

XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010

CONSIDERACIONES DE ESCALA EN LA ESTIMACIÓN DE LA CARGA  
ANUAL DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO  
SAN JORGE, COLOMBIA

*Mario Alberto Jiménez Jaramillo, Paula Lizet Correa Velásquez  
y Jaime Ignacio Vélez Upegui*

*Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos – Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia  
majimene@unal.edu.co, paula.correa@epm.com.co, jivelezu@unal.edu.co*

RESUMEN:

En este trabajo se implementó un modelo distribuido de producción de sedimentos de largo plazo, mediante el cual se estimó la carga media anual y la concentración de sólidos en suspensión en la cuenca del río San Jorge -Colombia-, considerando los aportes debidos a procesos de erosión en ladera y erosión en banca de cauces. En la aproximación se empleó la estimación de caudales medios de largo plazo en la cuenca, y se evaluaron los resultados como una función de la escala y de características morfológicas de los canales que conforman la red hídrica. La capacidad predictiva del modelo se verificó comparando los valores estimados con registros de sólidos en suspensión disponibles en seis sectores de la cuenca que definen cuencas entre 480 Km<sup>2</sup> y 5198 Km<sup>2</sup>, que son monitoreados por la Corporación Autónoma Regional del los Valles del Sinú y San Jorge -CVS-. Pese a la capacidad predictiva del modelo, los resultados mostraron que la metodología RUSLE subestima considerablemente la producción de sedimentos en la cuenca, y que la erosión en banca suple dicho déficit dentro del modelo conceptual, explicando la mayor parte de la producción de sedimentos. De esta manera, no fue posible identificar relaciones de múltiples escalas entre la carga de sedimentos y el área de cuenca, a pesar de haber tenido en cuenta dos procesos diferentes.

PALABRAS CLAVES: carga de sedimentos, erosión, modelo distribuido.

ABSTRACT:

In this work a long-term sediment supply model was implemented whereby mean yield and mean concentration for total suspended sediment were estimated in San Jorge river basin -Colombia-. Both hillslope sediment delivery and in-stream erosion processes -bank erosion- were taking into account. For the latter, long-term discharge estimation was considered. Outcomes were assessed in relation with basin area as a scaling factor, and it was done also by taking into account morphologies pattern of the drainage network. The model performance was verified by comparing predicted values with mean values for six survey sites monitored by CVS Regional Corporation which define watershed areas between 480 Km<sup>2</sup> and 5180 Km<sup>2</sup>. Although the model showed a good performance, results suggested that RUSLE model underpredict hillslope loads within the basin so the bank erosion process appeared to be the most important throughout it. In this way, it was not possible to figure out that a multi-scale law emerges for the relationship between suspended sediment yield and basin area despite the consideration of two different processes.

PALABRAS CLAVES: sediment yield, erosion, distributed model.

## INTRODUCCIÓN

La dinámica sedimentológica es un proceso complejo en el que intervienen variables climatológicas, geológicas, antrópicas, entre otras, que rara vez pueden considerarse en totalidad y/o detalle. Sin embargo, producto de dicha complejidad, un buen número de propuestas metodológicas existen en la literatura con diversos niveles de aproximación, entre las que cabe mencionar las empíricas, conceptuales y de base física (Merritt et al., 2003), cada una apropiada según sea la disponibilidad de información y el objetivo detrás de su aplicación.

Dentro de las estrategias más comunes, por su simplicidad y poca demanda de información, se encuentra la relación empírica entre el área de la cuenca,  $A$ , y el caudal sólido,  $Q_s$ , la cual suele expresarse de acuerdo con la ecuación [1], donde  $a$  y  $b$  son constantes. En dicha ecuación,  $A$  es empleado como sustituto del caudal, ya que es fácilmente evaluable a través del usos de modelo digitales de elevación -MDE- y se ha encontrado en distintos estudios que los caudales medios escalan linealmente con el área cuenca (Vogel et al, 1999). Sin embargo, la ecuación [1] corresponde a un modelo de escalamiento simple obtenido, generalmente, mediante la utilización de series de registro de estaciones que definen cuencas con áreas moderadas o grandes, en las que se ya se ha alcanzado la agregación de múltiples procesos. Por otro lado, el carácter agregado de dicho esquema no permite evaluar cambios en los factores medio ambientales que determinan el suministro de sedimentos en una cuenca, ni permite diferenciar los procesos erosivos más relevantes dentro de la misma.

$$Q_s = aA^b \quad [1]$$

En la escala de cuenca, y en un contexto de planificación y ordenamiento, los criterios de selección de un modelo de producción de sedimentos deben incluir su capacidad para evaluar cambios en la cuenca tales como usos del suelo y coberturas vegetales, importantes en procesos de erosión laminar, y a su vez deben ofrecer la posibilidad de evaluar espacialmente el problema con miras a detectar sectores críticos y apoyar el diseño de redes de monitoreo ambiental. Partiendo de dichas premisas, en este trabajo se implementa un modelo distribuido de producción de sedimentos que se basa de la conceptualización presentada por Wilkinson et al. (2009), mediante la cual se estimó la carga media anual de sedimentos en suspensión en la cuenca del río San Jorge, localizada al noroccidente de Colombia. En dicho esquema se tienen en cuenta procesos de erosión en ladera o erosión laminar, a través la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada -RUSLE-, y procesos de erosión en banca empleando la potencia de la corriente como una métrica de la capacidad de transporte de la misma.

## ZONA DE ESTUDIO Y DATOS

La cuenca del río San Jorge se encuentra ubicada en el noroccidente de Colombia (ver Figura 1) y ocupa territorios de los departamentos de Antioquia, Córdoba, Sucre y Bolívar, antes de la confluencia del canal principal en el río Cauca. Antes de su interacción con la ciénaga de Ayapel, el río San Jorge drena un área de 5268 Km<sup>2</sup>, dentro de la cual se encuentran como principales asentamientos las cabeceras de los municipios de Montelíbano, Puerto Libertador, San José y La Apartada. Se caracteriza por presentar bajas pendientes y amplias llanuras, en donde la situación ambiental se caracteriza por la sobre-explotación y deterioro del recurso suelo, debido principalmente a la actividad ganadera y, en menor porcentaje pero con gran impacto, a las prácticas agrícolas no sostenibles y la minería (ferroníquel, oro, carbón y materiales de construcción) -CVS, 2005-.

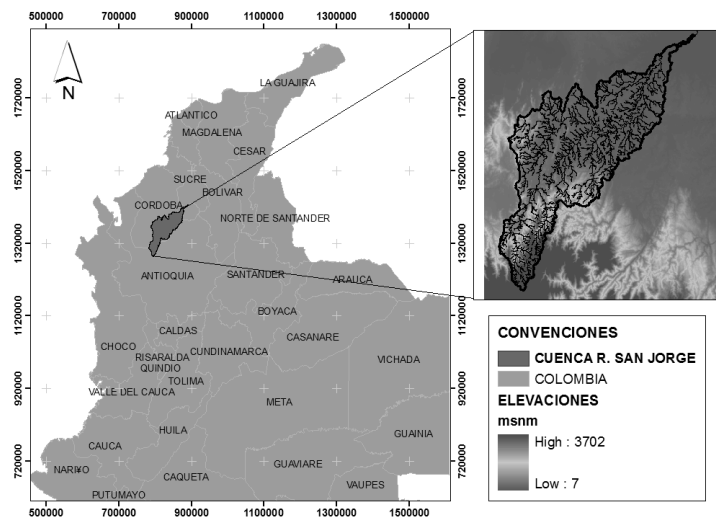


Figura 1.- Zona de estudio

El Río San Jorge transporta un caudal promedio mensual de 204 m<sup>3</sup>/s, caudales promedio máximos de 759 m<sup>3</sup>/s y caudales promedio mínimos de 31 m<sup>3</sup>/s de acuerdo con los registros de la estación Montelíbano del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia). Ya que el mayor porcentaje de la cuenca se caracteriza por poseer bajas pendientes, los canales que conforman la red hídrica del río San Jorge poseen morfologías de planicie caracterizadas, entre otras, por la alta carga de sedimentos en suspensión que transportan en relación con la carga de fondo, e importantes procesos de erosión en bancas producto de la migración lateral del cauce favorecidos por la ausencia de corredores riparios y la alta erodabilidad de limos y arenas que componen el material de banca.

La información empleada en este trabajo incluye un MDE para la zona de estudio, extraído de los productos de la misión satelital SRTM, a partir del cual se hizo la caracterización morfométrica de la cuenca y se segmentó en un conjunto de unidades Tramo-Ladera interconectados entre sí hacia aguas abajo. Por otro lado, se contó con información distribuida de un campo de precipitación media multianual de la cuenca del río San Jorge, al igual que capas de usos del suelo, coberturas vegetales y texturas de suelo, levantadas y llevadas a formato SIG –Sistema de Información Geográfica- por la Corporación Autónoma Regional de las cuencas del Sinú y San Jorge -CVS- la cual corresponde a la entidad ambiental con jurisdicción sobre la zona de estudio.

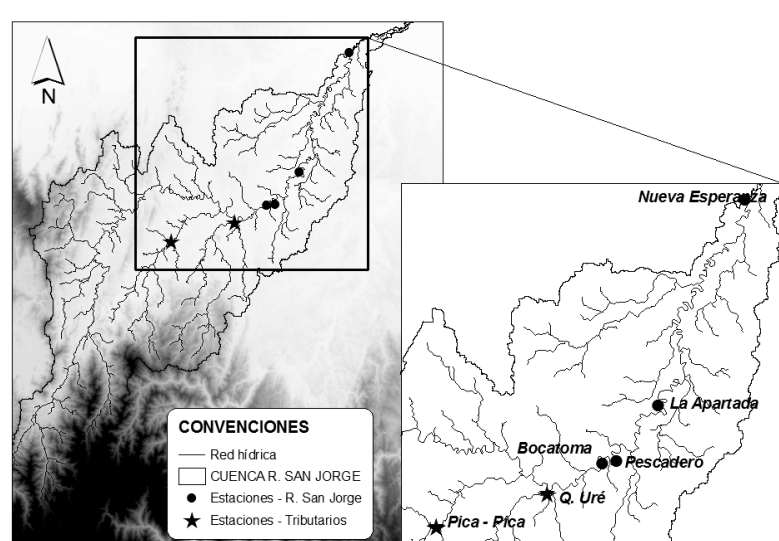


Figura 2.- Zona de estudio

Adicionalmente, como parte de los monitoreos de la calidad del agua de las fuentes hídricas de la cuenca, se contó con valores de concentración de sedimentos en suspensión en 6 estaciones de medición distribuidas espacialmente como se muestra en la Figura 2, cuatro (4) de las cuales se localizan sobre el río San Jorge y las restantes sobre el río San Pedro y la quebrada Uré, que corresponden a los principales tributarios al río San Jorge.

## MÉTODOS

En la Figura 3 se esquematizan las principales entradas y salidas de sedimentos en un tramo de una corriente de acuerdo con Wilkinson et al. (2009), donde el proceso primario de producción corresponde a la formación de surcos, cárcavas y canales en las partes altas de la cuenca. Por otro lado, al tramo ingresan sedimentos producidos y transportados desde laderas adyacentes al mismo a través de procesos de erosión laminar. Al interior del cauce, también tienen lugar procesos de producción de sedimento, que se acentúan en ríos de planicie en los que la disipación de energía se logra en un gran porcentaje a través de la migración lateral del cauce, que se traduce en la constante socavación de las márgenes del río.

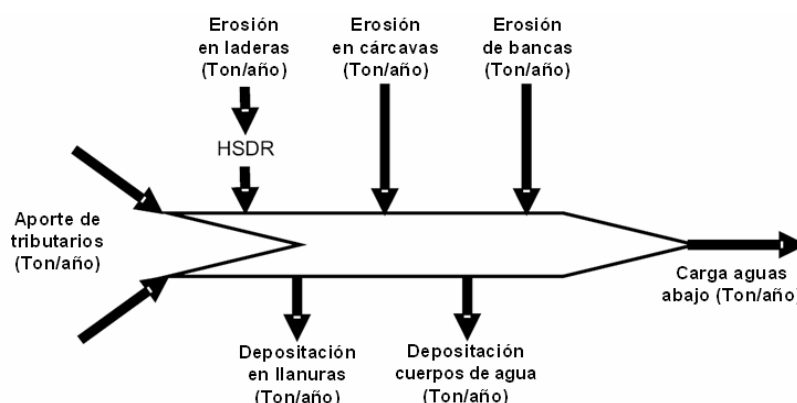


Figura 3.- Fuentes y sumideros de cargas de sedimento en suspensión (Tomada y modificada de Wilkinson et al., 2009)

Por otro lado, por la acción de eventos de desbordamiento del flujo sobre el nivel de banca llena, se genera en el largo plazo la depositación de sedimentos en la llanura de inundación del mismo, razón por la cual dicho proceso es considerado como un sumidero en el esquema conceptual de la Figura 3. Del mismo modo se considera como sumidero el intercambio de sedimentos entre el canal principal y cuerpos de agua aledaños como embalses, lagos o ciénagas.

Teniendo en cuenta que la interacción del río San Jorge con cuerpos de agua tiene lugar aguas abajo de la zona de estudio, y que no se contó con información suficiente que permitiera abordar el problema de ciclos de desbordamiento y erosión en cárcavas, solo se incluyó en este trabajo la erosión laminar y la erosión en banca como agentes erosivos en la cuenca.

### Caracterización espacial de la cuenca

De acuerdo con el esquema conceptual de producción de sedimentos descrito, la unidad de análisis corresponde a un tramo y sus laderas adyacentes.

El -MDE- y la red hídrica de la cuenca, se procesaron para obtener un mapa de direcciones de flujo -DIR- empleando la plataforma de acceso libre MapWindowGIS ([www.mapwindow.org](http://www.mapwindow.org)). Giles & Franklin (1998) propusieron un método para identificar unidades geomorfológicas de superficies topográficas, que puede emplearse igualmente para identificar cambios sensibles en la pendiente global de un perfil longitudinal, entendiendo esta como la pendiente medida en una longitud mucho más grande que la longitud de una unidad morfológica de un tramo (por ejemplo, una secuencia

salto-pozo en tramos de alta pendiente, o una secuencia pozo-rápida en un tramo de planicie). Empleando dicho método se separaron tramos en la red de drenaje, considerando como nodos (límites entre tramos consecutivos) aquellos definidos por cambios sensibles de pendiente (nodos topográficos) y por confluencias (nodos hidrológicos), tal como se ilustra en la Figura 4.

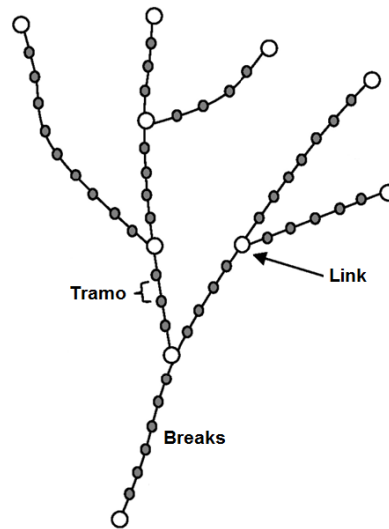


Figura 4.- Esquemización de la separación de tramos; nodos hidrológicos -Links-, nodos topográficos -Breaks-

A cada tramo se asignó un tipo de morfología siguiendo el esquema de clasificación propuesto por Flores et al. (2006) -Figura 5- donde se consideran, además de la pendiente, el índice de potencia específica de la corriente,  $S_0A^{0.4}$  (con  $S$  la pendiente longitudinal del tramo y  $A$  el área de cuenca) como variable discriminatoria entre los tipos de morfología *cascade*, *step-pool*, *plane-bed* y *pool-riffle* (Montgomery & Buffington, 1997). De igual forma, para cada tramo, se delimitó su ladera adyacente, la cual define el área potencial de aportes de sedimento producidos por erosión laminar.

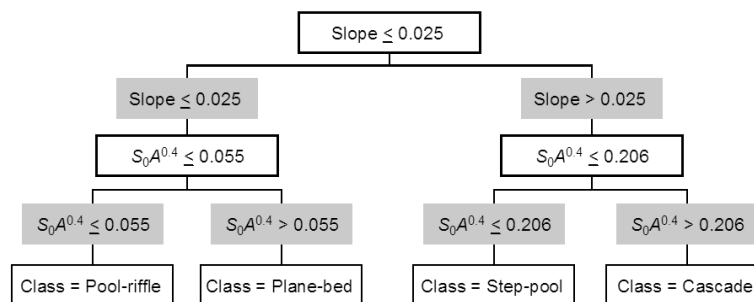


Figura 5.- Clasificación morfológica propuesta en Flores et al. (2006).

Junto con la pendiente y la longitud, se complementó la representación geométrica de cada tramo asumiendo una configuración rectangular con un ancho obtenido mediante una relación de geometría hidráulica de tramo (Sterwardson, 2005; Harman et al., 2008; Wohl y Merrit, 2008), derivada mediante la utilización de imágenes satelitales disponibles en Google y herramientas desarrolladas en CAD. En la Figura 6a se muestra la relación de geometría hidráulica para el ancho promedio de banca llena, obtenida para 59 tramos de 5 Km usando las imágenes satelitales antes mencionadas, y en la Figura 6b, la segmentación espacial de la cuenca en un total de 1028 tramos con sus correspondientes laderas adyacentes.

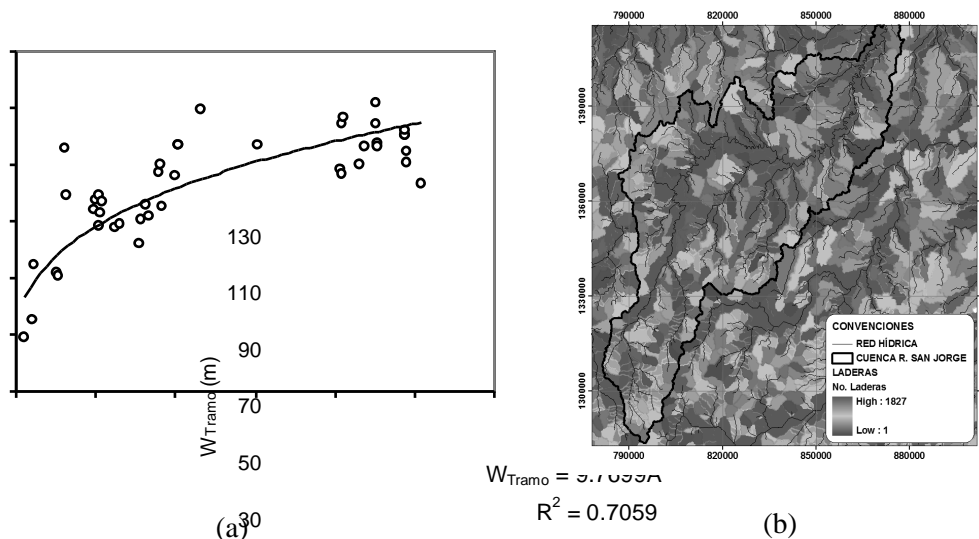


Figura 6.- (a) Geometría hidráulica de tramo para el ancho de banca; (b) Segmentación de la cuenca en unidades de análisis Tramo-Ladera

Erosión laminar

Los aportes por erosión laminar se evaluaron siguiendo la metodología RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), la cual viene dada por la ecuación [2], donde  $E$  es la erosión laminar [Ton/m<sup>2</sup>.año],  $R$  [MJ.mm/m<sup>2</sup>.h] la erosividad de la lluvia,  $K$  [Ton.h/MJ.mm] la erodabilidad del suelo,  $LS$  [-] el factor topográfico,  $C$  [-] las coberturas del suelo y  $P$  [-] las prácticas de manejo del mismo.

$$E = R.K.LS.C.P \quad [2]$$

En la Caracterización Físico-Biótica del Diagnóstico Ambiental de la cuenca Hidrográfica del río San Jorge (CVS, 2005) se consolidó información geológica (texturas del suelo), vegetal (coberturas y usos del suelo) y geomorfológica que permitió obtener los factores  $K$ ,  $C$  y  $P$ . El factor  $LS$ , se estimó partiendo de los mapas MDE y DIR, considerando que reducciones abruptas en la pendiente en la dirección de flujo (50%) de una ladera, generan la depositación del sedimento transportado. Dicho aspecto permite reemplazar el factor HSDR (Hillslope Sediment Delivery Ratio) considerado en el esquema conceptual de la Figura 3, el cual corresponde a un valor entre 0 y 1 que cuantifica la proporción de sedimentos que no alcanza un cauce debido a que antes sufre depositación en la ladera. Sin embargo, como tal, el factor HSDR no puede evaluarse espacialmente, razón por la cual se ha considerado su efecto directamente en la estimación del factor  $LS$ .

#### Erosividad de la lluvia

Es quizá uno de los parámetros más complejos de estimar ya que se basa en intensidades de lluvia de baja duración, para lo cual normalmente no se tiene información con la suficiente resolución temporal. Como consecuencia de ello, métodos alternativos para la estimación de  $R$  parten de valores medios de precipitación en resoluciones temporales más gruesas y fáciles de evaluar.

En Colombia, Pérez (2001) encontró interesantes relaciones entre el factor  $R$  y la precipitación media multianual de la región, de acuerdo con la ecuación [3], donde  $P_{media}$  (mm/año) denota la precipitación media multianual y  $R$  (KJ.mm/m<sup>2</sup>.h) el factor de erosividad anual.

$$R = 1.19254 \times 10^{-5} P_{media}^{1.7014} \quad [3]$$

El mapa  $P_{media}$ , se extrajo para la región de estudio del mapa del mapa nacional de precipitación media multianual construido en la tesis de Maestría “*Cuantificación de la incertidumbre en la elaboración de mapas de variables hidrológicas Aplicación al balance hídrico a largo plazo*” (Álvarez, 2007).

### *Erodabilidad del suelo*

Una detallada relación entre gerformas del relieve de la cuenca del río San Jorge y la naturaleza de los materiales que las conforman fue presentada en CVS (2005), con un nivel de detalle que permitió asociar a cada uno de dichos materiales un valor del coeficiente  $K$  de acuerdo con valores sugeridos en la literatura. Entre la propuestas con mayor diferenciación de tipos se encuentra la presentada Zaragoza et al. (sin año, Universidad de Alicante) y mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1.- Valores factor de erodabilidad

Descripción	K [Ton.h/ MJ.mm]	Descripción	K [Ton.h/ MJ.mm]	Descripción	K [Ton.h/ MJ.mm]	Descripción	K [Ton.h/ MJ.mm]
Aluvión	0.24	Calcáreas y areniscas	0.14	Conglomerado tramo regresivo	0.16	Limos y arcillas	0.28
Arcillas	0.28	Calcáreas y dolomías	0.14	Conglomerados y arcillas	0.22	Limos y arenas	0.28
Arcillas y conglomerados	0.28	Calcáreas y margas	0.22	Conglomerados y margas: caliche	0.18	Limos, arcillas rojas y caliche continental	0.3
Arcillas, margas y yesos	0.3	caliza zoógena	0.14	Conglomerados, areniscas y arcillas	0.16	Margas	0.32
Arenas	0.26	Cantos, gravas y limos	0.2	Cuaternario indiferenciado arenas, gravas	0.22	Margas abigarradas yesíferas	0.32
Areniscas	0.18	Cantos, gravas, arenas y arcillas	0.2	Detrítico cañadas	0.24	Margas ocre claro con niveles arenosos	0.32
Areniscas calcomargosas y margas	0.24	Cantos, gravas, arenas y limos	0.2	Dolomías	0.14	Margas y areniscas	0.28
Calcarenita	0.16	Conglomerado arcilloso y arcillas	0.16	Dunas	0.26	Margocalizas	0.16
Calcáreas tobáceas	0.14	Terra rossa: dolinas	0.28	Lentejón detrítico intercalado	0.2		

### *Cobertura vegetal*

El factor de cobertura  $C$  resume la influencia de la cobertura vegetal y de las prácticas de manejo del mismo sobre la erosión. El factor  $C$  se determinó a partir de los datos reportados por Ogawa et al. (1997, citado en Montoya et al., 2006), quienes definieron los valores a partir de clases de vegetación obtenidas de una imagen Landsat -ver Tabla 2-.

### *Prácticas de conservación*

El factor de prácticas de conservación  $P$ , refleja la reducción de la pérdida del suelo obtenida con prácticas de protección en zonas de cultivo que logren disminuir la tasa media de erosión anual. Basado en los análisis realizados para el estudio de erosión en la cuenca hidrográfica del río La Miel (Montoya et al., 2006), se definieron, según el tipo de actividad efectuada en las diferentes zonas de la cuenca del río San Jorge, los valores correspondientes a este parámetro.

Tabla 2.- Valores cobertura vegetal

Descripción	Factor C [-]
Embalse o Estanque	0
Lago, Laguna o Ciénaga	0
Centro Poblado	0
Pastos Manejados	0.014
Bosque Secundario	0.002
Rastrojo	0.014
Vegetación Baja	0.110
Cultivos	0.394

Tabla 3.- Valores practicas de conservación

Descripción	Factor P [-]
Ganadería	0.400
Urbano	0.400
Forestal	0.700
Conservación	0.700
Agrícola	0.500

### Factor topográfico

El efecto de la topografía en la ecuación RUSLE es tenida en cuenta a través del factor adimensional  $LS$ . Dicho factor asume que a mayores pendientes ( $S$ ) se produce una mayor velocidad de flujos y que entre más larga sean las pendientes ( $L$ ) se acumula más escorrentía, ocasionando mayor capacidad de arrastre. La estimación del mapa LS se hizo a través de la metodología descrita en Van Remortel et al. (2001) que partiendo del modelo de elevación digital del terreno y las direcciones de flujo de la región, permite estimar longitudes máximas acumuladas de flujo en las direcciones de máxima pendiente considerando zonas planas como zonas de potencial almacenamiento de sedimento en la cuenca, de tal forma que éstas no son consideradas como aportantes directos a los cauces.

En la Figura 7 se ilustra la forma en que fue estimado el factor  $LS$ . Partiendo del modelo de elevación digital, MED, y las direcciones de flujo, DIR, es estimada la pendiente máxima en la dirección de flujo, lo cual se hizo mediante un aplicativo desarrollado en MatLAB, donde fueron implementados los restantes pasos ilustrados en el diagrama de la Figura 7 y los restantes requerimientos de la metodología RUSLE.

Con el modelo de direcciones, DIR, las distancias no acumuladas en la dirección de flujo, NCSL, pueden estimarse para agregarse después hacia aguas abajo partiendo de las cabeceras de cuenca, definidas como aquellas zonas que no reciben flujo desde ninguna parte de la región. Como resultado, un mapa de longitudes máximas acumuladas,  $L_{max}$ , es producido que junto con las pendientes permite estimar el factor  $LS$  como:

$$LS = \left( \frac{L_{max}}{72.6} \right)^m (65.41 Sen^2 + 4.56 Sen + 0.065) \quad [4]$$

Donde  $L_{max}$ , es la longitud máxima acumulada en pies,  $\theta$  es el ángulo de la pendiente aguas abajo y  $m$  una constante que depende de  $\theta$  tal como se indica a continuación:

$$\begin{aligned} m &= 0.5; \quad \forall \quad \theta > 2.86^\circ \\ m &= 0.4; \quad \forall \quad 1.72^\circ < \theta \leq 2.86^\circ \\ m &= 0.3; \quad \forall \quad 0.57^\circ < \theta \leq 1.72^\circ \\ m &= 0.2; \quad \forall \quad \theta \leq 0.57^\circ \end{aligned} \quad [5]$$



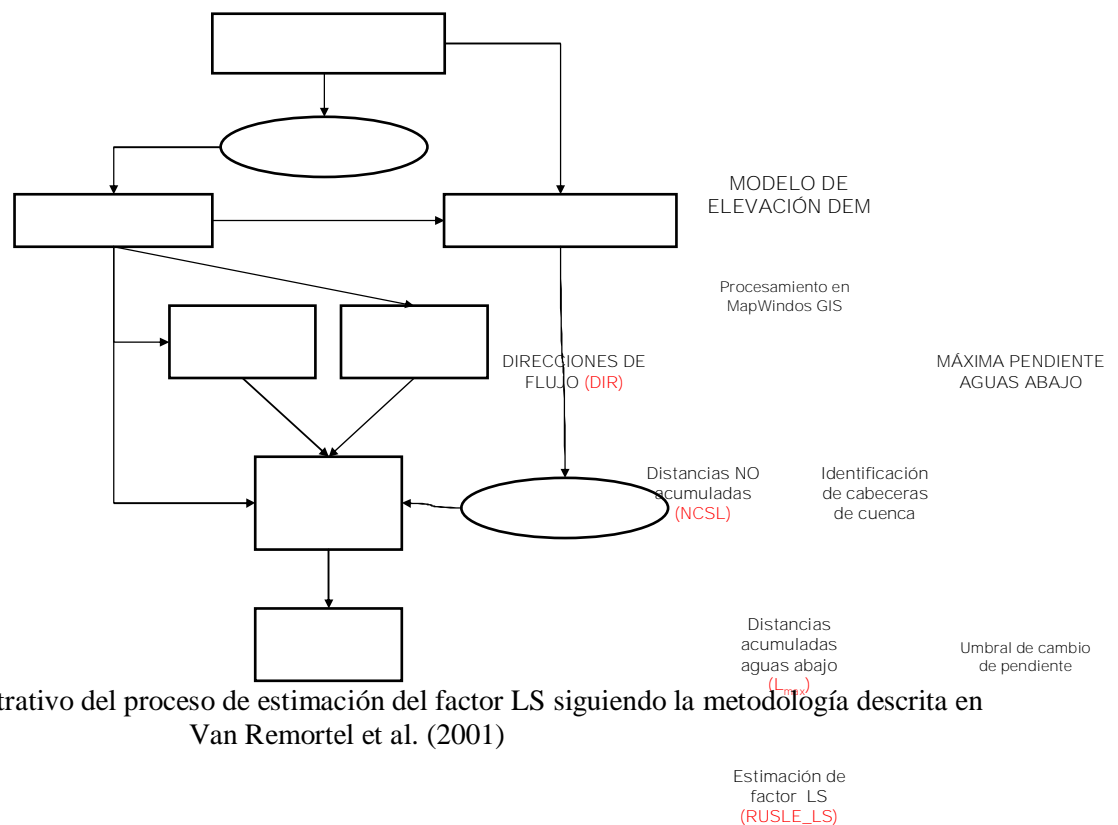


Figura 7. Diagrama ilustrativo del proceso de estimación del factor LS siguiendo la metodología descrita en Van Remortel et al. (2001)

### Erosión en banca

El máximo transporte de sedimentos en un tramo tiene lugar cuando por éste circula el caudal efectivo, definido como aquel capaz de realizar el mayor trabajo geomorfológico en la geometría del cauce. La magnitud de dicho caudal es difícil de estimar ya que para ello se requiere información paralela de caudal líquido y caudal sólido, por lo que suele asociarse a los caudales de banca llena  $Q_b$ , estimados hidrológicamente como el caudal con un período de retorno que está entre 1.5 y 3 años. Si se asume que en condiciones de banca llena el flujo es uniforme, puede escribirse el caudal  $Q_b$  como:

$$Q_b = V_b W_b H_b \quad [6]$$

$$Q_b = \left( \frac{1}{n_e} H_b^{2/3} S^{1/2} \right) W_b H_b = \frac{1}{n_e} H_b^{5/3} S^{1/2} W_b \quad [7]$$

donde  $W_b$  y  $H_b$  corresponden al ancho de banca llena (numeral 4.3) y profundidad de banca llena, respectivamente, y  $n_e$  al coeficiente de Manning equivalente en el tramo que recoge los efectos de rugosidad del material del lecho, alineamiento del cauce, macro-rugosidades del fondo, efectos de contracción y expansión, y demás factores que generan disipación de energía en la escala de tramo. En CVS (2005) se encontró un  $n_e = 0.028$  luego de calibrar el modelo de tránsito de caudales MDLC (Camacho & Lees, 1999) en el tramo Montelíbano-Puerto Córdoba, valor que se adopta en este trabajo para la totalidad de tramos definidos en el numeral 4.4.1.

Por su parte, en UNALMED & UPME (2000), un análisis del multiescalamiento de caudales máximos se hizo para diferentes regiones del país, encontrando que para un período de retorno de 2.33 años (período de recurrencia asociado a las condiciones de banca llena) el caudal se puede relacionar con el área de la cuenca,  $A$  ( $\text{Km}^2$ ), de acuerdo con la ecuación [8]. Dicha ecuación corresponde a la región del Caribe colombiano, razón por la cual se empleó en este trabajo.

$$Q_{2.33} = 2.4184 A^{0.6633} \approx Q_b \quad [8]$$

Combinando las ecuaciones [7] y [8], se definió para cada tramo la geometría de banca llena, el caudal de banca llena y la velocidad media,  $V_b$ , correspondiente a dicha condición.

Una vez determinados los parámetros ya descritos, se estimó la producción de sedimentos por erosión de bancas con base en la potencia de la corriente  $Q_b S$ , que al igual que los esfuerzos cortantes, es una medida de la capacidad de transporte de una corriente por unidad de tiempo. La cantidad de sedimento producida en un tramo,  $B_{Tramo}$  (Ton/año), puede estimarse de acuerdo con la ecuación [9] -Wilkinson et al., 2009-.

$$B_{Tramo} = K Q_b S \bar{E} (L_{tramo} H_b \rho_s) \quad [9]$$

Donde  $\rho_w$  y  $\rho_s$  son la densidades del agua y suelo, respectivamente;  $\bar{E}$  es una medida de la erodabilidad que se toma igual a la unidad bajo el supuesto de que todo el material de bancas es fácilmente erodable,  $\rho_s$  se toma como 0.5 de acuerdo con observaciones realizadas en el trabajo de Wilkinson et al. (2009) y  $K$  es una constante de calibración que se ajusta para cada región en particular de tal forma que los valores de cargas de sedimento estimadas se ajusten a valores observados en la cuenca.

Agregación hacia aguas abajo

La cantidad de sedimentos producida en ladera por erosión laminar y la cantidad producida por erosión en bancas fue agregada en la dirección de flujo mediante los aplicativos desarrollados, a partir de los cuales se generó también un mapa de cargas de sedimento en suspensión,  $W$  [Ton/año]. Asimismo, la concentración de sólidos en suspensión,  $SST$  [mg/l], en la cuenca se estimó de acuerdo con la ecuación [10], donde  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] corresponde al mapa caudal medio estimado para la cuenca.

$$SST = 0.0317 \frac{W}{Q} \quad [10]$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados para cada uno de los factores empleados en la RUSLE se muestran en la Figura 8, así como los tipos de morfología de los canales que conforman la red de drenaje, de acuerdo con Flores et al. (2006).

La cantidad de sedimentos producida desde ladera por erosión laminar y la cantidad producida por erosión en bancas fue agregada en la dirección de flujo ajustando el parámetro  $K$  (se obtuvo un valor igual a 0.006) hasta igualar el valor medio multianual registrado en la estación Montelíbano, a la cual llegan un total de  $2.059 \times 10^6$  Ton/año. Una vez ajustado el modelo de cargas de sedimento, se estimó el mapa de concentraciones,  $SST$ , tal como se refirió en la ecuación [10], y se compararon los valores observados en las 6 estaciones de medición disponibles con las correspondientes estimaciones, tal como se muestra en la Figura 9. De forma alternativa, también se presentan los valores estimados mediante relaciones obtenidas para el territorio colombiano (ecuación [11]; Zuluaga y Poveda, no publicado) a través de la cual se sobreestiman las cargas de sedimento en la cuenca.

$$W_{UNAL} = 633.87 A^{1.1359} \quad [11]$$

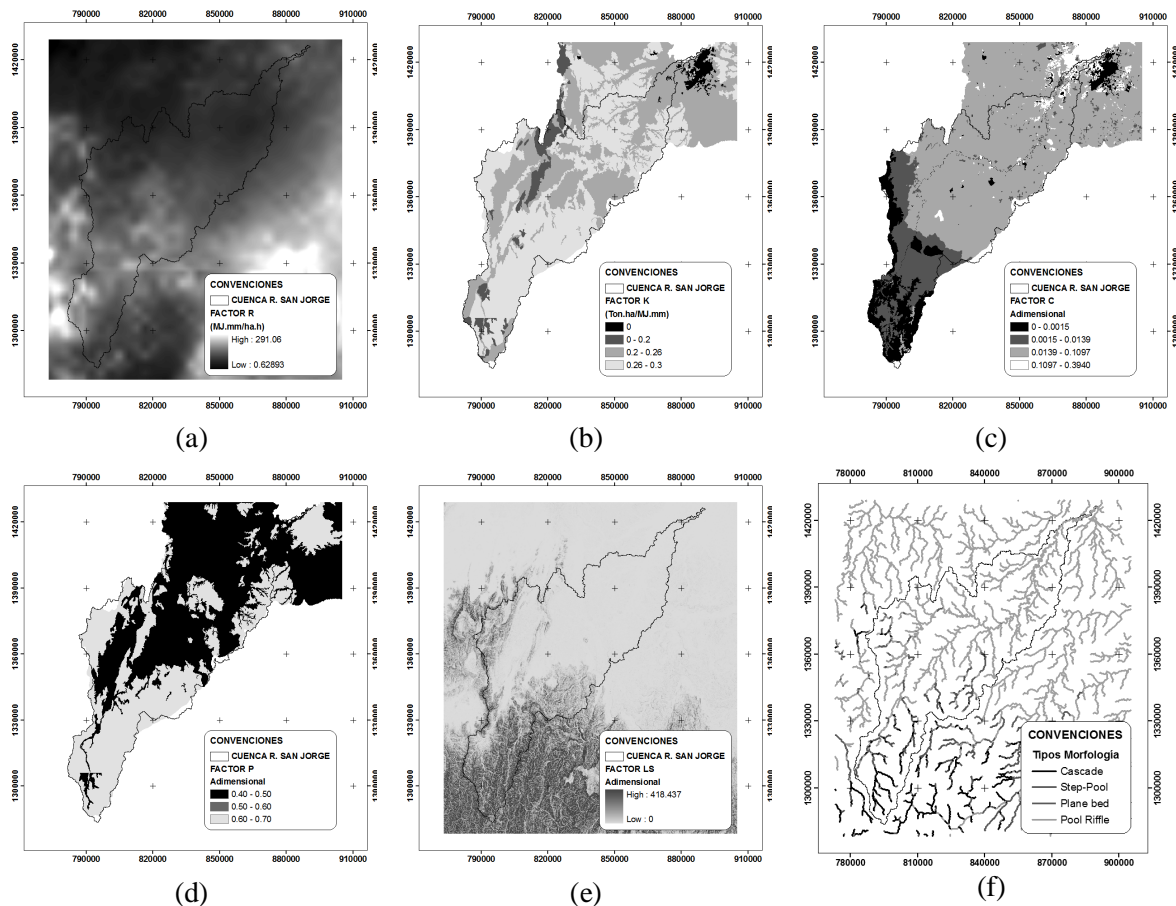


Figura 8.- Mapas de factores RUSLE (a-e); Tipos de morfología en la red de drenaje (f)

A excepción de la estación Quebrada Uré (Est\_02), en la que se obtuvo un error relativo del 55.6%, las estimaciones de SST muestran coherencia con los valores observados, de modo que desde el punto de vista predictivo los resultados son satisfactorios. Llama la atención, sin embargo, los altos porcentajes de la carga total estimada que fueron explicados por el proceso de erosión en banca (ver Tabla 4), especialmente en las estaciones de control localizadas sobre el río San Jorge, las cuales se encuentran muy distantes -hacia aguas abajo- de las zonas de piedemonte de la red de drenaje. No ocurre lo mismo en la estación Pica Pica, localizada en la zona de piedemonte de la cuenca del río San Pedro en la que los aportes por erosión laminar son comparables con los aportes por erosión en banca. Aunque la RUSLE es uno de los modelos de mayor utilización en el mundo, se han identificado limitaciones entre las que se encuentra la subestimación de cargas en condiciones de altas tasas de erosión, pero también la sobrestimación de éstas para bajas tasas (Yitayew et al., 2009; Kinnell, 2007). Asimismo, el método fue derivado en parcelas experimentales donde poco o nada se hizo en relación con coberturas boscosas (como las que caracterizan la parte alta de la cuenca del río San Jorge), para las cuales el factor de coberturas  $C$  es el más bajo, sin que se tenga en cuenta que la escorrentía directa que se genera en la superficie subyacente a los doseles puede generar procesos de erosión importantes que no sólo dependen de la intensidad de la lluvia, expresada en términos del factor de erosividad empleado en la RUSLE. En algunas variaciones del método se modifica el factor de erosividad,  $R$ , incluyendo una componente de escorrentía con miras a minimizar los efectos de sobrestimación/subestimación de la RUSLE (Kinnell, 2007).

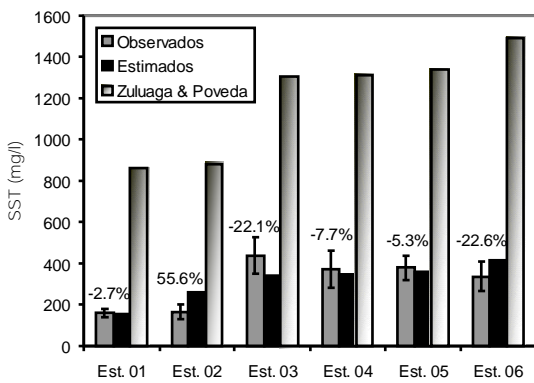


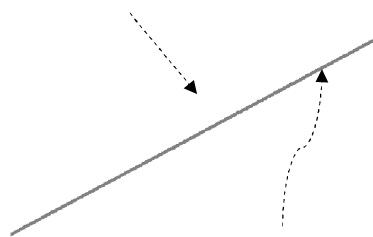
Figura 9.- Valores estimados vs. valores observados

Tabla 4.- Aporte porcentual de procesos de erosión

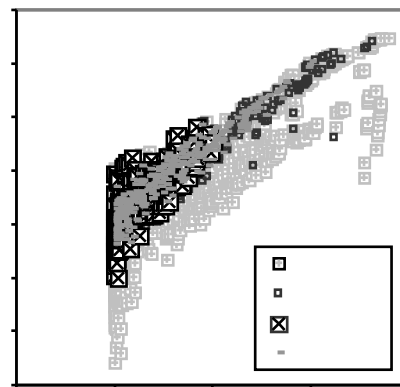
Estación	Carga Estimada [Ton/año]	Aporte laderas [%]	Aporte banca [%]
Pica Pica EST_01	156.550	59.4	40.6
Quebrada Uré EST_02	232.720	5.8	94.2
Bocatoma - EST_03	2'010.800	1.9	98.1
Pescadero EST_04	2'037.700	1.9	98.1
La Apartada EST_05	2'214.700	1.7	98.3
Nueva Esperanza EST_06	2'898.800	1.3	98.7

A diferencia del modelo de escalamiento simple representado por la ecuación [11], el diagrama  $W-A$  obtenido muestra que no todo el rango de escalas de la región puede representarse por una relación del mismo tipo (Figura 10a), aunque la tendencia general de la nube de puntos posee una pendiente cercana a la obtenida por (Zuluaga y Poveda, no publicado). Sin embargo, la variabilidad de las cargas de sedimento por fuera de la tendencia global de la nube de valores no puede interpretarse con certeza como un proceso de múltiples escalas, ya que los aportes por erosión en banca mostraron ser superiores en los distintos tipos de morfología y en distintas escalas. Como ejemplo más claro, en la Figura 10b se observa que la mayor dispersión en las escalas más bajas corresponde a la morfología Pool-Riffle, en las que el proceso dominante es la erosión en bancas dada la baja pendiente de las laderas adyacentes.

Dicha dispersión puede atribuirse a la incertidumbre en las cargas estimadas mediante la metodología RUSLE, a la definición de canales del tipo Pool-Riffle en las zonas de baja pendiente, teniendo en cuenta que no se tuvo en cuenta ninguna teoría de iniciación de canales y en vez de ellos se utilizó un umbral de área de  $10 \text{ Km}^2$ , y a la incertidumbre en la estimación de caudales de banca llena.



(a)



(b)

Figura 10.- Variación de la carga de sedimentos con la escala (a) y su variación de acuerdo con el tipo de morfología (b)

## CONCLUSIONES

La capacidad predictiva del modelo implementado fue satisfactoria, ya que empleando sólo una estación para fines de calibración, se obtuvieron desviaciones porcentuales aceptables entre los valores simulados y observados. No obstante, la mayor parte de las estaciones de medición se localizan lejos del piedemonte, y no se contó con información que permitiera evaluar la coherencia del método en la parte alta de la cuenca.

Mediante la implementación de modelos distribuidos para la estimación de cargas en suspensión, se pueden diferenciar los procesos geomórficos que tienen lugar en una cuenca de acuerdo con la escala. En este trabajo se consideraron como procesos de mayor relevancia, la erosión laminar y la erosión en bancas de cauce. Sin embargo, en la cuenca del río San Jorge no pudo diferenciarse la predominancia de un proceso sobre el otro en relación con la escala, y en vez de ello se encontró que el proceso de erosión en banca explicó los mayores porcentajes de erosión en toda la cuenca.

Lo anterior también señala, como en previos trabajos, que en la escala de cuenca la metodología RUSLE no es suficiente para cuantificar la totalidad de la carga de sedimentos. Mediante este se incurre en subestimación, mucho más en zonas con coberturas boscosas y en cuencas con grandes áreas de baja pendiente donde la escorrentía superficial es baja y emergen otros procesos de producción de sedimentos.

## AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Autónoma Regional de los valles del Sinú y San Jorge por su alianza con la Universidad Nacional de Colombia -sede Medellín- en pro de la gestión de los recursos naturales bajo su jurisdicción.

A COLCIENCIAS (Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación) por la financiación del proyecto de investigación “*Gestión de la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas*”, a través del cual reciben financiación tres (3) estudiantes de doctorado en Ingeniería – Recursos Hidráulicos en la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.

## REFERENCIAS

- Álvarez, O. (2007). “Cuantificación de la Incertidumbre en la Elaboración de Mapas de Variables Hidrológicas. Aplicación al Balance Hídrico a largo plazo”. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín.
- Corporación Autónoma Regional de los Valles de Sinú y San Jorge -CVS-. (2005) “Diagnóstico Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del río San Jorge”. Montería.
- Flores, A. N., B. P. Bledsoe, C. O. Cuhacyan, E. E. Wohl (2006). “Channel-reach morphology dependence on energy, scale, and hydroclimatic processes with implications for prediction using geospatial data”. *Water Resources Research*, No. 42, W06412, doi:10.1029/2005WR004226.
- Giles, P., Franklin, S. (1998). “An automated approach to the classification of the slope units using digital data”. *Geomorphology* 21 (1998) 251-264.
- Harman, C., Stewardson, M., DeRose R. (2008). “Variability and uncertainty in reach bankfull hydraulic geometry”. *Journal of Hydrology*, Volume 351, Issues 1-2, pp. 13-25.
- Kinnell PIA. (2007). “Runoff dependent erosivity and slope length factors suitable for modelling annual erosion using the Universal Soil Loss Equation”. *Hydrological Processes* 21, pp. 2681–2689. DOI:10.1002/hyp.6493.
- Merritt, W.S., Letcher, R.A., Jakeman, A.J. (2003). “A review of erosion and sediment transport Models”. *Environmental Modelling and Software* 18, pp. 761–99.
- Montgomery, D.R., Buffington, J.M. (1997). “Channel-reach morphology in mountain drainage basins”. *Geological Society of America Bulletin* 109, pp. 596–611.

- Montoya, L., Montoya, R., Anaya, J. (2006). "Estimación de la erosión en cuencas hidrográficas utilizando sistemas de información geográfica: caso de estudio río La Miel". *XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Guayana, Venezuela.
- Pérez, J. (2001). "Estimación del factor erosividad de la lluvia en Colombia". Tesis de pregrado. Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Stewardson, M. (2005). "Hydraulic geometry of stream reaches". *Journal of Hydrology*, Volume 306, Issues 1-4, pp. 97-111.
- Universidad Nacional de Colombia -UNALMED-, Unidad de Planeación Minero Energética -UPME-. (2000). "Balances Hidrológicos de Colombia". Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Medellín.
- Van Remortel, R., Hamilton, M., Hickey, R. (2001). "Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data". *Cartography*, Vol. 30, No. 1, pp. 27-35.
- Vogel, R.M., I. Wilson, C. Daly (1999). "Regional regression models of annual streamflow for the United States". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 3, pp. 148-157.
- Wilkinson, S.N., Prosser, I.P., Rustomji, P., Read, A.M. (2009). "Modelling and testing spatially distributed sediment budgets to relate erosion". *Environmental Modelling & Software*, Vol. 24, pp. 489-501.
- Wohl, E., Merritt, D.M. (2008). "Reach-scale channel geometry of mountain streams". *Geomorphology*, Volume 93, Issues 3-4, pp. 168-185 (January 2008).
- Yitayew, M., Pokrzywka, S.J., Renard, K.G. (1999). "Using GIS for facilitating erosion estimation". *Appl. Eng. Agric.* 15, 295-301.
- Zaragoz, B., Lorente, S., Moreno, M. "Tratamiento espacial de los desprendimientos de laderas en ambientes semiáridos mediante sistemas de información geográfica". Universidad de Alicante. España.
- Zuluaga, M., Poveda, G. (no publicado). "Relaciones de escala entre el transporte de sedimentos en suspensión y características morfoclimáticas de cuencas colombianas". Posgrado en Aprovechamiento de Recursos hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.