

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Estimación de producción de sedimentos en cuencas : Aplicación al río Apulco, México.
<i>Autor / Adscripción</i>	José Manuel Ramírez-León Universidad Nacional Autónoma de México Javier Aparicio Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 24(4): 145-157
<i>Fecha de publicación</i>	2009
<i>Resumen</i>	Se presenta una metodología para estimar la producción de sedimentos en cuencas, que combina el método de Kothyari et al. (1996) y el concepto de eficiencia de atrapamiento (Te). La metodología se probó en la cuenca alta del río Apulco, en el sureste de México, en el estado de Puebla, donde se ubica la presa La Soledad, y en ocho de sus subcuencas, contando cada cual con un embalse.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1184

Estimación de producción de sedimentos en cuencas. Aplicación al río Apulco, México

José Manuel Ramírez-León

Universidad Nacional Autónoma de México

Javier Aparicio

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Se presenta una metodología para estimar la producción de sedimentos en cuencas, que combina el método de Kothyari et al. (1996) y el concepto de eficiencia de atrapamiento (Te). El método utiliza la tasa de descarga de sedimentos (DR) y la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE). El DR se define como una función del área, pendiente y área forestada entre los segmentos isócronos. La USLE presenta dificultades para la obtención del factor de erosibilidad de lluvia (R) en México, debido al insuficiente número de estaciones pluviográficas. Por ello, se propone calcular R combinando los datos de una estación meteorológica automática (EMA) y estaciones climatológicas con registro de lluvia diaria acumulada, a través de un procedimiento de Monte Carlo. El método de Kothyari et al. (1996) relaciona la producción de sedimentos de una cuenca debido a una tormenta con curvas tiempo-área. Divide la cuenca en segmentos isócronos con igual tiempo de concentración (Tc). Supone que la pérdida de suelo del segmento aguas arriba descargará un cierto porcentaje de suelo en el segmento aguas abajo y así sucesivamente. Este proceso se expresa como una función del DR y la pérdida de suelo de cada segmento. La metodología se probó en la cuenca alta del río Apulco, en el sureste de México, en el estado de Puebla, donde se ubica la presa La Soledad, y en ocho de sus subcuencas, contando cada cual con un embalse.

Palabras clave: producción de sedimentos, erosión, USLE, factor R, cuenca, embalses.

Introducción

El azolvamiento reduce significativamente la capacidad de aprovechamiento de las presas de almacenamiento y regulación, altera la calidad del agua que contiene, genera inestabilidad estructural en la cortina y puede dejar fuera de servicio un embalse. Aproximadamente el 1% del volumen de almacenamiento se pierde en el mundo en cinco años debido al depósito de sedimentos (Marengo, 2001). El origen de los azolves está en los sedimentos suspendidos que lleva la corriente, que se generaron a partir de la erosión de la cuenca. Un cierto porcentaje de este material llegará al sistema de drenaje de la cuenca, por medio del cual será transportado y alcanzará la salida. Entonces, la erosión es directamente

proporcional a la producción de sedimentos de la cuenca (Brooks et al., 1997).

Los sedimentos, además de representar problemas para los embalses, también pueden depositarse sobre los cauces, ocasionando la elevación del fondo de los ríos, que genera inestabilidad y riesgo de inundaciones (Kramer et al., 1997). Por otro lado, las alteraciones en la dinámica de los sedimentos afecta directamente el desarrollo de la vida acuática, como es el caso de los peces, cuyo desove se ve obstaculizado, complicando su sobrevivencia, lo que, entre otros aspectos, impacta las economías locales de los pescadores (Stott y Mount, 2004).

Existe una gran diversidad de modelos para estimar la producción de sedimentos. Algunos de ellos usan

la medición directa de sedimentos y otros lo hacen mediante la modelación matemática. Estos últimos se dividen en métodos empíricos o de agrupación de variables, estocásticos y de simulación de procesos físicos (Simons y Sentürk, 1992). Su aplicación en México tiene diversas limitantes, ya que sólo se pueden aplicar algunos de los métodos de producción de sedimentos existentes. Los métodos con base en medición directa, tales como registro de descarga diaria de sedimentos, periodo de acumulación de carga de sedimentos por lapsos, método de la curva de descarga de sedimentos y duración de flujo, y curvas de producción de sedimentos y volumen de agua anual (USACE, 1995; Walling *et al.*, 1985), arrojan muy buenos resultados, por lo que son empleados por varias agencias, entre ellas el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América (*United States Army Corps of Engineers*, USACE) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos de América (*United States Geological Survey*, USGS), pero su aplicación no se ha generalizado en nuestro país debido a que las mediciones de sedimentos sobre los cauces son escasas. En cuanto a los métodos empíricos o de agrupación de variables, algunos fueron desarrollados localmente, por ejemplo, Anderson (1954); Branson y Owen (1970); Dendy y Bolton (1976); Flaxman (1972), y Tatum (1963), por lo que su extrapolación a México podría producir resultados poco confiables.

En el caso de las metodologías del tipo de la ecuación universal de pérdida de suelo (*Universal Soil Loss Equation*, USLE), por ejemplo: USLE (Wischmeier y Smith, 1965 y 1978), USLE-M (Kinnell y Risse, 1998), RUSLE (Renard *et al.*, 1997) y RUSLE2 (McCool *et al.*, 2004), su limitante principal para ser aplicados en México yace en que se requieren datos continuos de lluvia, es decir, de pluviómetros, cuando la red de pluviómetros en México es limitada. Por otro lado, estas series de ecuaciones fueron desarrolladas para estimar la pérdida de suelo para parcelas agrícolas, por lo que sólo consideran la erosión en una parcela, y desprecian el transporte y depósito de sedimentos sobre la cuenca. Entonces, al emplearlas a escala de cuencas, hay una tendencia a la sobreestimación. Para remediar esto, se pueden combinar las ecuaciones con las tasas de descarga de sedimentos (*DR*).

La MUSLE (Williams y Berndt, 1972) reemplaza el factor de lluvia (*R*) de la USLE, por lo que no se requiere de pluviómetro, y en cambio necesite el volumen de agua escurrido y su gasto pico. Estos últimos no siempre están disponibles, por lo que hay que estimarlos.

La limitante de los métodos estocásticos (e.g. Gangyan *et al.*, 2002) es que requieren series de datos de sedimentos para poder aplicarse con la precisión

apropiada. Esta misma limitante está presente en el método de redes neuronales artificiales (por ejemplo, Raghuvanshi *et al.*, 2006). Los métodos de simulación de procesos físicos, como WEPP (Flanagan y Nearing, 1995); SHETRAN (Summer y Walling, 2002); ANSWERS (Beasley *et al.*, 1980); EUROSEM (Morgan *et al.*, 1998), arrojan muy buenos resultados, pero requieren cuencas aforadas (caudal y sedimentos) y con años de registro, lo que limita su uso en nuestro medio.

Unos de los métodos de última generación son los que emplean radionúclidos ambientales (Zapata, 2002; Owens, 2006). Estos métodos estiman la erosión de la cuenca con base en la vida media del Cs-137 de las muestras de suelo. Su aplicación requiere de laboratorios especializados, equipo (espectrómetro de rayos gamma) y recursos humanos capacitados, lo que dificulta su aplicación en México. Por otra parte, el análisis de cada muestra es oneroso (alrededor de 700 dólares estadounidenses) y tardado (uno a dos días). Así por ejemplo, si se deben analizar cincuenta muestras de una cuenca de área modesta (100 km²), el costo sería del orden de 35 000 dólares estadounidenses y 75 días de duración sólo para el análisis, con un solo espectrómetro. La tecnología arroja muy buenos resultados, pero aún hace falta abaratarla y acelerarla.

Debido a la carencia de infraestructura en cuanto a mediciones de sedimentos en México y a que las tecnologías de última generación (radionúclidos ambientales) aún no son prácticas, se sugieren métodos de estimación de sedimentos que no impliquen mediciones sobre el cauce o que requieran pocas mediciones. Tal es el caso de los métodos que usan ecuaciones tipo USLE.

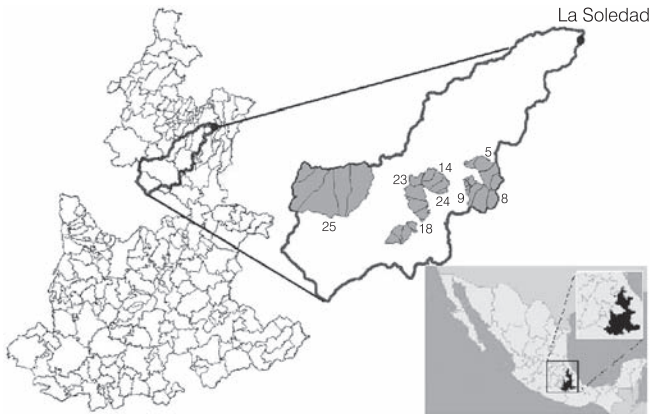
El método que se sugiere en este trabajo parte del concepto de Variación Temporal de Producción de Sedimentos de Kothyari *et al.* (1996), ya que requiere escasas mediciones de sedimentos sobre el cauce o volúmenes de azolve en los vasos, pero es aplicado a periodos extendidos y no sólo a una tormenta. Esta metodología describe de forma simple el proceso de erosión-transporte-depósito, relacionando la pérdida de suelo con la producción de sedimentos a través de tasas de descarga (*DR*). La pérdida de suelo se puede estimar por medio de cualquier ecuación del tipo USLE.

La metodología se probó en nueve cuencas en el sureste de México, en el estado de Puebla, en la cuenca alta del río Apulco (ilustración 1).

Metodología

Para estimar el azolvamiento que ocurrirá en un embalse, en este trabajo se combina el método de la

Ilustración 1. Ubicación de la cuenca alta del río Apulco, la presa La Soledad y las represas 5, 8, 9, 14, 18, 23, 24 y 25.



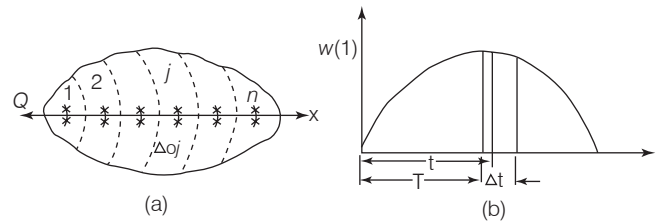
Variación Temporal de la Producción de Sedimentos de Kothyari *et al.* (1996), con el concepto de eficiencia de atrapamiento (Te) de sedimentos en embalses. El primero sirve para estimar la cantidad de carga suspendida que arrojará una cuenca y el segundo para determinar la cantidad de sedimento que será depositado en el embalse.

En el método de la Variación Temporal de Producción de Sedimentos se usa la curva tiempo-área (ilustración 2) de una cuenca para obtener la variación de carga de sedimentos suspendidos que llevará la corriente durante una tormenta, simplificando el proceso de erosión al no estudiar la erosión (*interrill, rill y gully*), transporte y depósito por separado. El método supone que una cierta cantidad de material erosionado en el segmento aguas arriba será depositado en el segmento aguas abajo, y consecuentemente una parte de la suma del material erosionado en el segmento aguas abajo y el material depositado del segmento aguas arriba será depositado en el siguiente segmento. La tasa de descarga (DR) se determina como una función del área, pendiente y área forestada, la cual es calibrada con datos de campo de la salida de la cuenca.

Entonces se requiere dividir la cuenca en n segmentos de igual tiempo de concentración (isócronas) a lo largo del cauce principal, numerando de la salida de la cuenca hacia aguas arriba (ilustración 2). La pérdida de suelo en cada segmento se puede estimar usando cualquier versión de la *USLE*. Para estimar el material desprendido de cada segmento isócrono que será descargado en el siguiente se recurre al DR definido por Kothyari *et al.* (1996):

$$DR_j = C_1 \frac{A_j}{A_{j-1}} + C_2 \frac{Ls_j}{Ls_{j-1}} + C_3 \frac{FA_j}{FA_{j-1}} \quad (1)$$

Ilustración 2. Diagramas que describen el concepto de curvas tiempo-área (Chow, 1988).



Donde j es el número de segmento tiempo-área; C_1 , C_2 y C_3 , coeficientes que se suponen constantes para cada cuenca durante las distintas tormentas; A_j , el área del segmento j ; Ls_j , la pendiente del segmento j , y FA_j es el área forestada del segmento j . El valor de la tasa Ls_j/Ls_{j-1} se toma como la unidad cuando la pendiente del segmento $j-1$ es menor que la del segmento j . Para el segmento más alejado de la salida, la relación A_j/A_{j-1} es tomada también como la unidad.

Entonces, la cantidad total de producción de sedimentos (Se_i) para una tormenta aislada i se expresa como:

$$Se_i = DR_1 Se_{i1} + DR_1 DR_2 Se_{i2} + DR_1 DR_2 DR_3 Se_{i3} + \dots + DR_1 DR_2 DR_3 \dots DR_n Se_{in} \quad (2)$$

Donde Se_{ij} es la pérdida de suelo correspondiente al segmento j , para la tormenta i (Kothyari *et al.*, 1996). La relación que tiene mayor influencia en DR (ecuación (1)) es la de área entre segmentos, seguida de las relaciones de pendiente y área forestada, por lo que C_1 tendrá un peso mayor, luego C_2 y posteriormente C_3 , siendo estos tres factores menores que la unidad. C_2 y C_3 se pueden expresar en función de C_1 como (Kothyari *et al.*, 1996):

$$C_3 = \frac{C_1}{2} \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{C_3 + C_1}{2} \quad (4)$$

Para la obtención del coeficiente C_1 se requiere calibrar el modelo, por lo que es necesario relacionar una tormenta en la cuenca con la carga de sedimentos que salen de ésta. En la aplicación que corresponde a este trabajo, gracias a que se contó con batimetrías en cada una de las cuencas, se obtuvieron los coeficientes con base en el material depositado en cada embalse.

Puesto que la acumulación de Se_i de las m distintas tormentas en el año constituye la producción de

sedimentos total anual (S_a) para cada cuenca y que los DR son invariables para cada segmento de cuenca, en este trabajo se usa la suma de pérdida de suelo anual por segmento j (Se_k), a fin de agilizar el procedimiento, en la forma:

$$S_a = \sum_{i=1}^m Se_i \quad (5)$$

$$Se_1 + Se_2 + \dots + Se_m \quad (6)$$

$$= \left(DR_1 Se_{11} + DR_1 DR_2 Se_{12} + \dots + DR_1 DR_2 \dots DR_n Se_{1n} \right) + \\ + \left(DR_1 Se_{21} + DR_1 DR_2 Se_{22} + \dots + DR_1 DR_2 \dots DR_n Se_{2n} \right) + \dots \\ \dots + \left(DR_1 Se_{m1} + DR_1 DR_2 Se_{m2} + \dots + DR_1 DR_2 \dots DR_n Se_{mn} \right)$$

$$Se_k = \sum_{i=1}^m Se_{ij} \quad (7)$$

$$S_a = DR_1 Se_{k1} + DR_1 DR_2 Se_{k2} + DR_1 DR_2 DR_3 Se_{k3} + \dots \\ + DR_1 DR_2 \dots DR_n Se_{kn} \quad (8)$$

Te es la diferencia relativa entre la carga de sedimentos entrante al embalse (qs_{in}) y la carga de sedimentos saliente (qs_{out}), con respecto a qs_{in} :

$$Te = \frac{qs_{in} - qs_{out}}{qs_{in}} \quad (9)$$

$$SR = Te S_a \quad (10)$$

Entonces, una vez que se tiene S_a (ecuación (8)), se multiplica por Te (ecuación (9)) y se obtiene la cantidad de sedimento que es retenido en cada presa para cada año, en unidades de masa (SR , ecuación (10)).

Las batimetrías producen estimaciones de volumen de material azolvado y compactado, por lo que para poder compararlo con lo calculado en la ecuación (10) se recurre al método de Lane y Koelzer (1953). Estos autores presentaron la ecuación siguiente para evaluar la variación de la densidad de los sedimentos (d_m) con respecto al tiempo:

$$d_m = d_1 + B \log \theta \quad (11)$$

donde d_1 y B son constantes, y θ es el número de años que lleva el sedimento en el fondo. Los valores de d_1 y B

varían según se trate de arcilla, limo o arena, y depende de si el material ha estado siempre sumergido. La ecuación no hace distinción alguna entre los estratos, por lo que se considera toda la masa con la misma densidad.

El modelo de pérdida de suelo $USLE$ (ecuación (12)) de Wischmeier y Smith (1965 y 1978) sigue siendo ampliamente utilizado. Las revisiones que ha sufrido, por ejemplo en la $RUSLE$ (Renard *et al.*, 1997) y la $RUSLE2$ (Foster *et al.*, 2003), siguen analizando el problema de manera similar, sólo que han afinado los factores y organizado en bases de datos para Estados Unidos. En el medio mexicano se sigue utilizando la $USLE$, al carecer de una base de datos nacional:

$$A = R K L S C P \quad (12)$$

La pérdida de suelo A es directamente proporcional a los factores de erosibilidad por lluvia R , de suelo K , longitud y pendiente del terreno LS , cobertura vegetal C y prácticas de conservación de cultivo P . K se puede obtener en México por medio de las cartas de edafología del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) y el método de la FAO (Figueroa *et al.*, 1991), sus unidades son: (t ha h/ha MJ mm). En este trabajo, LS se calculó para cada píxel a partir de un archivo *raster* de la zona, en el cual se determinó la longitud y pendiente para cada punto a través de un algoritmo y las ecuaciones (13) a (17) de Wischmeier y Smith (1978). Estos dos factores son adimensionales. Para C , también adimensional, se estimó un valor para las zonas forestadas con base en tablas y experiencia (Cortés, 2008), mientras que para las zonas agrícolas se calculó para maíz. Los factores K , C y P toman valores entre 0 y 1. El factor P se tomó como la unidad, ya que no se contó con información precisa acerca de qué tipo de prácticas de conservación se llevaban a cabo en la cuenca, pudiendo afectar los resultados.

Para estimar R se requieren datos de pluviómetro, pero debido a la falta de éstos, y al contar con una amplia red de estaciones climatológicas con registro de lluvia de 24 h, se optó por combinar los datos de éstas con una EMA a través de un procedimiento de Monte Carlo. Lo anterior se llevó a cabo determinando la tormenta característica de la EMA (ilustración 3) y su respectivo análisis de frecuencias acumuladas para la duración de las tormentas (ilustración 4), con base en los registros de lluvia de la EMA (siete años de registro cada diez minutos). Para el desarrollo de la tormenta característica, se delimitaron éstas al haber 6 h o más con menos de 13 mm de lámina de lluvia, a menos que su intensidad máxima en 15 min sobrepasara 24 mm/

Ilustración 3. Tormenta característica de la EMA TL01 utilizada en la metodología.

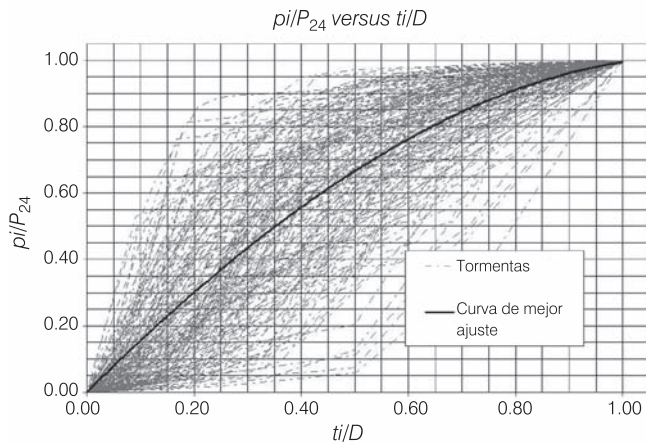
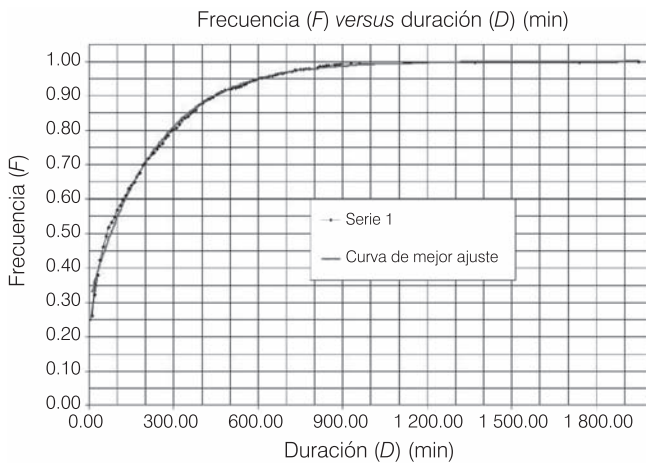


Ilustración 4. Distribución de frecuencia acumulada de tormentas de la EMA TL01 empleada en la metodología.



h, como lo indica Wischmeier y Smith (1965 y 1978), pero eliminando los lapsos sin lluvia, obteniendo una curva más esbelta (ilustración 3). Mientras que para el análisis de frecuencias acumuladas se delimitaron las tormentas sólo si había 6 h o más sin lámina de lluvia, con el fin de incorporar el $E/30$ de los días con precipitación menor a 13 mm (ilustración 4).

El procedimiento de Monte Carlo analiza la distribución de variables aleatorias generando números aleatorios. Entonces, debido a que la duración de la tormenta es un evento aleatorio, se modela el fenómeno de esta manera, a fin de asignarle una duración a un día con registro de lluvia. Esto se lleva a cabo de la siguiente forma: para cada día con registro de lluvia en la estación climatológica con precipitación P_{24} se supone una sola tormenta; por medio de un generador

de números aleatorios se genera un número entre 0 y 1, que toma el lugar de la frecuencia F en el análisis de frecuencia acumulado (ilustración 4), obteniendo una duración D ; esta duración, junto con P_{24} , toman su lugar en la tormenta característica (ilustración 3), dándole dimensiones al gráfico, haciendo posible determinar el incremento de lámina de lluvia para cada instante y así obtener R por la metodología de Wischmeier y Smith (1978) (ecuaciones (20) a (23)).

El área de aplicación de cada estación climatológica se determinó por polígonos de Thiessen (e.g. Aparicio, 2004). El proceso se repite para cada día de lluvia un número suficiente de veces, a fin de poder identificar una tendencia, por lo que se repitió mil veces para cada día de lluvia.

Resultados

Se analizaron las represas denominadas 5, 8, 9, 14, 18, 23, 24, 25 y la presa La Soledad, en la cuenca alta del río Apulco. Las cuencas se delimitaron con la ayuda del modelo digital de elevación del terreno (tamaño del píxel 30x30m de INEGI); se determinó la pendiente del cauce principal y se obtuvo el tiempo de concentración (T_c) por el método de Kirpich (e.g. Aparicio, 2004), dividiéndose cada cuenca en segmentos isócronos (ilustración 5).

Del modelo digital de elevación se obtuvo un archivo *raster* y de éste, la elevación de cada píxel. Por medio de un algoritmo se determinó la dirección y el desnivel para donde escurría cada uno, pudiendo tener una longitud de la pendiente de 30 o 42.43 m. Entonces, al conocer el desnivel y la longitud de la pendiente, se obtiene el ángulo de inclinación (θ), por lo que se aplicó la metodología de la *USLE* para cada píxel mediante las siguientes ecuaciones (Wischmeier y Smith, 1965 y 1978; Figueroa *et al.*, 1991):

$$L = \left(\frac{l}{22.1} \right)^m \quad (13)$$

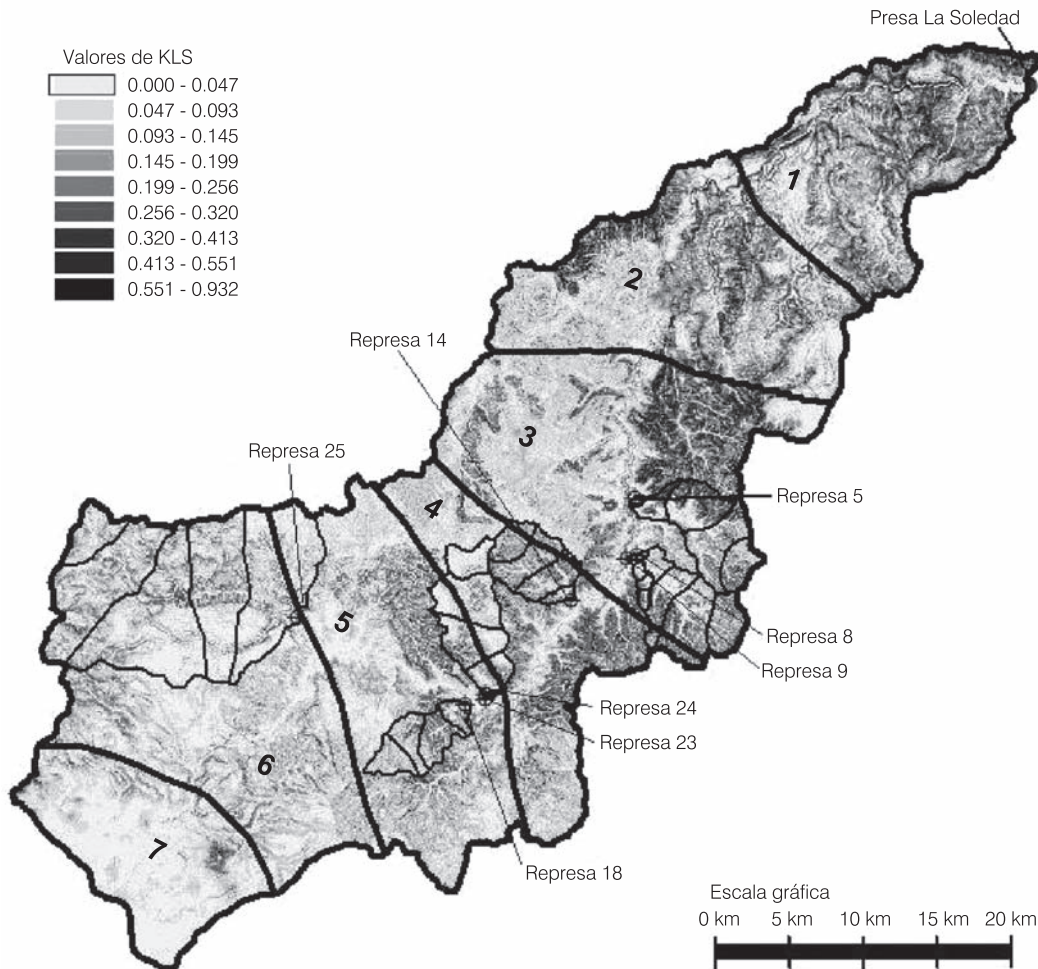
$$m = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (14)$$

$$\beta = \frac{\text{sen } \theta / 0.0896}{3(\text{sen } \theta)^{0.8} + 0.56} \quad (15)$$

$$S = 10.8 \text{ sen } \theta + 0.03 \quad \theta < 5.14^\circ \quad (16)$$

$$S = 16.8 \text{ sen } \theta + 0.50 \quad \theta \geq 5.14^\circ \quad (17)$$

Ilustración 5. Cuenca alta del río Apulco. Se muestra la distribución de represas, sus isócronas y los valores de los factores KLS calculados por píxel.



Donde l es la longitud de la pendiente; θ , el ángulo de inclinación; S , el factor de pendiente; L , el factor de longitud de la pendiente; nótese que m y β están en función de θ .

Para determinar K se empleó el método de la FAO (Figuroa *et al.*, 1991), que proporciona valores de erosionabilidad de suelo con base en la unidad geológica del suelo y su textura (gruesa, media o fina). La unidad de suelo y textura para cada zona de la cuenca se obtuvo de las cartas de edafología del INEGI. En la ilustración 5 se muestran las cuencas estudiadas con sus valores de KLS para cada píxel de 30x30, además de la distribución de los segmentos de área isócronas. Nótese que el primer segmento indica la salida de la cuenca.

R constituye el factor de peso de la $USLE$ y su cálculo se obtuvo de la combinación de la tormenta característica (ecuación (19) e ilustración 3), distribución de tormentas de la EMA TL01 (ecuación (18) e ilustración 4) y el procedimiento de Monte Carlo:

$$F = -1.086 e^{(-0.002498 D)} + 1.09 \quad (18)$$

$$RMSE = 0.01528$$

$$\frac{p_i}{P_{24}} = -0.143 \left(\frac{t_i}{D}\right)^3 - 0.4616 \left(\frac{t_i}{D}\right)^2 + 1.5985 \left(\frac{t_i}{D}\right) \quad (19)$$

$$R^2 = 0.8626$$

Siendo F la frecuencia acumulada, $0 < F < 1$, y D la duración de la tormenta. Por su parte p_i es la lámina de lluvia acumulada en el instante t_i y P_{24} es la lámina de lluvia en 24 h. Entonces se supone una tormenta para cada día de lluvia, por lo que para cada día con registro de la estación climatológica se genera un número aleatorio, el cual entra en la ecuación (18) como F y encuentra D . Luego se pasa a la ecuación (19), donde conocemos de antemano P_{24} ; se resuelve para p_i , pudiendo variar de $0 \leq p_i \leq P_{24}$ y $0 \leq t_i \leq D$.

Una vez que se determina p_i , se puede obtener el incremento de lámina de lluvia (Δp_i) para un intervalo de tiempo, su intensidad y la intensidad máxima en 30 min de la tormenta ($I/30$). Estas variables se requieren para emplear las ecuaciones de Wischmeier y Smith (1978), y obtener R para una tormenta cualquiera (ecuaciones (20) a (23)):

$$R = \sum_{i=1}^m EI_{30} \quad (20)$$

$$E = \sum_{j=1}^n e_j p_j \quad (21)$$

$$e_j = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I_j \quad I_j < 76 \text{ mm/h} \quad (22)$$

$$e_j = 0.283 \quad I_j \geq 76 \text{ mm/h} \quad (23)$$

En las ecuaciones anteriores, I_j es la intensidad de la lluvia en el intervalo j (mm/h); e_j , la energía cinética para el intervalo de tiempo j (MJ/ha mm); $\Delta p_i = p_j$, la lámina de lluvia en el intervalo de tiempo j (mm); E , la energía cinética total de la tormenta (MJ/ha), y R es el factor de erosibilidad de la lluvia o índice de erosibilidad anual (MJ mm/ha h año).

Una vez que se obtuvo el $EI/30$ para un día, se repitió el proceso mil veces y se obtuvo un promedio. Este promedio se acumuló con el resto de los promedios de los días del año y se obtuvo R (ecuación (20)).

El factor de erosibilidad de la cobertura vegetal (C) se obtuvo a partir de las cartas de uso del suelo de la serie I y II de INEGI, identificando las zonas agrícolas o forestales con su respectivo tipo de vegetación. En el caso forestal, se recurrió a un experto en la materia (Cortés, 2008), quien proporcionó valores aproximados de C para cada tipo de vegetación, los cuales coincidieron con los requerimientos estimados de Wischmeier y Smith (1978). Para las zonas agrícolas, se calculó C variando la pérdida relativa de suelo a través de las etapas de crecimiento del cultivo. La pérdida relativa de suelo de cada etapa fue afectada

por su R relativo correspondiente, constituyendo la sumatoria de estos productos el C anual (Wischmeier y Smith, 1965 y 1978). El cultivo dominante en la cuenca alta del río Apulco es el maíz. Sus fechas de siembra y de cosecha son 1° de abril y 1° de octubre, aproximadamente. La principal técnica de cultivo es el barbecho con vertedora y se remueven los residuos; su productividad es baja, aunque también se emplea maquinaria, aumentando su productividad ligeramente (SAGARPA-Puebla DDR 2 y 3, 2008). Para tales características de cultivo se considera la pérdida relativa de suelo adaptada a México (Figueroa *et al.*, 1991); contando con la distribución de R para cada año, se obtuvo C anualmente.

Al tener R , K , L , S y C se obtiene la pérdida de suelo (A , ecuación (12)) que constituirá la erosión para cada segmento isócrona (Se_k). Conociendo el área, pendiente promedio y área forestada de la isócrona, se pueden proponer valores para C_1 . Con C_1 se obtienen C_2 , C_3 (ecuaciones (3) y (4)), valores de DR_j (ecuación (1)); entonces se aplican las ecuaciones (8) y (10) para obtener Sa y SR . Tal resultado (SR) se acumula y se compara contra el más reciente dato de material sedimentado, transformando unidades de volumen a masa por medio de la ecuación (11), variando C_1 hasta obtener el menor error posible.

Para lograr los valores de $d1$ y B de la ecuación (11) de todos los embalses, se contó con 26 muestras de azolves de la presa La Soledad (JICA y CFE, 1993). Éstas se analizaron, determinando el porcentaje de arena, limo y arcilla de cada una. Posteriormente se obtuvo un promedio general para todas las muestras. Para arcilla fue el 18.84%, para limo 41.97% y para arena 39.19%. Los valores de $d1$ fueron 0.48, 1.04 y 1.49; para B , 0.26, 0.09 y 0, respectivamente. Cuando se tiene una mezcla de diferentes tipos de suelo se emplea la siguiente ecuación para obtener la densidad representativa (d_{sed}) para todo el embalse, en lugar de realizar un promedio ponderado (USACE, 1995):

$$d_{sed} = \frac{1}{\left(\frac{F_{clay}}{d_{clay}}\right) + \left(\frac{F_{silt}}{d_{silt}}\right) + \left(\frac{F_{sand}}{d_{sand}}\right)} \quad (24)$$

Donde d_{sed} será la densidad representativa de los sedimentos; F_{clay} la fracción de arcilla; d_{clay} la densidad de arcilla; F_{silt} la fracción de limo; d_{silt} la densidad de limo; F_{sand} la fracción de arena; y d_{sand} la densidad de arena. Al variar las densidades con respecto a los θ años, se obtendrá un d_{sed} para cada año de consolidación.

Cuadro 1. Relación de embalses con sus áreas, tiempos de concentración, número de isócronas, valores calculados de C_1 , C_2 , C_3 y sus tasas de descarga (DR).

Embalse	Área (ha)	T_c (h)	Núm. isócronas	C_1	C_2	C_3	DR_1	DR_2	DR_3	DR_4	DR_5	DR_6	DR_7
Represa 5	2 925	1.47	5	0.052	0.039	0.026	0.117	4.942	0.291	0.140	0.080		
Represa 8	3 475	1.14	5	0.086	0.064	0.043	0.193	0.713	15.456	0.366	0.137		
Represa 9	238	0.56	4	0.128	0.096	0.064	0.288	1.577	0.337	0.376			
Represa 14	2 181	0.69	4	0.148	0.111	0.074	0.333	1.126	0.406	0.258			
Represa 18	1 917	0.94	4	0.064	0.048	0.032	0.145	4.630	0.122	0.214			
Represa 23	3 125	1.42	4	0.116	0.087	0.058	0.260	0.344	6.056	0.145			
Represa 24	3 135	1.46	4	0.129	0.097	0.065	0.290	0.375	6.752	0.161			
Represa 25	16 883	2.55	5	0.191	0.143	0.096	0.430	0.365	0.540	0.389	0.190		
Presa La Soledad	144 539	13.4	7	0.107	0.080	0.054	0.241	0.293	0.309	0.166	0.253	0.349	0.093

Cuadro 2. Represas 5 y 8. Cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculada S_a y el azolve en el embalse.

Embalse	Año	S_a (t)	S_a acumulado (t)	T_e	SR (t)	Azolve (m^3)	$dsed$ (t/m^3)	Azolve (t)	Error %
Represa 5	1976	7 001.18							
	1977	2 875.98							
	1978	5 721.85							
	1979	11 358.62							
	1980	14 133.62							
	1981	20 230.30							
	1982	11 120.76	72 442.31	0.67	48 536.35	44 246.00	1.09	48 238.00	0.62%
Represa 8	1977	7 098.14							
	1978	3 982.68							
	1979	18 163.91							
	1980	74 192.09							
	1981	61 810.82							
	1982	36 052.64	201 300.28	0.72	144 936.20	162 181.00	1.09	176 813.41	-18.03%
	1983	16 361.89							
	1984	53 499.46							
	1985	51 384.94							
	1986	35 375.02	357 921.59	0.72	257 703.54	220 925.00	1.12	248 474.89	3.71%
1987	41 761.79	399 683.38	0.72	287 772.03	254 474.00	1.13	287 780.57	0.00%	

Los valores calibrados de C_1 , C_2 y C_3 , y los DR_i para los distintos embalses se muestran en el cuadro 1.

Aunque el concepto de las tasas de descarga de sedimentos (DR) es que sólo una fracción del material erosionado es transportado ($DR < 1$), en algunas ocasiones éstos resultaron mayores que la unidad ($DR > 1$). Lo anterior debido a que algunos segmentos no contaban con área forestada, pero al calibrar el

modelo se ajustaron los DR , reproduciendo la producción de sedimentos de la cuenca.

En los cuadros 2 a 6 se muestran los resultados de la cantidad de sedimento retenido en cada embalse. La columna 1 muestra el año, siendo la primera celda el año de construcción y la última el año de la última batimetría que se posee; la columna 2 corresponde a la producción de sedimentos calculada por año (S_a)

Cuadro 3. Represas 9 y 18. Cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculada Sa y el azolve en el embalse.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Embalse	Año	Sa (t)	Sa acumulado (t)	Te	SR (t)	Azolve (m ³)	dsed (t/m ³)	Azolve (t)	Error %
Represa 9	1978	146.5							
	1979	666.52							
	1980	2 730.08							
	1981	2 273.17							
	1982	1 328.27	7 144.54	0.65	4 643.95	1 435.00	1.06	1 522.60	205.00%
	1983	601.64							
	1984	1 967.25	9 713.43	0.65	6 313.73	2 821.00	1.09	3 075.52	105.29%
	1985	1 830.86	11 544.29	0.65	7 503.79	6 760.00	1.1	7 441.94	0.83%
Represa 18	1980	11 951.96							
	1981	11 192.96							
	1982	4 457.02	27 601.94	0.44	12 144.85	3 600.00	1.01	3 624.10	235.11%
	1983	4 890.22							
	1984	5 975.98	38 468.14	0.44	16 925.98	18 942.00	1.06	20 098.33	-15.78%
	1985	9 314.04	47 782.18	0.44	21 024.16	19 542.00	1.08	21 052.92	-0.14%

Cuadro 4. Represas 14, 23 y 25. Cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculada Sa y el azolve en el embalse.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Embalse	Año	Sa (t)	Sa acumulado (t)	Te	SR (t)	Azolve (m ³)	dsed (t/m ³)	Azolve (t)	Error %
Represa 14	1980	16 023.23							
	1981	14 531.32	30 554.55	0.35	10 694.09	10 631.00	1.01	10 702.17	-0.08%
Represa 23	1984	19 521.75	19 521.75	0.38	7 418.26	11 547.00	0.95	10 914.70	-32.03%
	1985	35 594.70	55 116.44	0.38	20 944.25	20 824.00	1.01	20 963.40	-0.09%
Represa 25	1987	54 465.73	54 465.73	0.52	28 322.18	30 000.00	0.95	28 357.22	-0.12%

Cuadro 5. Represa 24. Cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculada Sa y el azolve en el embalse.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Año	Sa (t)	Sa acum. (t)	Represa 23			Represa 24						
			Te	SR (t)	(3) - (5) (t)	Te	SR (t)	Azolve (m ³)	dsed (t/m ³)	Azolve (t)	Error %	
1986	48 670.88	48 670.88	0.38	18 494.94	30 175.95	0.54	16 295.01	22 922.00	0.95	21 666.81	-24.79%	
1987	48 899.08	97 569.97	0.38	37 076.59	60 493.38	0.54	32 666.42	32 342.00	1.01	32 558.50	0.33%	

en toneladas métricas (ecuación (8)); en la columna 3 se acumula Sa para los años en que hay batimetrías; la columna 4 consiste en el valor calculado de la eficiencia

de atrapamiento (Te) (JICA y CFE, 1993); la columna 5 corresponde al sedimento que es retenido en la presa (SR) en unidades de masa (ecuación (10)); la columna

Cuadro 6. Presa La Soledad. Cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculada Sa y el azolve en el embalse.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Año	Sa (t)	Sa acum. (t)	Azolve represas (t)	(3) - (4) (t)	Te	SR (t)	Azolve (m³)	dsed (t/m³)	Azolve (t)	Error %
1962	1.20E+06									
1963	1.62E+06									
1964	2.47E+06									
1965	2.17E+06									
1966	3.31E+06									
1967	2.45E+06									
1968	1.83E+06									
1969	3.00E+06									
1970	1.98E+06									
1971	2.88E+06									
1972	2.45E+06									
1973	3.49E+06									
1974	4.78E+06									
1975	3.15E+06									
1976	2.52E+06									
1977	1.50E+06	4.08E+07		4.08E+07	0.70	2.84E+07	3.00E+07	1.15	3.47E+07	-18.25%
1978	2.70E+06									
1979	3.20E+06									
1980	2.56E+06									
1981	3.85E+06									
1982	2.60E+06									
1983	2.33E+06									
1984	3.82E+06									
1985	2.09E+06									
1986	2.47E+06									
1987	9.54E+05									
1988	2.19E+06	6.96E+07	6.66E+05	6.89E+07	0.65	4.44E+07	3.65E+07	1.19	4.33E+07	2.58%
1989	3.00E+06									
1990	2.10E+06	7.47E+07		7.40E+07	0.63	4.62E+07	3.77E+07	1.19	4.48E+07	3.16%
1991	1.61E+06									
1992	2.95E+06	7.92E+07		7.86E+07	0.62	4.83E+07	4.05E+07	1.19	4.83E+07	-0.07%

6 se refiere al volumen de sedimentos (azolve) que ocupa en el almacenamiento, obtenido de batimetrías (JICA y CFE, 1993), que naturalmente tiene un cierto grado de incertidumbre debido a la naturaleza con que son realizadas; la columna 7 (Sed) expresa la densidad calculada para los azolves (columna 6), calculada a partir de muestras con las ecuaciones (24) y (11); la columna 8 expresa la masa de los azolves, producto de las columnas 6 y 7, por lo que su comparación con SR (columna 5) es posible; la columna 9 muestra el error (ecuación (25)):

$$\text{Error \%} = \left(\frac{SR - \text{azolve}}{\text{Azolve}} \right) 100 \quad (25)$$

La represa 24 se encuentra aguas abajo de la represa 23, difiriendo en muy poco el área de éstas (cuadro 1). Entonces, para calcular la producción de sedimentos y el material retenido (SR) en la represa 24 (cuadro 5), primero fue necesario calcular el material retenido en la represa 23 (columna 5), determinando el material que llegaría a la represa 24 (columna 6). Por medio del Te de la represa 24 (columna 7) se calculó el SR para dicha represa (columna 8); comparando contra el azolve en unidades de masa (columna 11), se obtuvo el error (columna 12) de la ecuación (25).

Por otro lado, para determinar la producción de sedimentos que arroja la cuenca de la presa La Soledad, se siguió el mismo procedimiento que en las represas 5,

8, 9, 14, 18, 23 y 25 (cuadros 2, 3 y 4), difiriendo en que las 25 represas existentes en la cuenca retuvieron 666 400 toneladas para 1987 (JICA y CFE, 1993). Entonces al total del sedimento producido acumulado (S_a) (columna 3), se le restó el material azolvado (columna 4), que se expresa en la columna 5, obteniéndose el material retenido (S_R) en la columna 7. El error se tiene al aplicar la ecuación (25) con las columnas 7 y 10.

Análisis

Analizando las represas 5, 14 y 25 (cuadros 2 y 4), notamos que obtienen resultados cuyos errores son menores que $\pm 1\%$, ello debido a que fueron calibradas con una sola batimetría, por lo que sus resultados se ajustaron siendo casi perfectos, los cuales no deben tomarse en cuenta para promediar el error. Las represas 9 y 18 (cuadro 3) adquirieron errores de hasta 205.00% y 235.00%, respectivamente, después de ocho y seis años de haber sido construidas, y empleando tres batimetrías para calibrar cada una. Tales errores, tan altos, los atribuimos a la imprecisión en las batimetrías y al cambio en el uso del suelo de las cuencas, las cuales no cuentan con registros al respecto para su evaluación, lo que pudo ocasionar un acelerado crecimiento en los azolves.

Las represas 8, 23 y 24 (cuadros 2, 4 y 5), y la presa La Soledad (cuadro 6) presentan resultados consistentes: errores de -18.03, -32.03, -24.79% y -18.25%, respectivamente, para 11, 2, 2 y 31 años de registro, y calibradas con 3, 2, 2 y 4 batimetrías, respectivamente. El error promedio, contando todos los años con batimetrías, resultó ser de 22.36%, pero eliminando los años usados para calibración, el error fue de 40.54%.

Conclusiones

Los resultados obtenidos de producción de sedimentos se consideran aceptables en vista del grado de aproximación de los datos de entrada.

La metodología propuesta para estimar el factor R arroja datos dentro del rango de otros autores en México, por ejemplo, Cortés (1991). Para su popularización se requiere verificarla respecto a los resultados que se obtendrían empleando la metodología original de Wischmeier y Smith (1965) en varias estaciones con información pluviométrica. Además, es necesario aplicar pruebas estadísticas para confirmar que los resultados forman parte del conjunto de datos esperados y determinar su grado de aproximación en cuanto a la metodología original.

La combinación de los elementos anteriores da como resultado la metodología que se propone. Resulta importante señalar que se recurre a este tipo de metodologías debido a la escasez de mediciones de sedimentos sobre el cauce en México, por lo que su aproximación siempre será inferior a aplicar alguna técnica con base en mediciones de sedimentos diarios. Se recomienda extender la red de mediciones de sedimentos y fomentar el desarrollo de tecnología de mediciones, a fin de abaratar y automatizar la medición de sedimentos, y con ello mejorar las aproximaciones de los cálculos, lo que dará lugar a estructuras óptimas, poblaciones seguras y con abasto de agua.

Recibido: 15/04/2009

Aprobado: 08/05/2009

Referencias

- ANDERSON, H.W. Suspended sediment discharge as related to the stream flow, topography, soil and land use. *American Geophysical Union*. Vol. 35, no. 2, 1954, pp. 268-281.
- APARICIO, J. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México, D.F.: Editorial Limusa, S.A. de C.V., 2004.
- BEASLEY, D.B., HUGGINS, L.F. and MONKE, E.J. Answers: a model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*. Vol. 23, no. 4, July-August, 1980, pp. 938-944.
- BRANSON, F.A. and OWEN, J.R. Plant cover, runoff, and sediment yield relationships on Mancos Shale in Western Colorado. *Water Resources Research*. Vol. 16, no. 3, 1970, pp. 783-790.
- BROOKS, K.N., FOLLIOTT, P.F., GREGERSEN, H.M. and DEBANO, L.F. *Hydrology and the Management of Watersheds*. Segunda edición. Ames, USA: Iowa State Press, 1997, pp. 151-163.
- CHOW, V.T. *Handbook of Applied Hydrology*. Austin, USA: McGraw-Hill Book Company, NJ. (1988).
- CORTÉS, H.G. *Caracterización de la erosibilidad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados*. Tesis de Maestría en Ciencias. Montecillo, México: Colegio de Posgraduados, 1991.
- CORTÉS, H.G. *Comunicación personal*. IMTA, 2008.
- DENDY, F.E. and BOLTON, G.C. Sediment yield-runoff-drainage area relationships in the United States. *Journal of Soil & Water Conservation*: Vol. 31, no. 6, Nov-Dec., 1976, pp. 264.
- FIGUEROA, B., CORTÉS, H.G., PIMENTEL, J., OSUNA, E.S., RODRÍGUEZ, J.M. y MORALES, F.J. *Manual de Predicción de Pérdidas de Suelo por Erosión Hídrica*. Montecillo, México: Colegio de Posgraduados, SAHR, 1991.
- FLANAGAN, D.C. and NEARING, M.A. *USDA- Water Erosion Prediction Project Hillslope Profile and Watershed Model*

- Documentation. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana 47907, 1995.
- FLAXMAN, E.M. Predicting sediment yield in Western United States. *Journal Hydraulics Division, Proceedings American Society of Civil Engineers*. Vol. 98, no. HY12, December, 1972, pp. 2073-2085.
- FOSTER, G.R., YODER, D.C., WEESIES, G.A., MCCOOL, D.K.; MCGREGOR, K.C. and BINGER, R.L. *Revised Universal Soil Loss Equation Version 2*. Washington, D.C.: USDA-Agricultural Research Service, 2003.
- GANGYAN, Z., GOEL, N.K. and BHATT, V.K. Stochastic modelling of the sediment load of the upper Yangtze River (China). *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*. Vol. 47(S), August, 2002, pp. s93-s105.
- JICA y CFE. *Estudio de Factibilidad para la Rehabilitación de la C.H. Mazatepec*. México, D.F. y Tokio: Japan International Cooperation Agency y Comisión Federal de Electricidad, 1993.
- KINNELL, P.I.A. and RISSE, L.M. USLE-M: Empirical Modeling Rainfall Erosion through Runoff and Sediment Concentration. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 62, 1998, pp. 1667-1692.
- KOTHYARI, U.C., TIWARI, A.K. and SINGH, R. Temporal Variation of Sediment Yield. *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 1, no. 4, October 1996, pp. 169-174.
- KRAMER, R.A., RICHTER, D.D., PATTANAYAK, S. and SHARMA, N.P. Ecological and Economic Analysis of Watershed Protection in Eastern Madagascar. *Journal of Environmental Management*. Vol. 49, 1997, pp. 277-295.
- LANE, E.W. and KOELZER V.A. *Density of Sediments Deposited in Reservoirs. Report No. 5 of Study of Methods used in Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams*. Iowa: St.Paul, U.S. Engr. Dist. Sub-Office Hydr. Lab., Univ. of Iowa, 1953.
- MARENGO, H. Aplicación en modelos físicos de la remoción hidráulica de sedimentos. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XVI, núm. 1, enero-marzo de 2001, pp. 99-124.
- MCCOOL, D.K., FOSTER, G.R. and YODER, D.C. The Revised Universal Soil Loss Equation. Version 2. *ISCO 2004 - 13th International Soil Conservation Organization Conference - Brisbane, July, 2004*.
- MORGAN, R.P.C., TORRI, D., SMITH, R.E., GOVERS, G., POESEN, J.W.A., STYCZEN, M.E., QUINTON, J.N., CHISCI, G. and AUERSWALD, K. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A Dynamic Approach for Predicting Sediment Transport from Fields And Small Catchments. *Earth Surface Processes & Landforms*. Vol. 23, no. 6, Jun., 1998, p. 527.
- OWENS, P.N. *Soil Erosion and Sediment Redistribution in River Catchments: Measurement, Modeling and Management*. Wallingford, Oxfordshire, UK: CABI Publishing, 2006, p. XIII.
- RAGHUWANSHI, N.S., SINGHT, R. and REDDY, L.S. Runoff and sediment yield modeling using artificial neural networks: upper Siwane River, India. *Journal of hydrologic Engineering ASCE*. January-February, 2006, pp. 71-104.
- RENARD, K.G., FOSTER, G.R., WEESIES, G.A., MCCOOL, D.K. and YODER, D.C. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA-ARS. *Agriculture Handbook*. No. 703, 1997.
- SAGARPA-PUEBLA DDR 2 y 3. *Comunicación personal*. 2008.
- SIMONS, D.B. and SENTÜRK, F. *Sediment Transport Technology: Water and Sediment Dynamics*. Water Resources Publications, LLC. August 20, 1992, 495 pp.
- SUMMER, W. and WALLING, D.E. *Modelling Erosion, Sediment Transport And Sediment Yield. International Hydrological Programme, Technical Documents in Hydrology No. 60*. Paris: UNESCO, 2002.
- STOTT, T. and MOUNT, N. Plantation Forestry Impacts on Sediment Yields and Downstream Channel Dynamics in the UK: a Review. *Progress in Physical Geography*. Vol. 28, no. 2, 2004, pp. 197-240.
- TATUM, F.E. A new method of estimating debris-storage requirements for debris basins. *USDA-ARS Miscellaneous Publication*. No. 970, 1963, pp. 886-898.
- USACE. *Sedimentation Investigations of Rivers and Reservoirs, Engineer Manual 1110-2-4000*. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers 20314-1000, 1995.
- WALLING, D.E., HADLEY, R.F., LAL, R., ONSTAND, C.A. and YAIR, A. *Recent developments in erosion and sediment yield studies*. Paris: UNESCO, 1985.
- WILLIAMS, J.R. and BERNDT, H.D. Sediment yield computed with universal equation. *Journal of Hydraulics Division*. ASCE. Vol. 98, no. 12, 1972.
- WISCHMEIER, W.H. and SMITH, D.D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the rocky mountains. Guide for selection of practices for soil and water conservation. *Agriculture Handbook*. No. 282, USDA-ARS, 1965.
- WISCHMEIER, W.H. and SMITH, D.D. Predicting rainfall-erosion losses, a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook*. No. 537. USDA-ARS, 1978.
- ZAPATA, F. *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides*. Secaucus, USA: Kluwer Academic Publishers, 2002.

Abstract

RAMÍREZ-LEÓN, J.M. & APARICIO, J. *Estimation of sediment yield in watersheds. Application to the Apulco River, Mexico. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXIV, no. 4, October-December, 2009, pp. 145-157.*

A methodology is presented to estimate the sediment produced in watersheds and deposited in reservoirs by combining the method of Kothyari et al. (1996) and the concept of trap efficiency (Te). The method assesses the sediment yield through the sediment delivery ratio (DR) and the universal soil loss equation (USLE). The DR is computed as a function of the area, slope and forested area between isochronal segments. The USLE presents difficulties to evaluate the rainfall factor (R) in Mexico, due to the lack of a sufficiently dense pluviometer network. An alternative is therefore proposed to find R by using an automatic weather station and standard rain gauge stations, following a Monte Carlo procedure. The method of Kothyari et al. (1996) refers the output of sediments of a catchment area due to a storm with time-area curves and divides the watershed into isochronous segments with the same concentration time (Tc). It assumes that part of the eroded material of the segment upstream would be deposited in the segment downstream, and so on. The description of this process is expressed as a function of DR and the soil loss of each segment. The methodology was tested in Southeast Mexico in the upper Apulco River watershed, in the State of Puebla, where the La Soledad dam is located, and in 8 of its subwatersheds, each with a reservoir.

Keywords: *sediment yield, erosion, USLE, factor R, catchment area, reservoir.*

Dirección institucional de los autores:

M.I. José Manuel Ramírez-León

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus
Morelos
Facultad de Ingeniería
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
teléfono: + (52) (777) 329 3600, extensión 339
ramirezleon@iteso.mx

Dr. Javier Aparicio

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)
Coordinador de Hidrología
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
teléfono: + (52) (777) 329 3600, extensión 551
japaricio@tlaloc.imta.mx