

EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RÍO LA MIEL

Rubén D. Montoya, Luis J. Montoya, y Jesús A. Anaya

Universidad de Medellín

rmontoya@udem.edu.co, ljmontoya@udem.edu.co, janaya@udem.edu.co

Recibido para evaluación: 27 de Junio de 2005 / Aceptación: 25 de Agosto de 2005 / Recibida versión final: 30 de Agosto de 2005.

RESUMEN

Se presenta una aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE) en la cuenca del proyecto hidroeléctrico del río la Miel (MIEL I), usando sistemas de información geográfica (SIG). Se emplearon 13 estaciones de precipitación para estimar el factor de erosividad de la lluvia R de forma aproximada, una imagen LANDSAT para obtener el mapa de usos del suelo y el factor de cobertura vegetal C. Los factores de prácticas de conservación P y de erodabilidad del suelo K fueron obtenidos a partir de valores recomendados por otros autores según los usos y tipo de suelo predominantes en la cuenca. El factor topográfico LS fue obtenido usando dos métodos: el método tradicional de Wischmeir y Smith y el método propuesto por Hamilton y Hickey (2001). Finalmente la metodología permitió representar la Pérdida de Suelo (t/ha.año) en formato raster e identificar las áreas con los mayores valores de pérdida de suelo.

PALABRAS CLAVES: Modelos de Erosión, Sistemas de Información Geográfica, RUSLE, Planificación de Cuencas, Pérdida de Suelo.

ABSTRACT

The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) has been applied to “La Miel” hydropower project river basin (Miel I), using Geographical Information Systems (GIS). In order to estimate soil loss the following data has been considered: thirteen precipitation stations to estimate rainfall erosive R- factor in approximated form; a LANDSAT image to obtain a Land Use map and Cover management C - factor values.

The soil conservation practice P - factor and the soil erosive K - factor, were obtained from recommended values by others authors according to land use and soil properties. On the other hand, the LS factor was obtained using two methods: the traditional Wischmeir and Smith (1965) method and the Hamilton and Hickey (2001) method.

The results obtained allow estimating the soil loss (Mg ha⁻¹ per year) in a raster format, where the areas with the highest soil loss rates were identified.

KEY WORDS: Erosion Models, Geographic Information Systems (GIS), RUSLE, Watershed Planning, Soil Loss.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de erosión superficial en una cuenca o región, es un problema que afecta directamente a todo el medio físico pues genera la reducción de la capa orgánica superficial del suelo rica en nutrientes generando impactos que en muchos casos son irreversibles o que requieren de procesos de tratamiento muy costosos afectando tanto económica como socialmente a dicha región, además representan en muchos casos el origen principal de los sedimentos que contaminan las corrientes de agua (Schwab et al ,1990).

Según el IGAC en Colombia las prácticas permanentes de mecanización y uso de implementos inadecuados de labranza como rastras y arados de disco, han destruido los suelos pulverizándolos superficialmente y compactándolos más internamente. De igual manera, el pobre manejo de los sistemas de irrigación ha desencadenado graves problemas de salinización y alcalinización de suelos en muchas áreas. En la actualidad, 49.2% del país está entre moderado y severamente afectado por erosión hídrica, 22.9% está entre moderado y severamente afectado por movimientos en masa y solamente el 24.8 % no está afectado por erosión.

La erosión laminar en una cuenca es un proceso que está influenciado por varios aspectos como la topografía, la pendiente del terreno, la capacidad de la lluvia para desprender partículas de suelo, el tipo y textura del suelo, los procesos erosivos presentes, el uso del suelo, las prácticas de manejo de cultivos, entre otros.

Varios son los autores que han estudiado y presentado modelos para la estimación de la producción de sedimentos en una cuenca. El desarrollo de estas formulas comenzó en 1940 en los Estados Unidos; dentro de estos primeros aportes pueden mencionarse los presentados por Zingg (1940) el cual relacionó las pérdidas de suelo con la pendiente y la longitud de ésta, Smith, (1941) y Smith y Whitt (1947) consideraron otros factores adicionales tales como la erodabilidad del suelo y el manejo agrícola, Musgrave (1947) revaluó las metodologías existentes y propuso la adición de un factor que tuviera en cuenta la precipitación. El modelo presentado por Wischmeier y Smith (1965), y sus posteriores modificaciones presentadas por Renard et al. (1997) es uno de los primeros modelos en combinar de una forma sencilla los principales procesos que influyen en la producción de

sedimentos en una cuenca utilizando la menor cantidad de procesos (Carvajal y Giraldez, 2000).

Posteriormente Foster y Meyer (1975) proponen un modelo con una formulación más elaborada al considerar que la intensidad de la erosión en una cárcava es linealmente proporcional a la diferencia entre la capacidad de transporte de flujo de escorrentía y el flujo total de sedimentos y que la capacidad de erosión del flujo de escorrentía es proporcional a su capacidad de transporte (Carvajal y Giraldez, 2000).

Similarmente en la década de los ochenta aparecen otra serie de modelos de erosión basados en las ecuaciones de transporte de Saint - Venant, continuidad, y cantidad de movimiento tales como los presentados por Rose (1985), Singh (1989), Govindaraju (1995), Sander et al (1996), entre otros. Otros modelos de solución numérica son el KINEROS presentado por Woolhiser et al (1990), el EUROSEM presentado por Morgan et al (1998) y el WEPP presentado por Lane y Nearing (1989), Chaves y Nearing (1991) y Ascough et al (1997).

Para este trabajo se empleo la ecuación universal de pérdida de suelo revisada RUSLE mediante una aplicación en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para estimar la erosión potencial en la cuenca de influencia del embalse Amaní (presa Pantagoras) para el proyecto Hidroeléctrico Miel I de la empresa generadora ISAGEN S.A. E.S.P.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del Río La Miel está localizada en la vertiente oriental de la Cordillera Central de Colombia, y desemboca en el Río Magdalena, entre los departamentos de Caldas y Antioquia.

Como zona de estudio se definió la correspondiente a la cuenca aguas arriba del sitio de presa (Pantagoras) con coordenadas 512527 m.E, 614855 m.N del sistema UTM, zona 18, datum WGS84 (910691.77 m.E, 1106607.88m.N - Origen Bogotá Sistema Central). La zona de estudio con una área de 761.52 Km² comprende a las cuencas del Río Moro con un área de 222.36 Km² y el Río La Miel con una área de 539.16Km².

La cuenca se encuentra localizada en jurisdicción de los municipios de Marquetalia, Manzanares, Norcasia,

Pensilvania, Samaná, La Dorada y La Victoria en el departamento de Caldas y los municipios de Argelia y Sonsón en el departamento de Antioquia.

El Río La Miel nace en el alto de Picona, vereda el Jordán del municipio de Pensilvania; corre entre los 3620 msnm

y 220 msnm (aproximadamente), cota a la cual desemboca al Río Magdalena. Por la diversidad de alturas presentes en la cuenca, cuenta con diferentes franjas térmicas y con gran variabilidad climática. En la Figura 1 se presenta la localización general de la cuenca definida para el estudio.

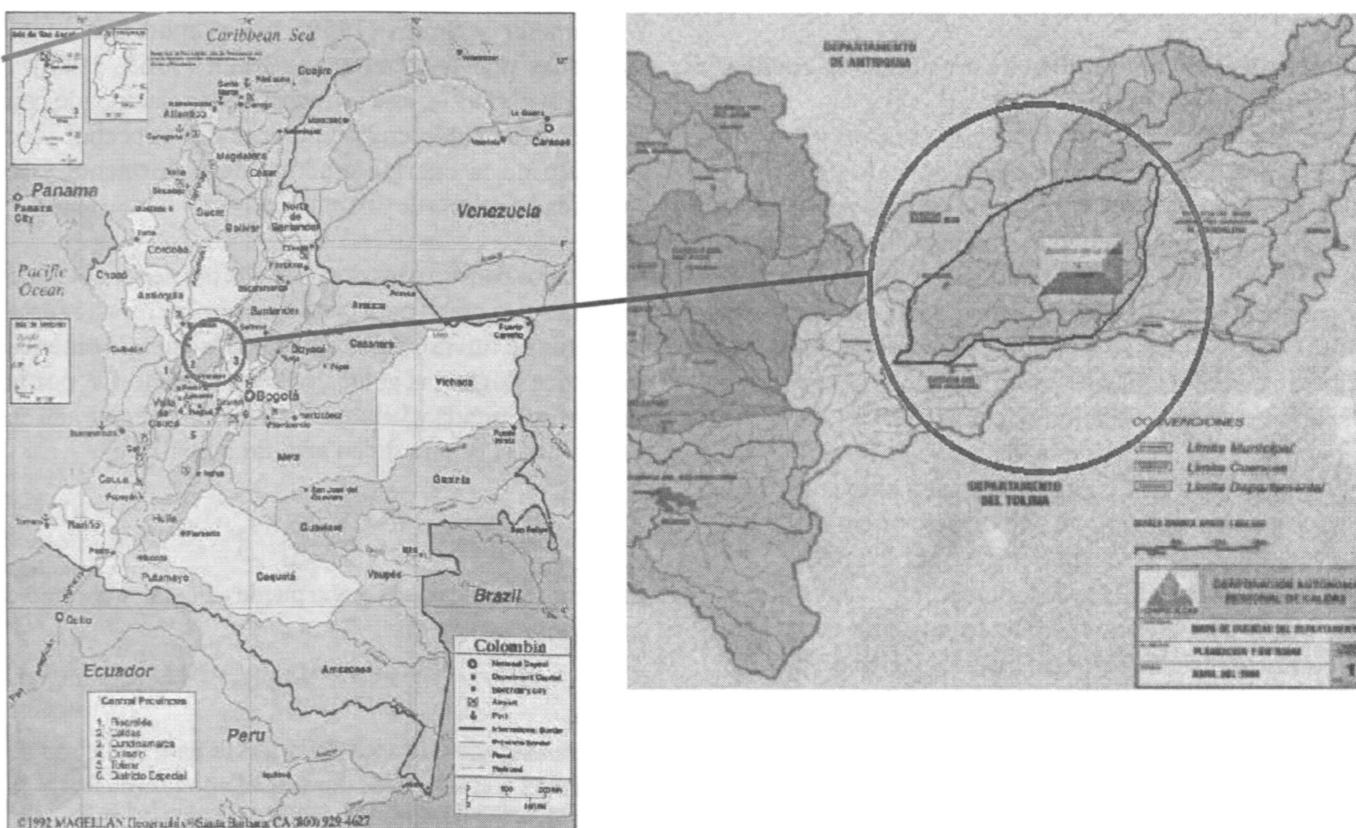


FIGURA 1. Zona de Estudio cuenca del río la Miel- Hasta el sitio de presa.

3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Uno de los principales objetivos del estudio era la identificación de las zonas erosivas más críticas dentro de la cuenca de estudio como resultado de la obtención de un mapa espacialmente distribuido de la producción de sedimentos mediante el método RUSLE, para lo cual fue necesario realizar las siguientes actividades.

3.1. Recolección de la información

Se recopilo toda la información hidrológica, de usos y tipos de suelos disponibles en la zona de estudio. En la medida de lo posible, los datos fueron confrontados,

soportados y validados con varias fuentes de información (Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Corporación Autónoma Regional para Caldas (CORPOCALDAS), Plan de Gestión Ambiental Regional para Caldas (PGAR), Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales (IDEAM), y CENICAFE. Con la ayuda de ISAGEN se recolectó la información disponible de precipitación y caudal, con la cual se generó una base de datos hidrológicos, la cual fue procesada y analizada.

En cuanto a la información en formato digital se realizó una búsqueda de imágenes Landsat gratuitas, georeferenciadas y ortorectificadas, pancromáticas y

multiespectrales. Se utilizó la siguiente escena en el sistema WRS-2 (8,56): ID:014-616, ETM+, ortho, geotiff, 2001-07-06.

Para suplir la información faltante de curvas de nivel se utilizó el modelo digital de elevación generado por el sensor SRTM de la NASA, con píxeles de 3 segundos de arco (aproximadamente celdas de 92 m por 92 m).

3.2. Aplicación del Modelo de erosión en la cuenca (método RUSLE)

La ecuación Universal de la pérdida de suelo (USLE) la cual fue obtenida a partir de datos de mas de 40 años que se obtuvieron en parcelas pequeñas localizadas en varios estados de Estados Unidos fue presentada por Wischmeier y Smith (1965). Este modelo a pesar de la difícil extrapolación de algunos de sus parámetros (Stocking et al, 1988) es recomendado por el propio Departamento de Agricultura de Estados Unidos en su versión actualizada denominada RUSLE (Renard et al, 1997) por sus Siglas en inglés Revised Universal Soil Loss Equation, para el cual se han mejorado y adaptado nuevas tecnologías en la estimación del parámetro relacionado con el factor de laboreo de conservación a partir de 5 variables de fácil determinación como son Cobertura del suelo por residuos de vegetación previa, cobertura del suelo por la parte aérea de la vegetación, rugosidad de la superficie del suelo, composición de la Biomasa en descomposición en los primeros 10 cm del suelo y el contenido de humedad del suelo. El método estima la pérdida media de suelo A, ($ML^{-2}T^{-1}$)¹, como producto de cinco factores que reflejan las influencias del clima R, (MLT^{-3}), de las características resistentes del suelo K, ($L^{-3}T^2$), del relieve LS, de la cubierta de la superficie, C y de las prácticas de protección, P, mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

A es la Pérdida de suelo promedio anual (t/ha.año), R es el índice de la fuerza erosiva de la lluvia (MJ.mm/Ha.h), K es el factor de erodabilidad del suelo (t.h/MJ.mm), LS es el factor topográfico (Adimensional), C es el factor de cobertura y manejo del suelo (Adimensional) y P es el

factor de prácticas de conservación (adimensional). A continuación se describirán cada uno de los diferentes parámetros utilizados en el modelo de erosión para la cuenca del río La Miel.

3.2.1. Índice de erosividad de la lluvia (R)

El factor climático (R) originalmente presentado por Wischmeier y Smith (1959), y sus modificaciones realizadas por Wischmeier y Smith (1965, 1978) y Renard et al (1997), está estrechamente relacionado con la pérdida de suelo en condiciones de barbecho² y es producto de la energía cinética de la tormenta y la intensidad máxima de 30 minutos.

Dicho valor para un periodo de un año puede ser obtenido como la suma anual para cada episodio de lluvia i (para n eventos de lluvia), del producto de la energía cinética con la que llegan las gotas de lluvia al suelo Ec, por la lámina precipitada y la intensidad máxima registrada en 30 minutos (I_{30}) para dicho año, tal que:

$$R = \sum_{i=1}^n Ec_i * I_{30} \quad (2)$$

La energía cinética de la lluvia puede calcularse mediante la siguiente expresión.

$$Ec_i = (11.9 + 8.73 * \log(I_i)) * (I_i * T_i) \quad (3)$$

Donde:

Ec_i es la energía Cinética de la lluvia para cada uno de los eventos considerados durante el año ($J/m^2.\text{año}$), i es cada uno de los eventos de precipitación del año, I_i es la intensidad promedio del evento i considerado [mm/h], $I_i * T_i$ es la lámina de precipitación para el evento considerado [mm].

Con la expresión original de Wischmeier y Smith (1965) para registros diarios u horarios de precipitación es posible determinar los valores del Índice de erosividad de la lluvia R mediante la ecuación (2) para cada evento de lluvia y cada año en la estación; dichos valores pueden ser correlacionados con los registros anuales de precipitación obteniendo así una expresión para R en función de la precipitación total anual para la estación. Si se cuenta con varias estaciones de precipitación en la

1. Haciendo referencia a las dimensiones involucradas. M: masa, L: longitud, T: tiempo.

2. Condiciones de parcela en estado natural

zona puede obtenerse una ecuación regional del índice de erosividad de la lluvia R . Para la cuenca del río La Miel se empleó la información de precipitación de 13 estaciones ubicadas en la zona, para cada una de las

cuales se estima el índice de erosividad de la lluvia y la Energía cinética para cada uno de los años de registro mediante las expresiones (2) y (3). La Figura 2 muestra la ubicación de las estaciones empleadas.

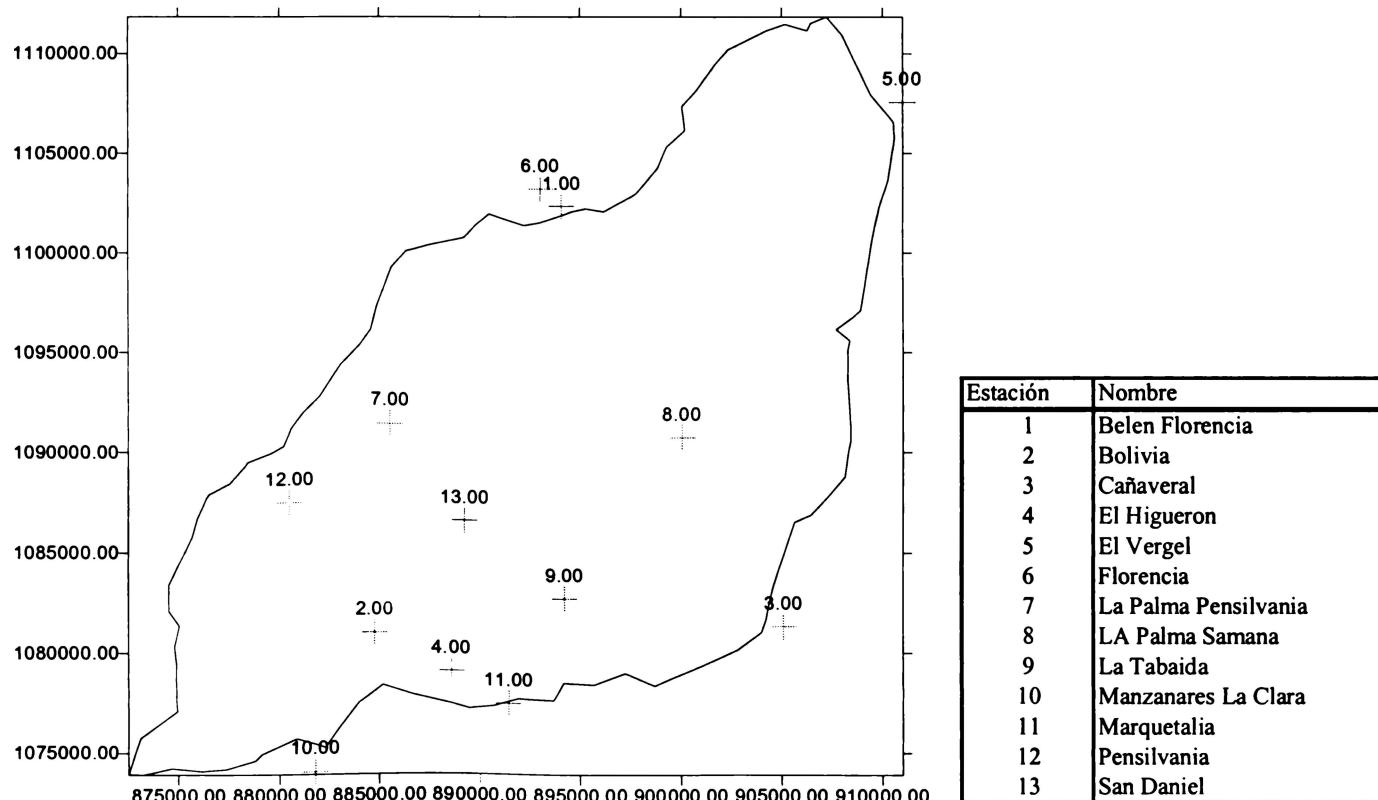


FIGURA 2. Ubicación de las estaciones empleadas.

Para el cálculo de la Intensidad máxima promedio de 30 minutos para cada año se empleó la ecuación de Grunsky (1922),

$$I_d = I_{24} \sqrt{\frac{24}{d}} \quad (4)$$

Donde I_d es la intensidad de la lluvia para una duración dada d (mm/h), I_{24} es la Intensidad máxima en 24 horas del año ($P_{max}/24$ en mm/h) y d es la duración considerada en horas (0.5 horas = 30 minutos). Los valores promedios

obtenidos del índice de erosividad de la lluvia para cada estación se presentan en la Tabla 1.

Con la información de la Tabla 1 se construyeron las isolíneas de coeficiente de erosividad de la lluvia empleando el método de interpolación Kriging; posteriormente se generó el mapa espacialmente distribuido mediante el modulo Vector to Raster de IDRISI. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.

TABLA 1. Valores de R promedio anual para las estaciones empleadas.

Est.	Nombre	Coordenadas		R Anual [MJ.mm/ha.h.año]
		Norte	Este	
1	Belén Florencia	1102320	894065	46725.4
2	Bolivia	1080952	884762	18825.4
3	Cañaveral	1081270	905079	31559.8
4	El Higueron	1079048	888571	21721.1
5	El Vergel	1107528	911000	23854.3
6	Florencia	1103175	893016	54624.2
7	La Palma Pensilv.	1091380	885545	33455.8
8	La Palma Samaná	1090720	900035	49456.1
9	La Tebaida	1082700	894200	25021.3
10	Manzanares- La Clara	1074040	881783	15856.4
11	Marquetalia	1077460	891428	15792.5
12	Pensilvania	1087400	880505	13859.5
13	San Daniel	1086587	889230	20704.4

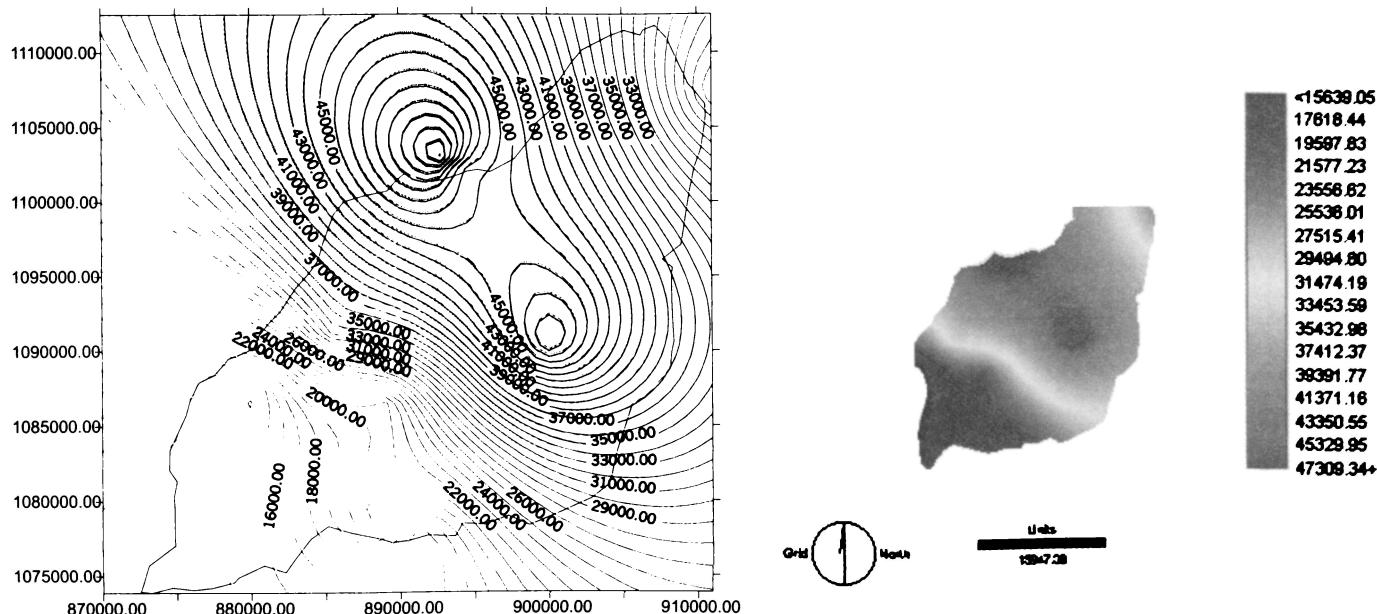


FIGURA 3. Factor de Erosividad de la lluvia R cuenca río la Miel [Mj.mm/ha.h.año]

3.2.2. Índice de erodabilidad del suelo (K)

El índice de erodabilidad del suelo K es una descripción cualitativa de la erodabilidad de una partícula de suelo. Intenta representar la susceptibilidad de las partículas de suelo a disgregarse y a ser transportadas por la acción de la precipitación y de la escorrentía. El factor de erodabilidad del suelo refleja el hecho que diferentes suelos erosionan a diferentes tasas aún cuando los otros factores que afectan la erosión sean los mismos. El índice

de erodabilidad del suelo K debe ser evaluado de forma experimental para parcelas estándar, para un tipo de suelo específico. En las parcelas sin vegetación de 40 pies y una pendiente del 33 %, se mide el suelo perdido en (ton/ha) y el índice de erosión pluvial R correspondiente para diferentes eventos de precipitación. Se grafican los valores de pérdida de suelo contra el índice de erosión pluvial R, y se ajusta una línea recta a dichos puntos. El factor de erodabilidad del suelo K se evalúa con la pendiente de dicha recta, pues los demás valores de la

ecuación de pérdida de suelo son conocidos. Para mediciones satisfactorias del índice de erodabilidad se requiere mediciones de por lo menos 5 años (Loch et al, 1998). Se han hecho muchos estudios con el fin de estimar el factor de erodabilidad como una función de las propiedades del suelo como el tamaño de las partículas, la textura, el contenido de materia orgánica y la densidad del suelo erodido. La textura es el principal factor que afecta el cálculo de K, sin embargo otras propiedades como la estructura, la materia orgánica y la permeabilidad también contribuyen. Para la cuenca del río la Miel se tomaron los valores de K presentados por Steward et al

(1975) como una función del contenido de materia orgánica y de la textura del suelo.

El mapa de tipo de Suelo se realizó a partir de la digitalización de la información encontrada en el Plan de Gestión Ambiental Regional para Caldas 2001-2006 correspondiente a la cartografía del comité de cafeteros, cuya fuente es el mapa de suelos del IGAC para el departamento de Caldas. De acuerdo a las características del suelo y los valores recomendados por Steward et al (1975) se definieron los valores para el factor de erodabilidad del suelo espacialmente distribuidos, como se muestra en la Figura 4.

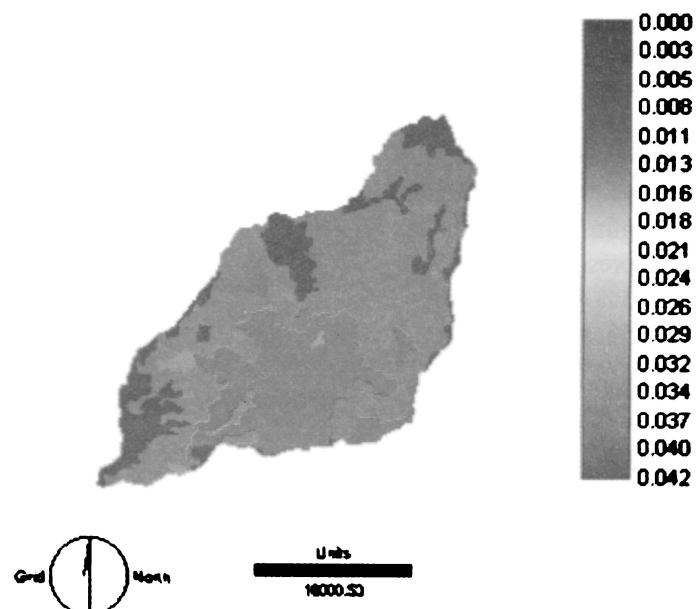


FIGURA 4. Factor de erodabilidad del suelo K cuenca del río la Miel [t.h/Mj.mm]

3.2.3. Factor topográfico (LS)

El método presentado por Wishmeier y Smith (1965) fue propuesto inicialmente para laderas de pendiente uniforme y con igual tipo de suelo y vegetación; de hecho fue diseñado para pendientes suaves asociadas a cultivos, por lo que se propuso utilizar factores correctores ante cambios de coberturas de suelo y cobertura vegetal mediante el método revisado (RUSLE). El efecto de la topografía es tenida en cuenta en la ecuación RUSLE a través del factor adimensional LS. Este factor asume que a mayor inclinación de las pendientes (S) se produce una mayor velocidad de flujos superficiales, y entre más largas son las pendientes (L) se acumula escorrentía de áreas más grandes, ocasionando también mayores

velocidades en el flujo superficial. Aumentos en L o en S resultan así en un incremento potencial en la erosión (Terrence y Foster, 1998).

Para la estimación del factor topográfico (LS) se emplearon el método tradicional presentado por Wischmeier y Smith (1976) y el método Remorter propuesto por Remortel et al (2001); los cuales emplean como información base el mapa de pendientes obtenido a partir del modelo de elevación digital de la NASA con una resolución de píxel de 92m.

El factor topográfico LS, como lo expresaron Wischmeier y Smith (1976), ajusta la pérdida de suelo a partir de una longitud estándar de 22 m (73 pies) y una pendiente

del 9%. Los dos parámetros del relieve considerados en la ecuación de la RUSLE son la pendiente media de la ladera y su longitud. El factor L, longitud de ladera viene definido por

$$L = \left(\frac{x}{22.13} \right)^m \quad (5)$$

El factor de pendiente S se expresa por

$$S = \left(\frac{0.43 + 0.3s + 0.043s^2}{6.574} \right) \quad (6)$$

Donde x es la longitud de la ladera o distancia en pendiente (m), m es la constante adimensional y s es la pendiente en porcentaje. El valor de m puede ser obtenido según la pendiente del terreno mediante las siguientes expresiones. Para pendientes $< 1\%$, $m = 0.2$, Para $1\% < \text{pendientes} < 3\%$, $m = 0.3$, Para $3\% < \text{pendientes} < 5\%$, $m = 0.4$ y Para pendientes $> 5\%$, $m = 0.5$. Similarmente el valor de x puede obtenerse según el valor de la pendiente, mediante las siguientes expresiones, para $0\% < \text{pendientes} < 1\%$, $x = 200$ m, para $3\% < \text{pendientes} < 7\%$, $x = 160$ m y para pendientes $> 7\%$, $x = 60$ m.

El método *Remorter* propuesto por Remortel et al (2001) propone el uso de un algoritmo *Arc Macro Language* (AML) en el módulo Grid de ArcInfo, desarrollado a finales de 2003. El algoritmo esta compuesto por cuatro fases: en la primera corrige los sumideros, en la segunda calcula la máxima pendiente en el sentido de la corriente y la dirección de flujo, en la tercera identifica los puntos más altos de la cuenca, y en la cuarta calcula la longitud

de pendiente no acumulada para cada celda. Con esta información es posible sumar las longitudes de pendiente no acumuladas a lo largo de la dirección de flujo desde los puntos más altos de la cuenca. Se asume al utilizar este algoritmo que ante la confluencia de dos flujos, el de mayor flujo toma la prioridad y también se asume que ante disminuciones del ángulo iguales o mayores al 50 % no se continúa la suma de acumulaciones de flujo, sino que por el contrario el material transportado se depositará, es decir no continua el proceso de erosión. El factor L se obtiene con base en la longitud de pendiente proyectada horizontalmente dividido por la longitud de referencia medida (22.1 m) y elevado al exponente de longitud de pendiente media (m)

El factor S es calculado directamente en el grid de ángulos de pendiente. Donde se aplican dos ecuaciones según un punto de quiebre del 9%.

Para pendientes menores al 9%,

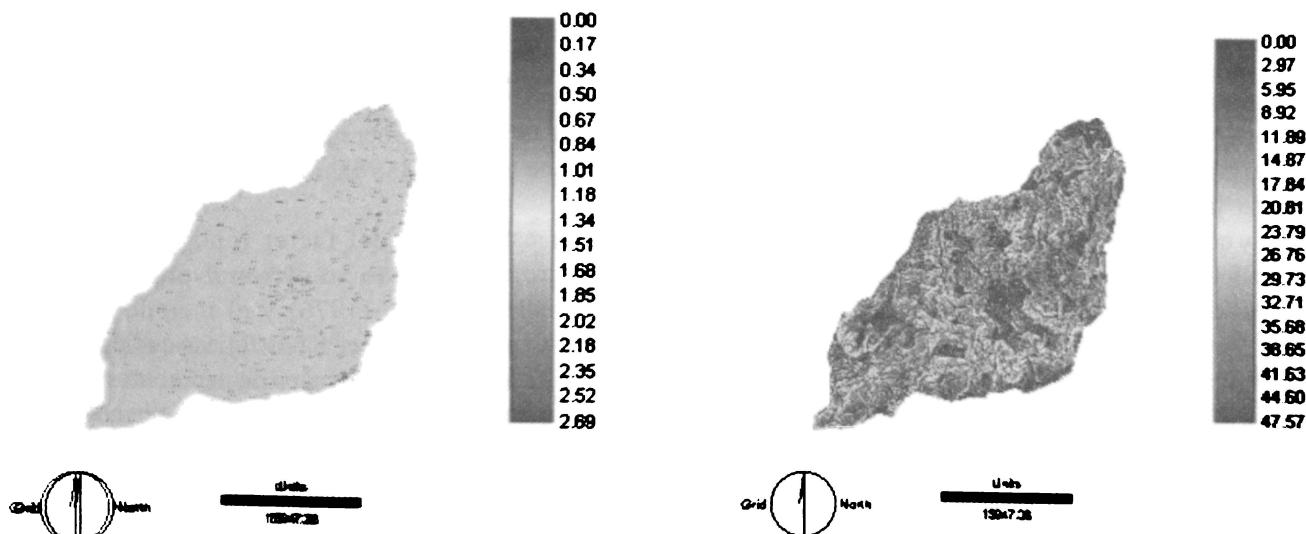
$$S = 10.8 \operatorname{Sen}(\theta + 0.03) \quad (7)$$

Para pendiente de 9% o mayores,

$$S = 16.8 \operatorname{Sen}(\theta - 0.50) \quad (8)$$

Donde θ es el ángulo de la pendiente.

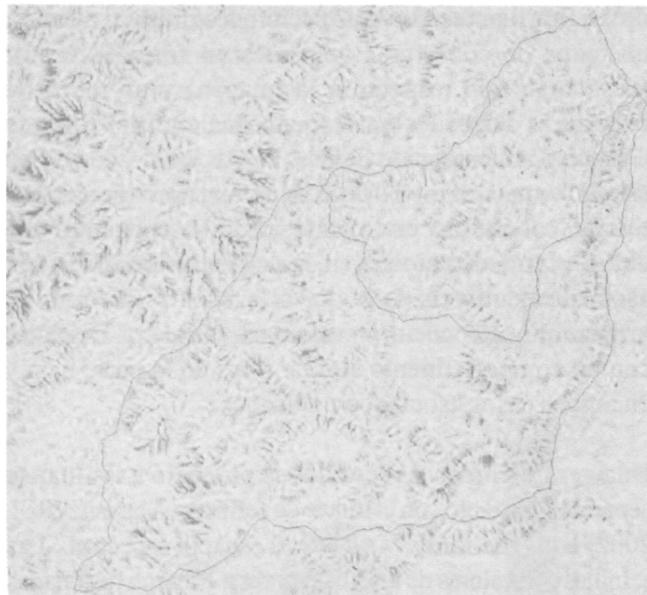
Los ángulos de las pendientes calculados por el programa se movieron en un rango entre 0.1 y 74.7 con una media de 16.6 grados, valores característicos a este nivel de detalle en cuencas de montaña. En la figura 5 se muestran los resultados obtenidos para las metodologías de Wischmeir y Smith (1976) y Remortel et al (2001).



(a) Factor L método de Wischmeir y Smith (1976)

(b) Factor S método de Wischmeir y Smith (1976).

FIGURA 5. Factores topográficos para la cuenca del río la Miel métodos de Wischmeir y Smith (1976) y Remortel et al (2001).



(c) Longitudes de pendiente en el área de estudio - Los tonos más oscuros están asociados a pendientes largas. Remortel et al (2001).



(d) Porcentajes de pendiente en el área de estudio- Los tonos más oscuros están asociados a pendientes fuertes. Remortel et al (2001).

FIGURA 5. Continuación. Factores topográficos para la cuenca del río la Miel metodos de Wischmeir y Smith (1976) y Remortel et al (2001).

3.2.4 Factor de cobertura vegetal del suelo (C)

El factor de cobertura C resume la influencia de la cobertura vegetal y de las prácticas de manejo del mismo sobre la erosión y ha sido muy empleado para comparar los efectos que tienen las diferentes opciones de manejo en los planes de conservación, indicando el modo en que afectará un determinado plan de conservación en la pérdida de suelo media anual o cómo se distribuirá a lo largo del tiempo la pérdida de suelo potencial con determinadas rotaciones de cultivo u otras actividades.

El factor C se determinó a partir de los datos reportados por Ogawa et al (1997), quienes definieron los valores a

partir de clases de vegetación obtenidas de una imagen Landsat. Para los cultivos se adoptó el valor de C correspondiente al Café (Angima et al, 2002), dado que gran parte de la zona de cultivos se encuentra en Café y Plátano asociados (PGAR 2001-2006).

Los polígonos correspondientes a sombra (72), nube (61) y sin clasificar (6) son el 1.31% del total de polígonos (10584) encontrados en el mapa Uso del Suelo. Como criterio para dar un valor de C a estos polígonos se optó por asignar el valor de C del polígono adyacente con mayor área. En la Tabla 2 se presentan los valores del factor de cobertura C asumidos para la zona.

TABLA 2. Valores del factor C para cada cobertura en la Cuenca del río La Miel.

USO DEL SUELO	FACTOR C
Infraestructura	0,000
Bosque	0,002
Rastrojo Alto	0,006
Rastrojo Bajo	0,014
Pasto	0,110
Cultivos	0,394
Suelo Desnudo	0,500

Fuente: *Estimation of Soil Erosion using USLE and Landsat TM in Pakistan*

3.2.5. Proceso de Clasificación de la Imagen de Satélite

Se clasificó el mosaico de imágenes de satélite Landsat con el fin de obtener un mapa de coberturas vegetales y relacionarlas con el factor C de la ecuación RUSLE. Con este fin se realizaron recorridos de campo con dos mapas impresos del área de estudio, donde el primer mapa se obtuvo al asignar el RGB a los tres primeros componentes principales de todas las bandas Landsat (sin las termales); y el segundo mapa se obtuvo al asignar el RGB a las bandas Landsat 453 respectivamente. Con la ayuda de GPS fue posible definir sobre los mapas la correspondencia entre grupos de píxeles y diferentes clases de cobertura vegetal. De esta forma se identificaron directamente sobre los mapas impresos las clases de coberturas vegetales más representativas a lo largo de los recorridos. Esta información se complementó tomando puntos de GPS -*waypoints*- con valores asociados a su respectivo tipo de cobertura, también se

utilizaron fuentes de información secundaria, a saber: un mapa de coberturas vegetales en formato vector (desactualizado respecto a la imagen) y un mapa de coberturas vegetales en formato análogo del Plan de Gestión Ambiental para Caldas (PGAR 2001-2006). Con esta información fue posible hacer una aproximación al tipo de coberturas; en la parte media se encuentra una alta diversidad de tonos en la combinación RGB 453 asociada a cultivos, en su mayoría de café, mientras en la parte alta se encuentran valores de Números Digitales con un comportamiento similar a los de la parte baja y en ambos casos asociados a Bosques.

Una vez obtenidas las semillas se procedió a evaluar su separabilidad tanto con el índice de Jeffries – Matusita (RSI, 2002) como de forma visual en el espacio espectral. Las semillas con valores de índice menores a 1 fueron fusionadas en una sola semilla o eliminadas, en la Tabla 3 se presentan algunos de los valores generados por dicho índice.

TABLA. 3. Algunos de los valores calculados por el Indice Jeffries – Matusita

Semilla	Semilla	Valor índice
Bosque	Rastrojo Alto	1,0378
Bosque condiciones de luz	Bosque condiciones de sombra	1,9600
Rastrojo Alto	Rastrojo Bajo	1,9416
Pasto	Cultivo limpio	1,9506
Cantera	Cultivo limpio	1,9725
Cantera	Infraestructura	1,9855
Pasto	Bosque condiciones de luz	1,9941
Pasto	Rastrojo Alto	1,9959
Cultivo limpio	Bosque condiciones de sombra	1,9999

Una vez definidas las semillas definitivas se realizó la clasificación supervisada de máxima verosimilitud. Con base en la metodología utilizada y la escala de trabajo asociada a una imagen de satélite Landsat, se concluye que las coberturas vegetales más representativas aguas arriba del sitio de presa y sus áreas asociadas son: Bosque(35146 ha), rastrojo bajo (18436 ha), cultivos (10695 ha), rastrojo alto (8295 ha), pasto (2812 ha). En la Figura 6 se muestra el mapa de factor de cobertura C obtenido para la cuenca del río la Miel con base a los resultados de la clasificación de la imagen y los valores recomendados en la Tabla 2.

3.2.6. Factor de prácticas de conservación (P)

El factor de prácticas de conservación P, estima la reducción de pérdida de suelo que se puede conseguir al aplicar alguna medida de protección en zonas de cultivo. El procedimiento para el cálculo del factor P (Factor de protección) fue el siguiente:

Dado que el área de estudio cultivada se encuentra en su mayoría en cultivos de café, se asume que la práctica de protección más utilizada es la construcción de eras o terraceo en sentido perpendicular a la dirección del flujo del agua. (USDA, 2004). Esta práctica de conservación favorece la disminución de la velocidad del agua al

generar flujo en el sentido de las terrazas y eventualmente favorecer su infiltración.

Stone y Hilborn (2000), propone un factor de 0.5 para cultivos con prácticas de conservación asociadas a la utilización de eras. Por otro lado Wischmeier and Smith, (1978), sugieren modificar el valor de P según el grado de pendiente sobre el cual se esté dando el cultivo. En este sentido se desarrolló la Tabla 4, donde el menor valor de P se asignó para pendientes entre 0 y 1%, y el máximo

valor (0.9) para pendientes superiores al 20%. Se reclasificó los valores de pendiente en valores de P, pero solamente para aquellas coberturas vegetales asociadas a cultivos; todas las otras coberturas reciben el valor de 1. Terrence y Foster (1998), ofrecen una completa discusión de este factor ante diversos tipos de suelo, clima y pendiente. La Figura 7 muestra los valores obtenidos del factor de prácticas de conservación P para la cuenca del río la Miel.



FIGURA 6. Factor de cobertura vegetal C cuenca del río La Miel [Adimensional]

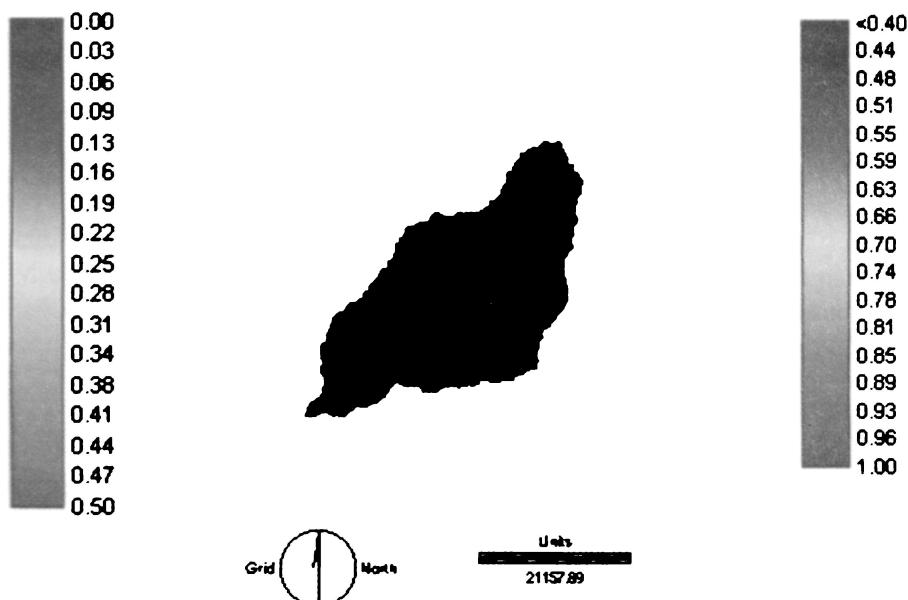


FIGURA 7. Factor de Prácticas de Conservación P cuenca del río La Miel

TABLA 4. Valores de Factor P para los cultivos.

Pendiente (%)	Valor de P
1-3	0.4
3-8	0.5
8-12	0.6
12-16	0.7
16-20	0.8
>20	0.9

3.2.7. Mapa de Pérdida de suelo promedio anual de suelo (A)

Una vez estimados todos los valores para la ecuación universal de pérdida del suelo RUSLE de Wischmeier y Smith (1965) y Renard et al (1997), dada por la expresión

(1), se calcularon los valores de producción de sedimentos (A) en t/ha.año para la cuenca del río La Miel mediante la multiplicación de los mapas temáticos correspondientes a cada una de las variables y para los valores obtenidos de L y S generados a partir de las dos metodologías presentadas para su cálculo.

Es importante resaltar que los parámetros de la ecuación universal de pérdida de suelo han sido calibrados para ciertas condiciones estándares y por lo tanto, tienen un rango en el cual han sido validadas. Por la alta precipitación y las altas pendientes en la cuenca de estudio, en puntos muy localizados, la aplicación de la ecuación da como resultado valores muy altos, que se alejan un poco de la realidad; en estos casos se está

extrapolando la ecuación a condiciones extremas. Hay que ser cuidadoso en la interpretación de los resultados; pues en estas situaciones no pueden interpretarse los resultados como tasas de erosión definitivas, sino como puntos o zonas críticas. La Figura 8 presenta las zonas con alta tendencia erosiva. En ella se observan los puntos donde se obtuvieron mayores valores de pérdida de suelo.

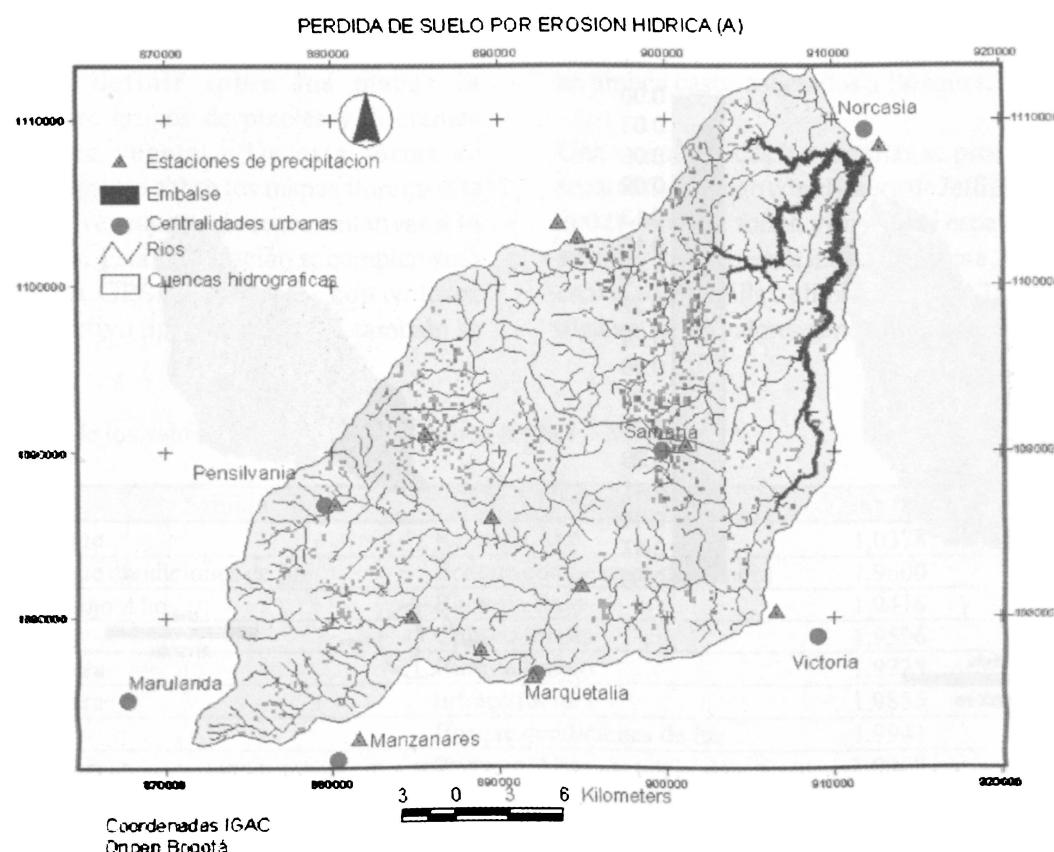


FIGURA 8. Zonas de mayor potencial erosivo cuenca del río la Miel

La Figura 9 presenta el mapa de pérdida anual de suelo para la cuenca del río La Miel teniendo en cuenta aquellos valores en el rango comprendido entre 10 t/ha.año y 4000 t/ha.año y para las dos metodologías empleadas para la estimación del factor topográfico LS. Se puede observar que ambos métodos tienen valores medios similares y que gran parte de la distribución se encuentra debajo de 400 t/ha año (aproximadamente el 78.1% del área de la cuenca tiene valores inferiores a este valor).

La mayoría de los valores altos de tasa de erosión se encuentran asociados a coberturas vegetales tipo pasto,

cultivos y rastrojos bajos, mientras que las zonas boscosas no presentan tales tasas de pérdida de suelo.

En cercanías de las estaciones con registros de precipitación más altos correspondientes a Belén – Florencia, Florencia y la Palma Pensilvania se presentan la mayor cantidad de focos erosivos. Dentro de estas zonas se encuentra la correspondiente a la margen derecha del río Tenerife, el cual sin embargo no presenta valores altos de producción de sedimentos en su margen izquierda debido a la presencia del bosque de Florencia.

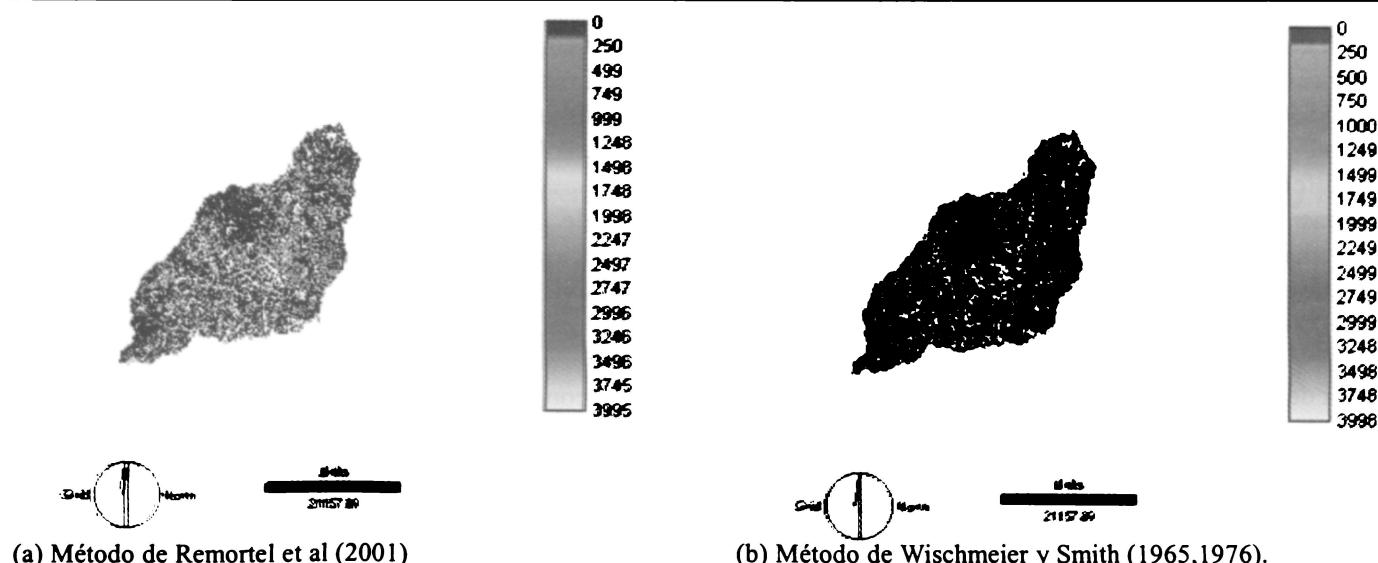


FIGURA 9. Mapa de pérdida anual del suelo A [t/ha.año]

Al superponer los valores de porcentaje de pendiente (S) con los valores de pérdida de suelos se observa como los focos de mayor erosión se encuentran ubicados en las partes más pendientes de la cuenca y en cercanías a los cauces principales

En la zona del bosque de Florencia a pesar de presentarse registros de precipitación altos, entre 5000 mm y 7000 mm al año (alto potencial erosivo de la lluvia) y altas pendientes de entre 20% y 70%, con un valor promedio de 40%, se presentan valores bajos de pérdida de suelos (aproximadamente el 85% del área con valores menores de 250 t/ha.año y casi 90% del área con valores inferiores a 600 t/ha.año); esto se debe en gran parte al bajo valor del factor de manejo de cultivo C, el cual mide de cierta forma el grado de protección de la vegetación ante procesos erosivos (el valor tomado para bosques fue de 0.002).

Utilizando estaciones de carga de sedimentos en la zona (entre ellas la estación San Miguel ubicada en la parte baja de la cuenca) se encontró una expresión que relaciona el área de la cuenca y la carga de sedimentos como se ilustra en la Figura 10. Utilizando la expresión obtenida se estimó una carga de sedimentos en el sitio de presa de $Q_{\text{sed prom}} = 1000.964$ ton/día. No es posible comparar la carga de sedimentos en las corrientes con la pérdida de suelo en la cuenca, pues gran parte de los sedimentos producidos en cuenca son depositados en ella y solo cierto porcentaje llega a las corrientes. Futuros estudios deben profundizar en metodologías para estimar el porcentaje de la producción de sedimentos en la cuenca que se convertirán en sedimentos en el cauce. Algunos autores plantean la utilización de un coeficiente de entrega. Para utilizar dicha metodología en nuestro medio se requiere un trabajo de calibración y validación previa (Carvajal y Giraldez, 2000).

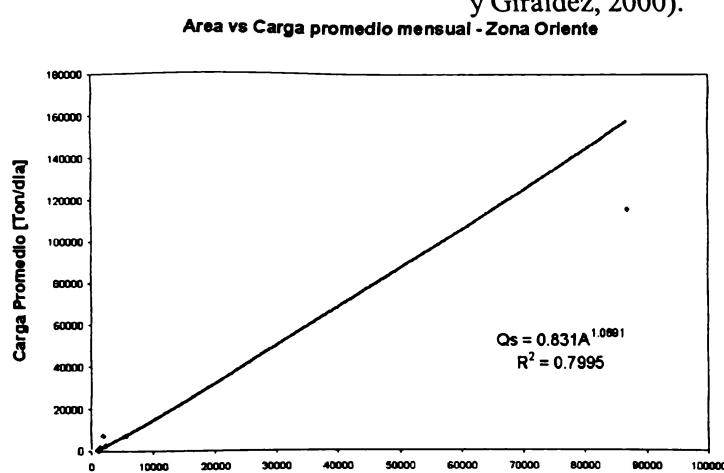


FIGURA 10. Relación entre el área de la cuenca y la carga de sedimentos promedio para las estaciones en la zona.

4. CONCLUSIONES

La información espacial y descriptiva requerida para el cálculo de la ecuación RUSLE incorpora la complejidad de diferentes temáticas ambientales, lo cual implica obtener información que en la práctica se encuentra en muy diversos niveles de detalle (escala). El nivel de detalle de los mapas utilizados varía entre 1:25000 y 1:250000, donde el menor detalle está asociado al mapa de suelos y al mapa de coberturas vegetales obtenido a partir de imágenes Landsat. Dado que el método RUSLE trata de estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica en condiciones reales, no se pueden tomar los valores de pérdida de suelo como definitivos, esto principalmente debido a que escalas medias están asociadas a una alta agregación de objetos, es decir, una generalización de la realidad disminuyendo el nivel de detalle. Así, la espacialización de valores de pérdida de suelo busca principalmente servir como medio para identificar los sectores con mayor probabilidad de alta pérdida de suelo.

Aunque todos los componentes de la ecuación RUSLE son difíciles de obtener en áreas caracterizadas por la falta de disponibilidad de la información, el factor P ofrece una dificultad especial. El factor P obedece a las prácticas de conservación para evitar la pérdida de suelo o favorecer la sedimentación *in situ*. Terraceos, eras, siembra de pastos entre eras y trampas de sedimentos son algunas de estas prácticas. La única aproximación en este estudio al factor P es la de asumir que los cultivos están plantados en eras a lo largo de curvas de nivel, es decir, perpendiculares al flujo del agua. Sin embargo, con un trabajo de campo intenso se pueden identificar otras prácticas y asignar valores de P más próximos a la realidad.

La cobertura vegetal es uno de los parámetros que mayor facilidad técnica presenta para ser modificado y disminuir las tasas de pérdida de suelo. En este estudio se utilizaron imágenes de satélite Landsat, las cuales solo permiten determinar clases muy amplias de cobertura vegetal y no permiten discriminar en tipos de cultivo bien sea por su tamaño o por su similitud en el campo espectral. Se sugiere considerar imágenes de satélite con píxeles de menor tamaño (SPOT, ASTER, IKONOS) para lograr una mejor aproximación a los tipos de cultivo.

Para una mejor representación del factor K asociado al tipo de suelo, se requiere mayor información de campo,

sería recomendable realizar estudios de menor escala para la definición del tipo de suelo. También, se recomienda realizar estudios con parcelas experimentales durante largo plazo para la medición de dicho factor.

Uno de los parámetros más importantes para la estimación de la pérdida de suelo es el correspondiente a la erosividad de la lluvia R; el cual fue obtenido de forma aproximada a partir de registros diarios de precipitación y comparado con los presentados por otros autores en zonas con registros anuales de precipitación similares.

Teniendo en cuenta las posibles diferencias existentes entre las tormentas de la zona de estudio comparadas con las de otras zonas presentadas por otros autores, se recomienda la implementación de estudios mucho más detallados para su determinación a partir de datos pluviográficos de alta resolución temporal, así como la utilización de las metodologías propuestas por otros autores, para estimar dicho factor como función de la intensidad de la lluvia.

La utilización de la ecuación de la RUSLE para zonas tropicales como Colombia debe hacerse con mucho cuidado pues esta puede conducir a errores considerables en la estimación de la perdida anual de suelo, debido básicamente a las diferencias existentes en las condiciones climáticas y topográficas para la cual fue diseñada. Según la FAO (1989) el método de la RUSLE en este tipo de zonas presenta limitaciones de diseño y operación debido básicamente a que las tierras cultivo tienen pendientes fuertes, que exceden los límites de diseño del modelo, los sistemas de cultivos prevalentes no presentan la homogeneidad que asume y necesita el modelo y las características edáficas y los patrones de formación y destrucción del suelo difieren en los trópicos de las zonas templadas.

5. BIBLIOGRAFIA

- Angima, S.D., Stott, D.E., O'Neill, M.K., Ong, C.K. y Weesies, G.A. 2002. Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. En: Elsevier, agriculture ecosystems and environment. 97 (2003) pp. 295-308.
- Ascough J.C., Baffaut C., Nearing M.A., y Liu B.Y. 1997. The WEPP Watershed model: Hydrology and erosion. ASAE 40. pp. 921-933.

- Carvajal, R.F., y Giráldez, J.V., 2000. Análisis de la producción de sedimentos en una cuenca con un sistema de información geográfica. El sistema Cubillas – Colomera. En: Ingeniería del agua. Vol 7, 225-236.
- Chaves, H.M.L. y Nearing, M.A. 1991. Uncertainty analysis of WEPP soil erosion model. Trans. ASAE 34. pp. 2437 –2444.
- Foster, G.R., y Meyer L.D. 1975. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanism. USDA-ARS-S-40. p. 190.
- Govindaraju, R.S. 1995. Non –Dimensional analysis of a physical based rainfall – runoff –erosion model over steep slopes. J.Hydrol.173. pp. 327 –341.
- Grunsky C.E. 1992. Rainfall and Runoff studies. Transactions of the American society of civil engineers. pp. 66-136.
- IGAC –ICA. 1988. Suelos y bosques de Colombia.
- Janson, M.B. 1982. Land erosion by water in different climates. UNGI Rapport Nr 57.Uppsala University.
- Lane L.J. y Nearing M.A. 1989. USDA –Water Erosion prediction project:Hillslope profile model documentation.USDA –Agricultural Research Service.
- Loch, R.J. 1998. Field Rainfall simulation. In So, HB; Sheridan, GJ;loch, RJ; Carroll, C; Willgoose, A. Post –Minig landscape parameters for erosion and water quality control. Final report projects 1629 and 4011 to the Australian coal association Research program.
- Morgan, R.P.C., Quinton J.N., Smith R.F., Gover G, Posen J.W.A., Auerswald K., Chisci G, Torri D., Styezen M.E y Folly A.J.V. 1998. The European soil erosion model (EUROSEM):documentation and user guide.Silsoe College. Cranfield University. <http://www.sil-soe.cranfield.ac.uk/eurosem/euro3.htm>
- Musgrave, G.W., y R.A. Norton. 1947. Soil and water conservation investigations at the Soil Conservation Experiment Station Missouri Valley Loess Region, Clarinda, Iowa, Progress report, pp. 1931-35.
- Ogawa C., G. Saito, N. Mino, S. Uchida, N. M. Kan y M. Shafiq. 1997. Estimation of Soil Erosion using USLE and Landsat TM in Pakistan. National Institute of Agro-environment Sciences Diane. En: Gis Development. 6p.
- Plan de Gestión Ambiental Regional para Caldas PGAR 2001-2006.
- Remortel, R.D.V., Hamilton M.E. y Hickey R.J. 2001. Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elavation data within ArcInfo Grid. Catography, v 30, N°1, pp. 27 –35.
- Renard, K.G, Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K, y Yoder, D.C. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Dept. of Agriculture, Agric. Handbook No. 703, p.404.
- Research Systems Inc (RSI). 2002. The Environment for Visualizing Images (ENVI). Pearl East Circle Boulder, USA.
- Rose, C.W. 1985. Develops in soil erosion and deposition models. Advances in Soil Science. Vol. 2.Springer-Verlag.
- Schwab A, Owensby C. y Kulyingyong S. 1990. Changes in soil properties due to 40 years of fertilization. Soil Sci. 149: pp. 35-43.
- Smith, D.D. 1941. Interpretation of soil conservation data for field use. Agric. Engng 22, pp.173-175.
- Smith, D.D. y Whitt, D.M. 1947. Estimating soil losses from field areas of Claypan soils. Proc. Soil Sci. Soc. Am. 12, pp.485-490.
- Singh, V.P. 1989. Hydrologic Systems. Watershed Modeling Volumen II. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Sander G.C.Hairsine P.B., Rose C.W., Cassidy D., Parlange J.Y., Hogart W.L y Lisle I.G. 1996. Unsteady soil erosion model, analytical solutions and camparison with experimental results. J.Hydrol.178. pp.351-367.
- Steward, B.A. et al. 1975. Control of Pollution from Cropland, U.S. EPA Report No. 600/2-75-026 or U.S.D.A Rep. No. ARS-H-5-1, Washington, DC.
- Stocking, M., C.Kalabane. y H. Elwell. 1988. An inproved methodology for erosion mapping. Geogr.Anal.70A. pp. 169-180.
- Stone R. P. y Hilborn D. 2000. Universal Soil Loss Equaiton (USLE). Ministry of agriculture and food. Ontario, Canadá..
- Terrence, T.J. y Foster, R.F. 1998. Guidelines for the use of the Revised Universal Soil Loss Equation (Rusle) on Mined Lands, Construction Sites, and Reclaimed Lands. 4. pp. 1-4.13.
- Wischmeier, W.H. y Smith D.D. 1965. Predicting Rainfall Erosion losses from cropland. United States Department of agricultere. Agicultural Hand Book. N 282. USDA Washington D.C .

- Wischmeier, W.H., y Smith D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion losses a guide to conservation planning . United States Department of agriculture, Agricultural Hand Book. N 537. USDA Washington D.C .
- Woolhiser, D.A., Smith R.E. y Goodrich D.C. 1990. KINEROS, a Kinematic runoff and erosion model. USDA-ars-77.
- Zingg, A.W. 1940. Degree and land of slope as it affects soil loss and runoff. Agric. Engg., 21. pp. 59-64.