



## **REDEFINICIÓN DE UN MODELO AGREGADO DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS. APLICACIÓN A CUENCAS EN EL NOA.**

Luis Alejandro Olmos, María Teresita Pilan, Marcelo Miranda, Carolina Acosta

Instituto de Recursos Hídricos - Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías - Universidad Nacional de Santiago del Estero.  
lolmos@unse.edu.ar, tpilan@unse.edu.ar, marcelomiranda88@gmail.com, caroacosta@live.com.ar

### **RESUMEN**

La erosión en cuencas es uno de los problemas ambientales más complejos a nivel mundial. La gran diversidad de factores que influyen en la erosión, tales como el amplio rango de temperatura, la distribución irregular de las lluvias, la degradación de la cobertura vegetal, hacen que la erosión en cuencas sea objeto de investigación.

Las metodologías desarrolladas (USLE, MUSLE, WEPP, etc.) y aplicadas principalmente en Estados Unidos y en Europa, tienen la limitación de ser aplicables bajo ciertas condiciones, por ejemplo: zonas agrícolas con los factores controlados, cuencas de superficies pequeñas (menores 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, con este trabajo se pretende formular un criterio general para estimar la producción global de sedimentos en cuencas en formato agregado para la región NOA de la República Argentina. Para ello se procede a una validación y ajuste de los parámetros de un modelo agregado con datos batimétricos de una serie de embalses de la región de estudio. En particular se selecciona un modelo empírico con ecuaciones sencillas y requerimiento de pocos parámetros y de disponibilidad factible.

### **ABSTRACT**

Watersheds erosion is one of the most complex environmental problems on a worldwide. The great diversity of factors that influence in the erosion, such as the extensive temperature rank, the irregular distribution of the rains, the degradation of the vegetable cover, cause erosion in watersheds investigation.

The available methods (e.g., USLE, MUSLE, WEPP, etc.), which are mainly used in USA and Europe, show many limitations, and they are applied under certain conditions, such as agricultural areas with controlled factors, small watersheds (under 500 km<sup>2</sup>), daily hydrologic data and long time steps, among the most important.

Inside this context, with this work one tries to formulate a general criterion to estimate the global production of sediments in basins in format added for the region NOA of the Republic Argentina. For it one proceeds to a validation and adjustment of the parameters of a model added with bathymetric information of a series of reservoirs of the region of study. Especially an empirical model is selected by simple equations and requirement of few parameters and feasible availability.

## **INTRODUCCIÓN**

Cuando se va a abordar un proyecto hidráulico que involucre la toma de decisiones en la planificación del aprovechamiento, gestión y control de los recursos hídricos de una región, en algunos casos se requiere de la estimación de la producción global de sedimentos en una cuenca. A partir de la aparición de los sistemas de información geográfica y de las herramientas de análisis espacial, se han propuesto en los últimos años modelos más o menos complejos a escala distribuida, pero su aplicación práctica no resulta sencilla, ya que se requiere de un elevado número de parámetros que en la mayor parte de los casos no se dispone y por otro lado plantear la distribución espacial del fenómeno no siempre es factible. En la etapa de anteproyecto de obras de aprovechamiento hídrico, como ser presas de embalses o de derivación, es necesaria una estimación expeditiva de la producción de sedimentos o el aporte global potencial de sólidos en el punto de cierre y no de una modelación detallada de los procesos de erosión, transporte y deposición en la cuenca.

Dentro de este contexto, con este trabajo se pretende formular un criterio general para estimar la producción global de sedimentos en cuencas en formato agregado para la región NOA de la República Argentina. Para ello se procede a una validación y ajuste de los parámetros de un modelo agregado con datos batimétricos de una serie de embalses de la región de estudio. En particular se selecciona un modelo empírico con ecuaciones sencillas y requerimiento de pocos parámetros y de disponibilidad factible. Figura 1.

## **PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN CUENCAS**

A la fecha se han desarrollado diferentes metodologías para abordar procesos de erosión superficial, que afectan a las cuencas a nivel mundial, los que pueden ser clasificados en dos grandes grupos: cualitativos o cuantitativos. De hecho, la valoración cuantitativa es más difícil que la cualitativa, puesto que implica un intento por calcular las magnitudes y volúmenes de interés que son escasamente medidos en la práctica.

En este sentido se han desarrollado varios métodos para la valoración cuantitativa de la erosión hídrica y su consecuente producción de sedimentos, entre los que se pueden citar: USLE, MUSLE, RUSLE, WEPP, AGNPS, CREAMS, ANSWERS, GAVRILOVIC, MIRAKI. La mayoría de ellos se han generado y usado principalmente en Estados Unidos, a excepción de los dos últimos que han sido desarrollados en Europa y la India respectivamente, y aplicados en la República Argentina. (Olmos & Jegat, 2001).

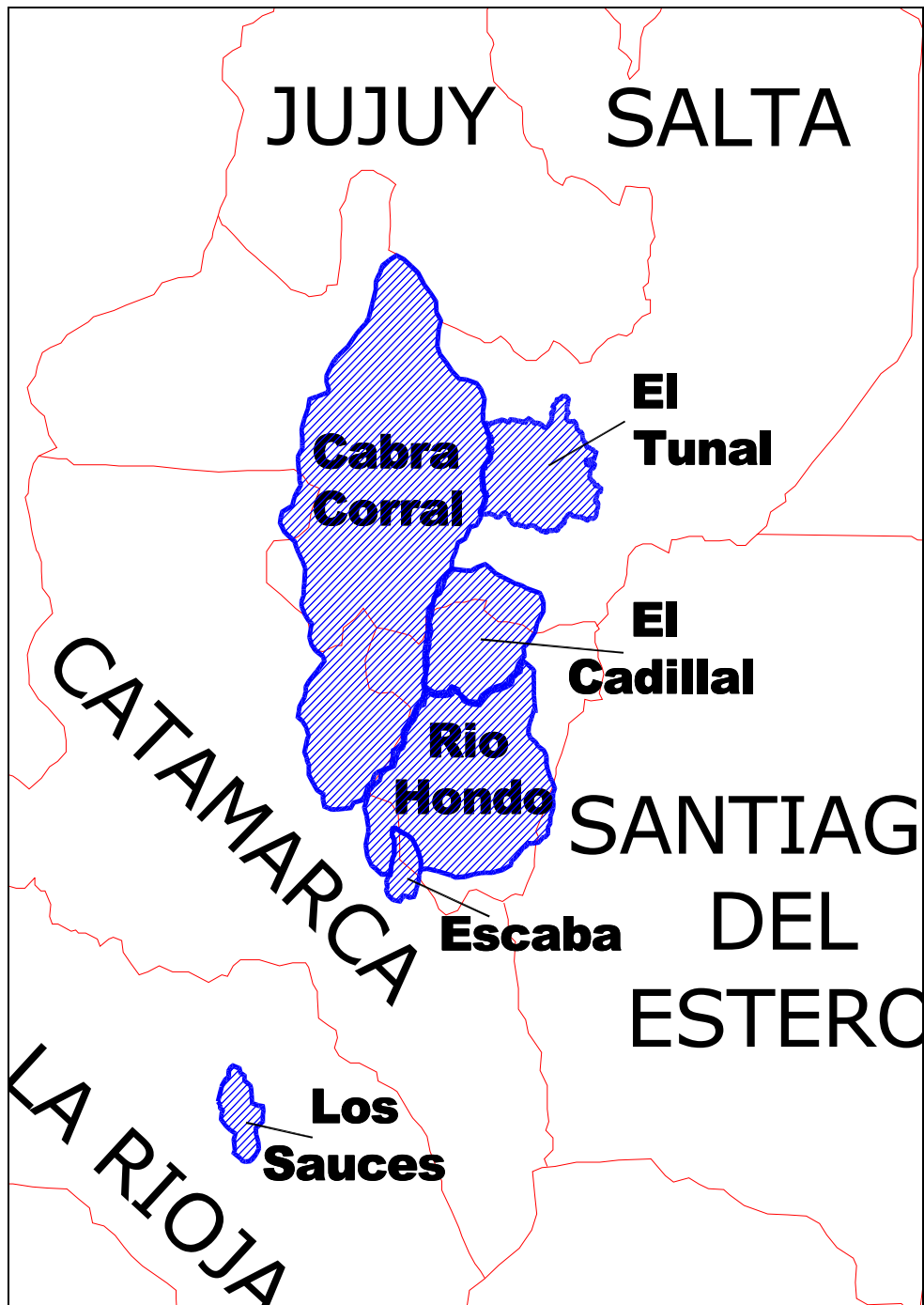


Figura 1.- Ubicación geográfica de las cuencas aplicadas

Mediante un estudio comparativo de las fórmulas, que considera su fundamento físico y el resultado de las predicciones comparadas con datos de campo y la aplicación de las mismas, se encontró que las relaciones basadas en los criterios de USLE, Gavrilovic, y Miraki tienen un formato sencillo donde sus formulaciones son sencillas en función de cantidades fácilmente disponibles para llevar estudios a escala regional, pero en virtud de los resultados obtenidos oportunamente (Olmos et al 2010), se decide profundizar el análisis sobre el último de ellos.

$$\text{Modelo USLE} \quad G_{PS} = \Gamma_{PS}(P_a, K_{IIU}, S_c, L_s, K_{EU}, K_P, A_c)(\text{ton / ha.año}) \quad (1)$$

$$\text{Modelo de Gavrilovic} \quad V_{Ps} = f_{Ps}(K_{EG}, K_{IG}, K_{\Phi}, K_{\Theta}, L_X, \Sigma L_{N-1}, Z, L_{CP}, A_c, S_c, P_a) \quad (2)$$

$$\text{Modelo de Miraki} \quad V_{Sa} = \Psi_{Sa}(A_c, P_a, V_Q, S_c, D_d, K_{EM}) \quad (3)$$

### **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 escorrentía a los cuerpos de agua. La expresión funcional definida por Miraki fue:

$$V_{Sa} = f_{Vs}(A_c, P_a, V_Q, S_c, D_d, F_c) \quad (4)$$

que se puede expresar:

$$V_{Sa} = c_0 A_c^{c_1} P_a^{c_2} V_Q^{c_3} S_c^{c_4} D_d^{c_5} F_c^{c_6} \quad (5)$$

donde se pueden aplicar cuatro formulaciones alternativas, según la tabla:

**Tabla 1.-** Valores de los coeficientes para las formulaciones de Miraki

<b>Ecuación</b>	<b>C<sub>0</sub></b>	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>3</sub></b>	<b>C<sub>4</sub></b>	<b>C<sub>5</sub></b>	<b>C<sub>6</sub></b>
<b>1</b>	1.182E-06	1.026	0.075	0.398	1.289	0.287	2.422
<b>2</b>	1.067E-06	1.292	0.129	0.397	1.384	0.000	2.510
<b>3</b>	2.410E-06	1.154	0.060	0.000	1.071	0.000	1.893
<b>4</b>	4.169E-05	0.841	0.000	0.000	0.139	0.312	0.000

De las cuatro expresiones propuestas por el autor en función de los resultados obtenidos en aplicaciones anteriores y de la cantidad de variables representativas que tienen el mayor sustento físico, se decide trabajar en base a las Ec. 1 y 2, en las que se aprecia que  $F_c$  es el factor de erosión integrado de uso del suelo y cubierta vegetal, que es el que más influye sobre  $V_{Ps}$ .

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

$$V_{Sa} = 1.067 \times 10^{-6} \cdot A_c^{1.292} \cdot P_a^{1.384} \cdot S_c^{0.129} \cdot D_d^{0.397} \cdot F_c^{2.510} \quad (7)$$

**Tabla 2.-** Factor de Cobertura y Uso del Suelo

<b>Uso del Suelo</b>	<b>Factor <math>F_c</math></b>
Embalses, lagunas y bañados	0,00
Bosques protegidos o reservas	0,20
Bosques nativos	0,40
Áreas agrícolas	0,60
Arbustos	0,65
Pastizales	0,80
Suelos desnudos	1,00

## **APLICACIÓN A LA REGIÓN DE ESTUDIO**

Las cuencas de aporte a los embalses en los cuales se cuentan con datos históricos productos de una serie de batimetrías se ubican en la región noroeste de la República Argentina. Estos embalses se encuentran insertos dentro de la cuencas altas y medias de los Río Salí-Dulce (Embalses El Cadillal, Escaba y Río Hondo), Juramento-Salado (Embalse Cabra Corral y El Tunal) y Río Huaco-Los Sauces (Embalse Los Sauces).

En lo que se refiere a su ubicación, los embalses El Cadillal y Escaba se encuentran en la provincia de Tucumán, sobre los ríos Salí y Marapa, respectivamente. Estos ríos son afluentes del río Dulce donde se emplaza el embalse de Río Hondo en el límite interprovincial entre las provincias de Tucumán y Santiago del Estero. Las capacidades de almacenamiento son de 300, 140 y 1650 Hm<sup>3</sup> y entraron en funcionamiento en los años 1966, 1950 y 1968 respectivamente.

La cuenca de aporte del río Salí o Dulce, es más húmeda con una pluviometría de aproximadamente 1000 mm anuales y también de régimen estival. El embalse de El Cadillal, de regulación anual, está destinado fundamentalmente al suministro de agua potable para la capital de la provincia de Tucumán y para riego. En cambio, los embalses de Escaba y Río Hondo, se concibieron fundamentalmente para regulación anual con fines de riego. El Cadillal se sitúa en la zona de los cordones subandinos de las cumbres Calchaquíes y la sierra de Medina. En cuanto a Escaba, está dominado por las sierras Pampeanas constituidas por serranías y planicies interserranas de orientación general norte-sur. Los ríos que nacen en estas sierras corren con rumbo sudeste y desembocan en el Embalse Río Hondo.

Cabra Corral es un embalse de regulación plurianual ubicado en la provincia de Salta sobre el río Juramento, nombre que adopta el río Salado en su parte alta. La capacidad original es del orden de los 3100 Hm<sup>3</sup> y funciona desde el año 1972. Las características climáticas ubican a la zona entre las más calurosas, del tipo subtropical. El régimen de lluvias de tipo estival hace que los torrentes de verano produzcan importantes crecidas. La precipitación media anual en la zona del río Juramento es de 600 mm y el embalse tiene como aprovechamientos principales el riego y la energía eléctrica. En lo relativo al relieve, se ubica en la zona de la Cordillera Oriental, caracterizada por valles intermontanos (Valles Calchaquíes, de Lerma y de Siancas), con cordones montañosos N-S de cumbres que sobrepasan los 6000 m de altura.

En estos valles se localizan las principales zonas agrícolas además de los mayores asentamientos urbanos.

La presa de Los Sauces se encuentra situada sobre el río homónimo, unos 15 Km al Oeste de la ciudad de La Rioja. La misma comenzó a embalsar agua en 1930. A la fecha ha prestado servicios durante más de siete décadas, por lo que ha superado ampliamente su vida útil. La capacidad original del embalse era de 18.6 Hm<sup>3</sup> y en la cuenca de aporte las características hidrometeorológicas predominantes son semi-desérticas. En los sectores montañosos de la cuenca situados por encima de los 3000 m.s.n.m. el clima es “de altura”. El régimen pluviométrico del área estudiada es continental subtropical Atlántico, con precipitaciones máximas en verano y mínimas en invierno. El análisis de los valores medios mensuales de los registros disponibles, indica que entre el 80% y el 90% de la precipitación anual cae entre los meses de noviembre y marzo. En el primer trimestre (verano) precipita el 55% del total anual, en el segundo (otoño) el 10%, en el tercero (invierno) el 4% y en el cuarto (primavera) el 31%.

Las áreas de las cuencas de aportes se sitúan entre los 780 Km<sup>2</sup> y los 32.600 Km<sup>2</sup>, correspondiendo a cuencas de magnitud superficial media y grande según la clasificación de Ponce (Clarke y Waldo, 1986).

A partir de los resultados obtenidos en un trabajo anterior, en el que se trabajó con información secundaria, se trató de mejorar la determinación de un parámetro que no tiene una variación temporal, salvo que haya alguna acción antrópica, como lo es la densidad de drenaje. En efecto en la mayoría de cuencas, en las zonas de montaña se encontró diferencias importantes entre las redes de drenaje en lo que hace a su definición y correspondiente longitud. Se hizo un avance parcial en el estudio de variabilidad espacial y temporal de la cobertura vegetal, en base a la cual se procedió a definir un Fc promedio hasta el año de referencia de las batimetrías que en la mayoría de los casos estaba entre los años 2000 y 2001.

**Tabla 3.-** Variables estimadas promedios para las cuencas en estudio.

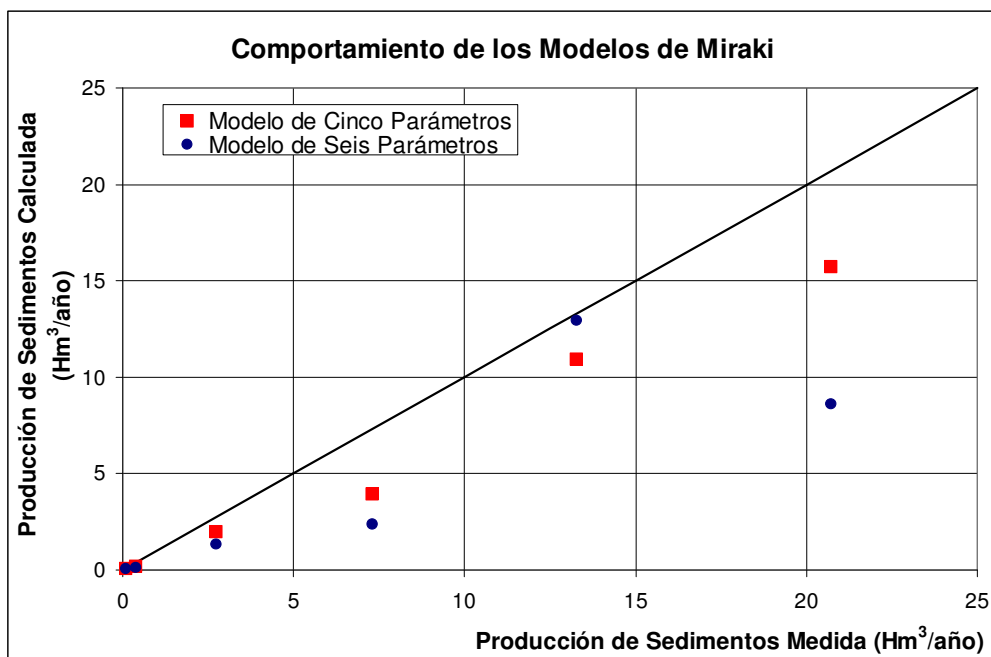
<b>Embalse</b>	<b>Fc</b> Adim.	<b>Ac</b> Km <sup>2</sup>	<b>Sc</b> (m/m)	<b>Dd</b> km <sup>-1</sup>	<b>P</b> mm	<b>Vq</b> Hm <sup>3</sup>
Los Sauces	0,57	1.118	0,18	3,60	113	24
Escaba	0,33	785	0,16	4,27	633	155
El Cadillal	0,36	5.427	0,14	3,50	590	1.010
El Tunal	0,54	6.095	0,143	3,40	420	768
Río Hondo	0,57	13.157	0,08	0,56	686	2.435
Cabra Corral	0,50	32.614	0,193	2,44	293	2.388

En consecuencia, se lleva a cabo la aplicación de las expresiones de Miraki seleccionadas a una serie de cuencas del noroeste argentino que desembocan en los embalses respectivos y cuyos resultados se presentan en la Figura 2 y en la Tabla 4. En términos generales para los casos estudiados todas las metodologías han subestimados los valores medidos, lo que indicaría que debería analizarse la sensibilidad de aquellas variables que pueden presentar variaciones temporales y/o espaciales, como ser precipitación y factor de cobertura, ya que los datos disponibles fueron recopilados de fuentes secundarias.

Dicho análisis indicó que de acuerdo la información actual analizada (imágenes satelitales y volumen de escorrentía), dichos cambios no eran sustanciales en el valor de la producción de sedimentos anual.

**Tabla 4.-Prod. de Sedimentos Medido y Calculado – Expresiones Originales(Hm<sup>3</sup>/año)**

Embalse	Area (Km <sup>2</sup> )	Medido	Miraki (6p)	Miraki (5p)
Los Sauces	1.118	0,113	0,034	0,086
De Escaba	785	0,388	0,104	0,159
El Cadillal	5.427	2,751	1,340	1,978
El Tunal	6.095	7,320	2,380	3,938
Río Hondo	13.157	13,286	12,920	10,898
Cabra Corral	32.614	20,741	8,618	15,701



**Figura 2.- Validación de Ec. de Miraki en 6 cuencas del NOA.**

En virtud de ello, se procede a un ajuste de los parámetros de las ecuaciones utilizadas para las cuencas estudiadas, lo cual produjo una muy buena correlación, tal cual se puede apreciar en la Figura 3 y los mismos se presentan en las ecuaciones adjuntas.

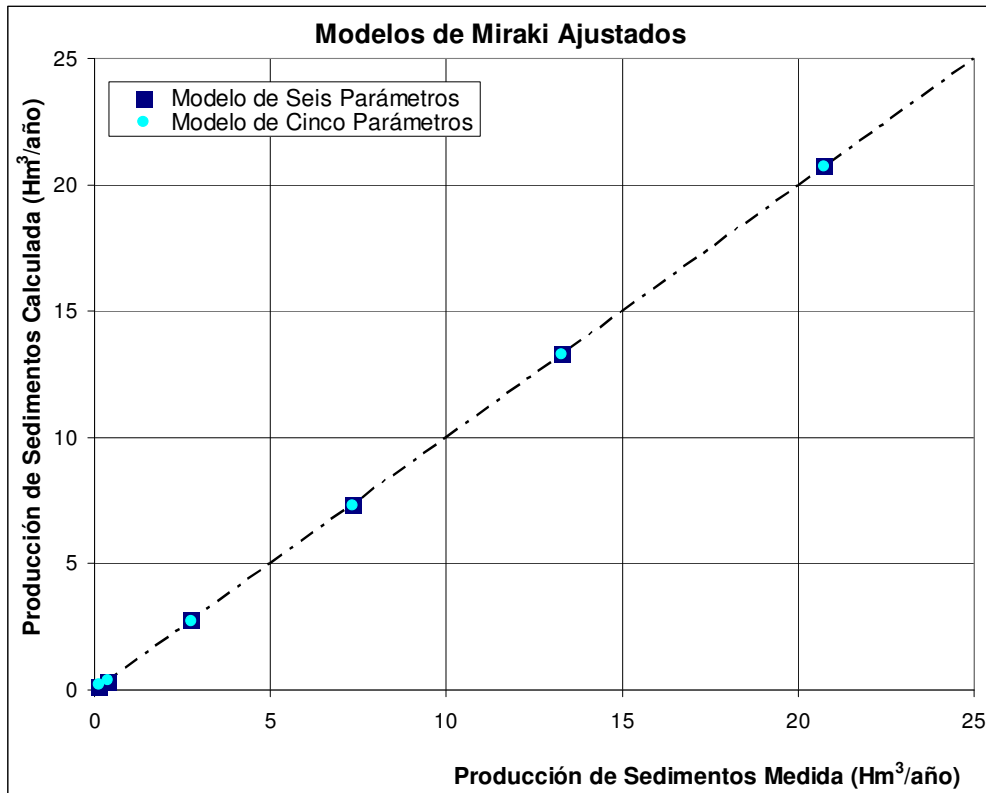


Figura 3.- Ajuste de la Ec. de Miraki en 6 cuencas del NOA

$$V_{Sa} = 1,523 \times 10^{-5} \cdot A_c \cdot P_a^{1,624} \cdot V_Q^{0,177} \cdot S_c^{0,679} \cdot D_d^{0,540} \cdot F_c^{3,598} \quad (5)$$

$$V_{Sa} = 1,179 \times 10^{-4} \cdot A_c \cdot P_a^{1,705} \cdot S_c^{1,154} \cdot D_d^{0,294} \cdot F_c^{3,517} \quad (6)$$

Tabla 5.-Prod. de Sedimentos Medido y Calculado – Expresiones Redefinidas (Hm³/año)

Embalse	Area (Km <sup>2</sup> )	Medido	Miraki (6p)	Miraki (5p)
Los Sauces	1.118	0,113	0,126	0,229
De Escaba	785	0,388	0,287	0,408
El Cadillal	5.427	2,751	2,764	2,750
El Tunal	6.095	7,320	7,315	7,317
Río Hondo	13.157	13,286	13,276	13,285
Cabra Corral	32.614	20,741	20,725	20,738

## CONCLUSIONES

- Desde el punto de vista físico, conceptual y de implementación, el modelo agregado de Miraki, en sus dos variantes adoptadas constituyen una alternativa interesante a la hora de hacer estudio de estimación de la producción global de sedimentos en cuencas.
- El proceso de validación y ajuste permitió obtener unas expresiones con comportamiento semejante de acuerdo a lo presentado en la figura 3 y que las mismas estarían del lado de la seguridad si se tiene en cuenta la disminución de la capacidad de retención de los embalses cuando se colmatan.
- Se tendría que generar una mayor cantidad de datos a partir de información básica generada



entre batimetrías para observar como se comporta las ecuaciones a medida que avanza el proceso de colmatación.

➤ Desde el punto de vista práctico sería conveniente analizar el reemplazo de la densidad de drenaje por otro factor físico semejante que sea menos tedioso de obtener en las zonas altas de montaña por la considerable cantidad de drenes.

#### LISTA DE SÍMBOLOS

$V_{sa}$  : producción media de sedimentos anual ( $Hm^3/año$ )

$A_c$  : área de la cuenca ( $Km^2$ )

$P_a$  : precipitación media anual. (cm)

$V_Q$  : derrame medio anual. ( $Hm^3$ )

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

$D_d$  : densidad de drenaje de la cuenca. ( $Km^{-1}$ )

$F_c$  : factor integrado de erosión de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca, varía entre 0,2 y 1,0. (adimensional)

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Bolton P., Bradbury P.A., Lawrence P. y Atkinson E.** - (1995) - “*CALSITE V-3.1 - User Manual*” - HR Wallingford Ltd. - Wallingford, United Kingdom
- **Clarke, C. & Waldo, P.** (1986). “*Sediment Yield from Small and Medium Watersheds*”. Proceedings of the Fourth Federal Interagency Sedimentation Conference, Vol. I, USA.
- **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.
- **Farias, H.D. y Olmos, L.A.** (2005). “*Fundamentos para la Formulación de una Metodología General para Estimar la Producción de Sedimentos en Cuencas*”. Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Neuquén, Argentina.
- **Garde, R. J. & Ranga-Raju, K.** (1985). “*Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*”. Halsted Press, J. Wiley & Sons, NY, USA.
- **Julien, P.Y.** (1995). “*Erosion and Sedimentation*”. Cambridge University Press, NY, USA.
- **Olmos, L. y Jegat, H.** (2001). “*Análisis de la erosión hídrica mediante un modelo distribuido (CALSITE) y un modelo agregado (SWRRB). Aplicación a la cuenca del río Grande (Venezuela)*”. Ingeniería del Agua, Vol. 8 N° 1, Valencia, España.
- **Olmos, L.A., Pilán, M.T., Farias, H.D.;** (2010) “Análisis de Modelos de Producción de Sedimentos en Cuencas”. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay, Noviembre 2010.
- **Verstraeten, G., Poesen, J., de Vente, J., Koninckx, X.** (2003). “*Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates*”. Geomorphology, Vol. 50, pp. 327–348.
- **Walling, D.E.** (1983). “*The sediment delivery problem*”. Journal of Hydrology 65, 209-237.
- **Wischmeier, W. y Smith, D.** (1978). “*Predicting Rainfall Erosion Losses*”. USDA & Agricultural Research Service, Agriculture Handbook N° 282, USA.



Instituto de Recursos Hídricos



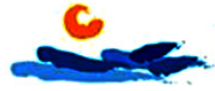
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



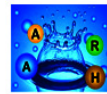
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Invest. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA S.A. INGENIERIA CIVIL E HIDRAULICA

