

# FUNDAMENTOS PARA LA FORMULACIÓN DE UNA METODOLOGÍA GENERAL PARA ESTIMAR LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN CUENCAS

Hector Daniel Farias , Luis Alejandro Olmos

Instituto de Recursos Hídricos (IRHi-FCEyT-UNSE)

Av. Belgrano (S) 1912, (G4200ABT) Santiago del Estero, Argentina. E-mail: H.D.Farias@members.asce.org

## Introducción

La estimación de la producción global de sedimentos en una cuenca es un tema que merece especial atención en la planificación de los recursos hídricos de una región. Aunque se han desarrollado modelos más o menos sofisticados a escala distribuida (de Vente *et al.*, 2005), su aplicación no es sencilla por el elevado número de parámetros y en ciertas instancias de planes de aprovechamiento hídrico (por ejemplo, estudios de factibilidad de sistemas de embalses) se requiere de una estimación expeditiva del aporte global potencial de sólidos al reservorio y no de una modelación detallada.

## Objetivos

El objetivo de este estudio es el de formular un criterio general para estimar la producción global de sedimentos (en forma de un modelo agregado) en cuencas, basado en los procesos físicos dominantes a escala de cuenca y analizar en este contexto algunos métodos disponibles, mediante la contrastación de sus predicciones con datos de campo colectados en geografías diversas.

## Producción de Sedimentos en Cuencas

En una revisión general de aspectos cuantitativos de geomorfología de cuencas, Strahler (1964) presentó un análisis de las variables fundamentales que gobiernan la dinámica y la evolución de cuencas hidrográficas. Ellas son: la densidad de drenaje  $D_d$  (que posee dimensiones  $L/L^2=L^{-1}$ ), la intensidad de escorrentía  $I_Q$  (representada por la tasa volumétrica de flujo por unidad de área de la superficie de la cuenca, con dimensiones  $L^3/T/L^2=L.T^{-1}$ ), el factor de proporcionalidad de erosión  $K_E$  (expresado como la tasa máscica de remoción de suelo por unidad de área, dividida por la fuerza por unidad de área. Es decir:  $[K_E]=(M.L^{-2}.T^{-1})/(M.L^{-1}.T^{-2}) = L^{-1}.T$ ), el relieve de la cuenca  $H_c$  (L), la aceleración de la gravedad  $g$  ( $L.T^{-2}$ ) y las propiedades del fluido: densidad  $\rho$  y viscosidad  $\mu$ . Considerando las variables anteriores, la dinámica de la cuenca estaría representada por una función de la forma:  $f(D_d, I_Q, K_E, H_c, \rho, \mu, g)=0$

Aplicando el Teorema "PI" de Vaschy-Buckingham se obtiene la siguiente función adimensional:

$$\Phi\left(H_c \cdot D_d, I_Q \cdot K_E, \frac{\rho \cdot I_Q \cdot H_c}{\mu}, \frac{I_Q^2}{g \cdot H_c}\right) = 0$$

O bien:  $\Phi(\Pi_H, \Pi_E, \Pi_R, \Pi_F) = 0$

donde  $\Pi_H=H_c D_d$  es el número de "escarpamiento" de la cuenca,  $\Pi_E=I_Q K_E$  es el número de Horton,  $\Pi_R=\rho I_Q H_c / \mu$  es una forma de número de Reynolds y  $\Pi_F=I_Q^2 / (g H_c)$  es una forma de número de Froude (elevado al cuadrado). El Número de Horton expresa la intensidad relativa de los procesos de erosión en la cuenca. Estos parámetros adimensionales definen los criterios de semejanza entre cuencas y por lo tanto deberían ser considerados en estudios de homogeneidad hidrológica para aplicar técnicas de transposición. Asimismo, se puede obtener una primera aproximación de las variables a considerar en un

modelo de erosión en cuenca, al expresar  $\Pi_E$  en función de las cantidades restantes, pero incluyendo aspectos relativos a los suelos y vegetación presentes en la cuenca.

## Metodología General de Cálculo

Una formulación generalizada debería tener la siguiente forma:  $\forall V_{Ps} = f_{Ps}(\Gamma_{CL}, \Gamma_{SU}, \Gamma_{TO}, \Gamma_{ES}, \Gamma_{VG}, \Gamma_{MA})$

donde  $V_{Ps}$  es el volumen anual de producción de sedimentos ( $L^3 T^{-1}$ ), que también se puede expresar en forma gravimétrica, es decir, en peso de material producido anualmente.

$\Gamma_{CL}$  es una variable (o conjunto de variables y parámetros) que tiene en cuenta los factores climáticos. Habitualmente se incluye algún indicador de la precipitación pluvial, en algunos casos la lluvia media anual, en otros la escorrentía superficial, y también se suelen introducir indicadores de la variabilidad durante el año de estas magnitudes (como por ejemplo, factores calculados en base a la razón entre la precipitación máxima y la media, etc.).

$\Gamma_{SU}$  es una variable que depende de las características de los suelos predominantes en la cuenca. Esta es una cantidad que intrínsecamente es distribuida arealmente en la cuenca y por lo tanto es una de las que más se presta para la implementación de modelos a escala distribuida. En ella se incluyen aspectos relacionados con la susceptibilidad de los suelos a ser erosionados y transportados por la escorrentía y generalmente sus valores cuantitativos se estiman a partir de clasificadores más o menos objetivos.

$\Gamma_{TO}$  es una variable (en la mayoría de los casos un conjunto de variables) relacionada con la topografía de la cuenca. Las cantidades que influyen en los procesos de erosión y transporte dependen de las características areales y de relieve, por lo que las magnitudes que habitualmente se consideran son el área de la cuenca, la pendiente media, la densidad de drenaje, indicadores de relieve, indicadores de forma, etc.

$\Gamma_{ES}$  es una variable indicativa de la eficiencia en los procesos de transporte de sedimentos en la cuenca. En la mayoría de las formulaciones esta cantidad queda implícitamente contenida en el factor de entrega de sedimentos (sediment delivery ratio,  $k_{SDR}$ ), pero es una cantidad que también se podría gestionar de una manera pseudo-distribuida en un modelo a escala de sub-cuencas.

$\Gamma_{VG}$  es una variable que depende del tipo y extensión de la cobertura vegetal de la cuenca o sub-cuencas. Esta cantidad, que a su vez se relaciona en cierto grado con  $\Gamma_{SU}$  puede estimarse a partir de recursos basados en tecnologías de percepción remota (e.g., imágenes satelitales, fotografías aéreas, etc.) y se distribuye superficialmente en toda la extensión de la cuenca, por lo que resulta apropiada para modelación distribuida.

$\Gamma_{MA}$  es una variable que depende del manejo ambiental en la cuenca o sub-cuencas, y debe interpretarse que la misma se refiere a los aspectos antrópicos fundamentalmente relacionados con las prácticas culturales de uso del suelo, laboreo agrícola, etc. También es una cantidad susceptible de ser gestionada en forma distribuida.

Teniendo en cuenta la formulación general, existen diversos modelos que pueden enmarcarse como casos particulares de la relación funcional generalizada. Por ejemplo, la denominada “ecuación universal de pérdida de suelo” (USLE) estima la erosión potencial  $E_s$  como el producto de seis factores, que más o menos tienen en cuenta los aspectos antes enunciados.

La producción de sedimentos global en un punto de la cuenca, que puede expresarse tanto en forma gravimétrica ( $G_{Ps}$ ) o volumétrica ( $V_{Ps}$ ), se relaciona con la tasa global de erosión potencial ( $E_s$ ) a través de:  $G_{Ps} = k_{SDR} \cdot E_s$ ,

donde  $k_{SDR}$  se denomina “factor de entrega” (o “sediment delivery ratio”), y depende fundamentalmente de la capacidad de la cuenca (a través de su red de cauces e interfluvios) de transportar el material generado por la erosión hacia aguas abajo. En una de las situaciones en que más interesa estimar la producción de sedimentos, como lo es el tema de la deposición de sólidos en un embalse, el valor de  $k_{SDR}$  se debe evaluar en el punto de localización del reservorio.

Teniendo en cuenta los procesos involucrados en la transferencia de las masas sólidas a través de la cuenca hidrográfica,  $k_{SDR}$  debería ser una función de las características fisiográficas, tales como el relieve (incluyendo la pendiente), la densidad de drenaje, la geometría hidráulica de los cauces y sus rugosidades, etc., además, obviamente del área de la cuenca. Es decir:

$$k_{SDR} = f_{k_{SDR}}(S_c, D_d, A_c)$$

Sin embargo, y como en muchos de los aspectos relacionados con este tema, generalmente se expresa al factor de entrega como una función exclusiva del área de la cuenca ( $A_c$ ). Es decir:  $k_{SDR} = f_{k_{SDR}}(A_c)$ . En esta investigación se analiza en detalle esta relación.

**Análisis de Formulaciones existentes**

En el marco del presente estudio se analizaron varias formulaciones existentes para predecir  $V_{Ps}$  o  $G_{Ps}$ , entre ellas USLE y modificaciones (van Rompaey et al., 2005), Gavrilovic (de Cesare et al, 1998) y Miraki (Chakraborti, 1991). Mediante un estudio comparativo de las fórmulas, que considera su fundamento físico y el resultado de las predicciones comparadas con datos de campo, se encontró que las relaciones basadas en los criterios de Gavrilovic y Miraki pueden expresarse en un formato tal que resulta adecuado para obtener una formulación sencilla en función de cantidades fácilmente disponibles en estudios regionales. Para la fórmula tipo Gavrilovic, se obtiene:

$$V_{Ps} = f_{Ps}(k_{\Xi}, k_{\Gamma}, k_{\Phi}, k_{\Theta}, L_X, \Sigma L_{N-1}, Z, L_{CP}, A_c, S_c, P_a)$$

en la que aparecen factores empíricos que dependen de los suelos presentes en la cuenca, su uso y su cubierta vegetal [ $k_{\Xi}$  es un factor de cobertura vegetal del suelo (variable entre 0.05 y 1.00),  $k_{\Gamma}$  es un factor de resistencia a la erosión del suelo (con valores de 0.2 a 2.0),  $k_{\Phi}$  es un factor de tipo y extensión de la erosión observada en la cuenca (varía entre 0.1 y 1.0) (todos estos factores se estiman a partir de tablas)], además de los parámetros morfométricos [ $L_X$  es el perímetro de la cuenca,  $L_{CP}$  la longitud del curso principal,  $\Sigma L_{N-1}$  la longitud de los cursos de menor orden,  $Z$  la altitud media y  $S_c$  es la pendiente media de la cuenca en %] y las variables hidrológico-climáticas (precipitación anual  $P_a$  y temperatura a través del factor  $k_{\Theta}$ ).

Para la fórmula tipo Miraki, se encuentra:

$$V_{Sa} = f_{Vs}(A_c, P_a, V_Q, S_c, D_d, F_c)$$
, que se puede expresar:

$V_{Sa} = c_0 A_c^{c_1} S_c^{c_2} D_d^{c_3} P_a^{c_4} V_Q^{c_5} F_c^{c_6}$ , donde se pueden aplicar cuatro formulaciones alternativas, según la tabla:

Ecuación	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$
1	1.182E-06	1.026	0.075	0.398	1.289	0.287	2.422
2	1.067E-06	1.292	0.129	0.397	1.384	0.000	2.510
3	2.410E-06	1.154	0.060	0.000	1.071	0.000	1.893
4	4.169E-05	0.841	0.000	0.000	0.139	0.312	0.000

de las que la Ec. 2 es la que tiene el mayor sustento físico y es analizada en detalle.  $F_c$  es el factor de uso del suelo y cubierta vegetal, que es el que más influye sobre  $V_{Ps}$ .

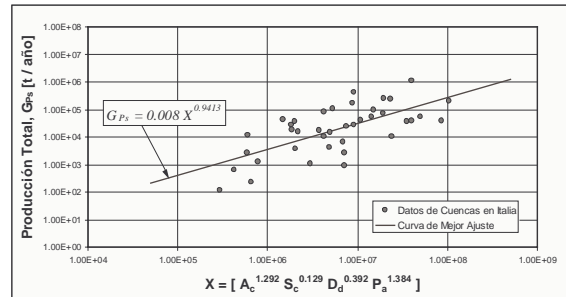


Fig. 1.- Relación entre la producción total y la variable X de la Ec. 2 de Miraki.

Entre las aplicaciones realizadas se llevó a cabo una validación independiente de la Ec. 2 usando datos de cuencas situadas en Europa y en Sudamérica, teniendo en cuenta que la fórmula fue calibrada inicialmente con datos de cuencas y embalses de la India. En la Fig. 1 se presenta uno de los resultados que indica que, no obstante la dispersión típica de estas verificaciones, la formulación predice de manera razonable el comportamiento de  $V_{Ps}$  en el caso de cuencas estudiadas en Italia.

**Conclusiones**

Se presentan los primeros resultados obtenidos en un estudio tendiente a establecer las relaciones fundamentales para la formulación de una metodología general para la predicción de la producción global de sedimentos en una cuenca, con vistas a aplicaciones en estudios de factibilidad y planificaciones regionales que incluyan sistemas de embalses para estimar su vida útil.

**Referencias Bibliográficas**

Chakraborti, A.K. (1991). “Sediment yield prediction & priorisation of watershed using Remote Sensing data”. *12th Asian Conference on Remote Sensing*, Singapore, Oct. 30–Nov. 5. [http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1991/psq/ps003pf.htm]

de Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G. (2005). “The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain”. *Journal of Hydrology*, Vol. 305, pp. 63–86.

Strahler, A.N. (1964). “Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks”. In: V.T. Chow (ed.) *Handbook of Applied Hydrology*, Section 4-II. McGraw-Hill, NY, USA.

van Rompaey, A., Bazzoffi, P., Jones, R.J.A., Montanarella, L. (2005). “Modeling sediment yields in Italian catchments”. *Geomorphology*, Vol. 65, pp. 157–169.

Verstraeten, G., Poesen, J., de Vente, J., Koninckx, X. (2003). “Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semi-quantitative analysis using reservoir sedimentation rates”. *Geomorphology*, Vol. 50, pp. 327–348.

De Cesare G., N. A. Beyer Portner, J.-L. Boillat and A. Schleiss (1998). “Modelling of Erosion and Sedimentation Based on Field Investigation in Alpine Reservoirs of Hydropower Schemes”. In: K. P. Holz, W. Bechteler, S. S. Y. Wang and M. Kawahara (eds.). *Advances in Hydro-Science and -Engineering*, Vol. III. Proceedings of ICHE '98, Cottbus/Berlin, Germany.