



Guía de campo para el cálculo simplificado del aporte de sedimentos en una cuenca

Field guide for simplified estimation of sediment load in a watershed

Alfonso Gutierrez-Lopez^{1*}, Enrique Montoya Morado², Carlos Chávez García¹, Eusebio Jr. Ventura¹

*Autor de correspondencia

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recibido 29 Marzo 2022
Revisado 16 Abril 2023
Aceptado 2 Agosto 2023
Publicado 19 Octubre 2023

PALABRAS CLAVE

Pérdida de suelo, factor erosivo
tipo de suelo, cobertura vegetal,
factor de conservación.

KEYWORDS

*Soil loss, erosion factor, soil
type, vegetation cover,
conservation factor.*

Abstract

Soil loss in watersheds is a recurrent problem in most Latin American and Caribbean countries. Soil erosion is a challenge in the environmental management of water resources associated with the atmosphere-soil-water system. A detailed guide is presented for the calculation of the sediment contribution of a watershed, with a field work approach. The calculation procedure considering the Universal Soil Loss Formula is used. The procedure for estimating the rainfall erosion factor, the soil type factor, the length and slope of the terrain, as well as the vegetation cover and conservation factors are documented. The results of the field work in the Los Izotes river basin in the Nayarit Riviera in the Mexican Pacific are presented. The field work is illustrated with photographs, materials and technological developments.

Resumen

La pérdida de suelo en cuencas es un problema recurrente en la mayoría de los países de Latinoamérica y el Caribe. La erosión de los suelos es un reto en la gestión ambiental de los recursos hídricos asociados al sistema atmosfera-suelo y agua. Se presenta una guía detallada para el cálculo del aporte de sedimentos de una cuenca, con el enfoque de trabajo de campo. Se utiliza el procedimiento de cálculo considerando la Formula Universal de Pérdida de Suelo. Se documenta el procedimiento para estimar el factor erosivo de la lluvia, el factor de tipo de suelo, de longitud y pendiente de terreno; así como los factores de cobertura vegetal y de conservación. Se presentan los resultados del trabajo de campo en la cuenca del río Los Izotes en la Riviera nayarita en el Pacífico mexicano. Se ilustra el recorrido de campo con fotografías, materiales y desarrollos tecnológicos.

1 Water Research Center, International Flood Initiative, Latin-American and the Caribbean Region (IFI-LAC), Intergovernmental Hydrological Programme (IHP), Autonomous University of Queretaro 76010, Queretaro, Mexico. alfonso.gutierrez@uaq.mx

2 Facultad de Ingeniería, Pinal de Amoles, 76333 Querétaro, México. enrique.montoya@uaq.mx

1. INTRODUCCIÓN

La erosión y eventual pérdida de suelo de una cuenca tiene su origen en la fuerza del régimen de precipitación (intensidad) actuando sobre el suelo; desprendiendo, moviendo y transportando sus partículas a la salida de la cuenca. En este proceso ocurre un depósito de partículas, tanto a lo largo de su recorrido sobre el terreno, como a través de la densidad de corrientes de la cuenca. Si existe alguna estructura en este recorrido; el material será atrapado, depositado y a largo plazo compactado; siendo esto una de las causas principales de la disminución de capacidad en los embalses de las presas. Lo cual representa un grave problema en la actualidad, pues el costo de desazolvar un canal o de dragar el vaso de una presa, es alto y si de esto depende su correcto funcionamiento, se convierte en un costo de operación y no de mantenimiento como debería ser. La eficiencia de retención de un vaso depende enormemente de las características del sedimento y de la cantidad de flujo que circula por el embalse. La cantidad de material que llega al inicio del embalse es función del volumen de sedimentos transportados y de la velocidad de depósito de las partículas. Por otra parte, la velocidad de depósito depende de la forma y del tamaño de las partículas y de la viscosidad y composición química de las aguas del vaso (González y Rivera, 2008; Gottschalk, 1964). Si bien no siempre se trata de dimensionar la capacidad de retención de azolves de una presa como una gran obra hidráulica, existen proyectos a menor escala que requieren la cuantificación de los volúmenes de sedimentos que pueden generarse en sus cuencas de aportación. Por ejemplo zonas de recreación en donde la capacidad de los canales y fundamental o en zonas de cultivo en donde se pierden anualmente superficies importantes producto de la erosión de las márgenes de ríos. También es importante mencionar que las modificaciones que realiza el hombre al entorno de una cuenca repercuten directamente en el proceso atmósfera, agua, suelo, sedimentos (Xu, 2003). Asimismo, en zonas donde se requiere llevar a cabo alguna modificación de las condiciones naturales del río es importante considerar este aporte de sedimentos en el aspecto del balance fluvial del río y en la modificación que eventualmente pudieran ocurrir en su dirección, profundidad y ancho hidráulico. Con el objeto de seguir paso a paso la cuantificación del aporte de sedimentos debido al proceso de pérdida de suelo; se detalla a continuación

el procedimiento de referencia apoyado en la literatura especializada.

2. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO

Para describir este proceso se pueden identificar cuatro etapas generales. La primera es la (1) erosión o remoción de partículas de suelo, la cual se produce sobre la superficie de la cuenca y se caracteriza por la pendiente del terreno y la longitud que recorren las partículas. Se divide en cuatro fases principales: erosión laminar (desprendimiento y movimiento de pequeños granos de suelo); erosión en cisuras (direccionamiento de estos pequeños granos a través de pequeños canales); erosión de depresiones (los pequeños canales se convierten en cavidades permanentes en el suelo) y erosión en zanja (las cavidades se transforman en hondonadas incluso en verdaderas trincheras); una vez que las partículas se desprenden por acción directa de la lluvia (eventualmente por el viento) a éstas se les llama sedimentos. Esta primera etapa culmina cuando se entregan los sedimentos a un arroyo o cauce. Así la segunda etapa es el (2) transporte de sedimentos, el cual ocurre en dos formas: transporte de fondo (rodamiento o salto de partículas) y transporte en suspensión (comúnmente llamado material de lavado).

Cabe mencionar que los materiales más finos que se desprendieron del suelo forman el caudal en suspensión y en ocasiones pueden abandonar la cuenca sin ser depositados, puesto que se mueven como parte de un escurrimiento directo; mientras que los materiales gruesos se mueven lentamente y en cortas distancias por el fondo del río. Como tercera etapa se considera (3) el depósito el cual ocurre cuando el material pierde velocidad y por sus condiciones particulares de densidad y peso específico se precipita en el fondo y forma a través de los años la capa de azolves. La cuarta etapa es lo que se conoce como (4) consolidación o compactación de sedimentos y es tan importante determinar como cualquier otra etapa; en este caso es fundamental determinar el número de años que transcurren desde el depósito hasta la consolidación del material, pues después de cierto umbral de dureza es muy costoso y casi imposible extraer material ya solidificado (Gracia, 1997). Cabe mencionar que toda cuenca hidrológica tiene una dinámica propia en el movimiento de sedimentos asociada con su red de

drenaje, a las condiciones de precipitación normal y por eventos extremos, así como al escurrimiento directo que se produce por el proceso lluvia-escurrimiento dentro de ella. También es importante señalar que esta dinámica de movimiento se basa en el principio de continuidad y por lo tanto existe un equilibrio entre el régimen de depósito y el transporte de sedimentos. Sin embargo el fenómeno de erosión debe ser cuidadosamente estudiado pues todo cambio en el uso de suelo de la cuenca puede alterar este equilibrio y lo que normalmente ocurre es que al aumentar las superficies de suelo desnudo se provoca un mayor desprendimiento de partículas de suelo que transformado en sedimento ocasionan la pérdida de capacidad de obras hidráulicas. En algunos casos se reporta que la diferencia de este balance pudiera ser incluso del orden de los 15 millones de toneladas de material (Carson et al., 1999). Por lo anterior, es de suma importancia cuantificar anualmente el volumen de aporte de sedimentos, ya que de este valor depende la estabilidad de las márgenes y profundidad del lecho del río, la óptima operación de las obras hidráulicas que se construyan, la seguridad de las obras civiles y el mantenimiento periódico que requieren todas estas estructuras para su correcto funcionamiento (Gracia, 1997). En este trabajo de campo se presenta de manera sistemática y simple el cálculo del volumen anual de aporte de sedimentos para la cuenca del río Los Izotes, en Nayarit, México.

3. OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo de campo es estimar el volumen anual de sedimentos que llegarán al sitio del proyecto sobre el río Los Izotes, tomando en cuenta las condiciones de los años 2011-2012 de la cuenca hidrológica.

4. DATOS DISPONIBLES EN LA CUENCA DE LOS IZOTES

De acuerdo con el estudio hidrológico y los trabajos de campo realizados en el arroyo Los Izotes aguas arriba de la localidad San Francisco, Nayarit (figuras 1 y 2). Se resumen a continuación los datos básicos necesarios para calcular el volumen de aporte de sedimentos.

Datos topográficos

- Área total de la cuenca hasta el sitio de proyecto
AT= 40.81 km² (40.81 x106 m²)
- Área de vegetación densa (verde oscuro. Fig.2)
Avd= 34.00 km²
- Área de vegetación media (verde claro. Fig.2)Avm=
6.063 km²
- Área de cultivo agrícola pecuario (amarillo. Fig.2)
Aap= 0.755 km²
- Longitud del cauce principal L= 18,170 metros
- Pendiente topográfica equivalente S= 0.017 (1.7%)
- Desnivel máximo entre cotas Δh= 635 metros

Datos hidroclimatológicos

- Temperatura media anual T= 26 °C
- Precipitación media anual Hp= 1,076 mm
- Tiempo de concentración Tc= 2.94 horas
- Intensidad máxima en 30 minutos I30= 94 mm /h
- Condiciones medias de tormentas I3013 al año
- Caudal pico máximo Qp= 147.7 m³/s Vol.=
0.782x106 m³
- Caudal pico máximo en milímetros / hora

$$Qp = \frac{(147.7 \text{ m}^3 / \text{s})(1 \times 10^9 \text{ mm}^3)(3600 \text{ s})}{1 \text{ m}^3 \text{ 1 h}}$$

$$= 5.3172 \times 10^{14} \text{ mm}^3 / \text{h}$$

$$Qp = \frac{5.3172 \times 10^{14} \text{ mm}^3 / \text{h}}{40.81 \times 10^{12} \text{ mm}^2} = 13.0 \text{ mm} / \text{h}$$
- Volumen de escurrimiento directo en milímetros
Vol.= (0.782x106m³)/(40.81 x106m²)
Vol.= 0.01916 m = 19.16 mm

5. PÉRDIDA DE SUELO

Como inicio de los cálculos y con objeto de tener una idea rápida de la magnitud de los volúmenes. Se emplea el procedimiento sugerido por el Departamento de Conservación de Suelos de Estados Unidos. Este volumen inicial se considera directamente proporcional al área de la cuenca (Strand, 1977; Gottschalk, 1964). Los cálculos respectivos se muestran a continuación (tabla 1).

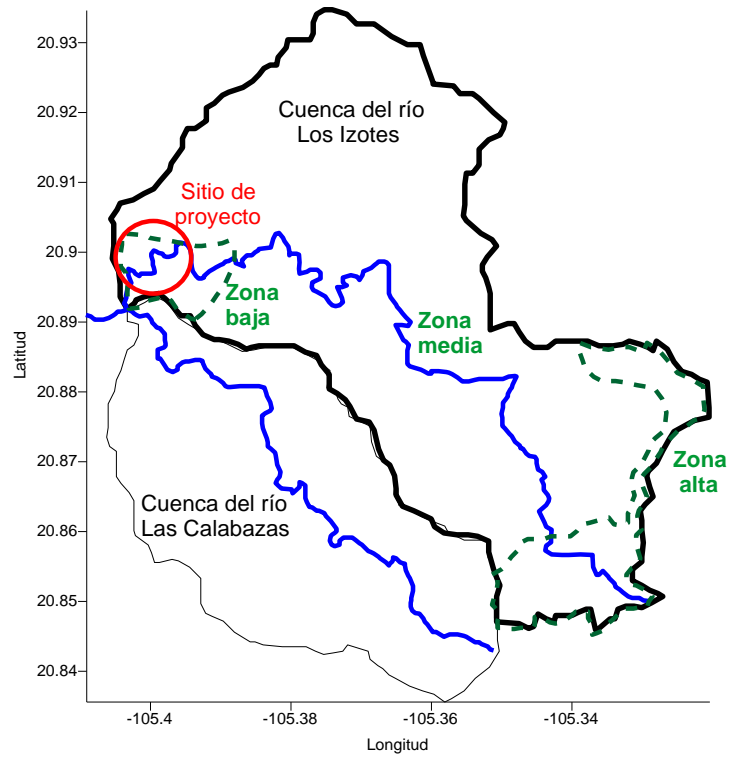


Figura 1. Vista general de las cuencas de los ríos Los Izotes, Las Calabazas y zona de estudio



Figura 2. Usos de suelo de las cuencas Los Izotes y Las Calabazas

Fuente: Estudio hidrológico Punto Cero, 2012

Tabla 1. Aporte de sedimentos en función del área de la cuenca (Strand, 1977; Gottschalk, 1964)

Área de cuenca, en km ²	Aporte medio de sedimentos, en m ³ año / km ²
< 25.9	1810
25.9 a 259.0	762
259.0 a 2590.0	481
> 2590.0	238

Para nuestro caso de estudio (área de 40.81 km²) se tendría un aporte medio de material igual a 762 m³ por año por unidad de área. Esto equivale a un total

de **31.1x10³ m³ al año**. De la misma forma Gottschalk, (1964) y González (2006) proponen utilizar:

$$A_s = 1421.8 A_T^{-0.229} \quad (1)$$

Donde

A_s Contribución de sedimentos, en m³ año / km²
 A_T Área de la cuenca, en km²

Al sustituir los valores en la ecuación (1) se calcula el volumen de sedimentos que puede ser producido por la cuenca. Esto es 608.1 m³ año / km². Para el área de

la cuenca se tendrán **24.8 x10³ m³ al año** (608.1 x 40.81). De la misma forma Namba (1988) propone la relación siguiente:

$$A_s = 0.292H_p + 0.474\Delta h - 0.118F + 2.452 \quad (2)$$

Donde

A_s Contribución de sedimentos, en m³ año / km²
 H_p Lámina de precipitación media, en mm / año
 Δh Desnivel máximo entre cotas, en m
 F Porcentaje de áreas entre suelo desnudo y con vegetación

Empleando los datos disponibles según el criterio de Namba se estima que la contribución de sedimentos

anual para la cuenca del río Los Izotes hasta el sitio de estudio será de (620 x 40.81) **25.3 x10³ m³ al año**.

$$A_s = 0.292(1076) + 0.474(635) - 0.118(20.06) + 2.452$$

$$A_s = 314.19 + 300.99 - 2.37 + 2.452$$

$$A_s = 620.0 \text{ m}^3 \text{ año / km}^2$$

Adicionalmente podemos verificar este valor obtenido con la expresión de Owen y Branson

(1988). El aporte de sedimentos, será de (314.2 x 40.81) **12.8 x10³ m³ al año**:

$$A_s = 19465 \left(\frac{\Delta h}{L} \right) + 14.29P_s - 604.8 \quad (3)$$

Donde

A_s Contribución de sedimentos, en m³ año / km²

- Δh Desnivel máximo entre cotas, en m
 L Longitud del cauce principal, en m
 Ps Porcentaje de suelo desnudo en la cuenca

$$As = 19465 \left(\frac{635}{18170} \right) + 14.29(16.71) - 604.8$$

$$As = 680.3 + 238.8 - 604.8$$

$$As = 314.2 \text{ m}^3 \text{ año} / \text{km}^2$$

De esta forma se puede observar que los tres primeros procedimientos arrojan valores similares en cuanto al aporte anual de sedimentos al sitio de proyecto. Lo anterior permite estimar un aporte de sedimentos promedio de **27.1x10³ m³ por año**. Esta cantidad corresponde a la contribución de sedimentos. Para conocer la cantidad de material que se mueve dentro de la cuenca, es necesario comparar esta cantidad con el valor de la erosión total. Cabe mencionar que el volumen de material que se mueve (transita) dentro de la cuenca, es el material que será atrapado de forma natural o artificialmente con obras de protección y control.

6. FÓRMULA UNIVERSAL USLE

Estimar la cantidad de sedimento en la cuenca que puede erosionarse y eventualmente transportarse, se

$$A = R K SL C P \quad (4)$$

Donde

- A Pérdida de suelo, en (kg / m²) anual
- R Factor erosivo de la precipitación, en (N / h) anual
- K Factor que depende del tipo de suelo, en (kg h / N m²) o (ton h / N ha)
- SL Factor adimensional que depende de la pendiente y longitud del terreno
- C Factor adimensional de cobertura vegetal
- P Factor adimensional de prácticas de conservación de suelos y cultivos

Vale la pena comentar que la expresión (4) calcula la erosión del suelo (A) al cuantificar el movimiento de material durante una tormenta y luego el valor final se presenta por el total de tormentas que ocurrieron al año. En contraste las ecuaciones 1, 2 y 3 suponen que el aporte de sedimentos (As), puede calcularse como el volumen total que aporta una cuenca y se totaliza a la salida de la misma (Gracia, 1997). A manera de ejemplo y aprovechando los datos y el recorrido de campo por el río Los Izotes. En seguida se calcula

utiliza la Formula Universal de Pérdida de Suelo (USLE). Aunque se utiliza como método de referencia para la estimación del aporte de sedimentos en embalses, la fórmula se desarrolló originalmente para cuantificar la pérdida de suelo en distritos agrícolas. La fórmula se basa en el poder erosivo de las gotas de lluvias sobre el suelo. Además es función la pendiente topográfica y la longitud del terreno en donde ocurre este proceso. La cobertura vegetal y el tipo de suelo también son elementos a considerar en este método para estimar la pérdida de suelo. El componente más difícil de estimar de esta metodología es el parámetro que relaciona las actividades de conservación de suelos que tienen lugar en la cuenca (Wischmeier y Schmidt, 1958). La fórmula original se expresa de la siguiente forma:

cada término que conforma la ecuación USLE, con algunas recomendaciones de cálculo.

6.1 Factor erosivo de la cuenca (R)

Este factor (R) considera que las partículas del suelo se separan por la acción cinética (EI₃₀) de la intensidad de precipitación en el golpeteo de las gotas, llamado Índice de Wischmeier. La hipótesis en el método es que esto ocurre cuando en 30 minutos, se sostiene un régimen máximo de precipitación, es decir una intensidad de lluvia (I₃₀). Es importante

señalar que si la duración de una tormenta típica es inferior a 30 minutos, se recurre a calcular el doble de la cantidad de precipitación como valor de I_{30} (Gracia, 1997). La ecuación (5) tiene unidades

Elupor tormenta al año; que son equivalentes a 100 (ton/acre) (in/h). Es necesario multiplicar por 1.702 para transformar al sistema métrico (N/h).

$$R = 1.702 \frac{\left[\sum (1.213 + 0.890 \log I_j) (I_j T_j) \right] I_{30}}{173.6} \quad (5)$$

Donde

- R Factor erosivo de la lluvia, en (N / h) tormenta
- I_j Régimen de precipitación, en mm/h
- T_j Lapso de tiempo seleccionado, en h
- I_{30} Régimen máximo de precipitación sostenido en 30 minutos, en mm/h

En el sitio del río Los Izotes, se sabe que la duración de tormenta máxima presentada en el estudio hidrológico es justamente de 30 minutos. La tormenta ocurrió el 20 de septiembre de 2006 distribuida como

lo muestra el hietograma de la figura 3 y que corresponde a condiciones de tormentas provocadas por huracanes.

Tabla 2. Hietograma máximo para lluvia huracanada

Tiempo	Duración (horas)	Lamina de lluvia (mm)	Precipitación acumulada (mm)	Intensidad (mm/h)	Intensidad de lluvia en 30 minutos (mm/h)
01:40	0.167	10.25	10.25	61.4	
01:50	0.167	30.00	40.25	179.6	
02:00	0.167	6.75	47.00	40.4	94
02:10	0.167	2.25	49.25	13.5	78*
02:20	0.167	1.50	50.75	9.0	21
02:30	0.167	0.50	51.25	3.0	8.5
02:40	0.167	0.00	51.25	0.0	4.0
02:50	0.167	0.25	51.50	1.5	1.5

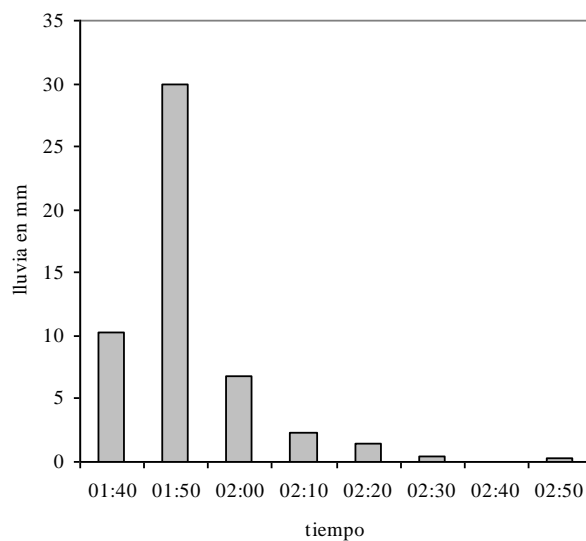


Figura 3. Hietograma máximo de precipitación de huracanes en la costa del Pacífico mexicano

La intensidad de lluvia para 30 minutos (0.5 horas) para las 2h10 por ejemplo, se obtiene como:

$$* \frac{(30 + 6.75 + 2.25)}{0.5} = 78 \text{ mm/h}$$

Así la intensidad máxima que sucede a los 30 minutos es igual a $I_{30} = 94 \text{ mm/h}$ y aplicando la ecuación numero 5 se obtiene que:

$$[1.213 + 0.890 \log(61.4)](61.4 \times 0.167) = 28.74$$

$$[1.213 + 0.890 \log(179.6)](179.6 \times 0.167) = 96.58$$

$$[1.213 + 0.890 \log(40.4)](40.4 \times 0.167) = 17.84$$

$$[1.213 + 0.890 \log(13.5)](13.5 \times 0.167) = 4.99$$

$$[1.213 + 0.890 \log(9.0)](9.0 \times 0.167) = 3.09$$

$$[1.213 + 0.890 \log(3.0)](3.0 \times 0.167) = 0.82$$

$$[1.213 + 0.890 \log(1.5)](1.5 \times 0.167) = 0.34$$

$$\Sigma = 152.41$$

$$R = \frac{(152.41)94}{173.6} = 82.53 \text{ EIU}; \text{ en el sistema métrico } (1.702 \times 82.53) \text{ R} = 140.46 \text{ N/h] tormenta}$$

Este cálculo solo es para una tormenta en específico. Para llevar este valor anualizado se toma en cuenta el número de tormentas al año, por ejemplo, para este caso es de 13 tormentas, por lo tanto:
 $R = 1825.97 \text{ N/h]año}$

Como un método de comparación se puede estimar la contribución de sedimentos para una tormenta, empleando la relación propuesta por (Haan., et. al., 1982).

$$R_h = 0.5 R + 0.35 V_e Q_p^{0.33} \quad (6)$$

Donde

- R_h Factor hidrológico de erosivo por lluvia, en (N / h) tormenta
- R Factor erosivo de la lluvia, en (N / h) tormenta
- V_e Volumen de escurrimiento directo, en mm
- Q_p Caudal máximo del escurrimiento directo, en mm/h

$$R_h = 0.5 (140.46) + 0.35 (19.16) (13)^{0.33}$$

$$R_h = 85.86 \text{ N/h] tormenta}$$

Lo anterior representa la condición de una tormenta, para la condición media anual de 13 tormentas, se tendrá entonces: $R = 1116.23 \text{ N/h]año}$. La comparación de estos dos valores obtenidos: $R = 1825.97 \text{ N/h]año}$ por el criterio del I_{30} y $R = 1116.23 \text{ N/h]año}$ por el factor hidrológico-

hidráulico en donde se toman en cuenta las características del hidrograma de escurrimiento directo, nos permite afirmar que existe un factor erosivo promedio de $R = 1471.1 \text{ N/h]año}$. Un criterio más que permite obtener el parámetro R, pero sólo en función de las condiciones del escurrimiento directo es la siguiente:

$$R_w = 9.05 (V_e Q_p)^{0.56} \quad (7)$$

Donde

R_w Factor hidrológico de erosivo por lluvia, en (ton) tormenta

V_e Volumen de escurrimiento directo, en m^3

Q_p Caudal máximo del escurrimiento directo, en m^3/s

$$R_w = 9.05 [(0.782 \times 10^6) (147.7)]^{0.56}$$

$$R_w = 296.28 \times 10^3 \text{ ton]tormenta}$$

Por tener unidades diferentes, no puede hacerse una comparación con los resultados anteriores, sin embargo los resultados finales podrán compararse cuando se aplique la expresión USLE para pérdida de suelo.

6.2 Factor de tipo de suelo (K)

El factor que se relaciona con el tipo de suelo fue propuesto por Wischmeier y Smith (1965) empleando resultados de pruebas de campo en parcelas

cultivadas con pendientes promedio de 9%. La variación de este parámetro va para suelos arenosos con materia orgánica (0.02) hasta valores para suelos con poco contenido de materia orgánica y del tipo limosos (0.60). Los valores del factor K, para diferentes tipos de suelos se presentan en la tabla 3 (Wischmeier y Smith, 1965). Originalmente se presentó como un nomograma, simplificado por la expresión (Alewell et al., 2019):

$$K = 2.77 \times 10^5 M^{1.14} (12 - a) + 0.043(b - 2) + 0.033(4 - c)$$

Donde

K Factor de tipo de suelo

M Parámetro granulométrico, igual al % de limo (0.1-0.002 mm)

a Porcentaje de materia orgánica

b Código de estructura del suelo utilizado en la clasificación de suelos

c Clase de permeabilidad en el perfil

Gracia (1997) realiza una importante transformación de unidades al sistema inglés en donde K tiene unidades de (ton/acre) Elu; al sistema métrico (kg h/Nm^2). Es suficiente multiplicar por 0.1317 los valores de K.

Para seleccionar un valor del factor K en campo es necesario iniciar con un valor de la tabla 3; pero después es necesario conocer y caracterizar los materiales que existen en diferentes zonas de la cuenca. Bojorquez et al, (2006) realizaron una caracterización muy exhaustiva de los suelos de la

llanura costera del estado de Nayarit. En este estudio se identifican tres formaciones (provincias) fisiográficas en la costa del estado. La primera llamada Llanura Costera del Pacífico, la segunda Sistema Volcánico Transversal y la tercera Sierra Madre del Sur. Bojorquez et al, (2006) expone que el tipo de suelo de la llanura fluvial de inundación actual se encuentra formada por Fluvisoles sometidos a la acción de la inundación sistemática de los ríos que descargan al océano Pacífico. Caracteriza la evolución del suelo con el lavado de las sales y las

transformaciones mineralógicas, biológicas y físico-químicas que tendrán los suelos expuestos a fuertes procesos de erosión de los taludes y de depositación de materiales fluviales (franco, franco limoso, franco arenoso hasta arenoso). En este sentido, como ya se ha comentado, existe un rol importante en lo que se refiere al clima cálido y subhúmedo de la región; además de la exposición directa a fenómenos hidrometeorológicos extremos, sobre todo tormentas tropicales y huracanes. Siguiendo las recomendaciones de Bojorquez et al, (2006) se subdividió la cuenca del río Los Izotes en dos zonas. La primera formada por la parte media-alta de la cuenca (68% del área) que se incluye dentro de la llanura intermedia formada por suelos sin sales con un poco de sodio intercambiable, sin embargo por debajo de los 100 cm de espesor éste desaparece. En general se trata de suelos Cambisoles, Feozem y Fluvisoles (Bojorquez et. al., 2007). La segunda parte de la cuenca (parte baja 32%) forma parte de la denominada llanura fluvial baja con influencia marina, más joven, en donde el lavado de sales es

menos intenso debido a que con la presencia de sales la cobertura vegetal es más pobre y hay menos aporte de materia orgánica al suelo; lo que lo caracteriza como un suelo Cambisolflúvico. Es importante mencionar que en las llanuras fluviales actuales, donde está activo el proceso aluvial (flúvico), solamente se identifican Fluvisoles, lo cual es lógico debido al rejuvenecimiento que hacen los ríos por las inundaciones periódicas, que se manifiestan por la presencia de material fúlvico en los primeros 50 cm de espesor del suelo (Bojorquez et. al., 2007). De lo anterior podemos concluir que las características morfológicas y de textura del suelo en la parte media-alta de la cuenca a una profundidad entre 0 y 30 cm de la superficie, tienen una textura arcillosa formada por 35% de arena, 35% de limo y 30% de arcilla, con un color gris rosado cuando el suelo está seco y pardo oscuro cuando esta húmedo. De 30 a 60 cm de profundidad el suelo está conformado por 63% de arena, 18% de limo y 19% de arcilla, con un color gris rosado cuando el suelo está seco y gris rojizo oscuro cuando esta húmedo.

Tabla 3. Valores generales del factor K (en sistema inglés)

Textura	Contenido de materia orgánica			Textura	Contenido de materia orgánica		
	0.5 %	2.0 %	4.0 %		0.5 %	2.0 %	4.0 %
Arena	0.05	0.03	0.02	Migajón	0.38	0.34	0.29
Arena fina	0.16	0.14	0.10	Migajón limoso	0.48	0.42	0.33
Arena muy fina	0.42	0.36	0.28	Limo	0.60	0.52	0.42
Arena migajonosa	0.12	0.10	0.08	Migajón arcilloso arenoso	0.27	0.25	0.21
Arena migajonosa fina	0.24	0.20	0.16	Migajón arcilloso	0.28	0.25	0.21
Arena muy migajonosa fina	0.44	0.38	0.30	Migajón arcilloso limoso	0.37	0.32	0.26
Migajón arenoso	0.27	0.24	0.19	Arcilla arenosa	0.14	0.13	0.12
Migajón arenosos fino	0.35	0.30	0.24	Arcilla limosa	0.25	0.23	0.19
Migajón arenosos muy fino	0.47	0.41	0.33	Arcilla	0.29	0.21	0.13

En ambos casos la estructura del suelo es del tipo de bloques subangulares medios. Esto nos lleva a un valor de $K = 0.14$ para el 68% de la cuenca (0.0952). De la misma forma en la **parte baja de la cuenca** a una profundidad entre 0 y 25 cm de la superficie, tienen una textura franco arcillo limoso formada por 22% de arena, 50% de limo y 28% de arcilla, con un color pardo cuando el suelo está seco y pardo oscuro cuando esta húmedo. De 25 a 55 cm de profundidad el suelo está conformado por 13% de arena, 58% de limo y 29% de arcilla, con un color gris rosado cuando el suelo está seco y pardo oscuro cuando esta húmedo. En ambos casos la estructura del suelo

es del tipo de bloques subangulares medianos. Esto nos lleva a un valor de $K = 0.25$ para el 32% de la cuenca (0.08). Finalmente, el valor del Factor de tipo de suelo, en ($\text{ton h} / \text{N ha}$) ponderado para la cuenca del río Los Izotes, es de $K = 0.1752$ en el sistema métrico será (0.1752×0.1317) ; $K = 0.0231 \text{ kg h} / \text{N m}^2$. En ambos casos y durante todo el recorrido sobre el cauce principal, el lecho o fondo está formado por suelos de tipo arenisca que son conglomerado con arena y grabas intercaladas; las arenas presentan una granulación de mediana a gruesa y un se notan elementos subredondeados (fotografía 3).



Fotografía 1. Estratigrafía característica del aparte media-alta de la cuenca

6.3 Factor de pendiente (S) y longitud (L)

El factor SL es un producto de la inclinación de la superficie representada por la pendiente (S) del terreno a lo largo en una longitud (L). Este factor (SL) representa la relación entre la pérdida de suelo en función de la velocidad del agua sobre la superficie del terreno. La longitud (L) se mide desde el punto en donde el flujo inicia el movimiento de las

partículas, hasta el punto en donde ocurre el primer depósito de sedimento. El desarrollo inicial que fue presentado por Wischmeier y Smith (1965, 1978) fue medido para longitudes de cauces de hasta 120 m (400 pies) y pendientes entre 3% y 20% Gracia (1997).

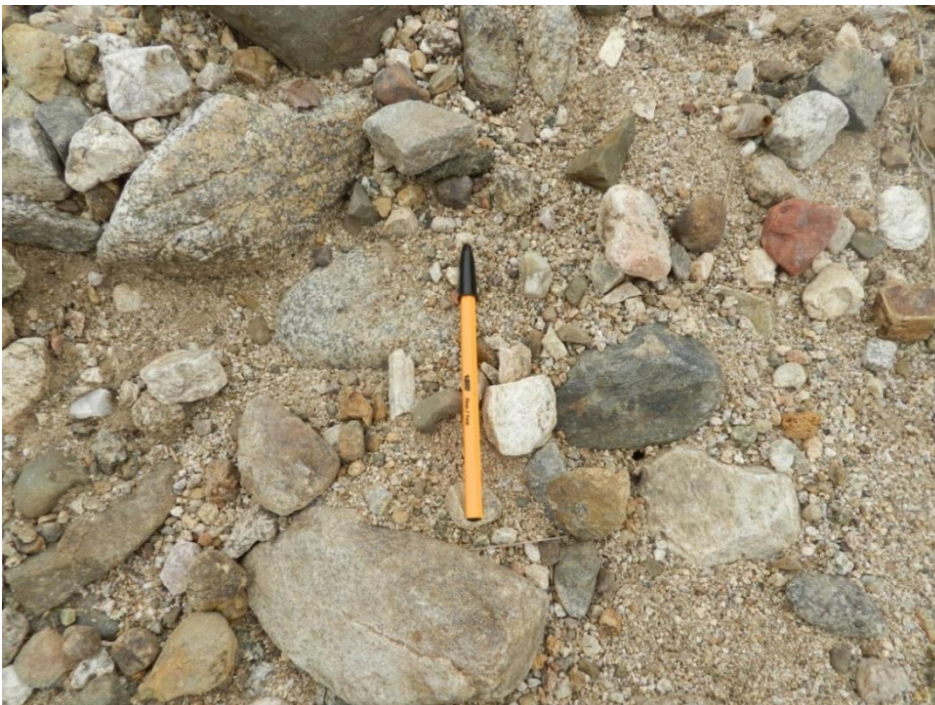
$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (8)$$

Donde

- L Factor de longitud y pendiente del terreno, adimensional
- λ Longitud de la pendiente del tramo, en metros
- m Exponente que depende de la pendiente del terreno adyacente



Fotografía 2. Estratigrafía característica del aparte baja de la cuenca



Fotografía 3. Suelo característico del fondo y lecho del río Los Izotes (conglomerado con arena y grabas intercaladas)

El exponente m se selecciona en función de la pendiente del cauce, según los valores siguientes (Mussetter, 2008):

$$\theta \geq 5\% \rightarrow m = 0.5 \quad 5\% < \theta < 3\% \rightarrow m = 0.4 \quad 3 \leq \theta \leq 1\% \rightarrow m = 0.3 \quad \theta < 1\% \rightarrow m = 0.2$$

Si se quiere utilizar la pendiente del terreno θ en grados se propone utilizar la relación $m = \beta / (\beta + 1)$ en donde $\beta = (\sin \theta / 0.0896) / [0.56 + 3(\sin \theta)^{0-8}]$ (Schmidt et al., 2019).

Respecto al cálculo del factor S asociado a la pendiente McCool et al., (1987) proponen dos expresiones muy sencillas para ser utilizadas en campo (θ en radianes).

$$S = (10.8 \theta) + 0.03 \text{ para pendientes } < 9\%$$

$$S = (16.8 \theta) - 0.50 \text{ para pendientes } \geq 9\%$$

Para verificar estas expresiones, se construyeron tres canales vertedores de diferentes dimensiones, longitudes y anchos. Equipados con un vertedor triangular de pared delgada y un depósito para la recolección y cuantificación del sedimento; fueron instalados en diversos sitios con diferentes pendientes

(fotografía 4). Los resultados preliminares tomados de ocho tormentas en la Sierra de Jalpan en el estado de Querétaro, México, permiten proponer una expresión preliminar con (θ en radianes) de la forma:

$$S = 2.55(\sin \theta)^{0.67} + 0.76$$



Fotografía 4. Vertedores para medición en campo del factor SL

Sin embargo, el Servicio de Conservación de Suelo de Estados Unidos (SCS) en su nota técnica No.28 recomienda utilizar el factor completo como SL.

$$SL = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m (0.0065 \theta^2 + 0.045 \theta + 0.065) \quad (9)$$

Donde

SL Factor de longitud y pendiente del terreno, adimensional
 θ Pendiente del terreno, en decenas de porcentaje

Aplicando los datos para nuestra cuenca y río de estudio, utilizando la ecuación 9, se tiene que:

$$SL = \left(\frac{18170}{22.13} \right)^{0.3} [0.0065 (1.7)^2 + 0.045 (1.7) + 0.065] = 1.20$$

Este valor representa un valor medio de la cuenca, sin embargo es conveniente desagregar el cálculo de este parámetro debido a su importancia. Si se observan las figuras 2 y 3, de acuerdo con el uso de suelo se ha subdividido la cuenca en tres zonas o regiones: alta, media y baja. Si bien la cuenca en realidad no está

deforestada ni presenta grandes superficies de suelo desnudo, si presenta una variedad en el tipo de vegetación y pendientes topográficas del terreno; lo que repercute de manera directa con la estimación del parámetro SL. De esta forma el valor ponderado es igual a 1.55 según los cálculos siguientes.

Zona alta

Área de vegetación media: $A_{vm} = 6.063 \text{ km}^2$

λ Longitud del tramo = 2,698.25 m

θ Pendiente del terreno = 1.7 %

$$SL = \left(\frac{2698.25}{22.13} \right)^{0.3} [0.0065 (1.7)^2 + 0.045 (1.7) + 0.065] = 0.677$$



Zona media

Área de vegetación densa: $A_{vd}= 34.00 \text{ km}^2$
 λ Longitud del tramo = 15,136.75 m
 θ Pendiente del terreno = 2.8 %

$$SL = \left(\frac{15136.75}{22.13} \right)^{0.3} [0.0065 (2.8)^2 + 0.045 (2.8) + 0.065] = 1.72$$



Zona baja

Área de cultivo agrícola pecuario: $A_{ap}= 0.755 \text{ km}^2$
 λ Longitud del tramo = 335 m
 θ Pendiente del terreno = 4 %

$$SL = \left(\frac{335}{22.13} \right)^{0.4} [0.0065 (4)^2 + 0.045 (4) + 0.065] = 1.04$$



6.4 Factor asociado a cobertura vegetal (C)

La cobertura de usos del suelo en la cuenca es representada por el factor C. Se recomienda utilizar los valores propuestos por (Rodríguez et al., 2004) mostrados en la tabla 4. Para el caso de suelos con

cultivos permanentes, cuya cobertura representa una disminución en la tasa de erosión anual, este factor debe reflejar esta condición a detalle (Lianes et. al., 2009).

Tabla 4. Valores del factor C

Tipo de cubierta	Factor C
Suelo desnudo	1.00
Arbolado forestal denso	0.01
Arbolado forestal claro	0.03
Matorral con buena cobertura	0.08
Matorral ralo y eriales	0.20
Cultivos arbóreos y viñedos	0.40
Cultivos anuales y herbáceos	0.25
Cultivos en regadío	0.04

Para nuestro caso de estudio y en general se recomienda una ponderación respecto a las áreas y sus condiciones de cobertura vegetal. Área de vegetación densa (verde oscuro. Fig.2), $A_{vd}= 34.00$

km^2 (83.29%) (0.01). Área de vegetación media (verde claro. Fig.2), $A_{vm}= 6.063 \text{ km}^2$ (14.85%) (0.03). Área de cultivo agrícola pecuario (amarillo. Fig.2), $A_{ap}= 0.755 \text{ km}^2$ (1.86%) (0.40).

$$C = \frac{[(34 \times 0.01) + (6.063 \times 0.03) + (0.755 \times 0.40)]}{40.818} = 0.0202 \quad ; C = 0.0202$$

6.5 Factor de prácticas conservación de suelos y cultivos (P)

Este factor toma en cuenta las actividades realizadas para conservar, estabilizar y proteger el suelo de la cuenca que en su condición desnuda es susceptible a ser erosionado. Este factor es una proporción entre el área en donde se pierde el suelo en dirección del

escurrimiento y el área en donde se implementa una práctica de conservación. Es importante mencionar que la evidencia visible en campo es la disminución inmediata del escurrimiento directo en la cuenca. A continuación algunos ejemplos de prácticas y valores propuestos de P.



Fotografía 5. Vista general de un suelo desnudo y un suelo en proceso de recuperar cubierta



Fotografía 6. Muros de piedra (P=0.60)



Fotografía 7. Sistemas de terrazas en sentido de la pendiente del terreno (P=0.35)



Fotografía 8. Sistemas de terrazas (P=0.18)



Fotografía 9. Barreras de muros vegetativos (P=0.45)

En el caso de la cuenca del río Los Izotes, como no se tiene por el momento ninguna práctica de conservación implementada, este coeficiente tendrá el valor de 1.0. Cabe mencionar que si hubiera alguna

buena práctica de conservación del suelo, el aporte se podría reducir entre en un 30% y 60% del volumen estimado por la formula universal de pérdida de suelo, tal como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Factor de método de control de la erosión, P
(Wischmeier y Smith, 1978)

Pendiente del terreno %	Cultivo en contorno	Cultivo en franjas de contorno y surcos irrigados	Terraceo
1 a 2	0.60	0.30	0.12
3 a 8	0.50	0.25	0.10
9 a 12	0.60	0.30	0.12
13 a 16	0.70	0.35	0.14
17 a 20	0.80	0.40	0.16
21 a 25	0.90	0.45	0.18

6.6 Estimación de la erosión

Empleando la ecuación de la pérdida Universal del Suelo, según la expresión número 4, se tiene:

$$A = R K SL C P$$

Donde

- A Pérdida de suelo anual, en (ton / hectárea) año
- R Factor erosivo de la lluvia; $R = 1825.97 N / h$] año
- K Factor de tipo de suelo; $K = 0.0231 \text{ kg h} / N \text{ m}^2$
- SL Factor de longitud y pendiente del terreno; $SL = 1.55$
- C Factor de cobertura vegetal; $C = 0.0202$
- P Factor de conservación de suelos y prácticas de cultivos; $P=1$

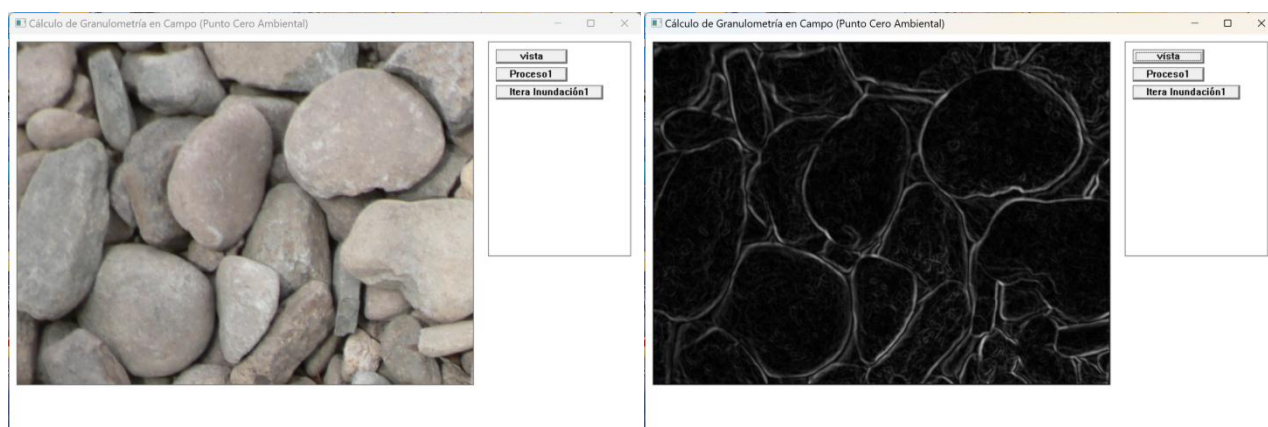
$$A = (1825.97)(0.023)(1.55)(0.0202)(1)$$

$$A = 1.3149 \text{ kg} / \text{m}^2 \quad ; \quad A = 1314.94 \text{ ton} / \text{km}^2$$

La continuación del cálculo consiste en relacionar el valor de la pérdida de suelo con el material representativo de la cuenca en estudio. Para llevar a cabo esto, es necesario evaluar la densidad del material representativo del suelo de la cuenca por cada metro cúbico (masa/volumen). Es importante mencionar que de preferencia debe tomarse el peso seco del suelo entre su volumen; lo que se conoce como densidad aparente del suelo. Para los recorridos de campo se debe pensar en estimar siempre la densidad aparente, lo cual implica tomar detalle del tipo de suelo, condición y textura de los materiales. La siguiente imagen muestra una aplicación para teléfono celular que permite tomar una fotografía y

procesarla en alto contraste. En campo es muy útil pues con algoritmos de reconocimiento de patrones geométricos de figuras; calcula de forma aproximada el diámetro de los elementos fotografiados, calcula la curva granulométrica representativa y algunos otros parámetros relacionados con las características del suelo.

El Departamento de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos (*Natural Resources Conservation Service, USDA, NRCS*) presenta diversos valores de referencia de la densidad aparente de varios materiales que conforma los principales suelos <http://www.mn.nrcs.usda.gov/>(ver tabla 6).



Fotografía 10. Vista de la pantalla de la aplicación *Roca-Mota.exe* para obtener una curva granulométrica a partir de una fotografía tomada en campo

Tabla 6. Características del suelo y densidad aparente

Localización	Composición	Densidad aparente (ton / m ³)
parte media y alta de la cuenca 68%	0 y 30 cm de la superficie	1.70 (0.35)
	35% de arena	1.40 (0.35)
	35% de limo	1.35 (0.30) [1.40]
	30% de arcilla	
		Ponderado = 1.49
parte baja de la cuenca 32%	0 y 25 cm de la superficie	1.70 (0.22)
	22% de arena	1.40 (0.50)
	50% de limo	1.35 (0.28) [1.452]
	28% de arcilla	
		Ponderado = 1.44
	25 a 55 cm de profundidad	1.70 (0.13)
	13% de arena	1.40 (0.58)
	58% de limo	1.35 (0.29) [1.4245]
	29% de arcilla	
		Ponderado = 1.44

Con estos valores, aplicados a la **parte media-alta** de la cuenca se tiene:

$$A = \frac{1314.94 \text{ ton / km}^2}{1.49 \text{ ton / m}^3} = 882.51 \text{ m}^3 / \text{km}^2$$

Lo que generará un total de $24.50 \times 10^3 \text{ m}^3$ al año. De la misma forma para la **parte baja** de la cuenca se tiene:

$$A = \frac{1314.94 \text{ ton / km}^2}{1.44 \text{ ton / m}^3} = 913.15 \text{ m}^3 / \text{km}^2$$

Lo que generará un total de $11.93 \times 10^3 \text{ m}^3$ al año. Estos resultados representan un aporte medio de sedimentos de **18 mil metros cúbicos al año** $[(24.50+11.93)/2]$, aproximadamente. Anteriormente se planteó una solución alternativa basada en la consideración no sólo de la intensidad de la

precipitación, sino utilizando también datos de caudales máximos asociados a la propagación de la avenida en el cauce. Lo anterior fue propuesto por la ecuación número 6. Aplicando una vez más la ecuación de la pérdida Universal del Suelo, se tiene:

$$A = R K SL C P$$

Donde

- A Pérdida de suelo anual, en (ton / hectárea) año
- R Factor erosivo de la lluvia; $R = 1116.23 \text{ N/h}$ año
- K Factor de tipo de suelo; $K = 0.0231 \text{ kg h} / \text{N m}^2$
- SL Factor de longitud y pendiente del terreno; $SL = 1.55$
- C Factor de cobertura vegetal; $C = 0.0202$
- P Factor de conservación de suelos y prácticas de cultivos; $P=1$

$$A = (1116.23)(0.023)(1.55)(0.0202)(1)$$

$$A = 0.80383 \text{ kg} / \text{m}^2 \quad ; \quad A = 803.831 \text{ ton} / \text{km}^2$$

Procediendo de forma similar asumiendo las mismas densidades aparentes de los materiales, se tiene que se generará un total de $14.97 \times 10^3 \text{ m}^3$ al año para la **parte media-alta** de la cuenca; resultado aproximado al obtenido anteriormente ($24.50 \times 10^3 \text{ m}^3$). Siguiendo del mismo procedimiento se tiene que para la parte baja de la cuenca, se estima un total de $7.29 \times 10^3 \text{ m}^3$ al año, similar al obtenido anteriormente ($11.93 \times 10^3 \text{ m}^3$). Estos resultados representan un aporte medio de sedimentos de **11 mil metros cúbicos al año** $[(14.97+7.29)/2]$, aproximadamente. Recordando que aun se tiene una

expresión más para calcular el valor de R, en la formula universal de pérdida de suelo. Lo que se obtuvo con la ecuación (7) fue un valor de $R_w = 296.28 \times 10^3 \text{ ton}$ tormenta. Cabe mencionar que las unidades de R_w deben conservar la homogeneidad de unidades; por lo que el valor de K debe multiplicarse por 1.317 (Gracia, 1997). Esto es $K = 0.1752 \times 1.317$; $K = 0.231 \text{ ton h} / \text{N ha}$. Como se demuestra con los siguientes cálculos, estos resultados son muy similares a los obtenidos con la primera opción de cálculo, que genera una gran confianza en los valores estimados.

$$A = (296.28 \times 10^3)(0.231)(1.55)(0.0202)(1) \times 13 \text{ tormentas}$$

$$A = 2.14288 \times 10^3 \text{ ton} \quad ; \quad A = 27.86 \times 10^3 \text{ ton} \text{ año}$$

Con estos valores, aplicados a la **parte media-alta** de la cuenca se tiene:

$$A = \frac{27.86 \times 10^3 \text{ ton}}{1.49 \text{ ton} / \text{m}^3} = 18.70 \times 10^3 \text{ m}^3$$

Lo que generará un total de $18.70 \times 10^3 \text{ m}^3$ al año. De la misma forma para la **parte baja** de la cuenca se tiene:

$$A = \frac{27.86 \times 10^3 \text{ ton}}{1.44 \text{ ton} / \text{m}^3} = 19.35 \times 10^3 \text{ m}^3$$

Lo que generará un total de $19.35 \times 10^3 \text{ m}^3$ al año. Estos resultados representan un aporte medio de sedimentos de **19 mil metros cúbicos al año**

$[(18.70+19.35)/2]$, aproximadamente. Resultado muy similar al obtenido por el primer procedimiento.

7. ENTREGA-DEPÓSITO DE SEDIMENTOS

Finalmente, con el aporte total de sedimentos de la cuenca (As), se procede a calcular el volumen (A) que es susceptible de ser movilizado o depositado dentro de la cuenca, a esto se le llama entrega de sedimentos (Gracia, 1997). Para el cálculo del **sedimento que puede aportar la cuenca**, se tiene un promedio de **27.1x10³ m³ al año**, mientras que el material que es susceptible de ponerse en

movimiento es de **16x10³ m³ al año**, lo que arroja una condición favorable, en el sentido que al estar la cuenca en condiciones casi vírgenes, la erosión del suelo es dos veces menor que el aporte teórico que tendría la cuenca. El porcentaje anual de entrega puede ser estimado a partir de la expresión propuesta por Maner, que considera que el material en tránsito (movimiento) puede ser depositado (Gracia, 1997).

$$\log \text{CES} = 19354 - 0.1419 \log \text{Area}$$

Donde

CES Porcentaje anual de entrega de sedimentos
Area Área de la cuenca, en km²

Para los valores obtenidos en la cuenca de estudio se tiene:

$$\log \text{CES} = 1.9354 - 0.1419 \log(40.81)$$

$$\log \text{CES} = 1.9354 - 0.1419 \log \text{Area}$$

$$\log \text{CES} = 1.7068; \text{CES} = 50\%$$

Lo anterior significa que en promedio, para conservar el equilibrio de sedimentos de la cuenca es necesario atrapar o realizar obras de conservación del 50% del total de 16x10³ m³ al año; esto es 8x10³ m³ de sedimentos al año. Ahora lo importante es garantizar que las obras diseñadas mantendrán esta condición de equilibrio y en su caso localizar sitios dentro de la cuenca virgen en donde se desarrollen prácticas de conservación de suelo y un buen manejo de zonas de cultivo.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El cálculo del aporte de sedimentos para la cuenca del río Los Izotes permitió conocer el valor anual que se genera en la cuenca, así como el volumen susceptible de ser depositado. En el primer caso se estimó un total de 27.1x10³ m³, mientras que el material que es susceptible de ponerse en movimiento dentro de la cuenca es de 16x10³ m³ al año. Estos resultados nos indican que la condición virgen de la cuenca permite un volumen en movimiento menor que el máximo posible erosionable de la cuenca. Esto sin duda es una condición favorable para las obras que se quieran construir aguas abajo o a la salida de la cuenca. Es importante señalar que si bien se estimó una tasa de entrega de sedimentos del 50%, lo que

significa que se recomienda atrapar la mitad de lo que se estima puede ponerse en movimiento; se puede disminuir el volumen de sedimento en movimiento a través de prácticas de conservación de suelos. Por ejemplo, si se cultivara en contornos o se realizaran terrazas en las pendientes más escarpadas de la cuenca, se podría según se muestra en la tabla 5 disminuir directamente cerca del 20% el volumen de sedimento; esto es tan solo 6.4x10³ m³ al año, lo que representa una cifra muy manejable y posible de controlar año con año, además que garantizaría un costo de mantenimiento mínimo para la infraestructura construida. Respecto a la aplicación de la fórmula universal de pérdida de suelo, se concluye que los términos que la componen fueron detalladamente estimados lo que representa una confianza en los resultados obtenidos. Sin embargo, Chaves (2009) recomienda una red de monitoreo de sedimentos sobre todo en regiones tropicales en donde las condiciones cambiantes de clima e intensidades variables de tormentas, generan incertidumbre al aplicar esta formulación. Finalmente, cabe mencionar que los factores hidroclimatológicos de la zona no pueden ser controlados por el hombre, sin embargo factores como el uso de suelo (ordenamiento territorial), prácticas de conservación y pendientes del terreno

pueden ser controlados con obras de ingeniería bajo el concepto de ecohidrológica.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Daniel Peyret por su interés, confianza y apoyo para realizar este estudio. Se reconoce el trabajo de campo de Verónica Escarpulli, por su dedicación y detalle en la medición del factor SL, en la Sierra de Jalpan, Qro., México. Juan Mota es el programador y desarrollador del programa de cómputo *Rocas-Mota.exe*, el cual sigue en desarrollo

y calibración en el Centro de Investigaciones del Agua, CIAQ de la Facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, México.

Financiamiento

El presente trabajo fue financiado por la empresa Punto Cero para el Desarrollo, A.C.

REFERENCIAS

- Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., & Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 203–225. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>
- Bureau of Reclamation (1987). *Design of Small Dams*, 3rd Edition, Denver, Colorado.
- Carson, M. A., Malcolm Conly F., y Jasper J. N. (1999). Riverine sediment balance of the Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. *Hydrological Processes* 13, pp. 2499-2518
- Chaves Henrique M. Leite (2009). Incertidumbre en la Predicción con la USLE en los Trópicos: Consecuencias y Mitigación. EFL- Facultad de Tecnología Universidade de Brasília Taller ISI-LAC / Unesco - U. Talca Santiago, November 18-19
- McCool, D. Brown, L. Foster, G.R. Mutchler, C. Meyer L. (1987) Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation, *Trans. ASAE* 30 1387–1398.
- González O., L.A. (2006). Adecuación de la fórmula Gottschalk para la evaluación de la aportación de sedimentos en embalses en el centro del país. AMH, XIX Congreso Nacional de Hidráulica Cuernavaca, Morelos.
- González O., L.A. y Rivera J.J. (2008). Propuesta sobre la eficiencia de retención de embalses en el centro y Norte de nuestro país. AMH, XX Congreso Nacional de Hidráulica Toluca, Edo. de México.
- Gottschalk, L.C. (1964). Reservoir Sedimentation. Section 17, part I in *Handbook of Applied Hydrology*, editor-in-chief Ven Te Chow. McGraw-Hill Book Company. New York, N.Y., U.S.A.
- Gracia S. J. (1997). Pérdida de suelo en cuencas. Capítulo 17 del manual de ingeniería de ríos. Instituto de Ingeniería, No. 587, UNAM
- Haan, C.T., Johnson, H.P. y Brakensiek., D.L. (1982). *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*. ASAE, U.S.A.
- Lianes E., Marchamalo M. y Roldán M. (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): pp. 217-235
- Mussetter B. (2008) *Sediment and Erosion Design Guide*. Southern Sandoval County Arroyo Flood Control Authority 1041 Commercial Dr. SE Rio Rancho, New Mexico 87124
- Rodríguez María F., Florentino Adriana, Gallardo Juan y García Roberto de Antonio (2004). Sistemas de información geográfica en la evaluación de la erosión hídrica en Badajoz-España aplicando la metodología USLE *Agronomía Trop.* 54(4): pp. 391-409
- Schmidt, S., Tresch, S., & Meusburger, K. (2019). Modification of the RUSLE slope length and steepness factor (LS-factor) based on rainfall experiments at steep alpine grasslands. *MethodsX*, 6, 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.01.004>

- Strand, R.I. (1975). "Bureau of Reclamation Procedures for Predicting Sediment Yield," in Present and Prospective Technology, Predicting Sediment Yields and Sources, Proceedings of the Sediment-Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, November 28-30, 1972.
- Strand, R.I. (1977). Sedimentation. Appendix H in the Design of Small Dams, Bureau of Reclamation, U.S. States Department of the Interior, second edition and revised reprint. Washington. D.C., U.S.A.
- Strand, R.I., y E.L. Pemberton (1982). Reservoir Sedimentation Technical Guidelines for Bureau of Reclamation, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 48 pp.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. D., (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss, Transac. AGU, pp. 258-291
- Wischmeier, W.H., y D.D. Smith (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses-Guide to Conservation Planning, U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537.
- Wischmeier, W.H., y D.D. Smith (1962). Soil-Loss Estimation as a Tool in Soil and Water Management Planning. Institute of Association of Scientific Hydrology, Publication No. 59, pp. 148- 159.
- Wischmeier, W.H., y D.D. Smith. (1965). Predicting Rainfall-Erosion Losses, from Cropland East of the Rocky Mountains, U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 282, 48 p.
- Xu, Jiongxin, (2003) Sedimentation rates in the lower Yellow River over the past 2300 years as influenced by human activities and climate change. Hydrological Processes 17, pp. 3359–3371

Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figuran no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO, y no comprometen a la Organización.



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
CC BY-NC-SA 4.0 license