

# **ESTIMACIÓN DE LA TASA DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RÍO HORCONES (PROV. DE SALTA Y SANTIAGO DEL ESTERO)**

Luis A. Olmos, Marcelo J. Borsellino, Mónica M. Mattar, María T. Pilán, H. D. Farias

Instituto de Recursos Hídricos – Fac. de Ciencias Exactas y Tecnologías - Universidad Nac. de Sgo. del Estero

Av. Belgrano (S) 1912, (4200) - Santiago del Estero, Argentina

E-mail: lolmos@unse.edu.ar - mborse@unse.edu.ar - mmattar@unse.edu.ar – tpilan@unse.edu.ar – hdf@unse.edu.ar

Comisión Organizadora, Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos

Instituto Nacional del Agua (INA) & Instituto de Recursos Hídricos (IRHi-FCEyT-UNSE)

E-mail: rios2003@bigfoot.com - Web: <http://members.bigfoot.com/~rios2003/>

## **RESUMEN**

La erosión de cuencas de drenaje y la degradación es uno de los problemas medioambientales más complejos a nivel mundial. Es así, que ha sido el tema de investigación durante décadas en los países con los más variados climas. El problema se agrava debido a factores, como ser: amplio rango de temperatura, distribución irregular de las lluvias, degradación de la cobertura vegetal, entre otros.

Las metodologías desarrolladas (USLE, MUSLE, WEPP, etc.) y aplicadas principalmente en Estados Unidos y en Europa, tienen la limitación de ser aplicables en ciertas condiciones: cuenca de montaña, zonas agrícolas con los factores controlados, cuencas de superficies pequeñas (< a 500 km<sup>2</sup>), datos hidrológicos a nivel diario y en un período de tiempo considerable, entre las más importantes.

Dentro de este contexto los hidrólogos en Argentina normalmente aplican modelos estocásticos semidistribuidos como el Gavrilovich y/o agregados como Miraki a la hora de predecir o validar el fenómeno de estudio en algún sitio de interés o donde se emplazará o está emplazada una obra hidráulica.

En consecuencia, el presente trabajo tiene como objetivo el análisis del modelo agregado de Miraki y la posibilidad de su implementación a escala distribuida de sus diferentes expresiones empíricas aplicada a la cuenca del Río Horcones, que tiene una superficie de 3.463 Km<sup>2</sup>.

## **ABSTRACT**

The erosion of watersheds and this degradation are among the most complex environmental problems worldwide. It is so that it has been under research for decades in countries with very different climates. Factors such as a wide temperature range, irregular rainfall distribution and degradation of the plant cover, among others, make the problem change for the worse.

The methodologies developed (namely USLE, MUSLE, WEPP, etc.) and applied mainly in the USA and in Europe are applicable only under certain conditions: mountain basin, farming areas with the controlled factors, small basins (less than 500 sq. km), daily hydrological data covering an extended period can be counted among others.

Within this context the hydrologist in Argentina usually apply the semi spread stochastic models like the Gavrilovich Model and/or the aggregated like Miraki Model to predict or validate the study phenomenon in any location of interest or where an hydraulic work is or will be built.

Consequently, the paper is guided at analyzing the Miraki aggregated model and the likelihood of its implementation to distributed scale in all its various empirical expressions to the 3.463 sq. km of the Horcones River basin.

## **INTRODUCCIÓN**

La erosión de cuencas de drenaje y la degradación es uno de los problemas medioambientales más complejos a nivel mundial. Es así, que ha sido naturalmente el tema de investigación durante muchas décadas en los países que presentaban todos los tipos de clima en el planeta. El problema se agrava debido a diferentes factores, como ser: amplio rango de temperatura, distribución irregular de las lluvias, degradación de la cobertura vegetal, entre otros.

La región del NOA, lugar geográfico donde se enmarca la cuenca del Río Horcones, presenta un cuadro de severo deterioro ambiental, que adquiere una considerable gravedad en el caso de las cuencas hídricas. En particular, los procesos de erosión superficial y remoción de sedimentos en masa, que afectan a las cuencas de dicha región, agudizan el problema de las inundaciones, acentúan los fenómenos de colmatación de embalses, condicionan el regular funcionamiento de las obras de toma, influyen negativamente en la fauna acuática, promueven procesos de metamorfosis fluvial, es decir tienden a adquirir las dimensiones de un desastre real para las áreas montañosas como para las zonas pedemontanas y de llanura, debido a la degradación de la tierra que implica.

La valoración de degradación de la tierra debido a la acción erosiva de escurrimiento del agua de lluvia puede ser de dos tipos: Cualitativa o Cuantitativa. De hecho la valoración cuantitativa es más difícil que el cualitativo, desde que implica un intento por calcular las magnitudes y volúmenes de interés que son escasamente medidos en la práctica. En los últimos años se han desarrollado varios métodos para la valoración cuantitativa de la degradación entre los que se pueden citar: USLE, MUSLE, RUSLE, WEPP, AGNPS, CREAMS, ANSWERS. La mayoría de ellos se ha usado principalmente en Estados Unidos y en menor medida en Europa.

Estas metodologías tienen la limitación de ser aplicables bajo algunas de las siguientes condicionantes: cuenca de montaña, zonas agrícolas con todos los factores controlados, cuencas de superficies pequeñas ( $< 500 \text{ Km}^2$ ), necesidad de contar con medidas y datos hidrológicos de las cuencas a nivel diario para ser aplicados a lo largo de un período de tiempo considerable, lo que la mayoría de las veces es imposible debido a la escasez de información.

## **OBJETIVO**

Dentro de este contexto, los hidrólogos en Argentina normalmente aplican modelos estocásticos como el Gavrilovich y/o agregados como Miraki los cuales permiten salvar los condicionantes antes expuestos y arribar a una cuantificación razonablemente aceptable a la hora de predecir o validar el fenómeno de estudio en algún sitio de interés o donde se emplazará o está emplazada una obra hidráulica.

En consecuencia, el presente trabajo tiene como objetivo el análisis del modelo agregado de Miraki y la posibilidad de su implementación a escala distribuida de sus diferentes expresiones empíricas aplicada a la cuenca del Río Horcones, que es una cuenca de magnitud superficial media según la clasificación de Ponce.

## ASPECTOS CONCEPTUALES DE LAS FÓRMULAS DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

En general las ecuaciones para la estimación de la producción de sedimentos derivan o son semejantes a la más conocida y difundida de ellas, como lo es la denominada “Ecuación Universal de Pérdida de Suelo” ó USLE (por su denominación en inglés) la cual, como indica su nombre, es una formulación que sirve para obtener una cuantificación de la cantidad de suelo superficial que puede ser removido de la cuenca por acción combinada de precipitación y escorrentía. Esta relación ha sido muy difundida por parte del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (Julien, 1995) y, a pesar de su denominación de ‘universal’ la misma ha sido testada inicialmente para pequeñas cuencas agrícolas y como se dijo anteriormente su aplicación a cuencas naturales de escala importante induce cierto nivel de incertidumbre.

### Modelo USLE

Este modelo plantea el cálculo de una tasa de erosión potencial por unidad de superficie ( $E_s$ ) expresada como el producto de seis factores:

$$E_s = F_R \cdot F_K \cdot F_L \cdot F_S \cdot F_C \cdot F_P$$

Los factores son:

- $F_R$  : factor de precipitación pluvial.
- $F_K$  : factor de estabilidad o erodabilidad del suelo
- $F_L$  : factor de longitud del flujo superficial
- $F_S$  : factor de pendiente de la cuenca
- $F_C$  : factor de manejo de cultivos
- $F_P$  : factor de prácticas de conservación

### **Erosión Promedio Anual ( $E_s$ )**

Es el valor estimado de la erosión para un año promedio y está expresada en [tn/ha.año] en el sistema internacional.

### **Índice de Erosividad por Lluvia y Escorrentía ( $F_R$ )**

Es el número de unidades del índice de erosividad de la lluvia, más un factor de escorrentía por nieve o agua aplicada, cuando estas generan una escorrentía significativa. Es una medida de la fuerza erosiva e intensidad de la precipitación en un año normal, es por ello que el valor numérico usado para R, debe cuantificar el efecto del impacto de la gota de lluvia y también debe proveer una información relativa sobre la cantidad y proporción de escorrentía a ser asociada con la lluvia y sus dimensiones son  $[(10^7 \text{ J/ha}) \cdot (\text{mm/hr} \cdot \text{año})]$

Los datos de investigaciones muestran, que cuando los factores distintos de la lluvia se mantienen constantes, la pérdida de suelo desde un campo cultivado por lluvia es directamente proporcional al parámetro EI, que es producto de la energía por la intensidad de la lluvia. Esta relación es lineal y la suma de los valores de EI de las tormentas para un periodo dado, es un medida numérica del potencial erosivo de la lluvia dentro de ese período.

### **Factor de Erosionabilidad del Suelo ( $F_K$ )**

Es el valor de la pérdida de suelo por unidad de índice de erosividad, para un suelo específico, medida sobre una parcela patrón unitaria (72,6 pies de largo, con una pendiente uniforme del 9%, con surcos mantenidos limpios y labrados por más de dos años, en el sentido de la pendiente). Esto fue concebido de esta manera con el objetivo de mantener los valores de L, S, C y P iguales a 1.0, de manera de calcular  $K = E_s/EI$  y además, porque la mayoría de las mediciones en los EEUU, fueron hechas sobre parcelas de esas dimensiones.

Este parámetro es una propiedad característica del suelo, cuando los demás factores que intervienen en el fenómeno de erosión son iguales, ya que cuando estos no son constantes el comportamiento del suelo puede llevar a confusión. Es decir, suelos con bajo valor de K, pero con signos de erosión bastante considerable o suelos con alto valor de K y muy baja proporción de erosión. Es por ello que este factor debe ser evaluado de manera independiente de los efectos de los demás factores. Las unidades son [tn.ha.h/ha.MJ.mm]. Se pueden calcular valores precisos para una condición dada de suelo usando el nomograma de erosionabilidad del suelo de Wischmeier y Smith (1978).

### **Factor de Topografía ( $F_L, F_S$ )**

Por un lado S es la proporción de pérdida de suelo desde un campo con un gradiente de pendiente dado, referido a aquel con el 9% de pendiente, con las demás condiciones idénticas. Y por el otro, L es la proporción de pérdida de suelo desde un campo con una longitud de la pendiente del terreno dada con respecto a aquel de 72,6 pies de longitud, con las demás condiciones idénticas.

Ambos, la pendiente y la longitud de la pendiente del terreno afectan substancialmente la erosión laminar del suelo. Ambos efectos se puede evaluar separadamente, pero en las aplicaciones de campo, es más conveniente considerar a los dos juntos como un solo factor de topografía.

Por lo tanto, LS es el valor de la pérdida de suelo por unidad de área desde un campo con pendiente referido a uno de 72,6 de longitud de pendiente, con una inclinación uniforme del 9%, bajo las demás condiciones idénticas. Este factor puede ser obtenido de la aplicación de la siguiente ecuación :

$$LS = (\lambda / 72,6)^m \cdot (65,41 \cdot \text{sen}^2 \theta + 4,56 \text{ sen } \theta + 0,065) \quad (1)$$

$\lambda$ : longitud de la pendiente en pies.                       $\theta$ : ángulo de la pendiente

m : 0,5 si  $S < 5\%$  ; 0,4 si  $3,5 < S < 4,5$  ; 0,3 si  $1 < \%S < 3$  ; 0,2 si  $\%S < 1$

Esta ecuación fue derivada de datos obtenidos de cultivos bajo lluvia, sin riego, pendientes del 3 al 18% y longitudes de pendientes de 30 a 300 pies. Actualmente existen formulaciones más generales para el cálculo de este factor como la de Mc Cool et al (1993), en la cual no hay limitaciones para L y S.

$$LS = \left[ \frac{L}{22,13} \right]^{0,5} (10,8 \text{ sen } \theta + 0,03) \quad \text{para } \theta < 5,143^\circ \text{ o } 9\% \text{ de pendiente} \quad (2)$$

$$LS = \left[ \frac{L}{22,13} \right]^{0,5} (\text{sen } \theta / \text{sen } 5,143) \text{sen } 5,143 \quad \text{para } \theta \geq 5,143^\circ \quad (3)$$

### **Factor de Cobertura y Manejo ( $F_C$ )**

Es la proporción de pérdida de suelo desde un área con un manejo y cobertura específico con respecto a un área idéntica con surcos continuos limpios y labrados. Este factor mide el efecto combinado de todas las interrelaciones de las variables de cobertura y manejo.

Para obtener los valores apropiados de C para una localidad dada, se requiere de información sobre la probabilidad de ocurrencia de la lluvia erosiva, de manera de ser distribuida a través de los 12 meses del año y establecer cuanto controla la erosión, el crecimiento de la plantas, residuos de cultivos y prácticas de manejo de cultivo. Estos, a la vez, determinarán cuando las lluvias erosivas son más probable de ocurrir. Los valores de pérdida de suelo para los distintos estados del cultivo deben ser combinados en proporción a los porcentajes aplicables de EI para obtener el valor anual de C para un sistema de cultivo y manejo particular.

Por otra parte, valores de C que son adimensionales y varían entre 0 y 1, pueden ser obtenidos directamente de tablas al efecto para diferentes coberturas y uso de la tierra.

### **Factor de Práctica de Control(P)**

Es la proporción de pérdida de suelo para un área con una práctica de mantenimiento, como curvas de nivel, terrazas, fajas, con respecto a aquella con surcos rectos labrados con alta o baja pendiente.

En general, siempre que un suelo inclinado que está cultivado y expuesto a lluvias erosivas, la protección ofrecida por césped o cultivos de crecimiento cerrado necesita ser controlada por prácticas que reducirán la escorrentía y la cantidad de suelo acarreado. Las más importantes de estas prácticas de control son el labrado en curvas de nivel, cultivo superficial en fajas y las terrazas. Al igual que el factor C, los valores del factor  $F_P$  son adimensionales (0-1) y se obtienen de tablas para las diferentes tipo de prácticas de siembra.

### **Producción de Sedimentos Anual ( $P_s$ )**

Para obtener la producción de sedimentos se afecta al  $E_s$  de un factor de entrega  $F_E$  dando el resultado en Ton/ha.año. Este factor de entrega está calibrado en función del área de las zonas estudiadas lo que implica desde ya una condición importante en lo que a su extrapolación se refiere. (Smith et al.). Los valores de  $F_E$  se pueden obtener de la Figura 1.

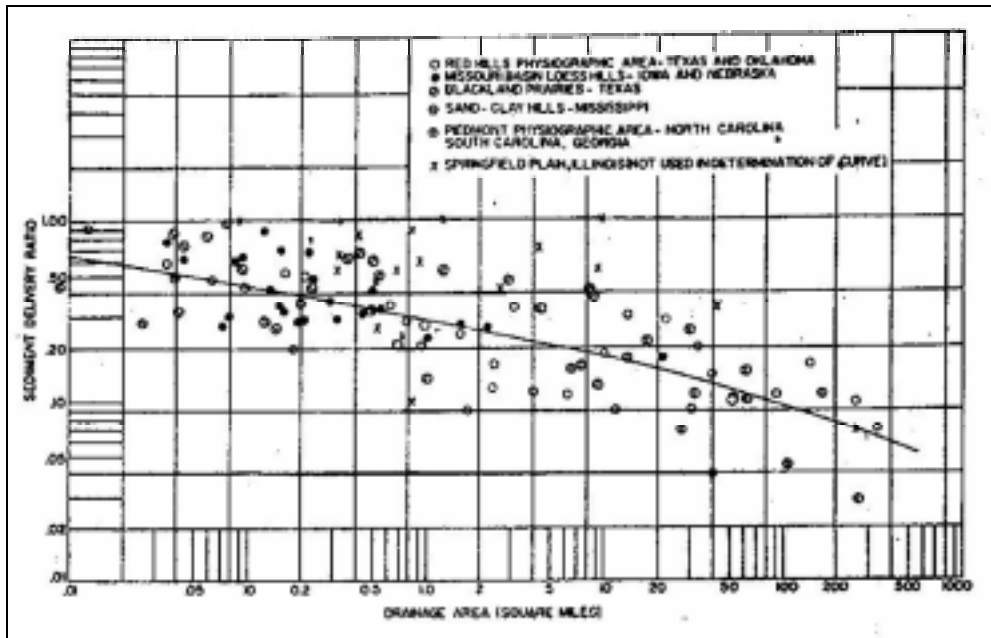


Figura 1 – Variación del Factor de Entrega en función del área de la cuenca

### Modelo de Gavrilovic

Otra formulación difundida, especialmente en Europa, fundamentalmente por su efectividad cuando se ha aplicado a ambientes de cuencas montañosas, es la de Gavrilovic. Esta metodología (Gavrilovic, S., 1959; Zemljic, M., 1971; Gavrilovic, Z., 1988) estima la cantidad de material producido por erosión superficial en una cuenca, y que es transportado a la sección del río que la define.

Es un método empírico que se compone de dos partes:

- El cálculo de la erosión media anual de sedimento por lluvia y escorrentía superficial (W).
- La determinación del coeficiente de redepositación o de retención de sedimentos (R).

De ambos se obtiene el volumen de sedimento producido por erosión y transportado a la sección final de la cuenca (G).

$$G = W \cdot R \quad [\text{m}^3/\text{año}] \quad (4)$$

En cuanto a la concepción del fenómeno de estudio por parte de ésta metodología son semejante a la USLE en un alto porcentaje, ya que tiene en cuenta la interacción de los siguientes factores: precipitación, clima, topografía, tipo de suelo, uso del suelo, vegetación, características geológicas, geomorfología. Por ello las formulaciones intentan incluir estas variables con un adecuado peso relativo.

La expresión para determinar el volumen promedio anual erosionado de sedimento es:

$$W = T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \cdot F \quad [\text{m}^3/\text{año}] \quad (5)$$

donde:

W = volumen promedio anual erosionado de sedimento (m<sup>3</sup>/año).  
 T = coeficiente de temperatura, que se obtiene de:

$$T = [ ( t / 10 ) + 0,1 ]^{1/2} \quad (6)$$

t = temperatura promedio anual.  
 h = precipitación media anual (mm/año).  
 F = superficie de la cuenca (km<sup>2</sup>).  
 Z = coeficiente de erosión, cuya expresión es:

$$Z = X \cdot Y \cdot (\varphi + I^{1/2}) \quad (7)$$

X = coeficiente de uso del suelo.  
 Y = coeficiente de resistencia del suelo a la erosión.  
 $\varphi$  = coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados.  
 I = gradiente de la pendiente superficial (en %).

Los valores de X, Y y  $\varphi$  son propuestos por los autores, como producto de más de 20 años de experiencia en el campo.

Estos coeficientes representan, respectivamente, el grado de protección del suelo dado por la vegetación y la intervención antrópica, el grado de erodabilidad del suelo, y el estado de inestabilidad de la cuenca. Los mismos se obtienen de tablas en función de las características de la cuenca y del clima.

### **Modelo MUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada)**

Esta ecuación fue presentada por Williams y Berndt en 1977, citado por Arnold et al (1990), como un modificación de la USLE. La misma radica en el reemplazo del factor de erosividad de la lluvia R por un factor de escorrentía, lo que permite estimar directamente la producción de sedimentos, eliminando la necesidad de usar un factor de entrega y teniendo la ventaja de poder ser aplicada a eventos de lluvia por separado.

La ecuación está dada por :

$$Y = 11,8 \cdot (V \cdot q_p)^{0,56} \cdot K \cdot C \cdot PE \cdot LS \quad (8)$$

donde

Y : producción de sedimentos desde la subcuenca en toneladas.

V : es el volumen de escorrentía superficial para la subcuenca en m<sup>3</sup>.

q<sub>p</sub> : es el caudal pico para la subcuenca en m<sup>3</sup>/s.

K, C, PE, LS, son los factores de la USLE, pero calculados como promedios ponderados para el área de la cuenca.

En cuanto a K,C,PE, la aplicación de un promedio ponderado por el área no requiere de una explicación. Por el lado del factor LS se aplica la expresión de la USLE con la diferencia que la longitud de la pendiente y el gradiente de la misma se determinan como sigue :

Longitud de la pendiente : se estima por el método de los puntos extremos de contorno.

$$\lambda = \frac{LC.LB}{2EP\sqrt{LC^2 - LB^2}} \quad (9)$$

donde

$\lambda$  : longitud de la pendiente promedio en m.

LC : longitud de la curva de nivel en m.

LB : longitud de la curva de nivel base en m.

EP : número de puntos extremos en la curva de nivel (aquellos donde un canal intercepta la curva de nivel).

Pendiente promedio : se estima por el método de la longitud de contornos.

$$p = \frac{0,25Z(LC_{25} + LC_{50} + LC_{75})}{A} \quad (10)$$

donde

Z : es el desnivel de la cuenca en m.

LC<sub>i</sub> : son las longitudes de las curvas de nivel para el 25, 50 y 75 % de Z en m.

A : área de la cuenca en m<sup>2</sup>.

### **Tránsito de sedimentos en cauce**

El modelo de tránsito de sedimentos, en el canal del cauce, consiste de dos componentes que operan simultáneamente: deposición y degradación. El primero basado en la velocidad de deposición de una partícula y el segundo en el concepto de la potencia de un cauce, Bagnold (1977), citado por Arnold et al (1990).

El modelo estima una distribución del tamaño de las partículas de sedimento, una vez desprendidas del suelo, a partir de valores típicos de las fracciones primarias de suelo. A través de una técnica de coeficiente de tránsito, se determina la distribución de partículas para el sedimento que sale de la subcuenca.

La deposición en el tramo del cauce, DEP, desde la salida de la subcuenca hasta la salida de la cuenca total, se calcula en base a la velocidad con que sedimenta cada partícula, según la Ley de Stoke, y el tiempo de viaje que debe recorrer el flujo.

$$V_f = 411d^2 \quad Y_f = V_f TT \quad (11)$$

donde

$V_f$  : velocidad de caída en m/h.

d : diámetro de la partícula en m.

$Y_f$  : profundidad de caída en m.

TT : tiempo de viaje.



Para el cálculo de DEP, usa otro parámetro basado en  $Y_f$  y en la profundidad del flujo  $d_q$  que es el factor de entrega DR :

$$DR = \frac{1-0,5Y_f}{d_q} \quad \text{si} \quad Y_f < d_q \quad (12)$$

$$DR = \frac{0,5d_q}{Y_f} \quad \text{si} \quad Y_f > d_q \quad (13)$$

$$DEP = SEDi(1 - DR) \quad (14)$$

SEDi : sedimento que ingresa al tramo

La potencia del cauce, según Bagnold (1977), citado por Arnold et al (1990), es el concepto usado para calcular el poder degradante del flujo,  $DEG_R$ .

$$DEG_R = \alpha_{SP} \cdot \gamma^{1,5} \cdot dur \cdot w \cdot (d_q S_w V_c)^{1,5} \quad (15)$$

donde

$\alpha_{SP}$ : parámetro de potencia máxima del cauce.

$\gamma$ : densidad del agua.

dur : duración del flujo degradante en horas.

w : ancho promedio del canal en m.

$S_w$  : pendiente de la superficie del agua.

$V_c$ : velocidad en el canal.

Todo el poder del cauce se usa para la recaptura de material depositado, hasta que todo se haya agotado. Cuando esto ocurre, comienza la degradación del material del lecho,  $DEG_B$ , que se calcula por la siguiente expresión:

$$DEG_B = K.C.DEG_R \quad (16)$$

K y C : son los factores de erosión de la MUSLE para el tramo del cauce.

$DEG_R$  : es el sedimento recapturado por el flujo, según el concepto de potencia del cauce.

La cantidad de sedimento que pasa por la salida de la cuenca total, SEDs, es:

$$SEDs = SEDi - DEP + ((DEG_R + DEG_B) \cdot (1-DR)) \quad (17)$$

En este modelo, Williams y Berndt (1977), propusieron estimar las predicciones del volumen diario de escorrentía V, mediante el modelo lluvia-escorrentía de Williams y Laseur (1976), (Barrios, 1995), que se basa en la técnica del “número de curvas” del SCS y en el procedimiento para cuantificar la humedad del suelo. El modelo debe ser calibrado en una cuenca con una estación, para determinar el coeficiente de agotamiento de la humedad del suelo.

En términos generales se puede usar cualquier modelo que permita simular la escorrentía

diaria o de un evento cualquiera, producido en la cuenca.

Para predecir el caudal pico de la esorrentía, los autores aplicaron el modelo de simulación HYMO, el cual determina el hidrograma de una crecida mediante una técnica de hidrograma unitario. Debido al tiempo que requiere el cómputo, lo aplicaron a tres hidrogramas de amplia variación en su volumen : 1,10 y 100 años de retorno, estableciendo una relación entre el caudal pico y su volumen por medio de :

$$q_p = b_1 V^{b_2} \quad (18)$$

$b_1$  y  $b_2$  son las constantes que se determinan al graficar en papel logarítmico los valores de caudal pico y volumen.

El modelo fue probado con datos de 26 cuencas de Texas (USA), cuyas superficies no superaban los 500 km<sup>2</sup>, factor LS menores a 2, factor K entre 0,25 y 0,35 y cobertura de cultivos entre 0 y 80% del área. Este modelo fue aplicado formando parte de un programa integral llamado SWRRBWQ ( Simulation of Water Resources in Rural Basins – Water Quality) desarrollado por Arnold y Williams (1994).

Esta metodología tiene la desventaja de requerir de mucha información básica, distribuida temporal y espacialmente, lo que la torna en la mayoría de los casos impracticables debido a la escasez de la misma.

### **Modelo de Miraki**

La metodología propuesta por Miraki (Garde & R. Raju, 1985; p. 263-264) se ha originado como una necesidad de estimar la producción de sedimentos en cuencas para evaluar la posible sedimentación en embalses. Las formulaciones han sido calibradas con datos observados en 32 embalses cuya colmatación progresiva fue monitoreada conjuntamente con las características físicas e hidrológicas de las cuencas que aportaban su esorrentía a los cuerpos de agua.

De manera semejante a los demás autores, Miraki presenta una relación funcional general para estimar el volumen total absoluto ( $V_{sa}$ ) en Hm<sup>3</sup> de sólidos producidos por una cuenca en un año de la siguiente manera:

$$V_{sa} = \Psi_{V_{sa}}(A_c, P_a, V_Q, S_c, D_d, F_c) \quad (19)$$

En ella:

$A_c$  : área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

$P_a$  : precipitación media anual. (cm)

$V_Q$  : derrame medio anual. (Hm<sup>3</sup>)

$S_c$  : pendiente media de la cuenca. (adimensional)

$D_d$  : densidad de drenaje de la cuenca. (Km<sup>-1</sup>)

$F_c$  : factor de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca. (adimensional)

De todos los factores el único cuyos valores están establecidos por el autor son los correspondientes al  $F_c$ , el resto son parámetros o variables de definición conocida.

Asimismo, aplicando un análisis de regresión múltiple, Miraki propone las siguientes ecuaciones para la relación funcional en función de los datos disponibles:

$$V_{Sa} = 1,182 * 10^{-6} .A_c^{1,026} .P_a^{1,289} .V_Q^{0,287} .S_c^{0,075} .D_d^{0,398} .F_c^{2,422} \quad (20)$$

$$V_{Sa} = 1,067 * 10^{-6} .A_c^{1,292} .P_a^{1,384} .S_c^{0,129} .D_d^{0,397} .F_c^{2,510} \quad (21)$$

$$V_{Sa} = 2,410 * 10^{-6} .A_c^{1,154} .P_a^{1,071} .S_c^{0,060} .F_c^{1,893} \quad (22)$$

$$V_{Sa} = 4,169 * 10^{-5} .A_c^{0,841} .P_a^{0,139} .V_Q^{0,312} \quad (23)$$

En cuando al comportamiento predictivo de la ecuación anterior, se ha reportado que en más del 85% de los casos contrastados, las predicciones estuvieron dentro del rango del +-30% de los valores observados, por lo que se estima que su aplicación resulta razonablemente confiable cuando se puede disponer de todos los datos básicos para su aplicación.

En virtud de la revisión realizada anteriormente, de que se trata de una cuenca mediana a grande, de que se disponen de datos escasos, de que se trata de cuenca que contempla el ambiente de montaña más el de llanura, de que se busca obtener una metodología expeditiva y criteriosa a la hora de evaluar la producción de sedimentos en una cuenca, es que se selecciona para su evaluación el método de Miraki.

## AREA DE ESTUDIO

La Cuenca del Río Rosario u Horcones, tiene su cabecera en las Sierras de Carahuasi en el Departamento Guachipas, Provincia de Salta, y en su tramo superior escurre con dirección Oeste-Este, hasta cercanías de la Localidad de Rosario de la Frontera. A partir de este punto cambia su denominación por Río Horcones, siendo su dirección dominante NO-SE y se introduce de esta manera en las llanuras deprimidas de la Provincia de Santiago del Estero (bañados del Horcones) para drenar finalmente sus aguas hasta el Río Salado. En este caso particular, la superficie de la cuenca de interés es hasta el sitio denominado La Fragua, lugar seleccionado para el emplazamiento de la presa, es de aproximadamente  $3.464 \text{ Km}^2$ . El área en cuestión está prácticamente en su totalidad en la provincia de Salta, con una pequeña superficie en la Provincia de Santiago del Estero.

En cuanto a su morfología se puede indicar que esta posee una forma alargada, con su lado mayor en dirección Noroeste-Sudeste. Por su parte y como consecuencia de la forma de la cuenca, el curso del Río Rosario u Horcones atraviesa la misma casi por el centro, dividiéndola en dos segmentos estrechos y largos. Por su parte, salvo los tributarios que dan origen al Río Rosario, las demás presentan un corto desarrollo, con un ángulo de confluencia del orden treinta grados ( $30^\circ$ ). Desde el punto de vista geomorfológico se ubica en la formación conocida como Chaco-Pampeana y debido a la proximidad existente entre los picos

de las sierras de Carahuasi y la descarga de los tributarios, se observan importantes pendientes medias, del orden del 4% al 10 %, especialmente en las fracciones altas de las cuencas mayores y un poco más suaves en las más pequeñas situadas en la región pedemontana, las cuales en realidad pueden ser consideradas como sub-sistemas de las mayores. En efecto, esta situación se presenta debido a que en la zona de transición entre la cuenca superior y media se generan pequeños sistemas intermontanos que confluyen con los sistemas mayores.

En general los flujos son concentrados en la cuenca alta y media, con patrones de flujo claramente dendríticos y apreciables valores de la densidad de drenaje, mientras que sobre la zona inferior los patrones de alineamiento de los cursos son cuasi-paralelos, hasta su descarga sobre el cauce principal. Estas características y su ubicación geográfica se muestran en la Figura 2.

Con respecto a las características altimétricas, se ha observado que los perfiles longitudinales de los cauces exhiben en general una forma cóncava, aproximándose a una relación entre cota y longitud del tipo exponencial decreciente, lo que evidencia un comportamiento torrencial en la cuenca alta y flujos más lentos y distribuidos en la porción inferior del curso fluvial. En general, los cursos son de régimen hidrológico permanente, a excepción de algunos arroyos de menor orden que pueden considerarse efímeros, es decir que conducen caudales líquidos resultantes de escorrentía superficial únicamente en períodos de tiempo breves inmediatamente posteriores a eventos importantes de precipitación pluvial.

Finalmente, ya en las proximidades de las posibles zonas de emplazamiento de la presa de embalse, el cauce muestra una morfología mas asociada a un curso de llanura, esto es mas ancho, meandriforme con un amplio valle de inundación y donde se observan importantes procesos de deposición de los materiales sólidos transportados por la corriente desde aguas arriba.

En cuanto al régimen de precipitaciones, la cuenca alta del río Rosario u Horcones está alimentado por una serie de sub-cuencas que cubren un área de importantes precipitaciones pluviales, las que se concentran fundamentalmente en los meses de verano. El gradiente pluviométrico es positivo, de Este a Oeste, hasta una altitud de entre los 800 y 1000 m.s.n.m.. Allí se produce la máxima pluviosidad anual, la cual desciende hasta las cumbres (gradiente negativo), donde se dan valores de totales anuales de menor magnitud. En efecto, del análisis de los datos proveniente de las estaciones relevadas, como así también de las curvas isohietas presentadas en la publicación del “*Atlas Climático del NOA*” , se puede observar que los mayores valores pluviométricos ocurren en las proximidades de las localidades de Yatasto, Horcones y Metán, las cuales se localizan en el pie de monte de las Sierras Sub Andinas, mas específicamente del sistema de las Sierras de Carahuasi, donde se registran valores anuales cercanos a los 1.000 milímetros.

Sin embargo cabe destacar que estos registros se concentran en pequeños sectores, con una influencia regional acentuada, pero que no puede ser tomada como un dato general de la cuenca. Como ya se indico, a partir de este punto se observa un gradiente negativo, tanto hacia la cabecera de la cuenca, observándose un registro anual del orden de los 800 milímetros en Pampa Grande , con variaciones intermedias como la que se registra en Arenales, con promedios anuales del orden de los 600 mm. Una situación semejante se presenta hacia el Oeste, donde se tiene una sensible disminución en los registros de la lluvia caída, ya sobre la Llanura Chaco Pampeana, más puntualmente en la localidad de Nueva

Esperanza, Departamento Pellegrini en la Provincia de Santiago del Estero, en cuya estación se cuenta con valores de menor cuantía. En consecuencia se puede decir que el régimen de precipitaciones es monzónico con una alta concentración de lluvias en el periodo estival, donde se produce el 80 % de la precipitación. Estas varían entre los 300 y 1.000 milímetros con valores medios anuales del orden de los 600 mm.

En cuanto a la vegetación y uso del suelo cuenta con un sistema silvo-pastoril, constituido fundamentalmente por bosques nativos e implantados que cubren buena parte de las cuencas, especialmente las laderas orientales del pie de monte. En la medida que se avanza hacia el sudeste, la vegetación nativa se alterna con áreas de cultivos y en algunos pocos casos algunos bosques implantados de especies leñosas de crecimiento rápido. Solo en las proximidades del límite interprovincial entre Santiago del Estero y Salta, vuelve a predominar bosques nativos con árboles de especies de gran porte como el Quebracho Colorado, Blanco, Algarrobo y Guayacán.

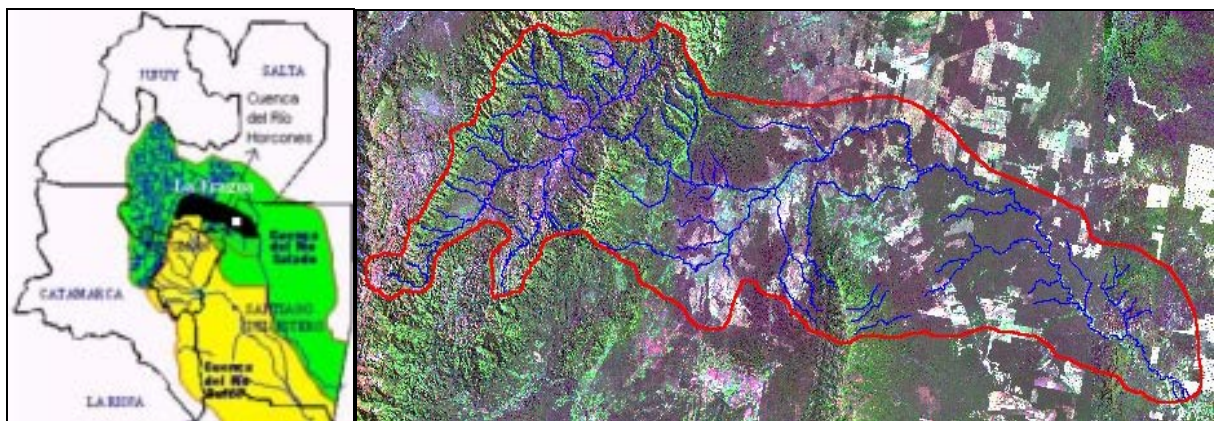


Figura 2 – Ubicación geográfica y Geomorfología de la cuenca de estudio.

## APLICACIÓN DEL MODELO Y RESULTADOS

Para la aplicación de modelo se procedió a la generación de la variables que por sus características pueden estar distribuidas espacialmente. Para ello se trabajo de manera alternada con los programas AUTOCAD, ARC VIEW e IDRISI para la generación de las siguientes imágenes raster:

- Precipitación media anual: se obtiene a partir del mapa de isoyetas del Atlas Climático del NOA, el cual se digitaliza, se rasteriza y luego se genera el modelo digital de elevación de la variable.
- Pendiente: de manera semejante al caso anterior se digitalizan las curvas de nivel que en este caso eran cada 100 metros y trabaja con herramientas GIS a fin de obtener el modelo de elevación del terreno. A partir de esta imagen se aplica un módulo específico del IDRISI, para obtener la distribución espacial de la pendiente en la cuenca.
- Factor de cobertura y uso de suelo: el proceso consiste en una clasificación supervisada de la zona de estudio a partir de una imagen satelital Land Sat TM con una combinación de las bandas 3,4 y 5, teniendo en cuenta la clasificación realizada por Miraki para este parámetro, lo que se muestra en Tabla 1.

Tabla 1 – Factor de Cobertura y Uso del Suelo

Tipo de Vegetación	Factor de erodabilidad
Bosques protegidos y reservas	0.20
Bosques nativos	0.40
Areas agricolas	0.60
Pastizales	0.80
Suelos denudados	1.00

- Área y densidad de drenaje: en este punto el área se determina directamente de la imagen de la cuenca y luego la red de drenaje se convierte a formato raster de manera de calcular mediante el calculador algebraico de imágenes el parámetro de la densidad de drenaje.

El único parámetro que no puede calcularse usando técnicas GIS es el del derrame o volumen de escorrentía anual. Es parámetro conceptualmente es agregado al igual que la densidad de drenaje, con la diferencia que éste último si puede calcularse con asistencia de programas que disponen de análisis espacial.

A manera de ejemplo se muestran las imágenes de la pendiente y de la cobertura y uso del suelo en la Figura 3 y 4 respectivamente.

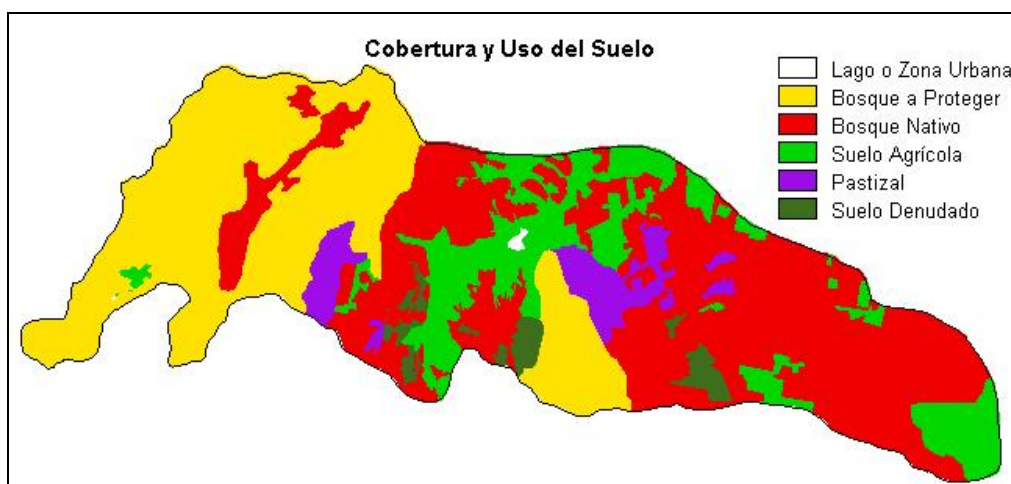


Figura 3 – Cobertura y uso del suelo de la cuenca de estudio.

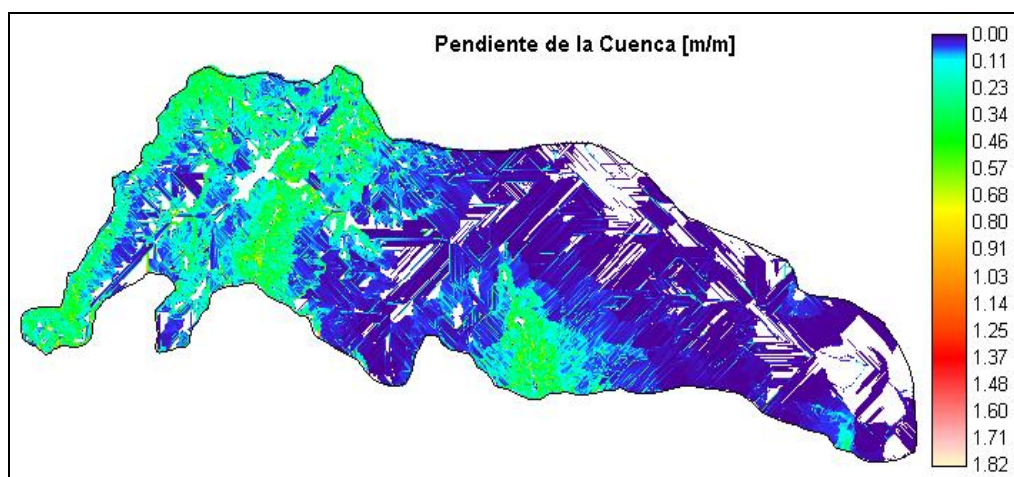


Figura 4 – Distribución de la pendiente.

Una vez obtenidas las imágenes de entrada del modelo, las formulaciones se aplican en forma distribuidas con las acotaciones siguientes:

- Para llevar a cabo el análisis en función del objetivo previsto, se aplica las diferentes formulaciones de manera agregada y se promedia los resultados para utilizar este valor como el de comparación y calibración de la aplicación de las formulas en formato distribuido. El valor de la producción de sedimentos promedio anual es de : 0,489 Hm<sup>3</sup>/año.
- Se adopta el criterio anterior a raíz de que no se dispone de la bibliografía consultada los valores de los coeficientes de correlación para las diferentes expresiones empíricas obtenidas. Sin embargo a fin de evaluar las diferentes formulaciones se presentan sus resultados en la Tabla 2.

Tabla 2 – Resultado de la Aplicación de las Formulaciones

<b>Formulación</b>	<b>Producción de Sedimentos</b>
Ecuación 20	0,380 Hm <sup>3</sup> /año
Ecuación 21	0,840 Hm <sup>3</sup> /año
Ecuación 22	0,398 Hm <sup>3</sup> /año
Ecuación 23	0,338 Hm <sup>3</sup> /año

- La aplicación de las fórmulas (20), (21) y (23) sólo pueden distribuirse parcialmente obteniéndose mapas relacionados a esa distribución parcial, ya que la distribución espacial del derrame o escorrentía anual y la densidad de drenaje como variables independientes de la producción de sedimentos no es factible de llevarse a cabo.
- Debido a que los valores obtenidos son bajos y el calculador de imágenes trabaja con simple precisión se obtuvieron mapas referentes a la combinación de las variables de mayor magnitud numérica o afectados de factores de conversión. En el caso de las fórmulas 20, 21 y 23 se aplica de manera agregada el factor resultante de la multiplicación de la constante, la densidad de drenaje y el volumen de escorrentía según corresponda. El caso de la fórmula 22 se aplica la fórmula completa afectada de un factor de  $1 \times 10^{10}$ , de manera de obtener valores representables por píxel.

La aplicación de la diferentes metodologías dio como resultado los valores obtenidos en la Tabla 3. De esta se puede inferir que la expresión matemática que mejor se ajusta al valor de calibración es la de la ecuación (22) dando una tasa promedio de producción de sedimentos de 0,406 Hm<sup>3</sup>/año, lo que representa una subestimación del 17% con respecto al valor promedio de referencia y una sobrestimación del 2% con respecto a la misma fórmula aplicada de manera agregada. Por otro lado esta formulación que se puede aplicar totalmente distribuida por las variables que componen su expresión, lo que le confiere una mayor capacidad de aplicación a la misma.

Tabla 3 –Producción de Sedimentos para las Formulaciones Distribuidas

<b>Formulación</b>	<b>Producción de Sedimentos</b>
Ecuación 20	0,334 Hm <sup>3</sup> /año
Ecuación 21	0,011 Hm <sup>3</sup> /año
Ecuación 22	0,406 Hm <sup>3</sup> /año
Ecuación 23	0,394 Hm <sup>3</sup> /año

Con respecto a las demás se descarta la aplicación de la formulación 21 y en cuanto las formulaciones 20 y 23 se puede decir que la primera es un tanto bajo su valor con respecto al de referencia, pero tiene la ventaja de ser la formulación más completa. Por último la ecuación (23) es la más simple pero la estimación es bastante aceptable con un error por defecto del 20,5%. Ambas formulaciones se comportan de manera disímiles a su aplicación de manera agregada, lo que limita su aplicación.

En la Figura 5 se presenta el mapa de producción de sedimentos resultante de la aplicación de la formulación (22).

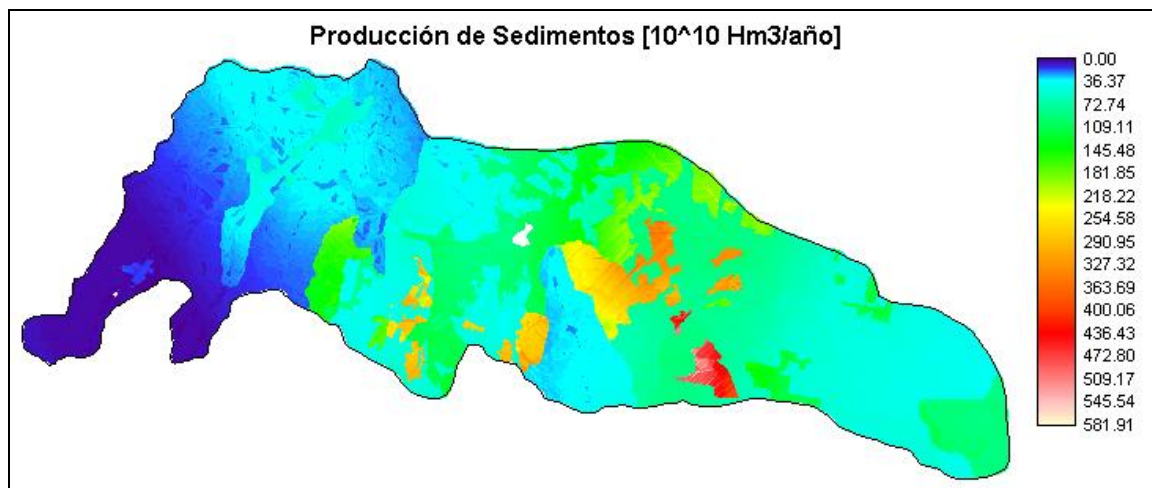


Figura 5 – Distribución espacial de la producción de sedimentos.

## CONCLUSIONES

La revisión conceptual llevada a cabo, sumada a los objetivos previstos y los resultados obtenidos permiten establecer las siguientes conclusiones:

- ❖ El modelo de Miraki es una metodología empírica conceptualmente semejante a las metodologías tradicionales, pero tiene la ventaja de ser apta a la hora de abordar el estudio de colmatación de embalses o producción de sedimentos en cuencas medianas o grandes y donde los datos disponibles son escasos.
- ❖ Las formulaciones de Miraki son factibles de ser aplicadas de manera distribuida parcial o totalmente según de que expresión se trate.
- ❖ La expresión que mejor se adapta para la aplicación en un formato distribuido es la referida en la ecuación (22).
- ❖ La posibilidad de implementación del modelo en forma distribuida mediante técnicas GIS permite visualizar mejor el fenómeno en estudio, plantear diferentes escenarios virtuales y adoptar medidas preventivas y/o correctivas eficientes.
- ❖ La tasa de producción de sedimentos para la cuenca del Río Horcones es baja, lo que significa que la misma presenta poco grado de intervención y la ecuación que estima con mayor precisión es la (22).



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Barrios, A.** – (1995) - “ *Erosión y Producción de Sedimentos en Cuencas Hidrográfica*” - Fac. De Ciencias Forestales - Universidad de los Andes - Mérida, Venezuela.

**Clarke, C. & Waldo, P.** – (1986) – “ *Sediment Yield from Small and Medium Watersheds*” Proceedings of the Fourth Federal Interagency Sedimentation Conference – Volumen I – USA.

**Emmanouloudis, D., and Filippidis, E.** - (2000). “*A quantitative estimation model of mountainous watersheds degradation*” - Technological University of Kavala, special edition, Greece.

**Garde, R. J. & Ranga-Raju, K.** (1985). *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*. Halsted Press, J. Wiley & Sons, NY, USA.

**Olmos, L. A.-** (1996) - “*Implementación de un Sistema de Información Geográfica para el Manejo de los Recursos Hídricos*” CICyT-UNSE - Santiago del Estero, Argentina.

**Olmos, L; Borsellino M. y Paz M.** (2.000) - “*Sistemas de Información Geográfica: Una herramienta para planificar y evaluar los recursos hídricos*” XVIII C.N.A. Sgo. del Estero

**Olmos, Luis; Jegat Herve** (2.001) “*Análisis de la erosión hídrica mediante un modelo distribuido (CALSITE) y un modelo agregado (SWRRB). Aplicación a la cuenca del río Grande ( Venezuela).* — Revista Ingeniería del Agua, Vol. 8 N° 1. Barcelona, España.

**Spalletti P.D. y Brea J.D.** (2000). “*Validación de una metodología para estimación de producción de sedimentos*”. XVIII Congreso Nacional del Agua. Santiago del Estero.

**Wischmeier, W. y Smith, D.** - (1978) - “*Predicting Rainfall Erosion Losses*” - USDA & Agricultural Research Service - Agriculture Handbook N° 282 - USA.