

CONSIDERACIONES Y CONCLUSIONES AL APLICAR EL MODELO DE EROSIÓN RUSLE EN ALGUNAS CUENCAS DE LA FILA COSTEÑA, COSTA RICA

Roger Mesén Leal

Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS-UCR)
Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica (UCR). Costa Rica, Centroamérica.
San Pedro de Montes de Oca, San José. Tel: (506) 2283 7634
E-mail: rmesen@produs.ucr.ac.cr

RESUMEN

Costa Rica, país centroamericano ubicado entre los 8,5° y los 11° latitud norte con una extensión terrestre de 51100 km², de relieve variado pero marcadamente montañoso. Formado y moldeado a partir de procesos tectónicos, fallamientos locales, actividad volcánica y eventos hidrológicos.

En los últimos 5 años la falda oeste de la Fila Costeña ha experimentado un crecimiento acelerado pero carente de una planificación integral, con lo cual se suelen desestimar variables sociales, económicas y ambientales; entre ellas la erosión

En la falda oeste de la Fila Costeña se forman más de 30 pequeñas cuencas, con fuertes pendientes y valles estrechos, que delinean cuencas cóncavas donde la escorrentía superficial y la erosión juegan un papel muy importante.

El modelo de erosión RUSLE (1997, USDA), ha sido empleado y calibrado a lo largo del mundo. Sin embargo en nuestro país se han realizado pocas calibraciones y varias de las variables carecen de información, por lo que se realizó una adaptación al modelo que incluye un análisis de sensibilidad numérica, una revisión teórica de las variables que evalúan los factores y ajustes al método de cálculo.

El modelo se evaluó mediante 6 casos en los que se varían las condiciones de cada factor para obtener el resultado en las situaciones extremas de uso del suelo y además comprender las interrelaciones que existen entre cada factor.

ABSTRACT

Costa Rica, Central American country located between 8.5 ° and 11 ° north latitude with a land area of 51100 km², with a varied relief but mostly mountainous. Formed and molded by tectonic processes, local faulting, volcanic activity and hydrological events.

In the last 5 years the western side of the Fila Costeña has experiment a fast growth but this has no integrated planning, which is often dismiss social variables, economic and environmental erosion including.

In the western hills of the Fila Costeña form more than 30 small watersheds, with steep slopes and narrow valleys, shaping concave watersheds where the surface runoff and erosion plays an important role.

The erosion model RUSLE (1997 USDA) has been calibrated and used throughout the world. But in Costa Rica there have been few calibrations and some variables don't have information. For this reason the model has been adjusted. This work includes a mathematical sensitivity analysis, a review of the theoretical variables that assess the factors and adjustments to the method calculation.

The model was evaluated by 6 cases in which they vary the conditions of each factor to obtain the result in the extreme situations of land use and also understand the interrelationships between each factor.

INTRODUCCIÓN

Costa Rica, país centroamericano ubicado entre los 8,5° y los 11° latitud norte con una extensión terrestre de 51100 km², de relieve variado pero marcadamente montañoso, con llanuras extensas, tres cordilleras, múltiples Filas, conglomerados montañosos y grandes farallones de hasta 300 metros de altura. Las elevaciones van desde los 0 msnm hasta los 3820 msnm,

Por su cercanía a la Zona de Convergencia Intertropical se ve afectada continuamente por fuertes frentes de aire. Estos ayudados por la topografía que se eleva paralela a las costas (de noroeste a sureste), provocan fuertes precipitaciones convectivas y orográficas, alcanzando valores anuales que van desde los 1500 mm hasta los 7000 mm.

Hacia el sur del país en el Cantón de Osa, a escasos kilómetros de la costa se levanta la Fila Costeña; un complejo sistema montañoso de aproximadamente 65 Km de largo; producto de la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa Caribe, fallamientos locales, actividad volcánica y eventos hidrológicos. Está formada por estrechas cadenas montañosas que desfilan junto a la costa desde el norte y se insertan hacia dentro del país en el sur, con vista al océano Pacífico, al Valle del General y al Humedal Térraba-Sierpe.

En la falda oeste de la Fila Costeña se forman más de 30 pequeñas cuencas con áreas entre 1 y 226 Km², con elevaciones que van desde los 0 msnm hasta los 1400 msnm. El 85% del área de las cuencas posee una pendiente superior al 12% y casi un 8% de la extensión supera el 75% de pendiente, formando valles estrechos que delinear cuencas cóncavas donde la escorrentía superficial juega un papel muy importante.

En los últimos 5 años la falda oeste de la Fila Costeña ha experimentado un crecimiento inmobiliario acelerado pero carente de una planificación integral que analice adecuadamente las variables ambientales, sociales y económicas.

Una de las variables ambientales que suele desestimarse es la erosión. La erosión es un proceso natural que se ve fuertemente acelerado por los cambios en el uso del suelo y en el relieve. En este proceso los suelos varían su espesor, desestabilizando los taludes, sobrecargando de sedimentos y otros materiales de arrastre a los sistemas naturales o artificiales que controlan el excedente de escorrentía superficial (ríos, humedales, canales, lagos y embalses), los cuales terminan anegados o colmatados, provocando desbordamiento e inundaciones en las comunidades vecinas o en las actividades agropecuarias e industriales que se encuentren en la parte baja de las cuencas.

El incremento en la erosión aumenta la carga de sedimentos en los ríos y en las desembocaduras afectando los procesos de oxigenación y la turbiedad en el agua. El incremento de erosión contiene intrínsecamente un aumento en la escorrentía y una reducción en la infiltración, afectando el comportamiento de los flujos superficiales y subterráneos.

A lo largo de los años se han definido diferentes métodos físicos y empíricos para modelar este proceso; estos integran de distintas maneras las principales variables que intervienen en el proceso erosivo.

En el último siglo se han hecho esfuerzos por conseguir ecuaciones que modelen el comportamiento de la erosión para diferentes regiones. En Estados Unidos de América en 1910 el Departamento de Agricultura (USDA) inicia una investigación sobre el proceso de erosión. Después de una serie de intentos por definir una cuenca que reuniera la mayor cantidad de variables determinantes del proceso, en 1965 se establece la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés). En 1997 se presenta la segunda versión del modelo, con una serie de modificaciones enfocadas hacia un uso más generalizado. En otros países se han realizado estudios similares, tal es el caso de Yugoslavia donde en 1988 se presenta la ecuación de Gavrilovic-Zeralic para cuencas onduladas. En Latinoamérica el modelo USLE se ha utilizado ampliamente.

OBJETIVOS

- Estudiar la aplicabilidad del modelo de erosión RUSLE en Costa Rica.
- Analizar la susceptibilidad a la erosión hídrica a partir de coberturas de uso de suelo.
- Definir los factores determinantes en el proceso erosivo para el caso de estudio.

MODELO DE EROSIÓN RUSLE

Este estudio tiene una visión sistémica y emplea un método que incluye las variables fundamentales que intervienen en el proceso de erosión. El modelo de predicción de erosión hídrica RUSLE¹, está diseñado para predecir la pérdida anual de suelo causada por la precipitación y el escurrimiento sobre una sección compuesta por terrazas y taludes, con una cobertura vegetal de suelo y un sistema de manejo dado. Este modelo se basa en el supuesto de que las mayores fuerzas hídricas que intervienen en el proceso son el impacto de las gotas y el flujo a través de la superficie del suelo; además, que la erosión se manifiesta de manera laminar en surcos o pequeñas cárcavas. El modelo está definido a partir de una sección transversal por lo tanto no puede ser aplicado directamente a cuencas o formaciones tridimensionales complejas.

El modelo se representa como una ecuación de seis factores donde dos de los factores (R, K) aportan el orden de magnitud y las unidades respectivas, mientras que los cuatro restantes (L, S, C, P) son factores adimensionales que permiten adaptar las estimaciones a condiciones distintas de la parcela de prueba en que fue desarrollado el método.

La siguiente ecuación muestra las variables del modelo. En la tabla 1 se muestran las unidades del modelo en el sistema inglés y su correspondencia en el sistema de unidades métricas.

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

A:= pérdida anual de suelo dada en unidades de masa por área.

R:= Factor de precipitación y escurrimiento. Se conoce como erosividad.

K:= Factor de características del suelo. Se conoce como erodabilidad.

¹ Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, Revisada; por sus siglas en inglés.

L:= Factor topográfico, longitud del talud. Pondera la variación de la erosión respecto al efecto de la extensión de la pendiente.

S:= Factor topográfico, nivel de pendiente. Estima la variación de la erosión respecto a la encontrada en el lote de control.

C:= Factor de cobertura. Simula el efecto de los diferentes usos del suelo con respecto a un suelo desnudo en continua labranza.

P:= Factor de prácticas de control de erosión.

Tabla 1.- Dimensión y unidades de los factores del modelo RUSLE

Símbolo	Dimensión	Unidades Inglésas	Factor de conversión (1 UI = #UM)	Unidades Métricas
A	$\frac{M}{L^2 * T}$	$\frac{Ton}{acre * año}$	2,242	$\frac{ton}{Ha * año}$
R	$\frac{L * F * L}{L^2 * T * T}$	$100 \frac{ft * Tonf * plg}{acre * hrs * año}$	17,02	$\frac{MJ * mm}{ha * hrs * año}$
K	$\frac{M * L^2 * T}{L^2 * L * F * L}$	$\frac{Ton * acre * hrs}{100 * acre * ft * Tonf * plg}$	0,1317	$\frac{ton * Ha * hrs}{Ha * MJ * mm}$

Donde:

Dimensión	M:=Masa L:= longitud T:= tiempo F:= fuerza
Unidades Inglésas	Ton: tonelada masa acre: ft: pie Tonf: tonelada fuerza plg: pulgada hrs: hora
Unidades Métricas	ton: tonelada métrica (1000 kilogramos) Ha: hectárea (10000 metros cuadrados) MJ: megajulios hrs: hora mm: milímetros (0,001 metros)

Fuente: Renard, et al., 1997

Cada uno de estos factores cuenta con múltiples métodos de cálculo de acuerdo al tipo de información base que se tenga y las características de la zona de estudio. Para decidir cuales ecuaciones utilizar se realizó un análisis de sensibilidad numérica y una revisión de los supuestos de cada una de las ecuaciones de los factores, con el fin de seleccionar el método que mejor se ajustara a las condiciones de la zona de estudio.

El factor climático (R), corresponde a la suma de la energía cinética por la intensidad máxima en 30 minutos de cada evento de lluvia. En la actualidad existen varias metodologías para determinar este factor a partir de indicadores climáticos tales como precipitación o intensidad promedio anual.

$$R = 5.7328p - 6870.9 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$R = 0.417p^{2.17} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

p:= precipitación anual promedio

El factor de erodabilidad (K), representa el efecto de las propiedades del suelo y las características del perfil en la erosión. “Expresa la influencia de las propiedades químicas y físicas del suelo en la erosión, a través de la infiltración, la permeabilidad, el aplastamiento, la abrasión y las fuerzas de transporte.”² Existen muchas regresiones y nomogramas con los cuales se puede estimar este factor, y cada uno de ellos posee sus propias limitaciones.

² Ministerio de Medio Ambiente Español, 1991.

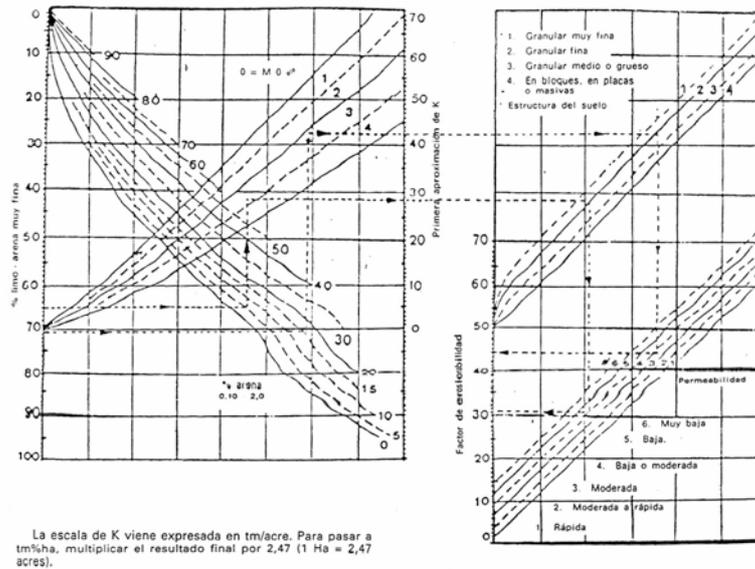


Figura 1.- Nomograma de Wischmeier para el calculo del Factor K.

Uno de los métodos más utilizados para calcular este parámetro es el nomograma realizado por Wischmeier en 1971, el cual se muestra en la figura 1. Este reúne 5 parámetros del suelo: el porcentaje de limo modificado (partículas con diámetros de 0,002-0,1 mm), el porcentaje de arena modificada (diámetro entre 0,1 y 2 mm), el porcentaje de materia orgánica, la estructura de suelo y la permeabilidad. Como se puede ver en la figura 1, este nomograma solo puede ser evaluado para suelos con materia orgánica menor a un 4%. El resultado del mismo se encuentra en unidades inglesas y por lo tanto es necesario realizar una conversión de unidades hacia el sistema métrico.

En caso de contar con datos escasos o suelos con porcentajes de materia orgánica superior al 4%, se puede recurrir a la ecuación del diámetro geométrico promedio, esta utiliza la granulometría del material como dato de entrada.

$$K = 7,594 \left(0,0034 + 0,0405 * e^{\left(\frac{1}{2} \left(\frac{\log(Dg)+1,659}{0,7101} \right)^2 \right)} \right) \tag{Ec. 4}$$

Donde:

$$Dg = e^{(0,01 \sum f_i * \ln(m_i))}$$

Dg:= promedio geométrico del diámetro de partícula.

f_i:= porcentaje de cada fracción de partícula, por ejemplo arcilla, limo, arena fina.

m_i:= promedio aritmético del tamaño de partícula para cada fracción.

El factor topográfico (LS), resume las características de la sección mediante el parámetro de pendiente y longitud de talud, donde “La longitud de talud se define como la distancia horizontal desde donde se origina la escorrentía hasta el punto donde la pendiente decrece lo suficiente para que se inicie la depositación y la escorrentía se convierta en un canal uniforme de agua.”³. Ambos parámetros poseen ecuaciones que derivan en el valor del factor.

³ Traducido de Wischmeier y Smith, 1978.

Como se indicó anteriormente este factor realiza un ajuste respecto de las condiciones topográficas de la zona donde se realizó la calibración del modelo, por lo cual dentro de las ecuaciones se observan referencias a la zona de calibración. En la bibliografía se anota que las ecuaciones funcionan bien aun para pendientes de hasta 50°. A continuación se resumen las ecuaciones que definen este factor.

$$L = \left(\frac{\lambda}{72,6} \right)^m \quad m = \frac{\beta}{(1+\beta)} \quad \beta = \frac{\text{sen } \theta / 0,0896}{3,0 * (\text{sen } \theta)^{0,8} + 0,56} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\begin{cases} s < 9\% & \Rightarrow S = 10,8 * \text{sen } \theta + 0,03 \\ s > 9\% & \Rightarrow S = 16,8 * \text{sen } \theta - 0,50 \end{cases} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

λ := longitud horizontal de la pendiente en pies.

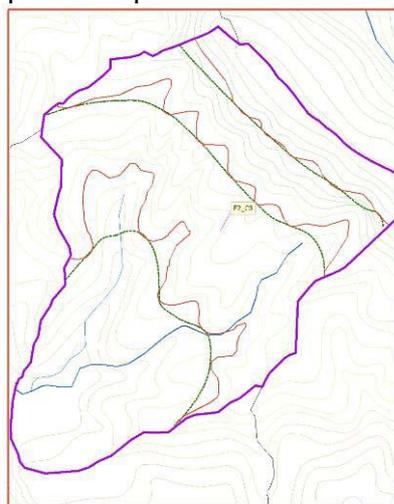
s y θ := pendiente en porcentaje y grados respectivamente

Para el análisis en cuencas pequeñas se presentan dos metodologías alternas para el cálculo del parámetro λ ; densidad de drenaje de Horton y contorno-punto extremo de Williams y Berndt (1976).

Horton propone que el parámetro λ es igual a la mitad del inverso de la densidad de drenaje, en este caso λ se estimaría a partir de la siguiente ecuación.

$$\lambda = 0,5 \frac{S_{\text{superficie}}}{l_{\text{longitud total de cursos de agua}}} \quad (\text{Ec. 7})$$

El método contorno-punto extremo de Williams y Berndt “se basa en que tanto la longitud del contorno como el número de puntos que extremasen el contorno deben ser tenidos en cuenta, ya que esos puntos de cruce del cauce con el contorno son máximos locales en una dirección ascendente. Así establece que λ puede estimarse aproximadamente dividiendo la longitud del contorno por dos veces el número de puntos extremos, en definitiva los puntos en que la curva de nivel corta la red de drenaje.”⁴ En la siguiente figura se muestra el cálculo del parámetro λ para cualquier curva de nivel.



$$\lambda = \frac{LC * LB}{2 * n * \sqrt{LC^2 - LB^2}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

- Divisoria de aguas
- Cursos de agua
- LC:= longitud de la curva de nivel (Km)
- LB:= longitud del contorno base (Km)
- n:= número de veces que la curva corta la red de drenaje

Nota: La longitud de contorno base de una curva de nivel es la línea cóncava más corta ubicada aguas abajo de la curva, que la roza en la mayor cantidad de puntos.

Figura 2.- Variables para el cálculo de λ con el método contorno-punto extremo

⁴ Ministerio de Medio Ambiente Español, 1991.

Williams y Berndt propusieron una ecuación alterna para calcular el parámetro s del factor S en caso de tener cuenca pequeña. Para este caso, la literatura recomienda utilizar la ecuación para el factor S propuesta en 1982 por Wischmeier.

$$s' = 0,25 * z * \frac{LC_{25\%} + LC_{50\%} + LC_{75\%}}{S_{superficie}}$$

$$\begin{cases} s < 9\% \Rightarrow S = \frac{0,43 + 0,30 * s + 0,043 * (s')^2}{6,613} \\ s > 9\% \Rightarrow S = \left(\frac{s'}{9}\right)^{1,3} \end{cases} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

- s' := pendiente equivalente
- z := diferencia máxima de elevaciones
- LC_i := longitud de la curva de nivel a la altura i

El factor C es modelado a partir de una ecuación multiplicativa de 5 subfactores, los cuales tienen su propia ecuación, donde intervienen varios indicadores según corresponda con la naturaleza del parámetro.

$$C = SLR = PLU * CC * SR * SC * SM \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

- SLR := relación de pérdida de suelo

PLU := subfactor de uso del suelo anterior. Este factor expresa la influencia de los residuos dejados por el anterior uso del suelo; así como el efecto del labrado y consolidación que se le haya dado al suelo. Se calcula con la ecuación (Ec. 11) considerando las constantes de la tabla 2.

$$PLU = C_f * C_b * e^{-\left((C_{ur} * B_{ur}) + \left(\frac{C_{us} * B_{us}}{C_f^{(C_{uf})}} \right) \right)} \quad (\text{Ec. 11})$$

C_f := factor de consolidación de la superficie del suelo. El proceso de labrado tiende a destruir las uniones del suelo, aumentando el potencial de erosión.

B_{ur} y B_{us} := indicadores que evalúan el efecto de las raíces y la materia muerta respectivamente, de tal manera que las raíces funcionan como barreras, mientras que la materia muerta contribuye a la plasticidad y resistencia del suelo.

Tabla 2.- Constantes de calibración del subfactor PLU

$C_b=0,951$	$C_{ur}=0,00199$ acre*plg/lb	$C_{us}=0,000416$ acre*plg/lb	$C_{uf}=0,5$
-------------	---------------------------------	----------------------------------	--------------

Fuente: Renard, K.G.; et All. (1997) USDA

CC := subfactor de cobertura de copas. Estima la eficiencia con que las copas de la vegetación reducen la energía de impacto de las gotas de lluvia.

$$CC = 1 - F_c * e^{(-0,1 * H)} \quad (\text{Ec. 12})$$

- F_c := fracción del suelo que se encuentra cubierta por las copas.
- H := distancia desde la copa hasta el suelo.

SR:= subfactor de rugosidad de superficie. Este subfactor expresa la rugosidad aleatoria del terreno. Un terreno rugoso se erosiona menos que un terreno alisado, pues en el terreno rugoso se disminuye la capacidad de transporte y el efecto de la escorrentía al reducirse la velocidad.

$$SR = e^{(-0,66(R_u - 0,24))} \quad (\text{Ec. 13})$$

R_u := rugosidad media, en pulgadas.

SC:= subfactor de cobertura de superficie. La cobertura superficial afecta la erosión reduciendo la capacidad de transporte de la escorrentía, provocando depositación en zonas planas y reduciendo la susceptibilidad del suelo al impacto de las gotas.⁵

$$SC = e^{\left(-b * S_p * \left(\frac{0,24}{R_u}\right)^{0,08}\right)} \quad (\text{Ec. 14})$$

S_p := es el porcentaje de área cubierta por los materiales no erodables.

R_u := es la rugosidad media de la superficie según como se definió en el apartado anterior.

SM:= subfactor de humedad del suelo. Este factor relaciona la humedad presente en la capa superficial de suelo. Debido a la poca investigación que se ha realizado con respecto a este subfactor, en el Haddbook 703 se recomienda utilizar el valor igual a 0,5; dado que este subfactor varía desde 1,0 hasta 0,0 a lo largo del año. Donde los suelos alcanzan la unidad una vez se encuentren saturados.

El Factor P es utilizado durante la predicción de la erosión para establecer el impacto aproximado que tendría alguna medida de mitigación de la erosión. Existen múltiples ecuaciones de acuerdo a la medida de mitigación que se plantee, sin embargo por la naturaleza de este estudio este factor no será contemplado y para efectos de todos los cálculos y análisis se supone que su efecto es neutro, es decir su magnitud es igual a la unidad.

El resultado final del modelo debe ser comparado con algún estándar que indique el nivel de erosión o el rango de susceptibilidad en que se encuentra la zona de estudio. Para este efecto se definen dos criterios de tolerancia y categorización de la erosión; el primero basado en la tasa de erosión que se da en ladera es decir en ton/ha-año. El segundo criterio se define en función de la profundidad de suelo que es afectada por la erosión; es decir de acuerdo a la tasa de erosión cual es la profundidad de suelo que se desprendería respecto de la profundidad de la primera capa de suelo.

La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), para América Latina; propone los siguientes límites en la tasa de erosión anual. De manera similar en el estado de Michigan, Estados Unidos de América se utilizan los siguientes límites.

Tabla 3.- Clasificación de severidad de la erosión sufrida

Clase	A (ton/Ha*año) (según FAO)	A (ton/Ha*año) (en Michigan)
Tolerable o Ligera	0-10	0-7,41
Moderada	11-50	7,41-19,77
Severo	51-200	19,77-32,13
Muy Severo	>200	>32,13

Fuente: López Mora

⁵ Modificado de Agricultura Handbook, N° 703; USDA.

El siguiente rango realizado por el Soil Survey Staff de los Estados Unidos de América (1951) depende de la altura de suelo desprendida respecto de la profundidad total.

Tabla 4.- Clasificación de la severidad erosiva según el Soil Survey Staff

Clase	Rango de pérdida (Horizonte A; capa cultivable)	Detalle
Ligera	<25%	Pocos surcos o manchas. Reducción del espesor del horizonte A (o capa superficial cultivable). Situación presente en la mayor parte del área. Fácil recuperación de la capa cultivable.
Moderada	25%-75%	El labrado atraviesa el horizonte A (o capa superficial cultivable). Cárcavas poco profundas.
Severa	>75%	Remoción casi completa del horizonte A. La capa arable esta mayormente compuesta por el horizonte B. Cárcavas superficiales. Pérdida de parte del horizonte B (subyacentes a la primera capa)
Muy severa	total	Cárcavas profundas. Perfiles de suelo destruidos y perdidos.

Fuente: Modificado de Ministerio de Medio Ambiente Español, 1991

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD NUMÉRICA

El modelo de erosión RUSLE, al ser de carácter empírico, posee un rango de calibración establecido por las condiciones y características del lugar donde fue calibrado y desarrollado. Adicionalmente las ecuaciones auxiliares siguen un comportamiento determinado por los supuestos y la variación de los factores en la zona de estudio.

Se busca mediante un análisis de sensibilidad numérica explorar la variación numérica de los factores para cada uno de los parámetros e indicadores que los determinan, definir sus rangos de comportamiento y comprender las correlaciones lógico-matemáticas que sustentan las ecuaciones.

El modelo fue calibrado y desarrollado para muchas condiciones y particularidades de los Estados Unidos de América. En Costa Rica algunos de los parámetros que intervienen en la estimación de los factores que componen el modelo varían hasta en un 200% con respecto al rango de calibración.

El análisis de sensibilidad reúne la evaluación de las variables en sus valores mínimos, máximos, así como la revisión preliminar del comportamiento de crecimiento de cada factor según el crecimiento de cada variable de manera aislada. El análisis se realizó por factores y posteriormente se estudió la interacción de todos los factores con respecto al modelo.

Para estudiar el comportamiento específico del factor respecto del rango de variación de los parámetros que lo componen, se evalúa la función de cada factor en varios datos representativos de la variable. Para seleccionar los casos se utilizan valores incrementales, o la nube de dispersión; el primero se usa cuando cada variable del factor es independiente, el segundo cuando las variables del factor están interrelacionadas.

En los valores incrementales se divide el rango de la variable en grupos de acuerdo a órdenes de magnitud, presencia de casos en la zona de estudio, entre otros. Posteriormente para cada grupo se define un incremental y se evalúa la ecuación en todos los valores. En las ecuaciones que tenían más de una variable se evaluó una de las variables asumiendo las restantes constantes, luego se le aplicó el incremental a las variables constantes y se volvió a

evaluar la variable inicial.

El análisis de nube de dispersión consiste en definir suficientes casos donde a partir de números aleatorios se asignan los valores correspondientes a las variables que componen cada ecuación, cuidando que se cumplan las interrelaciones.

Ahora se resumen algunos resultados sobresalientes del análisis de sensibilidad que se realizó a cada factor del modelo de erosión RUSLE.

Al factor R no se le realizó el análisis de sensibilidad, pues se cuenta con una capa de información de este dato y no es necesario realizar ningún cálculo preliminar para utilizarlo.

Para el factor K se evaluaron tres posibles ecuaciones; a continuación se muestran los resultados de dos de ellas: la ecuación de Wischmeier y Smith basada en el nomograma de la figura 1 y la ecuación del diámetro geométrico promedio (Ec. 4).

La evaluación del comportamiento de las variables que reúne la ecuación de Wischmeier y Smith, reflejó la importancia del subfactor M, el cual se obtiene de la granulometría y evalúa doblemente el porcentaje de limos, reflejando la importancia que tiene este grupo granulométrico dentro del comportamiento final de la erodabilidad. En el análisis de valores extremos se encontró que para el valor máximo del factor K el subfactor M representaba 87% del resultado. También se observó que debido a la forma en como se define el subfactor M, no es posible evaluar materiales de suelo que sean netamente arcillosos, pues este grupo granulométrico no se incluye en el análisis.

La ecuación del diámetro geométrico es muy versátil por su adaptabilidad, ya que aunque se basa en la granulometría del suelo, esta puede ser agrupada y segregada a conveniencia del usuario. Una revisión previa de la información base con la que se contaba determinó la agrupación que se empleó. Mediante una evaluación de casos aleatorios se definió el comportamiento de la ecuación. En la figura 3 se muestra la distribución encontrada; en esta se puede ver que el comportamiento observado en la ecuación de Wischmeier se mantiene, es decir los materiales arenosos y arcillosos presentan la menor erodabilidad, mientras que los materiales mal graduados y los limos presentan un K mayor.

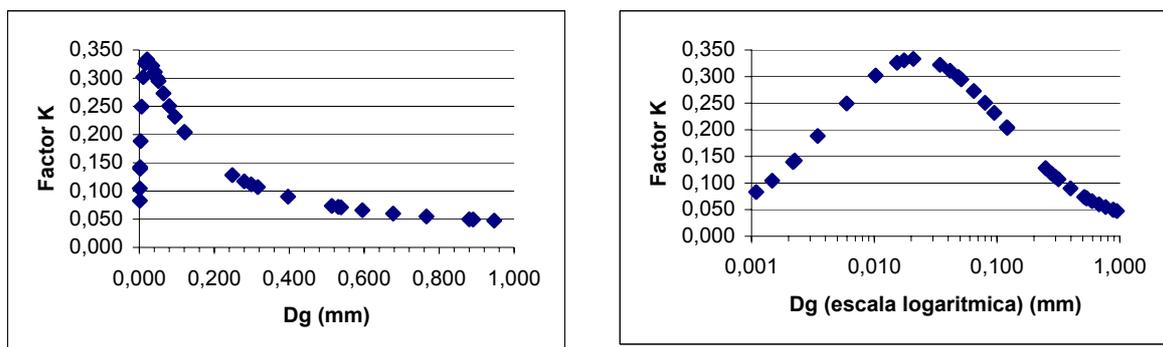


Figura 3.- Comportamiento del factor K de acuerdo al diámetro promedio geométrico de partícula

El efecto de la topografía está incluido dentro de los factores L y S, uno determina la longitud del talud y el otro la pendiente del mismo. El análisis de sensibilidad se realizó de manera separada para cada factor, y para cada uno de sus componentes.

En el estudio se encontró un comportamiento lógico y consistente en el factor L de acuerdo a las ecuaciones definidas tradicionalmente (Ec. 5), es decir el factor aumenta conforme aumenta la longitud de la pendiente.

El análisis realizado a la ecuación para cuencas definida por Williams y Berndt (Ec. 8) y conocida como método contorno-punto extremo se comportó de acuerdo a los supuestos. Es decir, el factor L aumenta cuando aumenta la longitud de la curva, ya que esto implica que las laderas son más anchas y por consiguiente representan una mayor área. El factor también aumenta al aumentar la longitud del contorno base de la curva, esto pues cuando el mismo aumenta las cuencas se vuelven más lisas, las laderas son más continuas, los cañones son mucho menos pronunciados y las gotas deben recorrer mayor distancia sobre la ladera para llegar al cauce de agua. Cuando en indicador n (numero de uniones entre cauce y curva de nivel) aumenta, el factor disminuye pues al haber más cauces cercanos a la curva de nivel el flujo superficial debe recorrer menor distancia para alcanzar el río.

En la evaluación del factor S, para el caso tradicional con un solo talud (Ec. 6) así como para la ecuación alterna para evaluar el comportamiento en cuencas pequeñas (Ec. 9), se encontró un comportamiento marcadamente diferente para pendientes superiores a los 75° . Una de las ecuaciones se basa en las funciones trigonométricas y la otra en una parábola; es de esperar, entonces, que ambas ecuaciones pierdan su comportamiento lineal a partir de algún valor. En la ecuación para una sola ladera el crecimiento tiende a una asíntota horizontal mientras que en la ecuación alternativa para cuencas pequeñas la asíntota es vertical; en ambos casos se concluye que las ecuaciones no tienen capacidad para predecir el comportamiento del factor para pendientes superiores a 65° , adicionalmente en la literatura se encontró que la pendiente máxima de calibración de la ecuación tradicional es inferior a los 50° .

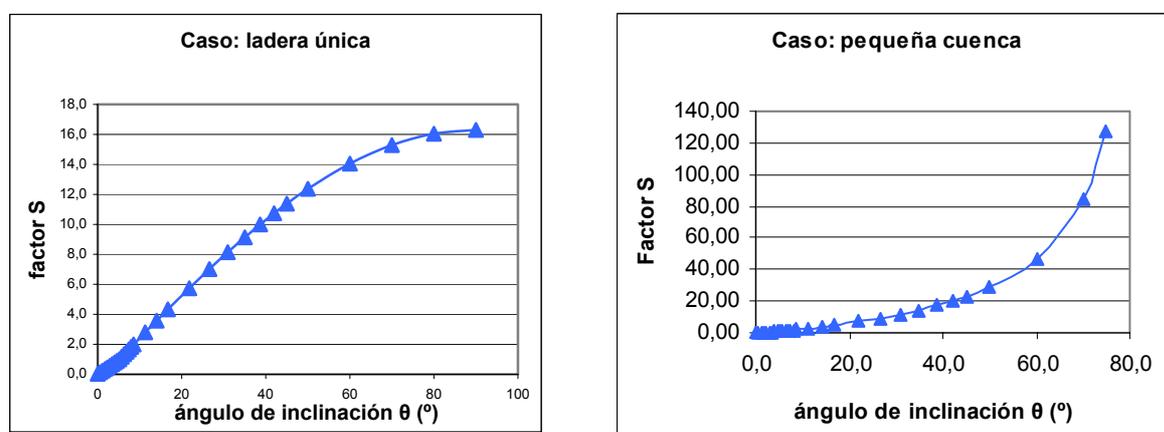


Figura 4.- Comportamiento del Factor S según la metodología para ladera única y cuencas pequeñas

La evaluación del factor C (SLR) fue sumamente importante en la decisión de la metodología, ya que algunos de los parámetros que solicitan las ecuaciones son difíciles de determinar y en general se contaba con poca información explícita y detallada respecto de cada uso del suelo que se definió en la zona de estudio. Algunos de los parámetros no se pudieron obtener y se estimaron de acuerdo al efecto que se supuso produciría dentro de la modelación del factor C.

El subfactor PLU integra el efecto de los residuos y la compactación que se da al realizar un cambio en el uso del suelo (Ec. 11). El análisis de esta variable dio como resultado que un

remoción o movimiento del suelo aumenta el efecto de la erosión y por lo tanto el valor numérico del subfactor, mientras que los residuos forman pequeñas barreras y disminuyen la velocidad de la escorrentía.

El subfactor CC representa el efecto reductor que tiene el dosel forestal sobre la energía de impacto de la precipitación (Ec. 12). Por la estructura de la ecuación se asumió como determinante el porcentaje de cobertura, Fc, pues la altura de caída H, podría ser nula y el subfactor seguiría dando un resultado, este sería el caso de un arbusto denso. Se encontró que a medida que el dosel se separa del suelo el efecto del porcentaje de cobertura se reduce, como se muestra en la figura 5.

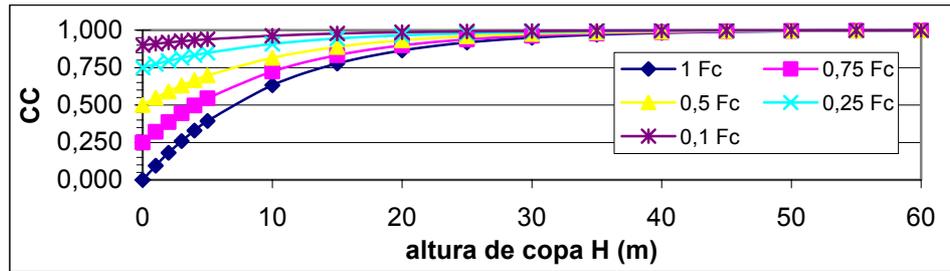


Figura 5.- Comportamiento del subfactor CC de acuerdo a sus variables

Para el subfactor SR (Ec. 13) se encontró que al aumentar la rugosidad media de la superficie del suelo, se reduce el subfactor y que más allá de unas 3 pulgadas el subfactor alcanza el valor de 0,1.

El subfactor SC requiere de una constante, sin embargo en la literatura se encontró que no se ha llegado a un consenso de que valor usar (Ec. 14). Tomando en cuenta la ecuación, los rangos establecidos por la literatura, los dos casos de constantes que se tienen y el comportamiento esperado de la ecuación de acuerdo a las variables, se construyó una sucesión de crecimiento que se resume en la figura 6.

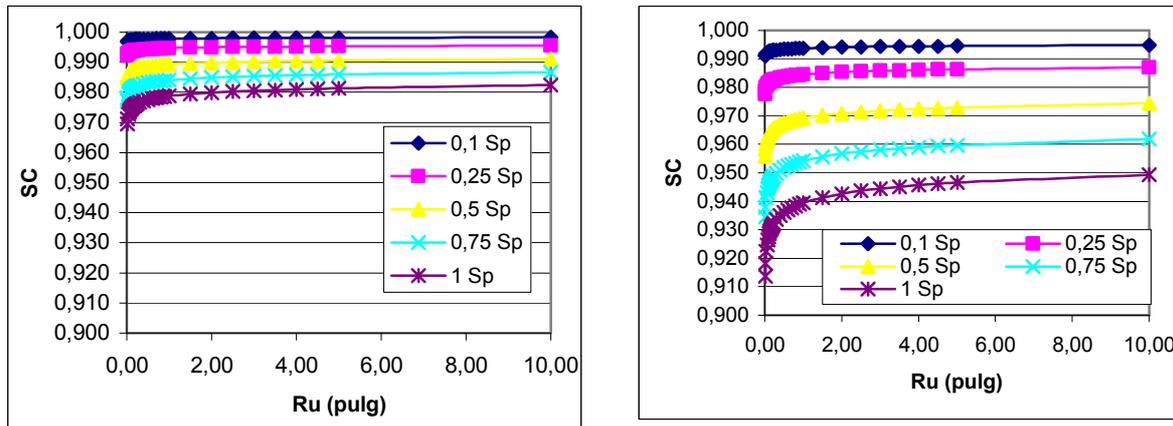


Figura 6.- Comportamiento del subfactor SC asumiendo la constate b como 0,024(izq) y 0,07(der)

El subfactor varía entre un 3% y un 8% del máximo para cada posible constante; si bien la diferencia entre una constante y otra es de 3 veces, en cualquiera de los dos casos el subfactor varía menos de un 10% entre los casos extremos mínimos y el valor máximo.

En la bibliografía se recomienda tomar el subfactor SM (humedad del suelo) como 0,5 suponiendo un comportamiento lineal a lo largo de las cuatro estaciones. En nuestro país se

tienen dos estaciones principales, seca y lluviosa; bajo este concepto se supondrá un valor unitario durante la estación lluviosa y un valor nulo en la seca. Así para la zona de estudio se tienen 3 meses secos por tanto el subfactor SM alcanza el valor de 0,75.

CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Se definió la zona de estudio general, como el área que reúne las cuencas occidentales de la Fila Costeña, excluyendo las llanuras costeras. Esta zona está compuesta por 32 cuencas definidas por la topografía y los afluentes fluviales presentes en la cartografía nacional; mapas topográficos, IGN escala 1:50000; realizados en 1968. A esta zona de estudio se le asocian una serie de características que varían espacialmente, las características se agruparon en clima, topografía, edafología y efectos antrópicos. Inicialmente fue necesario ubicar y detallar cada una de las características citadas. La siguiente figura muestra los nombres de los afluentes y el indicador que se le designó a cada cuenca.

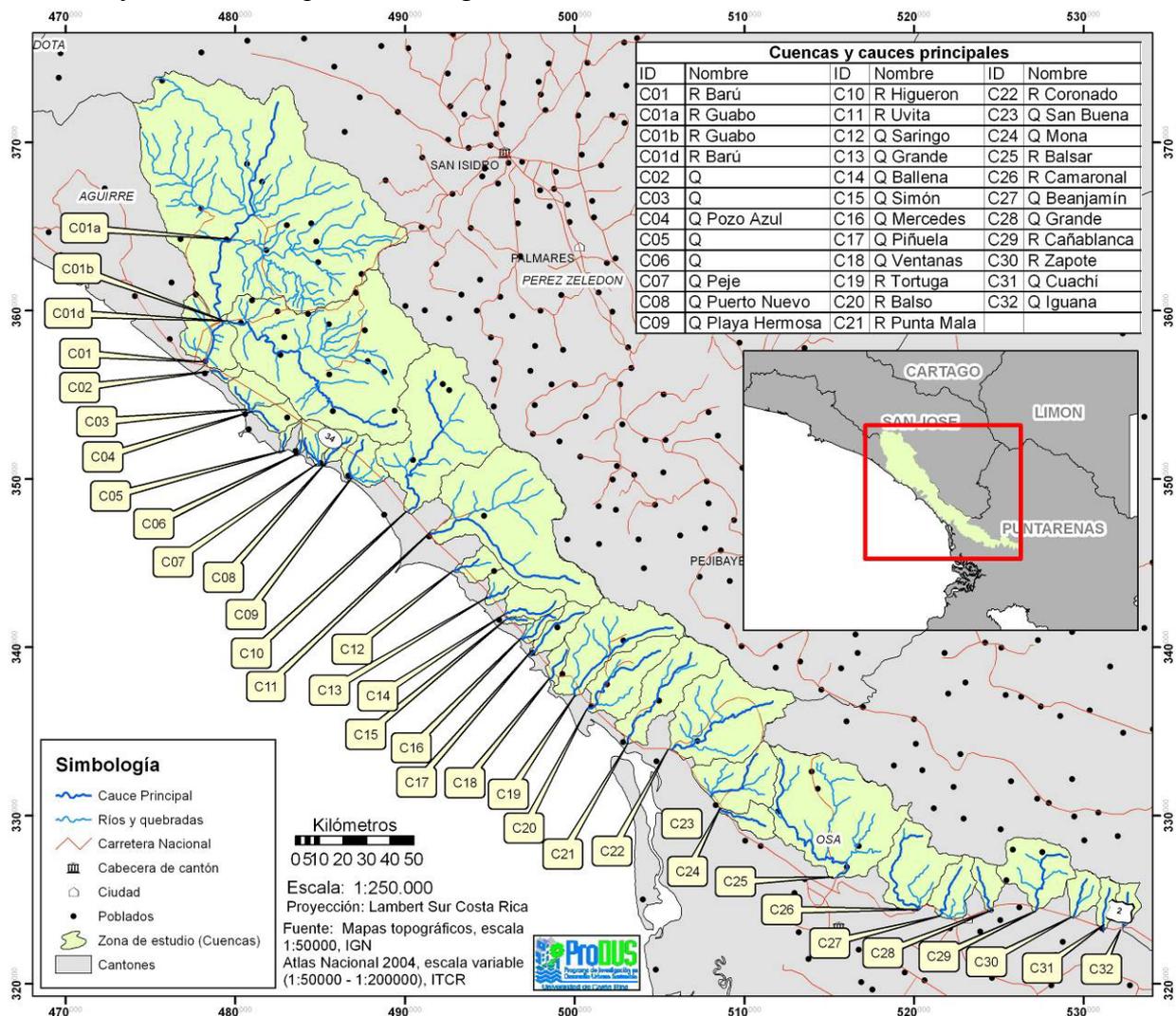


Figura 7.- Mapa de ubicación de la zona de estudio.

Nota: entiéndase Tc:= tipo de cauce R:= río; Q:= quebrada. En caso que no se indique el nombre se debe a que este no se incluye dentro la cartografía nacional.

Con el fin de caracterizar y agrupar las cuencas se calcularon una serie de parámetros morfohidrológicos, tales como área, perímetro, índice de compacidad, número de orden de Horton para el cauce principal, longitud y pendiente media por cuartillas. La cuenca de mayor área es la ubicada en el extremo norte, la del río Barú, con una extensión de 226 Km², seguida por la cuenca del río Uvita con 46 Km², hasta llegar a cuencas muy pequeñas cercanas a un kilómetro cuadrado.

El número de orden de Horton del cauce principal por cuenca, varía entre 4 y 1 siendo 2 el valor más común. La longitud de los cauces y de la red de drenaje varían hasta en dos y tres ordenes de magnitud respectivamente, siendo el cauce principal más largo el de la cuenca del río Barú con 19,6 Km y una red de drenaje de 225 Km.

Los cauces principales tienen un comportamiento en el cual la pendiente media no puede representar la sección longitudinal del río. Se encontró que los cauces principales mantienen pendientes variables, algunos con valles internos angostos por el choque de dos montañas o pequeños de procedencia sedimentaria. Estos valles se presentan tanto en la parte baja como en la parte media y alta de las cuencas.

Costa Rica cuenta con un atlas climático general. En el 2007, en un proyecto de graduación de ingeniería civil de la Universidad de Costa Rica (Orozco, 2007), se actualizó y mejoró el nivel de detalle de los indicadores, con información reciente de muchas estaciones climatológicas ubicadas por todo el país. De acuerdo con la cartografía, en la zona de estudio se presenta una precipitación media anual entre los 2500 mm y los 3500 mm, predomina el rango intermedio entre los 2750 mm a los 3250 mm. Analizando los datos climáticos y las observaciones de campo, se concluye que la precipitación se da inicialmente por convección térmica y convección frontal en la costa, mientras que a medida que se adentra en el territorio pasa a ser orográfica. En general se tienen lluvias copiosas de corta duración y gran intensidad.

METODOLOGÍA Y LINEAMIENTOS DE CÁLCULO

Las condiciones climáticas y edafológicas de Costa Rica son diferentes de la región donde se desarrolló y calibró el modelo de erosión RUSLE (USDA, 1997). Se han realizado pocas calibraciones locales y diversas de las variables carecen de información, por lo que, se propuso una adaptación a la metodología para evaluar las características de los factores.

Para evaluar el modelo de erosión en una zona de estudio tan grande se debió realizar una reducción, así se convirtió toda la zona de estudio en pequeñas laderas uniformes (más de 1,3 millones) representadas por un arreglo tipo raster donde a cada píxel o celda se le aplica el modelo de manera aislada. Previo a la aplicación del modelo se digitalizaron todas las variables que intervienen en el cálculo de cada factor. Al aplicar el modelo de manera aislada punto a punto se desprecia el efecto de la acumulación de la escorrentía y el lodo, esta es una de las razones por las cuales el estudio finalmente se enfoca en la susceptibilidad de las cuencas y pierde capacidad para calcular el volumen real de sólidos que son trasladados hasta los cauces.

El modelo de erosión RUSLE se aplicó en dos fases (Figura 8). En cada una se definieron 5 componentes, que sintetizan el enfoque de cada fase. En ambas, se utiliza un SIG; para

representar y procesar la información cartográfica pues el proceso de cálculo requiere de la superposición y combinación de diversas capas de información. Los cinco componentes son:

1. Objetivo secundario:= justificación de los supuestos y la metodología aplicada.
2. Zona de estudio:= porción de la zona de estudio general en la cual se aplicara la fase.
3. Unidad de estudio:= tipología de la sección unitaria de la zona de estudio.
4. Variable de interés:= factor o característica de la zona de estudio que se manipulara para llegar al objetivo.
5. Método de aplicación:= sistema informático bajo el cual se aplicara el modelo.

En la figura 8 se da el diagrama de flujo que resume los componentes de las fases y la Fase 0 donde se realizó la digitalización de los datos preparándolos para el procesamiento de las fases. También se ubica el análisis de sensibilidad como un paso previo, posterior a la definición del modelo y sus variables.

Por el comportamiento del modelo matemático en el análisis de sensibilidad y la variación de las características de la zona de estudio se decidió que el tamaño del píxel será de 20 X 20 metros, con el cual se logra un comportamiento consistente del modelo matemático, una buena representación de la variación topográfica y antrópica así como una definición consistente del comportamiento curvilíneo de los límites de las variables climáticas y edafológicas.

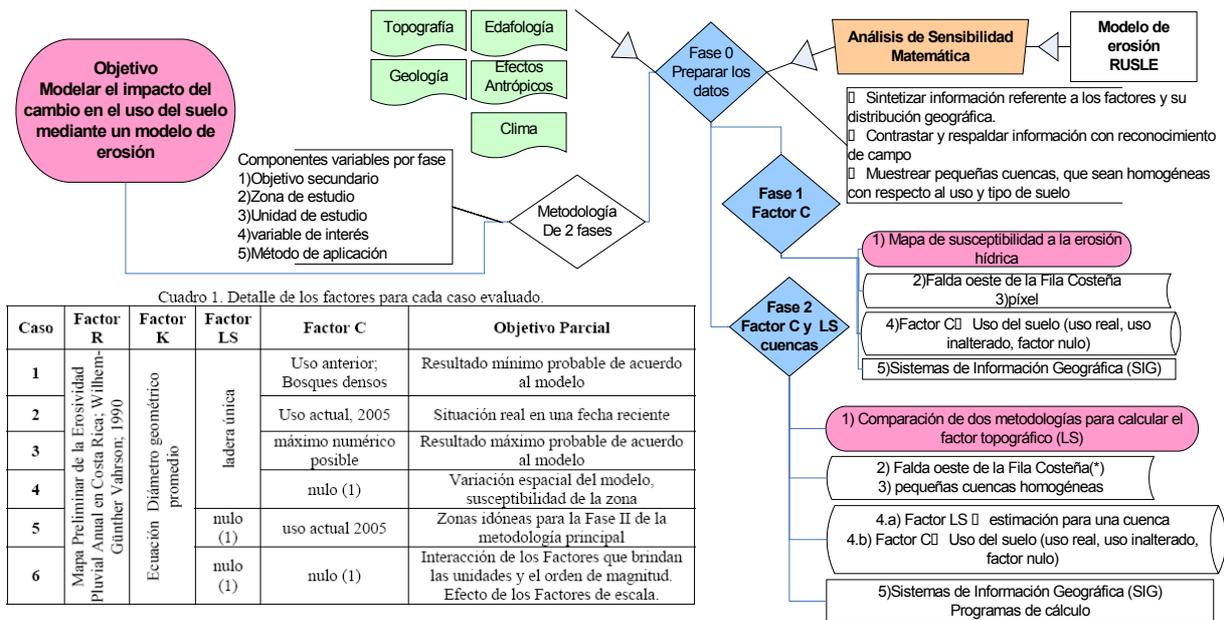


Figura 8.- Esquema metodológico

Para estudiar el efecto del cambio de uso del suelo, se definen tres casos posibles para el Factor de cobertura de uso del suelo, C. Caso 1: uso del suelo sin intervención humana, supuesto a partir de el mapa de zonas de vida, la corroboración de campo y la entrevista con el Dr. Jorge Lobo. Caso 2: uso del suelo real estimado a partir de un mapa de uso del suelo; y caso 3; el uso del suelo con el cambio más radical en la cobertura vegetal; en el entendido que se asignó el valor numérico máximo que podría alcanzar el Factor con las características locales; suponiendo la total pérdida de la cobertura vegetal. Adicionalmente se definen tres

casos complementarios donde se elimina alguno de los factores con el fin de entender las interconexiones que tienen cada factor, el peso de cada uno en la variación espacial y en el orden de magnitud del resultado. La selección de la información, los factores y las variables que intervienen en cada caso se basó en los resultados preliminares del análisis de sensibilidad, donde se encontró que era probable que el resultado del modelo evaluando las condiciones reales de uso del suelo (caso 2) se encontraría muy distante de los rangos de valores que apuntaba la bibliografía como probables. Así la aplicación de los casos busca subsanar el problema evaluando los valores extremos de uso del suelo y las interacciones que se dan entre los factores. En figura 8 se da la tabla que resume las condiciones de cada factor según el caso que se evalúe.

La capa que representa al factor R se obtuvo realizando una interpolación espacial a las curvas de isoerodientes definidas por Vahrson en su mapa de 1990.

La información para el factor K se obtiene del estudio para mejorar el nivel de detalle del mapa de suelos escala 1:200.000, en este se encontró información granulométrica para una serie de trazas de suelo divididas de acuerdo a la Séptima Aproximación de la USDA, 1975. El factor se definió con la ecuación del diámetro geométrico ya que los suelos de la zona de estudio tienen un porcentaje de materia orgánica mayor al 4%, límite para poder aplicar el nomograma de Wishmeier.

Las variables del factor topográfico L y S se calculan definiendo un modelo de elevación digital a partir de las curvas de nivel presentes en la cartografía nacional en escala 1:50000. Estas curvas de nivel se tienen cada 20 m y hay curvas auxiliares cada 10 m donde el relieve es más plano.

La asignación del valor numérico a cada variable de los subfactores para cada uso del suelo se fundamenta en la entrevista realizada al biólogo de la Universidad de Costa Rica, Dr. Jorge Lobo, y observaciones de campo durante una gira realizada en noviembre del 2008.

Para el primer Caso, uso del suelo anterior, se asumieron las condiciones de un bosque virgen inalterado dando como resultado un factor C de 0,022

El caso uso del suelo actual (Caso 2) se realizó a partir del mapa de uso del suelo del 2005. La cobertura se define mediante fotointerpretación. Para este caso se ortorectificaron las fotografías en color verdadero capturadas durante febrero y marzo del 2005 por el proyecto CARTA II para la oficina de Catastro Nacional. Al aplicar estas técnicas se obtiene un mosaico de fotos georeferenciadas con escala efectiva cercana a 1:10000. Al realizar la fotointerpretación se encontraron grandes sectores cubiertos por nubes, una situación muy común en el clima tropical de nuestro país. En tal caso se recurrió a otras fotografías capturadas durante el mismo proyecto CARTA II en el siguiente orden: fotografías digitales en infrarrojo cercano escala en mosaico 1:15000 y a las imágenes multiespectrales desde color verdadero hasta infrarrojo térmico, sensor MASTER, escala 1:40000.

Durante la gira fue posible constatar la aproximación del mapa de uso del suelo a la realidad, sin dejar de lado que este corresponde a la realidad de hace tres años, y algunos cambios recientes no se muestran en el mapa.

Para la zona de estudio, debido al nivel de detalle de la información encontrada se definieron nueve categorías de uso; Bosques, Charral, Pastos, Suelo desnudo, Urbano, Cultivos, Cuerpos de agua, Humedales, Nubes y Sombras.

El valor máximo posible para factor C dados los rangos definidos por el análisis de sensibilidad numérica es de 0,835; valor asignado al factor C en el caso de alteración máxima; Caso 3.

Para la Fase II se modifica el procedimiento de cálculo del factor LS, en vez de dividir la cuenca en cientos de pequeñas laderas, se toma la ecuación del inverso de la densidad de drenaje de Horton y la ecuación de contorno punto-extremo de William y Berndt; esto para comparar el resultado del modelo de acuerdo a los dos enfoques que calculan el factor de relieve en pequeñas cuencas. El modelo se aplica en 8 pequeñas cuencas homogéneas retomando los casos 1, 2 y 3 de la Fase I. Finalmente se calcula la masa de suelo que teóricamente se desprende y llega al cauce; según la Fase I y las dos ecuaciones aplicables en pequeñas cuencas homogéneas.

Para la Fase II se retoman los casos 1, 2 y 3 de la Fase I y se modifica el procedimiento de cálculo del factor LS; esto para comparar la erosión de acuerdo a los dos enfoques que calculan el factor de relieve en pequeñas cuencas. En la Fase II se evalúa el modelo en 8 pequeñas cuencas homogéneas. Finalmente se calcula la masa de suelo que teóricamente se desprende y llega al cauce; según la Fase I y las dos ecuaciones para la longitud de pendiente aplicables en pequeñas cuencas homogéneas.

RESULTADOS

El comportamiento numérico y espacial del modelo se debe a la interacción y distribución de los factores que lo componen, a su vez los factores deben su comportamiento a las diferentes características que posee la zona de estudio. (Mesén, 2009). Los factores evaluados por el modelo definieron diferentes patrones acorde a las variables que se evaluaron para cada uno. El Factor de erosividad, el cual evalúa el efecto de la precipitación en el proceso, se reduce a medida que se avanza perpendicular a la costa, pues el mayor impacto de la precipitación se da donde la coactividad actúa conjuntamente con la lluvia orográfica.

El factor referente a las características del suelo dividió la zona en dos partes: hacia el norte, en la cuenca del río Barú, el suelo presenta una leve mejoría en su resistencia a la erosión. Durante el periodo de formación de esta cadena montañosa se da un pliegue en la placa, de tal manera que la cara superior queda en dirección norte, en la cuenca del río Barú, y la sección transversal de la placa queda expuesta formando el resto de las cuencas. La cara norte es mucho más resistente debido a la consolidación que ha sufrido el material a lo largo de los años, con lo que el suelo residual que se forma por meteorización de esta roca tiende a ser más fino, mientras que en el resto de la Fila la sección transversal es débil y conforma un suelo sumamente alterado, de carácter limoso.

El factor topográfico varía con el relieve. De las dos partes en que se divide este factor, longitud de pendiente y ángulo de pendiente, la primera se evaluó de manera limitada, pues debido a la forma cómo se planteó la metodología, donde las cuencas se modelan como una sucesión de pequeños bloques. La variable que mide la longitud de la ladera y define el valor

del factor L solo puede tomar uno de dos valores, con lo que la varianza de este factor se genera únicamente a partir de la variación de la pendiente.

Sin embargo, gracias a la topografía quebrada de la zona las laderas no son continuas por grandes distancias y al decidir el tamaño de celda se consideró este problema. Se escogió un tamaño píxel de 20 metros de lado, concordante con la separación media entre curvas de nivel para la zona de estudio. De esta manera la variación del factor topográfico LS, esta dado principalmente por las pendientes.

El factor uso del suelo, se evaluó para tres escenarios: uno donde no se haya producido ninguna intervención humana, un uso del suelo real obtenido a partir de fotogrametría y el uso más crítico, es decir el caso en que toda la zona se encuentre intervenida y toda la capa vegetal haya sido eliminada.

El análisis fotogramétrico realizado a las fotos aéreas del Proyecto CARTA II, 2005, permitió crear el mapa de uso del suelo que se muestra en la figura 9; tomado de la investigación: Mesén (2009).

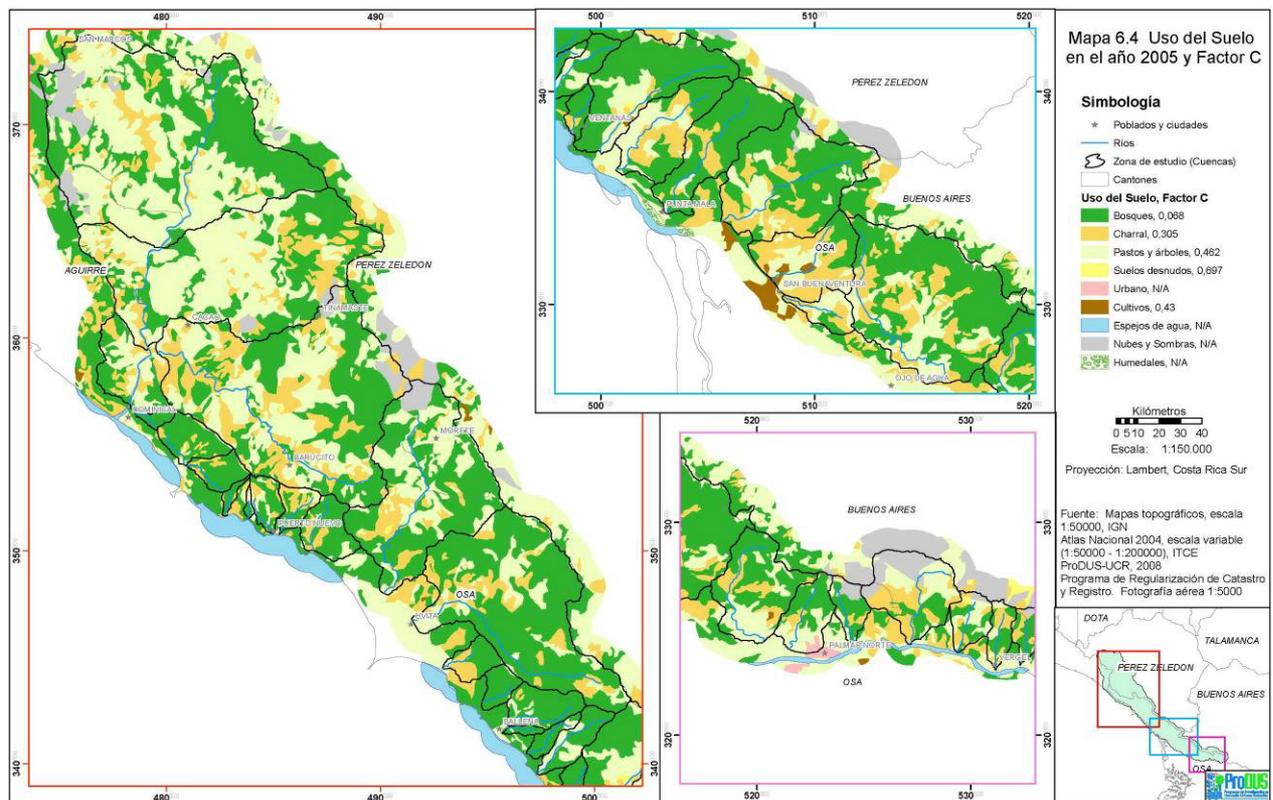


Figura 9.- Mapa de uso del suelo de la zona de estudio en el año 2005.

Fuente: Mesén R.; 2009.

En la metodología se partió del supuesto que todos los bosques presentan algún nivel de afectación y por esto el factor C asignado a los bosques inalterados (caso 1) es inferior al asignado a los bosques definidos por las fotografías aéreas del 2005 (caso 2). Existe evidencia que los bosques actuales han sido intervenidos en diversas formas: inicialmente por los pobladores de la región para explorar, buscar tierras de cultivo o especies madereras, y

actualmente por los desarrolladores que intervienen zonas y mantienen parte de la cobertura boscosa (ver figura 10).



Figura 10.- Incursiones humanas dentro del bosque en la zona de estudio.

En la figura 11 se presenta el resultado de aplicar el modelo de erosión de acuerdo al planteamiento del caso 2. En este se puede ver las áreas donde el uso del suelo y las características topográficas se combinan para formar condiciones desfavorables que incrementan considerablemente la erosión.

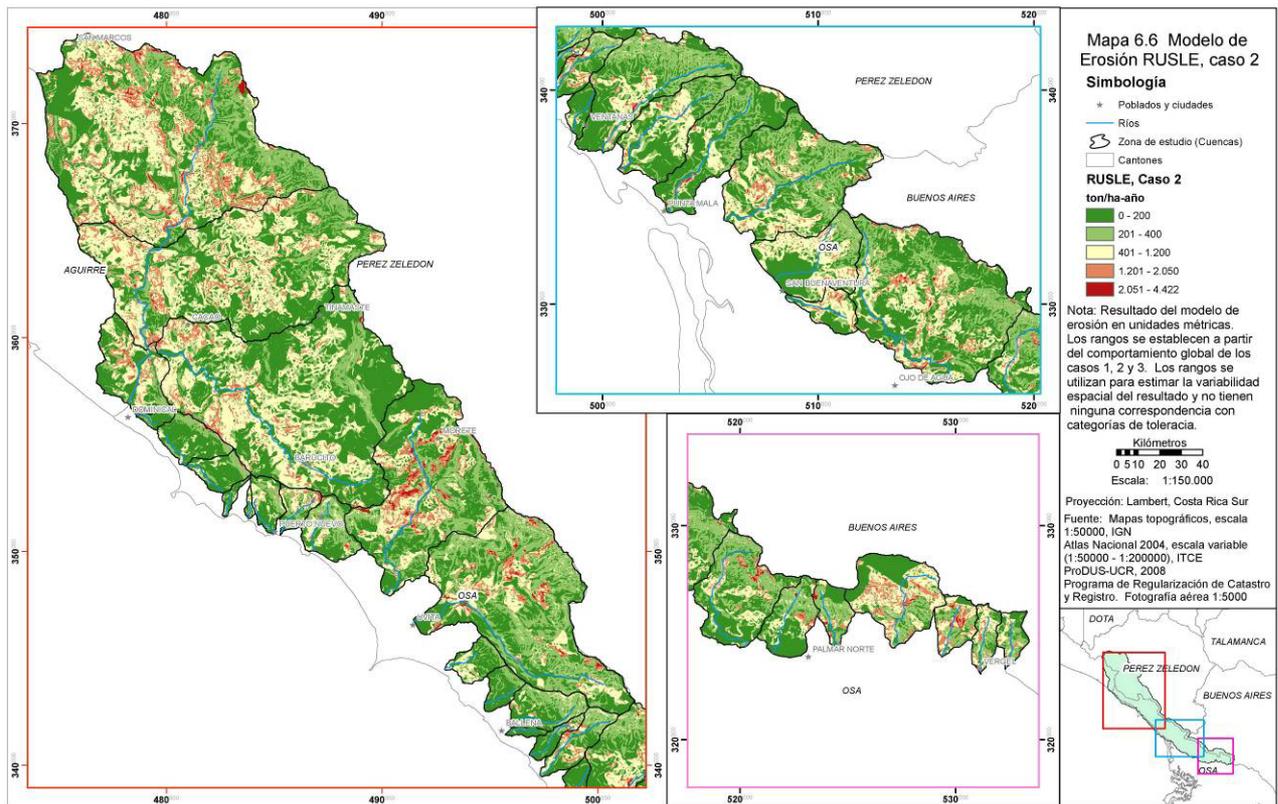


Figura 11.- Mapa, resultado del modelo de erosión RUSLE según el caso 2.
Fuente: Mesén R.; 2009.

Para cada cuenca y los casos 1, 2 y 3 se calculó la tasa promedio de erosión, ponderada por el área, resumida en la figura 12. El gráfico de la figura 12 muestra el comportamiento entre cuencas y el rango de afectación que puede alcanzar las cuencas. Así la línea morada representante el caso 3, erosión máxima esperada con la suposición de eliminación total de la

cobertura vegetal; el caso 1 (línea azul) es en el que se supone un nivel de intervención nulo, es decir bosque primario virgen, donde la tasa de erosión sería la mínima esperable. En el caso 2 se calculó la erosión con el uso del suelo producto del análisis fotogramétrico a las fotografías aéreas del proyecto CARTA 2005. Estas tasas de erosión son promediadas por cuenca. En la figura 12 se puede ver el nivel de afectación que posee cada cuenca, según el modelo y los supuestos de los tres casos formulados. Por ejemplo la cuenca C30, río Zapote es la que se encuentra más afectada ya que presenta una erosión mayor de acuerdo al uso del suelo del 2005. La cuenca C28, ubicada al noreste de Palmar Norte alcanza la mayor tasa de erosión promedio, el cual es 1,6 veces la tasa promedio para todas las cuencas juntas.

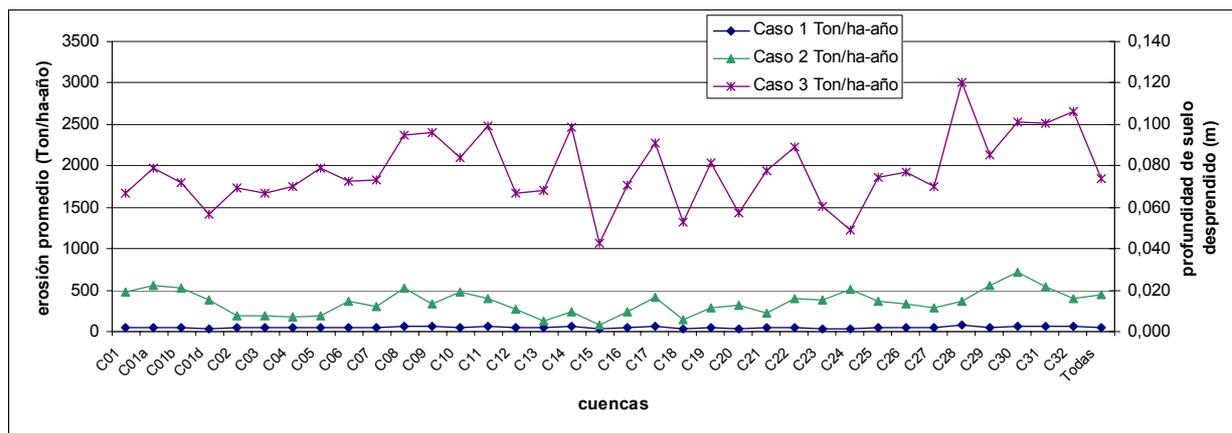


Figura 12.- Gráfico, tasa promedio de erosión según los casos 1, 2 y 3 para cada cuenca de la zona de estudio.

Comparando la separación para cada cuenca entre la línea del caso 3 y la línea del caso 1 se puede observar de manera nominal y en promedio cuales cuencas poseen una mayor vulnerabilidad a la erosión.

Con la línea del caso 2 es posible observar la afectación media que tiene cada cuenca, dentro de la zona de estudio, para el año 2005. Utilizando las tres líneas y comparándolas verticalmente se tiene el nivel de afectación al que ha llegado la cuenca en el año 2005 respecto del rango de valores que puede alcanzar. Por ejemplo, la cuenca de la quebrada Mona (C24), según las consideraciones del caso 2 presenta una erosión promedio de 500 ton/ha-año, valor cercano al promedio de toda la zona de estudio. Sin embargo, la erosión promedio máxima esperable es cercana a las 1250 ton/ha-año, es decir que la cuenca se encuentra afectada a un 40% de su vulnerabilidad máxima; de acuerdo al gráfico esta sería la cuenca más afectada en promedio.

Este gráfico, representa de manera rápida el nivel de afectación en diferentes casos. Corresponde a valores medios, por lo cual dentro de una cuenca pueden darse valores mucho más altos y bajos que estos promedios, por lo cual no debe descuidarse la variación espacial de estos resultados, ya que una cuenca de baja afectabilidad puede alcanzar valores superiores a los promedios observados en el gráfico de la figura 12. Por ejemplo 27 de las cuencas tienen al menos 1 hectárea de terreno con una tasa de erosión entre las 4800 ton/ha-año y las 7523 ton /ha-año. Otro caso es la cuenca del río Barú (C01), que reúne gran variación topográfica y un valle extenso en comparación con el resto de cuencas, por esto la tasa promedio de erosión es baja, sin embargo los valores más altos y las mayores extensiones se dan en esta cuenca, con 116 ha entre las 4800 y 7523 ton/ha-año.

El resultado del modelo de erosión aplicado a las cuencas reducidas como un arreglo de miles de pequeñas laderas independientes (Fase I) es contrastado contra el efecto global de la erosión en microcuencas, a partir de las ecuaciones de Horton (La) y de Williams-Benets (Lb) para calcular el factor LS equivalente. En la figura 13 se muestra la masa desprendida en cada cuenca; por color se distinguen los tres métodos empleados para calcular el Factor LS, mientras que la tonalidad diferencia entre los casos conforme con el cuadro 1. (hacer referencia a la ecuación no tal)

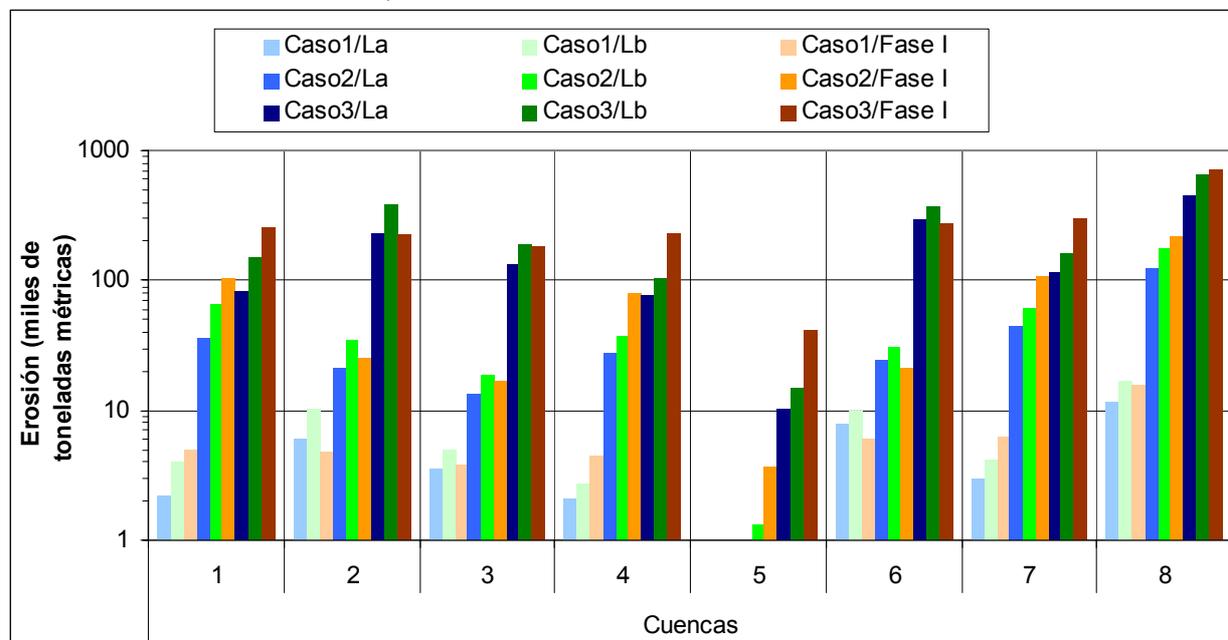


Figura 13.- Gráfico, masa de suelo desprendida, para las 8 micro-cuencas definidas en la fase II, según los casos 1, 2 y 3.

IMPACTOS AMBIENTALES DE ACTIVIDADES HUMANAS Y EFECTOS DE LA EROSIÓN

La comprensión de los efectos de la erosión inicia al entender el proceso en sí mismo, qué lo provoca y cuál es el comportamiento de las partes que lo componen y condicionan.

Los sistemas naturales que activan y controlan la erosión son continuos y constantes; por esta razón toda superficie siempre estará sometida a este proceso físico natural. Sin embargo pueden darse algunas condiciones que retarden o eliminen el proceso, convirtiéndolo en fenómenos aislados y esporádicos. Así en aquellos lugares donde se encuentren yacimientos de roca expuesta, el proceso de erosión es muy lento. En contraste en localidades donde los suelos sean sumamente profundos y poco consolidados la erosión es constante y puede llegar a desencadenar otros procesos o fenómenos naturales. Similarmente, las intervenciones humanas pueden acelerar significativamente los procesos erosivos.

Durante el proceso de erosión los suelos varían su espesor, ya sea por que se erosiona o se sedimenta material. En una zona como la Fila Costeña, donde la topografía es sumamente montañosa, el cambio en la profundidad del suelo puede afectar considerablemente la estabilidad de los taludes y de los sistemas naturales que soportan los taludes.

Los bosques que son socolados (eliminación del sotobosque) pierden capacidad para retener el suelo alrededor de las raíces y, a medida que el material es transportado por la escorrentía

superficial los árboles pierden integridad estructural, para sí y para ayudar al suelo; en contraparte en las zonas donde el material se deposita, con el paso del tiempo las laderas tienden a sobrecargarse y aumenta la probabilidad de un deslizamiento. La sustitución de las especies locales por especies madereras como la teca, práctica común en la Fila Costeña, tienen un efecto análogo pues esta especie requiere la eliminación del sotobosque y las especies herbáceas del suelo, además de que el tronco de la teca es esbelto y su follaje, de poca cobertura, de tal manera que las gotas de agua impactan casi con la misma intensidad que si el suelo se encontrara completamente desnudo.



Figura 14.- Fotografías, árboles desestabilizados por la erosión.

La creación de caminos expone los árboles y la superficie contigua a los mismos. Además estos suelen dejarse desprotegidos sin tipo de cobertura o material que amortigue el impacto de la gotas llovidas. Usualmente solo se cubre la superficie de ruedo, dejándose los espaldones y colindancias desprotegidas, o con material esparcido aleatoriamente; en tal caso, las gotas de lluvia que impactan donde no hay lastre desprenden gran cantidad de suelo formando estructuras similares a edificios coronados por piedras, como los que se muestran en la figura 10.



Figura 15.- Fotografías, erosión en espaldones y taludes expuestos.

La combinación de taludes y terrazas mal protegidos así como la construcción de puentes y alcantarillas mal diseñados afecta los patrones de escorrentía superficial y el comportamiento hidráulico de los cauces.



Figura 16.- Fotografías, taludes grandes expuestos.

En algunas zonas la erosión puede llegar a ser tan fuerte que se formen cárcavas; estas son incrustaciones en el suelo, donde la escorrentía superficial forma un flojo de lodos uniforme durante el evento de precipitación. Estas hendiduras en el suelo, pueden llegar a afectar la estabilidad de los taludes.



Figura 17.- Fotografías, formación de cárcavas por infraestructura deficiente o inexistente.

El suelo que es liberado durante el proceso de erosión se distribuye sobre las laderas, en los márgenes y en los ríos; durante los eventos extremos de precipitación todo el material suelto que ha sido depositado por la cuenca se apresura hacia el cauce, donde debido a las diferencias de pendientes y los meandros del río, se deposita, formando dunas, reduciendo la capacidad hidráulica del río, alcantarillas y puentes. Con el pasar del tiempo o por una sucesión de eventos extremos los sistemas naturales que controlan el excedente de escorrentía superficial tienden a colmatarse y anegarse provocando desbordamientos e inundaciones en las comunidades vecinas o en las actividades productivas que colinden con los afluentes.



Figura 18.- Fotografías, Sistemas naturales afectados por los procesos erosivos.



Figura 19.- Fotografías, Sistemas artificiales afectados por los procesos erosivos.

Después de movilizarse hacia el cauce los sedimentos llegan a los afluentes que sostienen ecosistemas o la costa donde se tienen formaciones de coral. Estos se ven afectados debido a la turbiedad del agua y la reducción de la oxigenación. En Uvita, el biólogo Jorge Lobo ha registrado con fotografías una pluma de sedimento proveniente del río Uvita, durante la época seca del 2009.

Adicionalmente el incremento de erosión por reducción de la capa vegetal conlleva un incremento en la escorrentía, y una reducción en la infiltración. Losilla & Zamora (2008) encontraron que los acuíferos de donde se saca gran parte del agua del distrito Bahía Ballena de Osa se recargan en la parte alta, donde actualmente ocurren los cambios del uso del suelo. Además, estos acuíferos son pequeños y su capacidad de captación se vería muy reducida en caso de darse un cambio intensivo del uso del suelo.

Todos estos efectos pueden ser controlados o mitigados parcialmente al menos aplicando las técnicas adecuadas, que varían de acuerdo al presupuesto y a la magnitud de los proyectos. Diseñar adecuadamente los sistemas de control de escorrentía y contemplarlos durante todo el proceso constructivo es imperativo para reducir los efectos adversos de la erosión. Algunos sistemas de control de escorrentía son: caños, cunetas, contracunetas, canales, alcantarillados, trampas de sedimento, reductores de velocidad, cobertura vegetal o artificial porosa, pozos de infiltración entre otros. La combinación de estos sistemas según el momento de la construcción del proyecto puede mitigar y controlar el proceso erosivo y su incremento; dado que el mayor impacto de la erosión se da y transmite por la escorrentía superficial.

CONCLUSIONES

En el cálculo del Factor K, el peso de la granulometría es muy superior al resto de las otras variables que afectan el proceso erosivo. Los suelos arenosos son poco erosionables pues las partículas más grandes requieren mayor fuerza para ser desprendidas y transportadas. Los suelos arcillosos en estado saturado son poco erosionables ya que su plasticidad los vuelve deformables más que erosionables. Los suelos más erosionables son los limos y los materiales con una mala granulometría.

En el análisis de sensibilidad y las revisiones previas al planteamiento de la metodología se encontró que el tamaño del píxel que se escoja para dividir la zona de estudio subestima la erosión total en la medida en que este sea mucho menor respecto de la longitud uniforme de las laderas que forman la cuenca.

El criterio de tolerancia por pérdida de masa por área por año presenta serias dificultades en regiones donde no ha sido calibrado adecuadamente. El criterio de tolerancia por porcentaje del horizonte A desprendido resultó en un comportamiento aceptable. Sin embargo se debe recordar que este analiza el resultado al cabo de un año y no la sostenibilidad del mismo en el tiempo.

La falta de calibración del modelo para las condiciones tropicales, la escasa información pertinente y la dificultad de medir y determinar algunos parámetros, obliga el uso de los resultados del modelo con cautela. Sin embargo las relaciones observadas entre los casos de estudio; erosión mínima, máxima y real; así como el comportamiento y la variación relativa entre cuencas y entre las partes de las cuencas, siguen siendo válidas.

La metodología pese a sus limitaciones es efectiva en la determinación y comparación de la susceptibilidad de diferentes regiones dentro de una zona de estudio y puede ser utilizada como una herramienta de planificación regional y como un indicador de la susceptibilidad de un terreno ante un proyecto u obra civil.

Agradecimiento. Al Dr. Jorge Lobo de la Universidad de Costa Rica, por su apoyo y criterio profesional en materia de vegetación natural en la zona de estudio.

Al Programa de Regularización de Catastro y Registro, por brindar por medio de ProDUS las fotografías aéreas en color verdadero y escala 1:5000 capturadas durante el proyecto CARTA II en el 2005, con estas se realizó el uso del suelo.

LISTA DE SÍMBOLOS

A:= pérdida anual de suelo dada en unidades de masa por área.

R:= Factor de precipitación y escurrimiento. Se conoce como erosividad.

K:= Factor de características del suelo. Se conoce como erodabilidad.

L:= Factor topográfico, longitud del talud.

S:= Factor topográfico, nivel de pendiente.

C:= Factor de cobertura.

P:= Factor de prácticas de control de erosión.

p:= precipitación anual promedio

Dg:= promedio geométrico del diámetro de partícula.

f_i:= porcentaje de cada fracción de partícula, por ejemplo arcilla, limo, arena fina.

m_i:= promedio aritmético del tamaño de partícula para cada fracción.

λ:= longitud horizontal de la pendiente en pies.

s y θ:= pendiente en porcentaje y grados respectivamente

LC:= longitud de la curva de nivel (Km)

LB:= longitud del contorno base (Km)

n:= número de veces que la curva corta la red de drenaje

s' := pendiente equivalente

z:= diferencia máxima de elevaciones

LC_i:= longitud de la curva de nivel a la altura i

SLR:= relación de pérdida de suelo

PLU:= subfactor de uso del suelo anterior.

C_f := factor de consolidación de la superficie del suelo.

B_{ur} y B_{us} := indicadores que evalúan el efecto de las raíces y la materia muerta respectivamente.

CC := subfactor de cobertura de copas.

F_c := fracción del suelo que se encuentra cubierta por las copas.

H := distancia desde la copa hasta el suelo.

SR := subfactor de rugosidad de superficie.

R_u := rugosidad media, en pulgadas.

SC := subfactor de cobertura de superficie.

S_p := es el porcentaje de área cubierta por los materiales no erodables.

R_u := es la rugosidad media de la superficie.

SM := subfactor de humedad del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Clérico, C y García Préchac, F. “Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del río De La Plata.” *Agrociencia*. (2001) Vol. V, N° 1; páginas: 92-103.

Dr. Joseph A. Tosi O. (1995) “MANUAL PARA LA DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE USO DE LAS TIERRAS DE COSTA RICA.” CENTRO CIENTIFICO TROPICAL

FAO. (1993). “Erosión de suelos en América Latina.” Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe Santiago, Chile.

FAO. (1993). “Erosión de suelos en América Latina.” Recuperado el 11 de agosto de 2007. <http://www.fao.org/docrep/T2351S/T2351S01.htm#Pr%F3logo>

George R. Foster, Daniel C. Yoder, Glenn A. Weesies, Donald K. McCool, Keith C. McGregor, Ronald L. Bingner. (2003). “User’s Guide, Revised Universal Soil Loss Equation, version 2.” USDA-Agricultural Research Service.

Hunt, Roy E. (2005). “Geotechnical engineering investigation handbook.” 2nd edition. Taylor & Francis Group.

J.M. Laflen & W.C. Moldenhauer. (2003) “Pioneering Soil Erosion Prediction. The USLE Story.” World Association of Soil and Water Conservation.

Jean Pierre Bergoenig. (1998). “Geomorfología de Costa Rica.” Instituto Geográfico Nacional, San José, Costa Rica.

Leica Geosystems Geospatial Imaging (2005). “Leica Photogrammetry Suite Project Manager. User’s Guide.”

López Mora, José Carlos. (2001). “Análisis de la producción de sedimentos en la cuenca del Río Banano y la estabilidad lateral del río.” Informe de proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Civil.

M. H. HUSSEIN, M. M. AWAD & A.S. ABDUL-JABBAR. “Predicting rainfall-runoff erosivity for single storms in northern Iraq.” *Hydrological Sciences -Journal- des Sciences Hydrologiques*,39,5, October 1994

Marie-Josée Fortin y Mark Dale. (2005). “Spatial Analysis. A Guide for Ecologists.” CAMBRIDGE university press.

Marisela Pando Moreno. “Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica.” Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Num. 51, 2003, pp. 23-36

Mauro Greppi. (2005). “IDROLOGIA.” Editore Ulrico HOEPLI MILANO.

Mesén L., Roger. (2009). “Implementación del modelo de erosión RUSLE como herramienta de planificación regional en algunas cuencas de la Fila Costeña.” Informe de proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Civil.

MET-ALARN (Metodologías para el Análisis Local de Amenazas Naturales y Riesgos en Nicaragua), 2005. “Mapas de erosión, Recomendaciones técnicas para su elaboración.”

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (1991). “Estudio para aumentar el nivel de detalle del mapa de suelos de Costa Rica a escala 1:200000.”

Ministerio de Medio Ambiente Español. (1998). “Guía para la elaboración de estudios del medio físico.”

Orozco Orozco, Erick G. (2007). “Zonificación climática de Costa Rica para la gestión de infraestructura vial.” Informe de proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Civil.

Oswaldo Ortiz Vera; 2004. “HIDRORED.” Programa de Energía, Infraestructura y Servicios Básicos de ITDG-Perú.

PRIAS (2006). “Misión Carta 2005.” Recuperado agosto 2007. <http://opes.conare.ac.cr/prias/mision-carta2005.asp>.

Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, y D.C. Yoder. (1997). "Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)." Agriculture Handbook No. 703. U.S. Department of Agriculture.

Suñeyman O zhan, A. Nihat Balci, Necdet O zyuvaci, Ahmet Hızal, Ferhat Go'kbulak , Yusuf Serengil (2004) "Cover and management factors for the Universal Soil-Loss Equation for forest ecosystems in the Marmara region, Turkey." Forest Ecology and Management 214 (2005) pág. 118–123

Universidad Nacional de Colombia. "Suelo." Recuperado marzo 2008. http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000088/lecciones/seccion1/capitulo04/tema03/01_04_03.htm

W.-G. Vahrson, M. Alfaro, G. Palacios. (1991). "Taller de erosión de suelos. Memoria." Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional, Costa Rica.

Wischmeier, W. H., and D. D. Smith. (1978). "*Predicting Rainfall Erosion Losses, A guide to Conservation Planning.*" Agriculture Handbook No. 537, USDA Science and Education administration, Washington, D. C.

Zachar, Dušan. (1982). "SOIL EROSION." Elsevier Scientific Publishing Comapany. Bratislava.