz. En consecuencia, es posible que el impacto de este huracán ocasionara una erosión laminar, material de lavado, que se refleja en los resultados de RUSLE y en el desarrollo de sedimentación en el embalse del Caracol.

CONCLUSIONES

Para el periodo de estudio se observó una dicotomía de los escurrimientos; asimismo, se observó que los registros de material en las estaciones aguas arriba del embalse sufrieron una disminución significativa.

De la comparación con el mapa obtenido de erosión por RUSLE, podemos inferir que la mayoría de la cuenca presenta una erosión severa durante el transcurso de los años, razón por la cual el suelo disponible para ser erosionado se ha reducido, quizá en forma puntual por los impactos de los sucesos particulares generados por eventos hidrome-

teorológico particulares.

Los huracanes y ciclones son de los fenómenos naturales más destructivos, producen precipitaciones intensas que cuales arrastran y lavan todo tipo de material disponible; la cuenca ha sido impactada por numerosas tormentas y huracanes, siendo el huracán Paulina en 1997 el de mayor impacto por erosión hídrica, movimientos de masa y generación de sedimentos.

Otra clara evidencia de la disminución de la tasa de erosión en la cuenca es la alta deforestación y, posiblemente, zonas de contención de sedimentos aguas arriba.

Disponer del mapa de erosión hídrica para la cuenca ayuda a identificar las zonas donde es necesario implementar planes de manejo y conservación.

A su vez, es posible identificar las zonas más susceptibles de producir sedimentos que terminen en el fondo de los embalses, disminuyendo así su capacidad de almacenamiento.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación pudo llevarse a cabo gracias al apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y la Dirección de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Agradezco al M.I. Pascual Cristóbal Bernabé por el apoyo con la información de las estaciones hidrométricas.

Agradezco también al Geólogo Alexis Trasviña Carrillo por las asesorías brindadas para la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica.

REFERENCIAS

- [1] R. Lal, "Soil Degradation By Erosion," *Land degradation & development*, pp. 519-539, 2001.



[2] M. Hajigholizadeh, A. M. Melesse and H. R. Fuentes, "Transport Modelling in Shallow Waters: A Review on Approaches, Models and Applications," *Environmental Research and Public Health*, vol. 15, p. 518, 14 03 2018.

[3] J. C. Valencia Vargas, "Desarrollo de la región hidrológica del Balsas," *Tecnología y Ciencias del Agua*, pp. 81-87, 2015.

[4] P. Gao, X.-M. Mu, F. Wang and R. Li, "Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 15, pp. 1-10, 2011.

[5] Z. Depeng, X. Zongxue, Y. Wenyi , J. Shuangyan, X. Peiqing and R. Dachuan , "Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China," *Science of The Total Environment*, vol. 544, pp. 238-250, 15 02 2016.

[6] D. González Correa, *Estudio y modelación de los escurrimientos generados por el cambio de uso de suelo en la zona metropolitana de Querétaro*, 2016.

[7] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, "<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/376/diagnostico.html>," 2007. [Online].

[8] J. A. Sánchez Jiménez, *Creación de una base de datos y medición de sedimentos en los ríos de México*, 2007.

[9] M. A. L. Montes-León, E. M. Uribe-Alcántara and E. García-Celis, "Mapa Nacional de Erosión Potencial," *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. II, no. I, pp. 5-17, 2011.

[10] L. G. Matías Ramírez, "Algunos efectos de la precipitación del huracán Paulina en Acapulco, Guerrero," *Investigaciones Geográficas*, 1998.

