

*Departamento de Hidráulica  
Escuela de Ingeniería Civil*

**Seminarios 2008**



*Centro Universitario Rosario de  
Investigaciones Hidroambientales*

**MODELACIÓN DE PROCESOS DE EROSIÓN / SEDIMENTACIÓN  
EN SISTEMAS HIDROLÓGICOS DE LLANURA :  
APLICACIÓN EN LA CUENCA DEL A° LUDUEÑA**

**Dr. Ing. Civil PEDRO A. BASILE**

Departamento de Hidráulica-EIC y CURIHAM – Área : Hidráulica Fluvial  
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura  
Universidad Nacional de Rosario  
Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina  
Telefax: 0341-4808541. E-mail: [pbasile@fceia.unr.edu.ar](mailto:pbasile@fceia.unr.edu.ar)

## **Organización de la exposición**

---

- a) Introducción: definiciones, conceptos, etc.**
- b) Modelos de erosión/sedimentación desarrollados : Parte I**
- c) Aplicación en la Cuenca del A° Ludueña (I)**
- d) Modelos de erosión/sedimentación desarrollados : Parte II**
- e) Aplicación en la Cuenca del A° Ludueña (II)**
- f) Conclusiones**

# Qué es la erosión de suelos?

*Erosión es el proceso de disgregación y transporte de partículas de suelo por agentes erosivos (Ellison, 1944).*

- Agentes erosivos
  - Agua (impacto de lluvia, flujo superficial mantiforme, flujo encauzado, infiltración)
  - Hielo (disgregación por  $\Delta T$ , arrastre de glaciares, etc.)
  - Viento (suspensión de partículas sueltas)

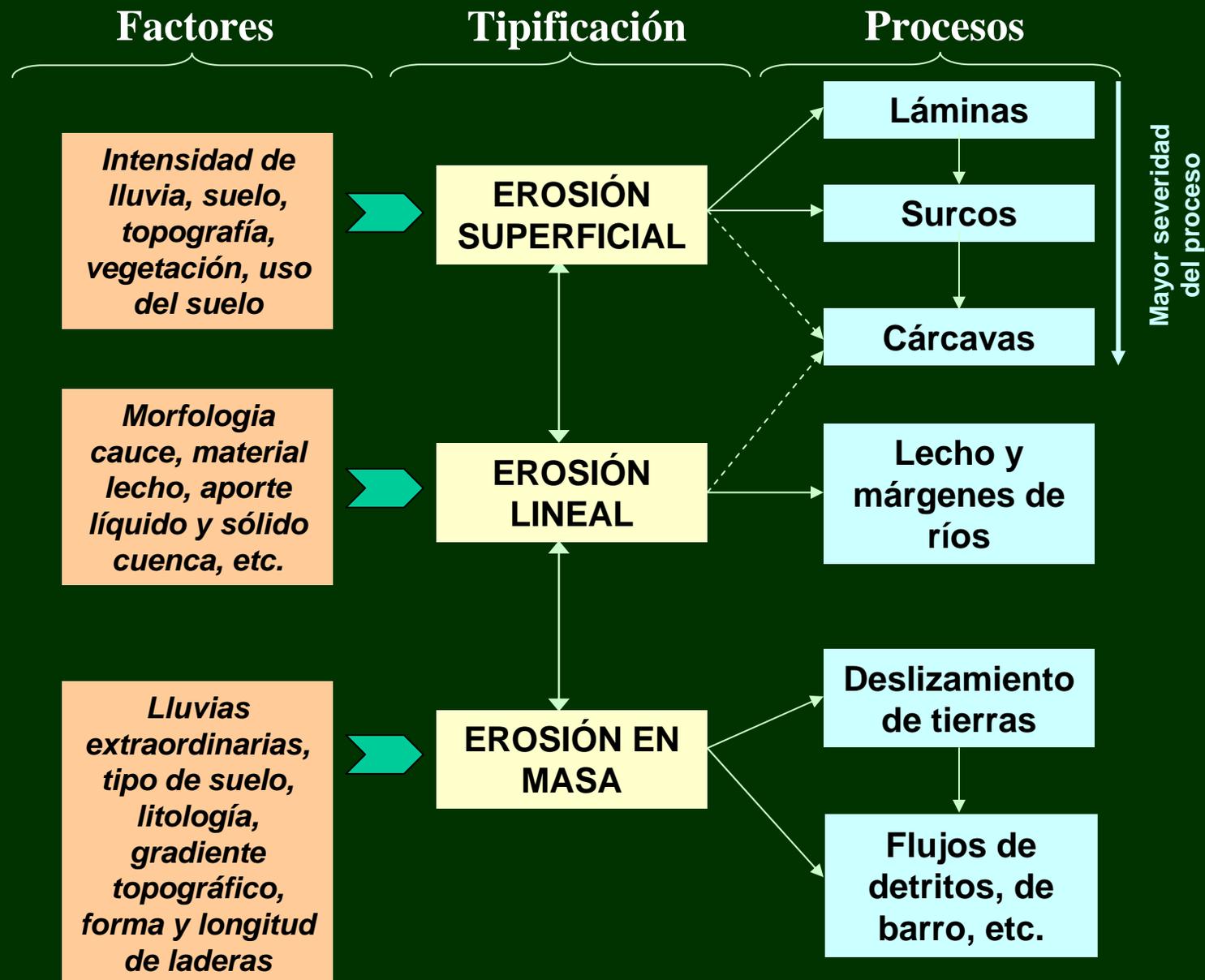
# Erosión geológica vs. Erosión acelerada

- La erosión geológica es aquella que se da en un ambiente natural no perturbado, es un proceso natural de lenta evolución temporal.
- La intervención antrópica es la causa principal de procesos de erosión acelerada :
  - Agricultura intensiva (sin medidas de conservación),
  - Tala indiscriminada de bosques y selva nativa,
  - Desmonte y remoción de pasturas,
  - Incendios de praderas y/o bosques naturales
  - Sobrepastoreo.

# PORQUÉ LA EROSIÓN ES UN PROBLEMA ?

- Degrada el recurso suelo
  - Remueve y transporta nutrientes
  - Arrastra materia orgánica
  - Reduce la productividad del suelo
- Causa sedimentación aguas abajo
- Produce sedimentos que son contaminantes
- Produce sedimentos que transportan contaminantes (adsorción de agroquímicos, metales pesados, etc.)

# Clasificación de erosión hídrica



# Estimación del flujo de sedimentos desde los continentes a los océanos a escala planetaria

| Fuente              | Cantidad estimada (10 <sup>9</sup> T/año) | Cantidad estimada (%) |
|---------------------|---|-----------------------|
| Ríos (TSS + TSB)    | 20  | 71                    |
| Ríos (TSD)          | 5   | 18                    |
| Glaciares, icebergs | 2   | 7                     |
| Vientos             | 0.7                                       | 2.5                   |
| Erosiones costeras  | 0.4                                       | 1.5                   |

Syvitsky et al., (2003). *Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective.* *Sedimentary Geology* 162 (2003) 5-24.

**El 89 % de los sedimentos descargados en los océanos son transportados por los ríos.**

# Flujo de agua y sedimentos de algunos ríos del mundo

| Río         | Caudal<br>módulo<br>(m <sup>3</sup> /s) | Area<br>Cuenca<br>(10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> ) | Transporte<br>Sedimentos<br>(10 <sup>6</sup> T/año) | Prod. neta<br>específica<br>(T/km <sup>2</sup> /año) | Degradación<br>promedio<br>(mm/año) |
|-------------|---|--|---|--|-------------------------------------|
| Amazonas    | 199770                                  | 6,15   | 1200  | 195  | 0,153                               |
| Columbia    | 7950                                    | 0,67   | 10  | 15   | 0,012                               |
| Congo       | 39600                                   | 3,72   | 43  | 12   | 0,009                               |
| Danubio     | 6530                                    | 0,81   | 67  | 83   | 0,065                               |
| Ganges      | 30790                                   | 1,48   | 1060  | 716  | 0,563                               |
| Huang Ho    | 1550                                    | 0,75   | 1050  | 1400   | 1,101                               |
| Indus       | 7540                                    | 0,97   | 59  | 61   | 0,048                               |
| Mackenzie   | 9700                                    | 1,81   | 42  | 23   | 0,018                               |
| Mekong      | 14900                                   | 0,79   | 160   | 203  | 0,159                               |
| Mississippi | 19390                                   | 3,27   | 210   | 64   | 0,050                               |
| Niger       | 6080                                    | 1,21   | 40  | 33   | 0,026                               |
| Orinoco     | 34880                                   | 0,99   | 150   | 152  | 0,119                               |
| Paraná      | 19000                                   | 2,57   | 100   | 39   | 0,031                               |

Re-elaborada de Chakrapani (2005). *Factors controlling variations in river sediment loads*. *Current Science* 88(4) 569-575.

# Flujo de sedimentos en ríos del Noroeste Argentino

| Cuenca         | Estación          | Río            | Área<br>(km <sup>2</sup> ) | Transporte<br>Sedimentos<br>10 <sup>6</sup> (T/año) | Producción<br>neta esp.<br>(T/km <sup>2</sup> /año) | Degrad.<br>promedio<br>(mm/año) |
|----------------|-------------------|----------------|----------------------------|---|---|---------------------------------|
| Pilcomayo      | La Paz            | Pilcomayo      | 96000                      | 137,5   | 1432  | 1,13                            |
| Bermejo Sup.   | Alarache          | Bermejo        | 2260                       | 4,9   | 2147  | 1,69                            |
| Bermejo Sup.   | Balapuca          | Bermejo        | 4420                       | 7,3   | 1652  | 1,30                            |
| Bermejo Sup.   | Arrazayal         | Bermejo        | 4750                       | 11,0  | 2320  | 1,82                            |
| Bermejo Sup.   | Aguas Blancas     | Bermejo        | 4850                       | 15,7  | 3241  | 2,55                            |
| Bermejo Sup.   | San José          | Iruya          | 2120                       | 17,7  | 8341  | 6,56                            |
| Bermejo Sup.   | Astilleros        | Gde. de Tarija | 9600                       | 12,6  | 1307  | 1,03                            |
| Bermejo Sup.   | San Telmo         | Gde. de Tarija | 10460                      | 14,0  | 1338  | 1,05                            |
| Bermejo Sup.   | Colonia Colpana   | Pescado        | 5150                       | 22,1  | 4300  | 3,38                            |
| Bermejo Sup.   | Cuatro Cedros     | Pescado        | 1700                       | 24,0  | 14119   | 11,10                           |
| Bermejo Sup.   | Angosto           | Las Maderas    | 2950                       | 34,2  | 11595   | 9,12                            |
| Bermejo Sup.   | Pozo Sarmiento    | Bermejo        | 25000                      | 119,7   | 4787  | 3,76                            |
| Gde. de Tarija | Presa San Jacinto | Tolomosa       | 438                        | 0,9   | 2121  | 1,67                            |
| San Francisco  | Arrayanal         | Candelaria     | 370                        | 1,4   | 3740  | 2,94                            |
| San Francisco  | San Juancito      | Grande         | 8440                       | 4,2   | 499   | 0,39                            |
| San Francisco  | Bajada de Pinto   | Lavayen        | 4100                       | 2,0   | 483   | 0,38                            |
| San Francisco  | El Angosto        | Mojotoro       | 850                        | 2,0   | 2388  | 1,88                            |
| San Francisco  | Peña Alta         | Valle Grande   | 1400                       | 3,8   | 2682  | 2,11                            |
| San Francisco  | Caimancito        | San Francisco  | 25800                      | 19,3  | 749   | 0,59                            |

Basile (2001). *Caracterización de Caudales Sólidos en Cuencas del NOA*. Estudio Regional de Riesgos Hidrogeológicos en el Noroeste Argentino. SUCCE, Enel-Hydro.

## Flujo de sedimentos en ríos del Noroeste Argentino (cont.)

| Cuenca            | Estación              | Río       | Área<br>(km <sup>2</sup> ) | Transporte<br>Sedimentos<br>10 <sup>6</sup> (T/año) | Producción<br>neta esp.<br>(T/km <sup>2</sup> /año) | Degrad.<br>promedio<br>(mm/año) |
|-------------------|-----------------------|-----------|----------------------------|---|---|---------------------------------|
| Bermejo M. e Inf. | El Ceibal             | Del Valle | 995                        | 0,53  | 533   | 0,42                            |
| Bermejo M. e Inf. | El Piquete            | Del Valle | 700                        | 0,16  | 235   | 0,18                            |
| Bermejo M. e Inf. | San Felipe            | Dorado    | 85                         | 0,12  | 1413  | 1,11                            |
| Bermejo M. e Inf. | San Fernando          | Seco      | 32                         | 0,07  | 2306  | 1,81                            |
| Pasaje            | Miraflores            | Pasaje    | 34500                      | 15,24   | 442   | 0,35                            |
| Pasaje            | El Tunal              | Pasaje    | 38000                      | 6,71  | 177   | 0,14                            |
| Salí-Dulce        | San Vicente           | Sali      | 3720                       | 1,64  | 441   | 0,35                            |
| Salí-Dulce        | Ruta 307-Km 19        | Los Sosa  | 620                        | 0,25  | 398   | 0,31                            |
| Salí-Dulce        | Las Higueras          | Solco     | 140                        | 0,18  | 1276  | 1,00                            |
| Salí-Dulce        | Los Hornitos          | Cochuna   | 155                        | 0,19  | 1215  | 0,96                            |
| Salí-Dulce        | Potrero del Clavillo  | Las Cañas | 1000                       | 0,02  | 22  | 0,02                            |
| Salí-Dulce        | Potrero de las Tablas | Lules     | 600                        | 0,38  | 635   | 0,50                            |
| Salí-Dulce        | Km 52                 | Angostura | 500                        | 0,16  | 313   | 0,25                            |
| Salí-Dulce        | El Sauce              | Dulce     | 20200                      | 4,68  | 232   | 0,18                            |
| Juram.-Salado     | Quebrada de Usuri     | Potreros  | 302                        | 0,22  | 724   | 0,57                            |

Basile (2001). *Caracterización de Caudales Sólidos en Cuenas del NOA*. Estudio Regional de Riesgos Hidrogeológicos en el Noroeste Argentino. SUCCE, Enel-Hydro.

# Modelos para pronóstico de erosión/sedimentación hídrica

---

## Según la representación de procesos

- (i) **Modelos empíricos:** utilizan metodologías derivadas a partir de mediciones sistemáticas (Curvas TSS-Q; USLE, MUSLE, RUSLE, etc.)
- (ii) **Modelos físicamente basados:** utilizan ecuaciones que describen la dinámica del proceso físico (Producción, Transporte, Erosión/Sedimentación)
- (iii) **Modelos híbridos (combinación de (i) y (ii))**

## Según la escala temporal

- a) **Modelos de eventos (Erosión a escala temporal de una crecida)**
- b) **Modelos continuos (Erosión continua con paso temporal diario)**
- c) **Modelos agregados a escala anual (Erosión media anual)**

# Modelos de erosión/sedimentación desarrollados \_ Parte I

---

## EROSUP-U

**Modelo empírico**

**Escala temporal anual**

**Espacialmente semi-distribuido**

**Producción bruta de sedimentos (USLE)**

**Tránsito de sedimentos agregado por subcuenca (SDR)**

**Módulo de sedimentación en embalses (CHURCHILL-LANE)**

## Aplicación del modelo EROSUP-U. Cuenca del A<sup>o</sup> Ludueña

---

### OBJETIVO

**Balance de sedimentos a escala temporal anual del Sistema Hidrológico del A<sup>o</sup> Ludueña, a los efectos de evaluar procesos de:**

- **Erosión superficial bruta y neta a nivel de cuenca,**
- **Re-deposición interna de sedimentos en la cuenca,**
- **Sedimentación en la presa de retención de crecidas,**
- **Sedimentación en la zona del entubamiento del A<sup>o</sup> cercana a la desembocadura en el río Paraná,**
- **Ingresos de sedimentos al río Paraná.**

# Sistema Hidrológico del A° Ludueña

## Descripción

### Poblaciones:

Rosario, Pérez, Zavalla, Pujato, Funes, Roldán, Ibarlucea, Ricardone, Coronel Arnold.

$$F = 700 \text{ km}^2$$

$$L \text{ cursos} = 110 \text{ km}$$

$$S = 1,33 \text{ ‰ (media curso)}$$

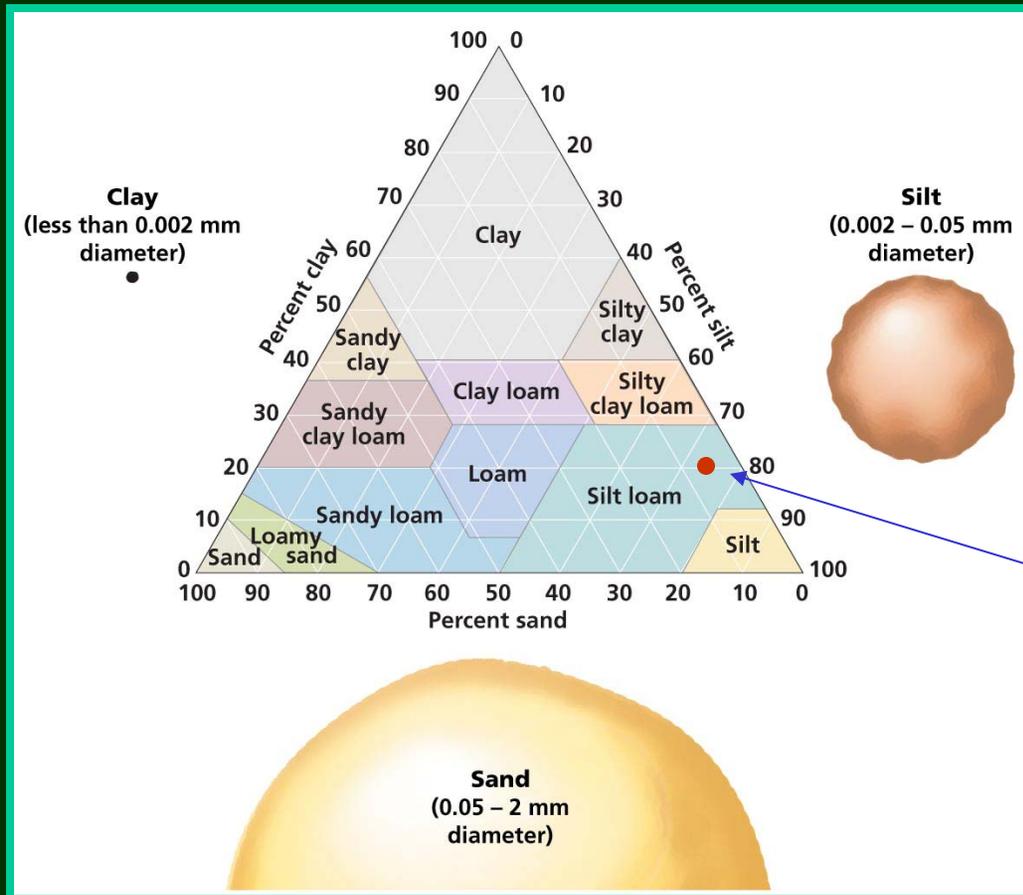
$$Q_{\text{ma}} = 2,7 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_p = 400 \text{ m}^3/\text{s} \quad (1986)$$



# Sistema Hidrológico del A° Ludueña

## Composición textural promedio de suelos Horizonte A



### (Franco-limoso)

$$f_{\text{vfs}} = 6 \% \text{ (arena muy fina)}$$

$$f_{\text{clay}} = 21 \% \text{ (arcilla)}$$

$$f_{\text{silt}} = 73 \% \text{ (limo)}$$

Porcentaje promedio de materia orgánica : 2 %.

# Estructura de descarga de la Presa de Retención de Crecidas del A° Ludueña



**Longitud del cierre: 7 Km**  
**Cota coronamiento presa: + 32.5 m IGM**  
**( $V=71 \text{ Hm}^3$  para  $Z=+30 \text{ m IGM}$ )**  
**7 orificios  $D=1 \text{ m}$**   
**Ancho vertedero = 44 m**

# A° Ludueña en Av. Circunvalación, 8.5 Km Aguas Abajo Presa de Retención



Vista hacia aguas arriba desde Puente Este

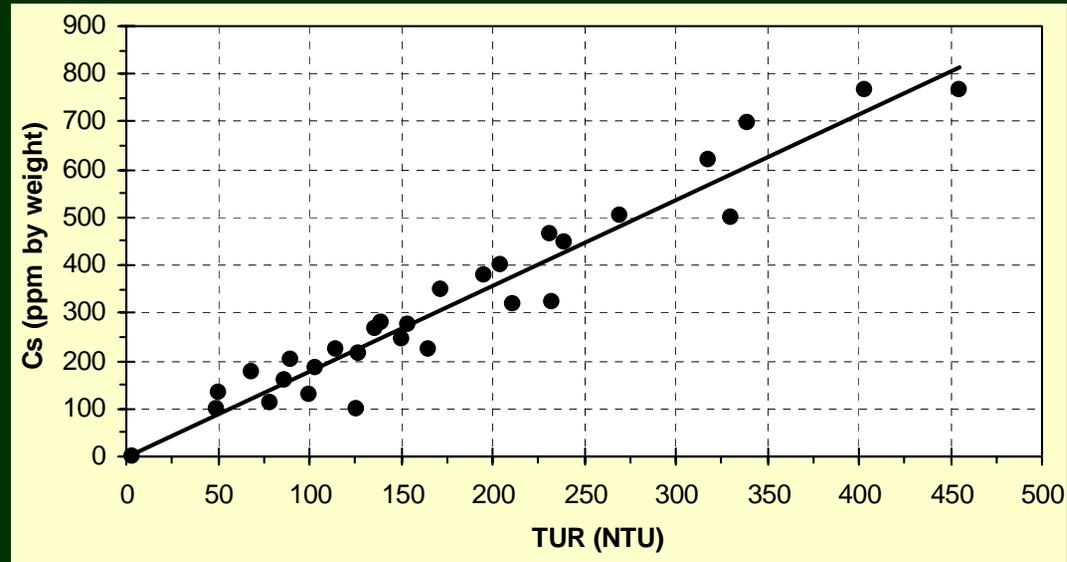


Vista hacia aguas abajo desde Puente Este

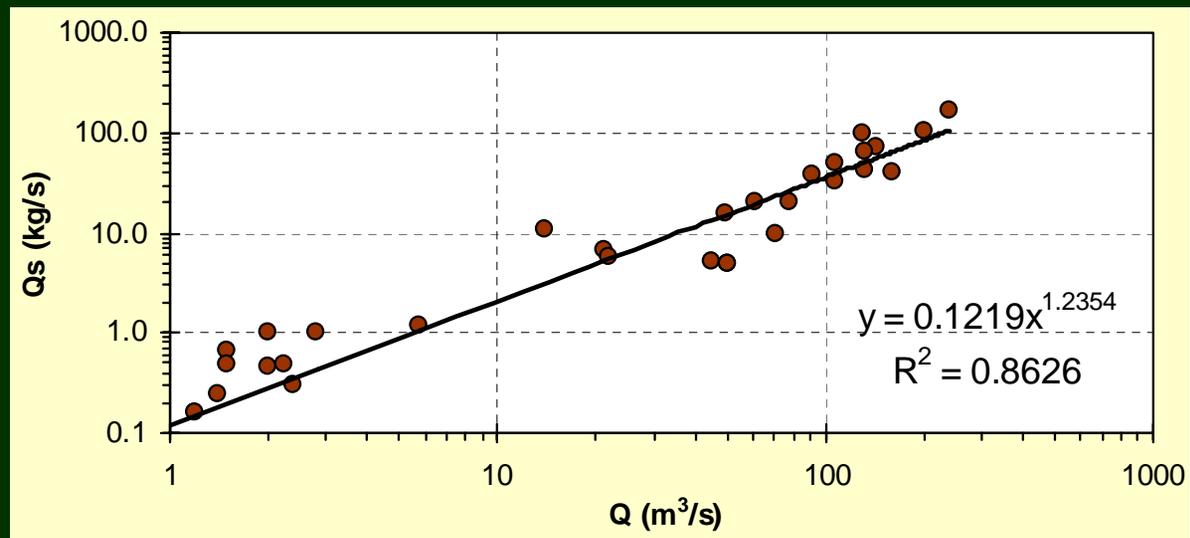


# MEDICIONES DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN: Ludueña - Av. Circunvalación

## Curva Calibración Turbidímetro

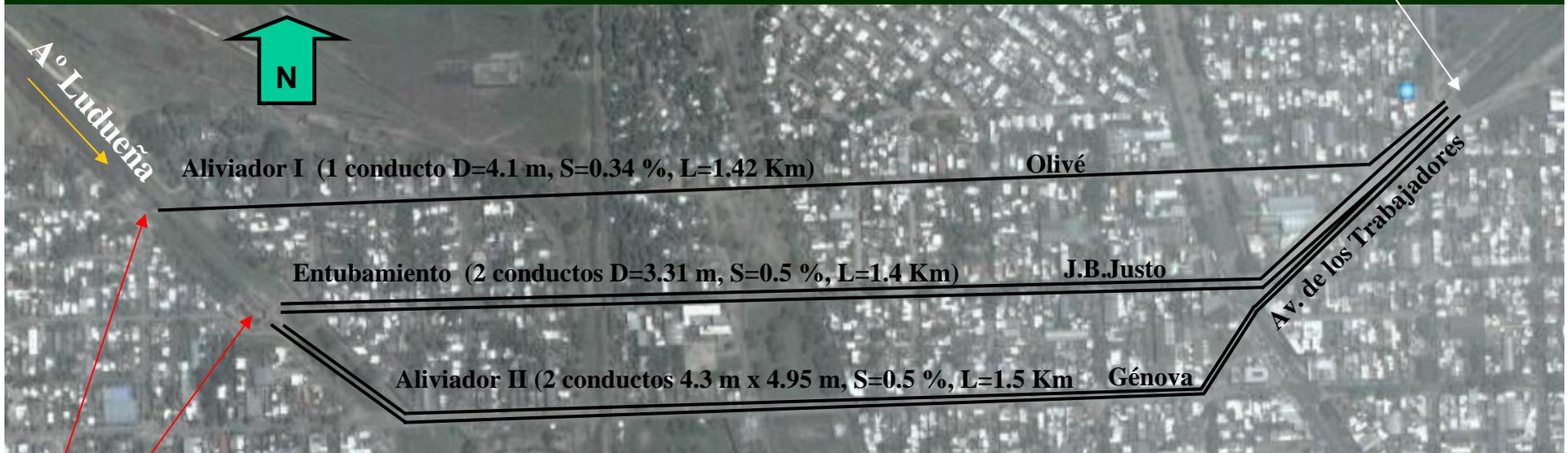


## Curva Transporte en Suspensión - Caudal



# Embocadura – Desembocadura de los Entubamientos del A° Ludueña Ciudad de Rosario

Desembocadura  
1.05 Km Aguas Arriba  
de la confluencia con el  
Río Paraná



## Embocadura

2.9 Km Aguas Abajo del  
cruce del A° Ludueña y  
Av. Circunvalación

# Embocadura entubamientos del A° Ludueña

Aliviador I

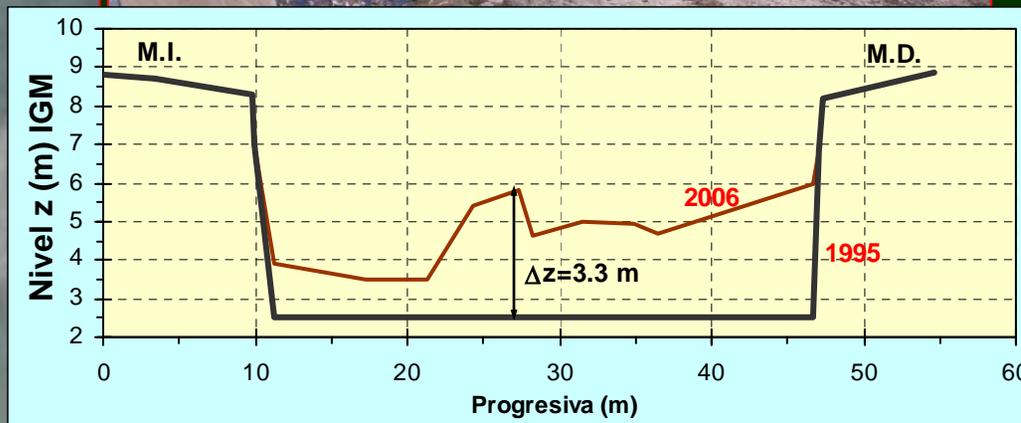
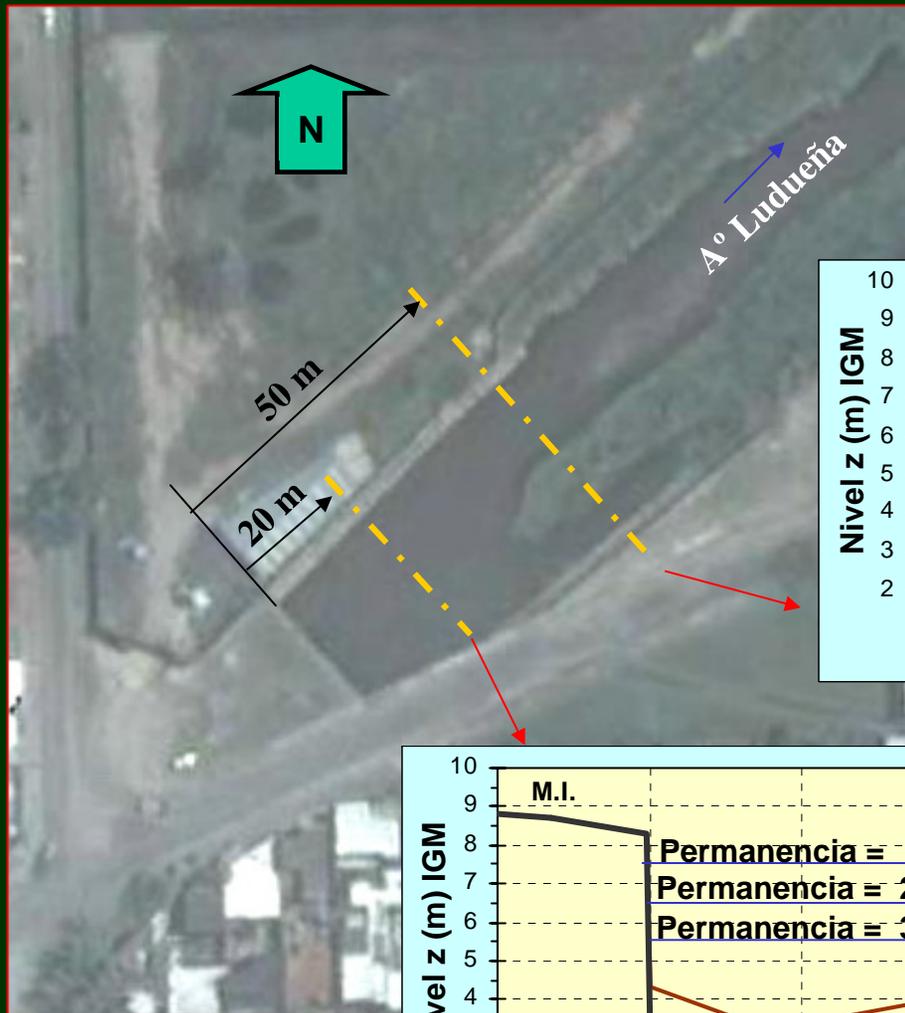


Entubamiento

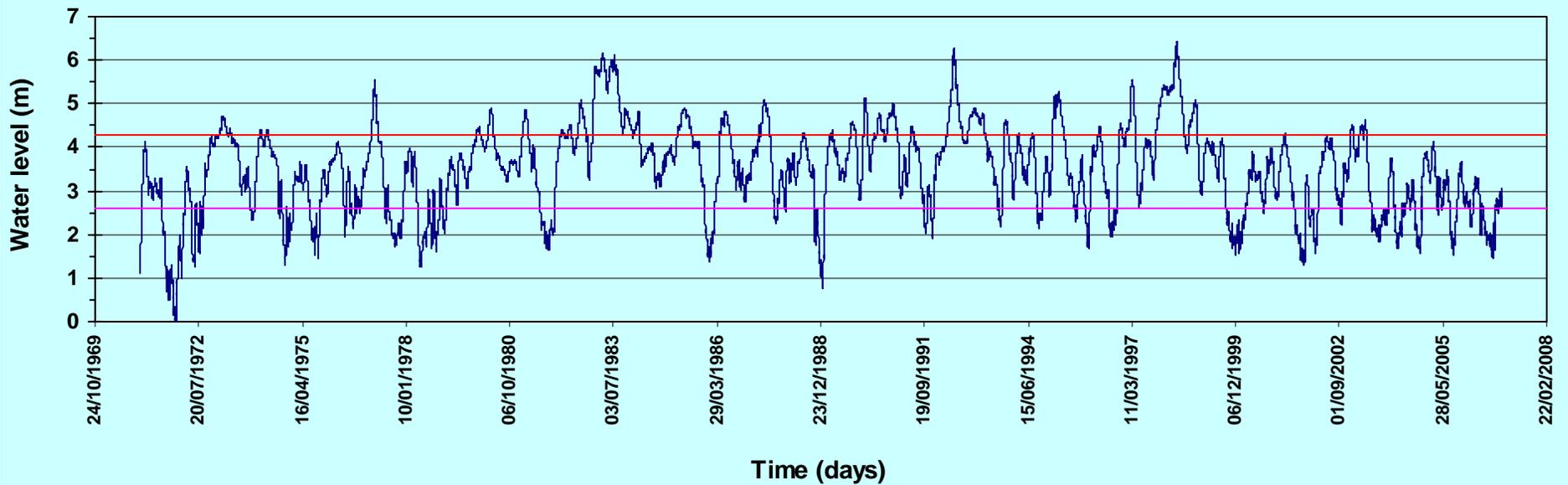
Aliviador II



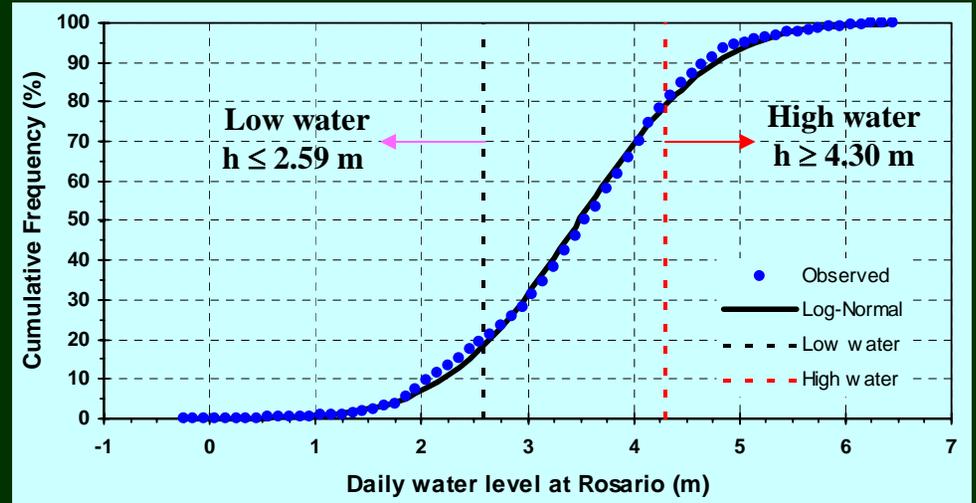
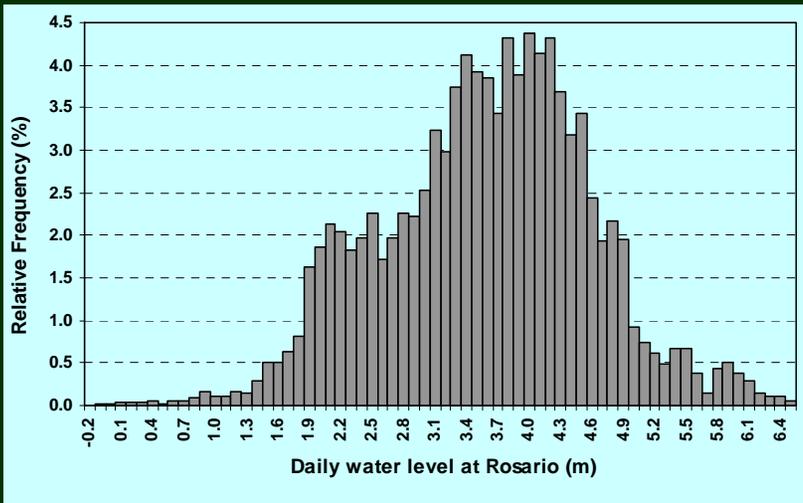
# Sedimentación desembocadura entubamientos A° Ludueña



# Niveles hidrométricos diarios del Río Paraná en Rosario (km 416) - Serie 1971 – 2006



Niveles referidos al cero local de la escala limnimétrica : + 3.04 m IGM



# Sistema Hidrológico del A° Ludueña

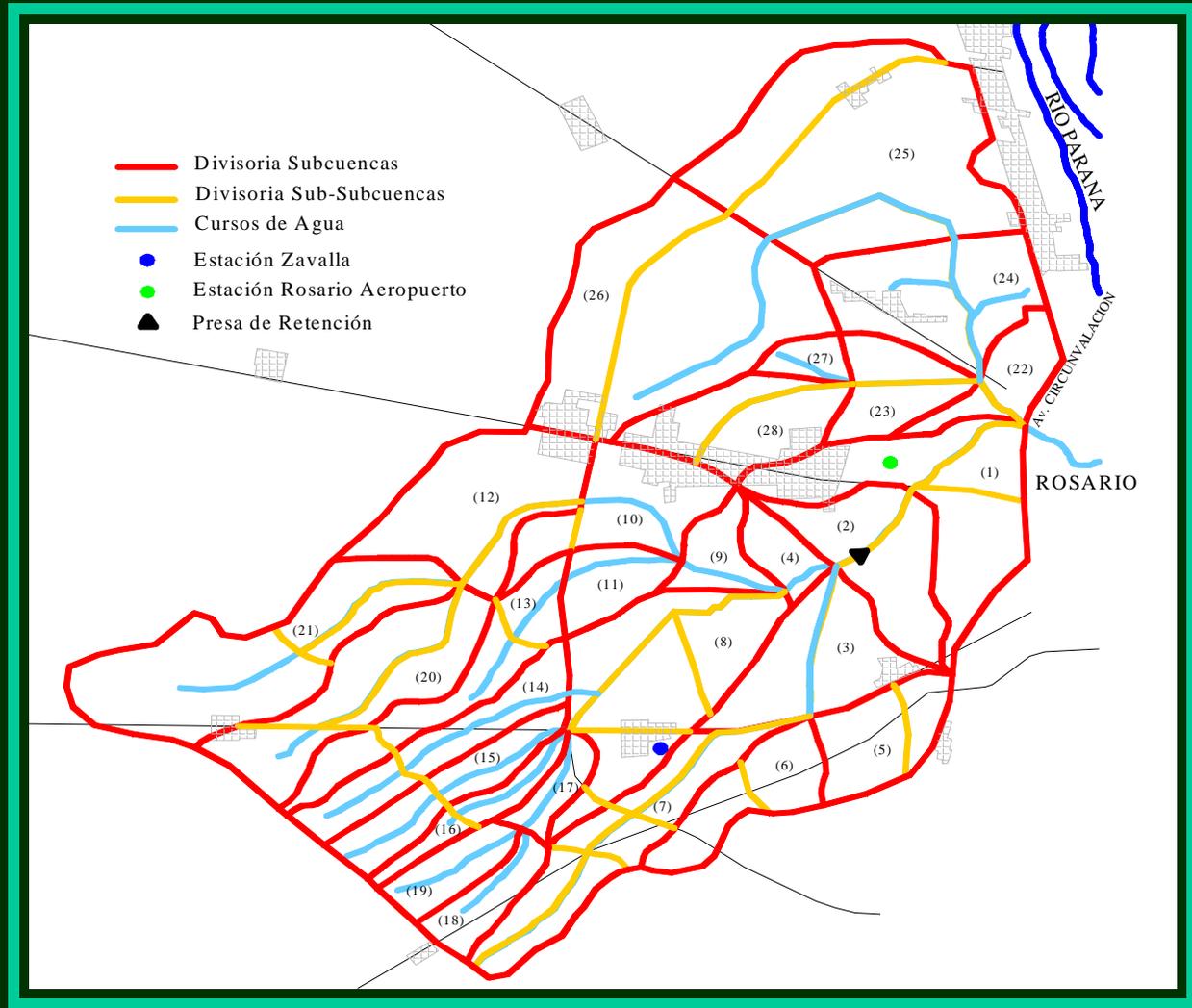
## Delimitación de subcuencas y sub-subcuencas

### Ludueña:

21 subcuencas

### Ibarlucea:

7 subcuencas



# Implementación del modelo EROSUP-U

---

**Producción bruta específica de sedimentos :**

$$A_i = 224 R_i K_i LS_i C_i P_i$$

**A<sub>i</sub>** : erosión superficial media anual o producción bruta específica de sedimentos [(T/km<sup>2</sup>)/año]

**R<sub>i</sub>** : factor de erosividad de lluvia

**K<sub>i</sub>** : factor de erosionabilidad del suelo

**LS<sub>i</sub>** : factor topográfico de longitud y pendiente del terreno

**C<sub>i</sub>** : factor de cobertura vegetal

**P<sub>i</sub>** : factor de prácticas conservacionistas para control de erosión

## Factor de erosividad de lluvia (R)

- $R_s$  para tormenta genérica es el producto de la energía cinética por unidad de área (E) y la intensidad máxima en 30 minutos ( $I_{30}$ ) :

$$R_s = EI_{30} = \frac{1}{173,6} \left\{ \sum_{n=1}^N [1,213 + 0,89 \log I_n] I_n \Delta t \right\} I_{30}$$

$I_n$  : intensidad asociada al n-ésimo pulso de precipitación (mm/h),

$\Delta t$  : intervalo de tiempo (h) de cada pulso.

- Factor de erosividad para un año genérico ( $R_y$ ) y el factor de erosividad medio anual (R) se determinan mediante:

$$R_y = \sum_{s=1}^{N_s} R_s \quad , \quad R = \frac{1}{N_y} \sum_{y=1}^{N_y} R_y$$

$N_s$  : número de tormentas en el año,

$N_y$  : número de años.

## Factor de erosividad de lluvia (R) \_ cont.

Arnoldus (1978)

R en función del índice de Fournier modificado IFM :

$$\log R = 1,93 [\log IFM] - 1,52$$

$$IFM = \frac{1}{P_{MA}} \sum_{k=1}^{12} P_k^2 \quad , \quad P_{MA} = \sum_{k=1}^{12} P_k$$

$P_k$  : precipitación media del k-esimo mes expresada en (mm),

$P_{MA}$  : precipitación media anual (mm)

## Factor de erosividad de lluvia (R) \_ cont.

Se procesaron 1031 tormentas registradas en la estación pluviográfica de Rosario Aeropuerto (período 1986-1998) :

- R calculado a partir de  $EI_{30}$  :  $R = 219,4$
- R calculado a partir de IFM :  $R = 230,9$

### Fórmula de Arnoldus

- # Brinda resultados satisfactorios,
- # Tiene la ventaja de requerir datos de precipitaciones medias mensuales,
- # Muy útil en el caso de cuencas sin registros pluviográficos.

El modelo se alimentó con los datos de precipitación media mensual de las estaciones de Zavalla (estación pluviométrica) y Rosario Aeropuerto.

Los datos de precipitaciones medias mensuales para cada subcuenca se asignaron en función del área de influencia de cada estación, materializadas con polígonos de Thiessen.

## Factor de erosionabilidad del suelo (K)

K se determina en función de las características texturales y el contenido de materia orgánica (Wischmeier y Smith, 1978):

$$K_{ij} = T_1 T_2 T_3 T_4$$

$$T_1 = 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 \text{ SAN}_{ij} \left( 1 - \frac{\text{SIL}_{ij}}{100} \right) \right]$$

$$T_2 = \left( \frac{\text{SIL}_{ij}}{\text{CLA}_{ij} + \text{SIL}_{ij}} \right)^{0.3}$$

$$T_3 = 1 - \frac{0.25}{\text{C1}_{ij} + \exp(3.72 - 2.95\text{C1}_{ij})}$$

$$T_4 = 1 - \frac{0.7 \text{ SN1}_{ij}}{\text{SN1}_{ij} + \exp(-5.51 + 22.9\text{SN1}_{ij})}$$

$\text{SAN}_{ij}$ ,  $\text{SIL}_{ij}$ ,  $\text{CLA}_{ij}$  y  $\text{C1}_{ij}$  : contenidos de arena, limo, arcilla y materia orgánica respectivamente para la subcuenca i y la sub-subcuenca j, expresados en % .

$$\text{SN1}_{ij} = 1 - (\text{SAN}_{ij}/100)$$

## Factor de erosionabilidad del suelo (K) \_ cont.

Se determinaron los porcentajes de arena, limo, arcilla y materia orgánica para cada sub-subcuenca, los cuales se suministraron como información de entrada al modelo.

Los valores de  $K_{ij}$  obtenidos variaron entre 0,3 y 0,35.

El valor de  $K_i$  para cada subcuenca se determina mediante la siguiente ponderación areal:

$$K_i = \frac{1}{F_i} \sum_{j=1}^{NSSB_i} K_{ij} F_{ij}$$

$NSSB_i$  : número de sub-subcuencas correspondiente a la subcuenca  $i$ ;

$F_i$  : área de la subcuenca  $i$ ,

$F_{ij}$  : área de la sub-subcuenca  $j$  contenida en la subcuenca  $i$

## Factor topográfico (LS)

El factor topográfico LS (Wischmeier y Smith, 1978):

$$LS_i = \left( \frac{L_i}{22,13} \right)^\zeta \left( 0,065 + 4,52S_i + 65,4S_i^2 \right) \quad \zeta = 0,2 + \frac{0,3S_i}{S_i + \exp(-1,47 - 61,09S_i)}$$

$L_i$  (m) para cada subcuena se define mediante la inversa de la densidad de drenaje  $D_{di}$  ( $\text{Km}^{-1}$ ) dividida por 2. Es decir,  $L_i$  representa la longitud promedio de la zona del valle dentro de cada subcuena:

$$L_i = \chi \frac{D_{di}^{-1}}{2} = \chi \frac{F_i}{2 LCH_i}$$

$LCH_i$  : longitud total de cursos en la subcuena  $i$  (km),  $F_i$  : área en ( $\text{km}^2$ ) y  $\chi=1000$  .

Los parámetros morfológicos para cada subcuena se determinaron a partir de información digitalizada de curvas de nivel con equidistancia de 2,5 m, red de cursos permanentes y temporarios en CAD. Los valores de  $LCH_i$  que se ingresaron como datos en el modelo variaron entre 2,3 km y 15,9 km, mientras los referidos a  $S_i$  variaron entre 0,00018 y 0,0036

## Factor asociado a la cobertura vegetal (C)

Valores promedios del factor C se determinaron en función de datos de NDVI (Índice Diferencia Normalizada de Vegetación) obtenidos por Zimmermann (2002).

El factor C se relaciona con el NDVI mediante:

$$C_{ij} = \exp \left[ -\alpha \frac{NDVI_{ij}}{(\beta - NDVI_{ij})} \right]$$

$\alpha$  y  $\beta$  : parámetros de la curva  $C=f(NDVI)$ , se adoptaron los valores  $\alpha = 2$  y  $\beta = 1$  (Van de Knijff *et al.*, 1999).

Los valores de  $C_{ij}$  que se ingresaron como datos en el modelo variaron entre 0,018 y 0,26. El valor de  $C_i$  para cada subcuenca se determina mediante la siguiente ponderación areal:

$$C_i = \frac{1}{F_i} \sum_{j=1}^{NSSB_i} C_{ij} F_{ij}$$

## Factor de prácticas conservacionistas (P)

---

P relación entre la erosión bajo las condiciones específicas de labranza en el caso de estudio y la labranza por roturado en el sentido de la máxima pendiente ( $P=1$ )

Wischmeier y Smith (1978): valores orientativos de P en función de la pendiente y del tipo de práctica de cultivo (cultivo en contorno, cultivo en franjas de contorno y surcos irrigados, terráceo, etc.)

En este estudio, para caracterizar las diversas prácticas de manejo y para estimar la erosión real se especificó un valor promedio de  $P=0,6$  para cada subcuenca.

# Tránsito agregado de sedimentos

## Producción neta específica de sedimentos (SY)

$$SY_i = SDR_i A_i$$

$A_i$  : producción bruta específica de sedimentos [(T/km<sup>2</sup>)/año]

## Relación de erogación de sedimentos (SDR)

Vanoni (1975):  $SDR_i = 0,47 F_i^{-0,125}$

USDA SCS (1979):  $SDR_i = 0,566 F_i^{-0,11}$

Williams & Berndt (1972):  $SDR_i = 0,627 SLP_i^{0,403}$

$F_i$  : área (km<sup>2</sup>)       $SLP_i$  : pendiente media del curso principal (%)

Las ecuaciones aplicadas en el Sistema Hidrológico del A<sup>0</sup> Ludueña brindan valores similares de SDR variables entorno al 20%-30%.

# Módulo para sedimentación en embalses

## Eficiencia de retención de sedimentos (E)

$$E = 100 - \left[ C_1 \left( \frac{g V^2}{Q^2 L_e} \right)^{-0.2} - C_2 \right] \quad \text{Churchill (1948)}$$

V: volumen del embalse (m<sup>3</sup>),

Q: caudal medio anual (m<sup>3</sup>/s),

L<sub>e</sub>: longitud del embalse (m),

g : aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

C<sub>1</sub>=1602 , C<sub>2</sub>=12 : coeficientes.

$$0 \leq E (\%) \leq 100$$

E=0 % (Sedimentación nula, pasa la totalidad del sedimento que ingresa)

E=100 % (Sedimentación de la totalidad del sedimento ingresante)

# Consolidación de sedimentos

## Densidad global “in situ” de sedimentos

$$\rho_b(t) = \tilde{\rho}_{b1} + \tilde{a} \log t \quad \text{Lane \& Kolzer (1953)}$$

$$\tilde{\rho}_{b1} = \sum_{k=1}^3 \rho_{b1k} f_k \quad \tilde{a} = \sum_{k=1}^3 a_k f_k$$

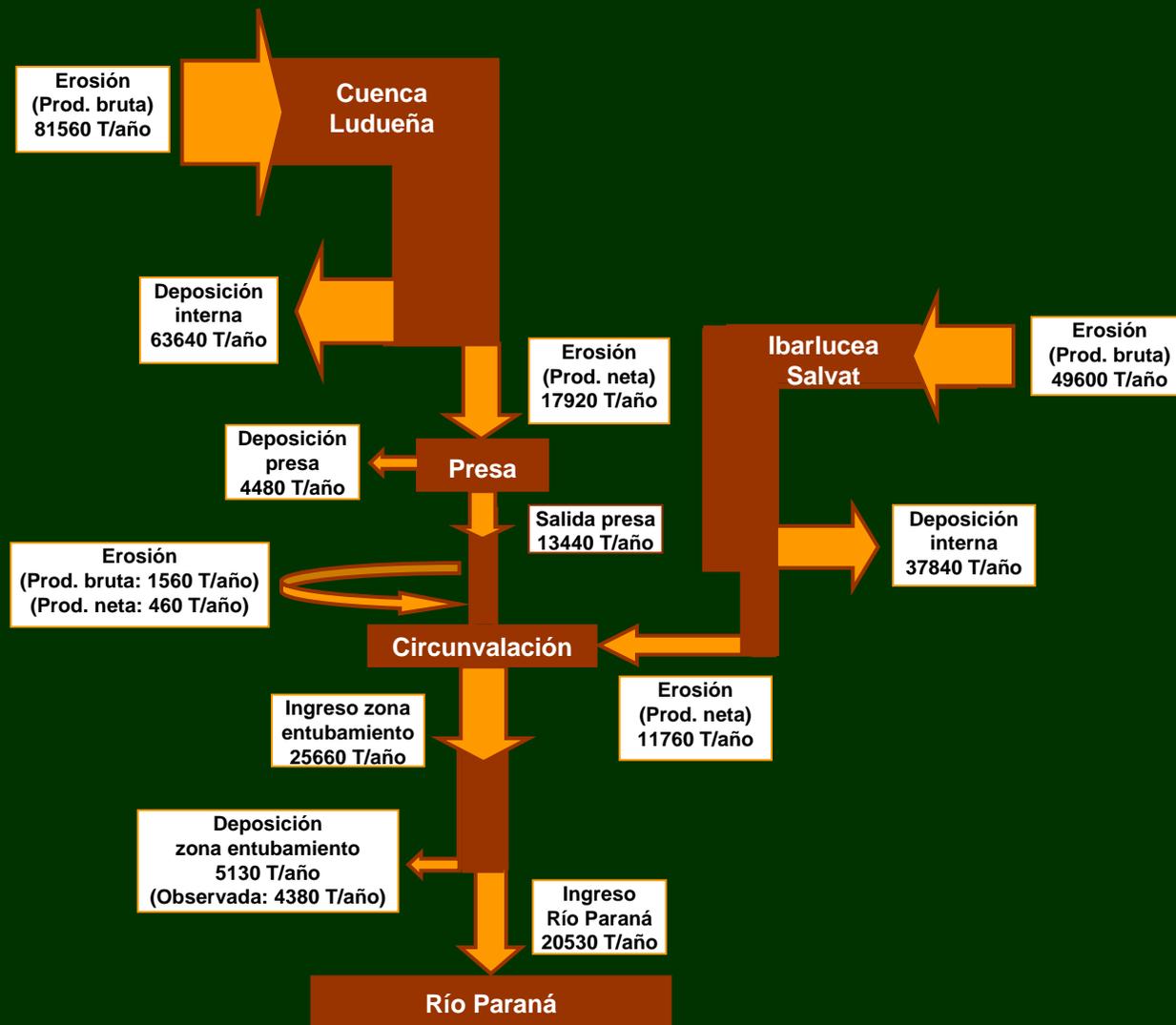
Arena:  $k=1$ ,  $f_1 = \text{SAN} / 100$

Limo :  $k=2$ ,  $f_2 = \text{SIL} / 100$

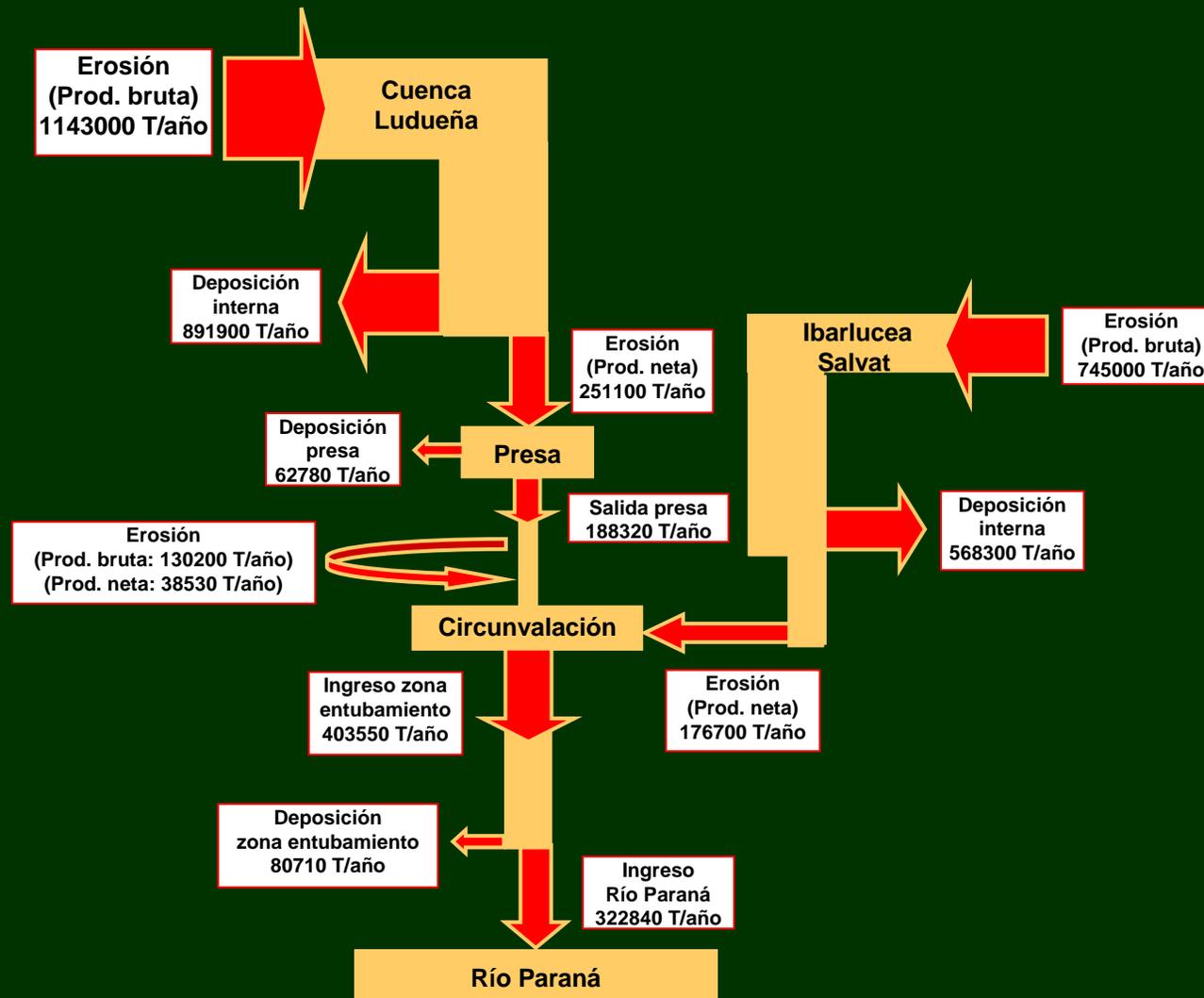
Arcilla:  $k=3$ ,  $f_3 = \text{CLA} / 100$

Densidad inicial ( $t=1$  año)  $\rho_{b1}$  y coeficiente  $a$ : función del tipo de operación del embalse y del tipo de sedimento.

# Balance medio anual de sedimentos en el Sistema Hidrológico del Aº Ludueña considerando erosión real



# Balance medio anual de sedimentos en el Sistema Hidrológico del A° Ludueña considerando erosión potencial



## Síntesis de resultados (erosión real)

### Clasificación de Wischmeier et al. (1978)

# Valores moderados de erosión por subcuenca:  $A < 450$  (T/km<sup>2</sup>/año).  
Tasa de degradación promedio cuenca completa :  $\Delta z_e = 0.032$  mm/año

### Presa

- # Ingreso de sedimentos : 17920 T/año
- # Eficiencia de retención de sedimentos : 25 %
- # Sedimentación estimada: 4480 T/año
- # Pérdida de volumen : 0,35 Hm<sup>3</sup> en 100 años (0.5 % CE)  
(Capacidad embalse: 71 Hm<sup>3</sup> para  $Z = +30$  m IGM).
- # Concentración a la salida : 255 ppm en peso

### Zona entubamiento

- # Ingreso de sedimentos : 25660 T/año
- # Concentración a la entrada : 298 ppm en peso
- # Eficiencia de retención de sedimentos : 20 %
- # Sedimentación estimada: 5130 T/año.
- # Sedimentación observada : 4380 T/año.

### Río Paraná

- # Ingreso de sedimentos : 20530 T/año

## Síntesis de resultados (erosión potencial)

### Clasificación de Wischmeier et al. (1978)

# Valores altos de erosión por subcuenca:  $A > 1120$  (T/km<sup>2</sup>/año).

Tasa de degradación promedio cuenca completa :  $\Delta z_e = 0.503$  mm/año

### Presa

# Ingreso de sedimentos : 251100 T/año

# Eficiencia de retención de sedimentos : 25 %

# Sedimentación estimada: 62780 T/año

# Pérdida de volumen: 4,9 Hm<sup>3</sup> en 100 años (6.9 % CE)  
(Capacidad embalse: 71 Hm<sup>3</sup> para  $Z = +30$  m IGM)

# Concentración a la salida : 3580 ppm en peso

### Zona entubamiento

# Ingreso de sedimentos : 403550 T/año

# Concentración a la entrada : 4690 ppm en peso

# Eficiencia de retención de sedimentos : 20 %

# Sedimentación estimada: 80710 T/año

### Río Paraná

# Ingreso de sedimentos : 322840 T/año

# Modelos de erosión/sedimentación desarrollados – Parte II

---

## CTSS8-SEDMU

**Modelo híbrido**

**Escala temporal evento de crecida**

**Hidrología + Hidráulica :**

**Físicamente basada, espacialmente distribuida (CTSS8)**

**Sedimento :**

**Empírica**

**Espacialmente semi-distribuida**

**Producción neta de sedimentos (MUSLE)**

# Modelos de erosión/sedimentación desarrollados: Parte II (cont.)

---

## CTSS8-SED

**Modelo físicamente basado**

**Escala temporal evento de crecida**

**Hidrología + Hidráulica :**

**Físicamente basada, espacialmente distribuida (CTSS8)**

**Sedimento :**

**Físicamente basada, espacialmente distribuida**

**Producción bruta por impacto de lluvia + flujo overland**

**Transporte de sedimentos + erosión/sedimentación (overland)**

**Tránsito + erosión/sedimentación (flujo encauzado)**

# CTSS8\_SED : Ecuaciones Cuasi-Bidimensionales Gobernantes de la Dinámica Hidro-Sedimentológica

Agua (fase líquida) (Riccardi, 2000)

Ec. de continuidad para la j-ésima celda:

$$A_{sj} \frac{\partial z_j}{\partial t} = (A_s i)_j + \sum_{k=1}^N Q_{j,k}$$

Leyes de intercambio de caudal entre celdas:

- Ley de descarga tipo río cinemática:

$$Q_{j,k} = K_{j,k} S_{b,j,k}^{1/2} \quad K_{j,k} = \frac{1}{n} R_{j,k}^{2/3} A_{tj,k}$$

- Ley de descarga tipo río difusiva:

$$Q_{j,k} = \text{sign} [z_j - z_k] \frac{K_{j,k}}{\sqrt{\Delta x_{j,k}}} \sqrt{|z_j - z_k|}$$

- Otras leyes de descarga tipo río entre celdas:  
Cuasi-Dinámica, Dinámica

- Leyes de descarga entre celdas para vinculaciones especiales (albardones naturales, diques longitudinales, terraplenamientos viales y ferroviarios, etc.):

Fórmulas para vertederos de cresta ancha:

$$Q_{j,k} = \mu_1 b \sqrt{2g} [z_j - z_k]^{3/2} \quad \text{Descarga libre}$$

$$Q_{j,k} = \mu_2 b \sqrt{2g} [z_j - z_w] \sqrt{|z_j - z_k|} \quad \text{Desc. ahogada}$$

- Otras leyes de descarga (vinculaciones especiales):  
Puentes, Alcantarillas, Estaciones de bombeo

# CTSS8\_SED : Ecuaciones Cuasi-Bidimensionales Gobernantes de la Dinámica Hidro-Sedimentológica (continuación)

## Sedimento (fase sólida)

### Procesos de producción bruta, transporte de sedimentos y erosión-sedimentación asociados al flujo sobre el terreno (celdas valle)

#### Tasa de disgregación de suelo debido al impacto de lluvia

$$D_{p_j} = c_{p_j} \alpha i_j^\beta F_{h_j} F_{c_j}$$

Park et al., (1982)

$$F_{h_j} = \begin{cases} \exp \left\{ 1 - (h/d_{50})_j \right\} & \text{si } h_j > d_{50j} \\ 1 & \text{si } h_j \leq d_{50j} \end{cases}$$

Law & Parsons (1943)

$$d_{50j} = 0.0124 i_j^{0.182}$$

$$F_{c_j} = 1 - Rac_j$$

#### Tasa de disgregación de suelo debido al flujo sobre el terreno

$$D_{f_j} = \begin{cases} c_{f_j} \left\{ (\tau_j / \tau_{c_j}) - 1 \right\} & \tau_j > \tau_{c_j} \\ 0 & \tau_j \leq \tau_{c_j} \end{cases}$$

Alberts et al., (1995)

$$\tau_{c_j} = 2.67 + 6.5 f_{\text{clay}_j} - 5.8 f_{\text{vfs}_j} \quad (f_s > 0.3)$$

$$\tau_{c_j} = 3.5 \quad (f_s < 0.3)$$

# CTSS8\_SED : Ecuaciones Cuasi-Bidimensionales Gobernantes de la Dinámica Hidro-Sedimentológica (cont.)

Sedimento (fase sólida) (cont.)

**Procesos de producción bruta, transporte de sedimentos y erosión-sedimentación asociados al flujo sobre el terreno (celdas valle)\_ (cont.)**

**Tránsito de sedimentos en celdas valle :**

**Ec. de continuidad de sedimentos cuasi-2D para la j-ésima celda:**

$$(1-p)A_j \frac{\partial z_{bj}}{\partial t} = \sum_k Q_{s,j,k}$$

**Capacidad de transporte del flujo sobre el terreno (E&H, 1967):**

$$Q_{sc} = \frac{c_t}{n_v^r} \frac{Q^z S^x}{B^y d^w} \quad c_t=0.006, \quad z=1.7, \quad x=1.65, \quad y=0.7, \quad w=1, \quad r=0.3$$

# CTSS8\_SED : Ecuaciones Cuasi-Bidimensionales Gobernantes de la Dinámica Hidro-Sedimentológica (cont.)

## Sedimento (fase sólida) (cont.)

### Procesos de producción bruta, transporte de sedimentos y erosión-sedimentación asociados al flujo sobre el terreno (celdas valle)\_(cont.)

#### Descripción del proceso de resolución :

I) Se calculan las tasas de disgregación por impacto de lluvia  $D_p$  y por flujo sobre el terreno  $D_f$

II) Se calcula la capacidad de transporte  $Q_{sc}$

III) Se resuelve la ecuación de continuidad de sedimentos cuasi-2D y se calcula la erosión (o sedimentación) en términos de variación de volumen de suelo, asumiendo que el transporte que sale de cada celda es a capacidad :

$$\Delta V_{spj} = A_j \Delta z_{pj} = \frac{\Delta t}{(1-p)} \sum_k Q_{sc\ j,k}$$

IV) Se calcula la disponibilidad de sedimento a ser transportado en términos de volumen de suelo  $V^*_{sd}$  :

$$V^*_{sdj} = V^n_{sj} + \Delta V_{sdj} \quad \Delta V_{sdj} = A_j \Delta z_{dj} = A_j \frac{(D_p + D_f)_j}{\gamma_s (1-p)} \Delta t$$

# CTSS8\_SED : Ecuaciones Cuasi-Bidimensionales Gobernantes de la Dinámica Hidro-Sedimentológica (cont.)

Sedimento (fase sólida) (cont.)

**Procesos de producción bruta, transporte de sedimentos y erosión-sedimentación asociados al flujo sobre el terreno (celdas valle)\_ (cont.)**

**Descripción del proceso de resolución\_ (cont.) :**

V) Se realiza una comparación entre  $\Delta V s_p$  y  $\Delta V s_d$ , distinguiendo dos casos :

V.1)  $\Delta V s_p > 0$  (sedimentación) o  $V^* s_d > \Delta V s_p$  ( $Q_s$  no limitado por disponibilidad de sedimentos) :

$$\Delta V_{s_j} = \Delta V_{s_{pj}} \quad (\text{puede representar erosión o sedimentación})$$

$$Q_{s_{j,k}} = Q_{sc_{j,k}}$$

# CTSS8\_SED : Ecuaciones Cuasi-Bidimensionales Gobernantes de la Dinámica Hidro-Sedimentológica (cont.)

## Sedimento (fase sólida) (cont.)

### Procesos de producción bruta, transporte de sedimentos y erosión-sedimentación asociados al flujo sobre el terreno (celdas valle)\_ (cont.)

#### Descripción del proceso de resolución\_ (cont.) :

V.2)  $(V_{sd} + \Delta V_{sd}) < \Delta V_{sp}$  ( $Q_s$  limitado por la disponibilidad de sedimentos) :

$$\Delta V_{sj} = (V_{sd} + \Delta V_{sd})_j \quad (\text{erosión de todo el sedimento disponible})$$

Los caudales sólidos efectivos se determinan proporcionalmente a las capacidades de transporte originales. De la ec. de continuidad de sedimentos:

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_{spj} &= \frac{\Delta t}{(1-p)} \sum_k Q_{sc\ j,k} \\ V_{sdj} + \Delta V_{sdj} &= \frac{\Delta t}{(1-p)} \sum_k Q_{s\ j,k} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\Delta V_{spj}}{V_{sdj} + \Delta V_{sdj}} = \frac{\sum_k Q_{sc\ j,k}}{\sum_k Q_{s\ j,k}} \downarrow$$

$$\sum_k Q_{s\ j,k} = \frac{V_{sdj} + \Delta V_{sdj}}{\Delta V_{spj}} \sum_k Q_{sc\ j,k}$$

# CTSS8\_SED : Ecuaciones Cuasi-Bidimensionales Gobernantes de la Dinámica Hidro-Sedimentológica (cont.)

Sedimento (fase sólida) (cont.)

**Procesos de producción bruta, transporte de sedimentos y erosión-sedimentación asociados al flujo sobre el terreno (celdas valle)\_ (cont.)**

**Descripción del proceso de resolución\_ (cont.) :**

V.2)  $(V_{s_d} + \Delta V_{s_d}) < \Delta V_{s_p}$  ( $Q_s$  limitado por la disponibilidad de sedimentos)\_ (cont.):

$$\sum_k Q_{s,j,k} = \frac{V_{sdj} + \Delta V_{sdj}}{\Delta V_{spj}} \sum_k Q_{sc,j,k}$$

$R_{Vs}$

$$Q_{s,j,1} = R_{Vs} Q_{sc,j,1}$$

$$Q_{s,j,2} = R_{Vs} Q_{sc,j,2}$$

$$Q_{s,j,3} = R_{Vs} Q_{sc,j,3}$$

$$Q_{s,j,4} = R_{Vs} Q_{sc,j,4}$$

# CTSS8\_SED : Ecuaciones Cuasi-Bidimensionales Gobernantes de la Dinámica Hidro-Sedimentológica (cont.)

## Sedimento (fase sólida) (cont.)

### Tránsito de sedimentos y erosión-sedimentación asociados al flujo encauzado (celdas río)

Ec. de continuidad de sedimentos para la j-ésima celda río:

$$\frac{\partial V_{sj}}{\partial t} + \sum_k Q_{sr\ j,k} + A_j \phi_{sj} = \sum_k Q_{sv\ j,k} \longrightarrow Q_{sr\ j,k}$$

$$V_s = A_j h C_s$$

Flujo vertical de sedimentos del lecho :  $\phi_{sj} = \begin{cases} \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}\right) w_s C_s & \tau_b < \tau_{cd} \\ 0 & \tau_{cd} \leq \tau_b \leq \tau_{ce} \\ M \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1\right) & \tau_b > \tau_{ce} \end{cases}$

Ley de Stokes,  $d < 0.1$  mm:

$$w_s = \frac{1}{18} \frac{(s-1)g d^2}{\nu}$$

Sedimentación impedida ( $C_s > 3 - 10$  kg/m<sup>3</sup>):

$$w_{sm} = w_s (1 - C_s)^\alpha \quad \text{Richardson et al. (1954)}$$

$$2.39 < \alpha < 4.65$$

# CTSS8\_SED : Ecuaciones Cuasi-Bidimensionales Gobernantes de la Dinámica Hidro-Sedimentológica (cont.)

---

Sedimento (fase sólida) (cont.)

**Tránsito de sedimentos y erosión-sedimentación asociados al flujo encauzado (celdas río) \_ cont.**

**Variación de la cota del fondo (Erosión / Sedimentación) :**

$$\Delta z_{bj} = \frac{\Delta t}{(1-p)} \phi_{sj}$$

**Cota del fondo acumulada:**

$$z_{bj \text{ acum}} = z_{bj} + \Delta z_{bj}$$

# Aplicación del modelo CTSS8\_SED

## Cuenca Aº Ludueña: Evento del 3-4-94

Precipitación total media en el cuenca : 155 mm

Precipitación neta : 106 mm

Caudal pico observado en Av. Circunvalación : 200 m<sup>3</sup>/s

### Coeficientes de rugosidad de Manning :

Celdas valle : 0.10 – 0.15 s/m<sup>1/3</sup>

Celdas cursos secundarios : 0.040 – 0.060 s/m<sup>1/3</sup>

Celdas cursos principales : 0.035 – 0.050 s/m<sup>1/3</sup>

Coeficientes de gasto en puentes y alcantarillas : 0.6 – 0.9

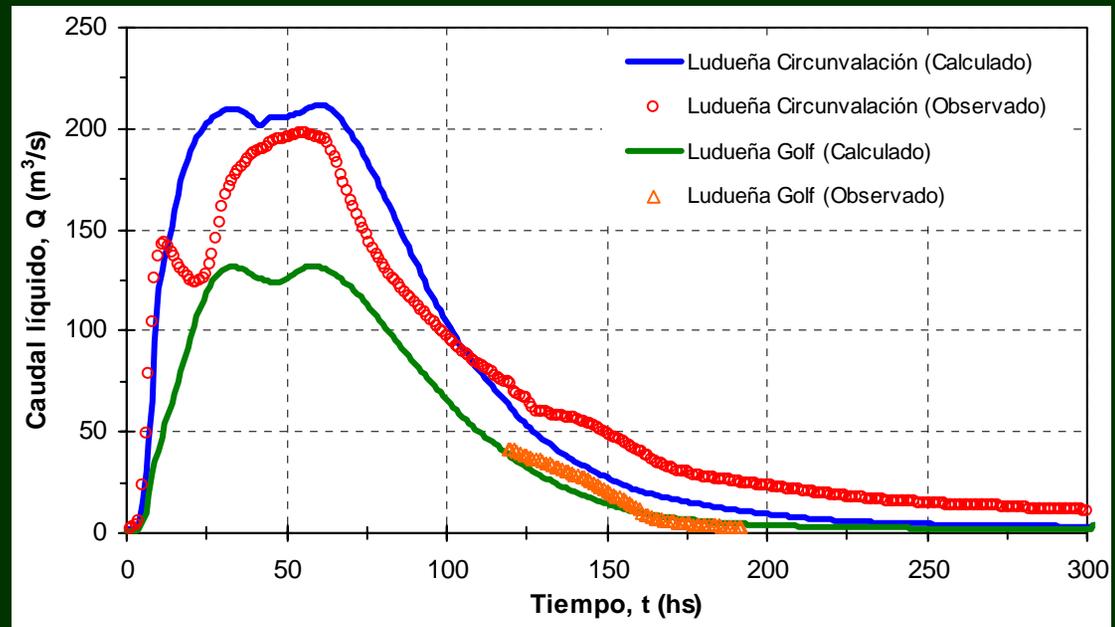
Coef. de erosionabilidad por impacto : 16 (kg m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>)<sup>-1</sup> (Meyer et al., 1984)

Coef. de erosionabilidad por overland : 0.15×10<sup>-6</sup> kg s<sup>-1</sup>m<sup>2</sup> (Wicks et al., 1996)

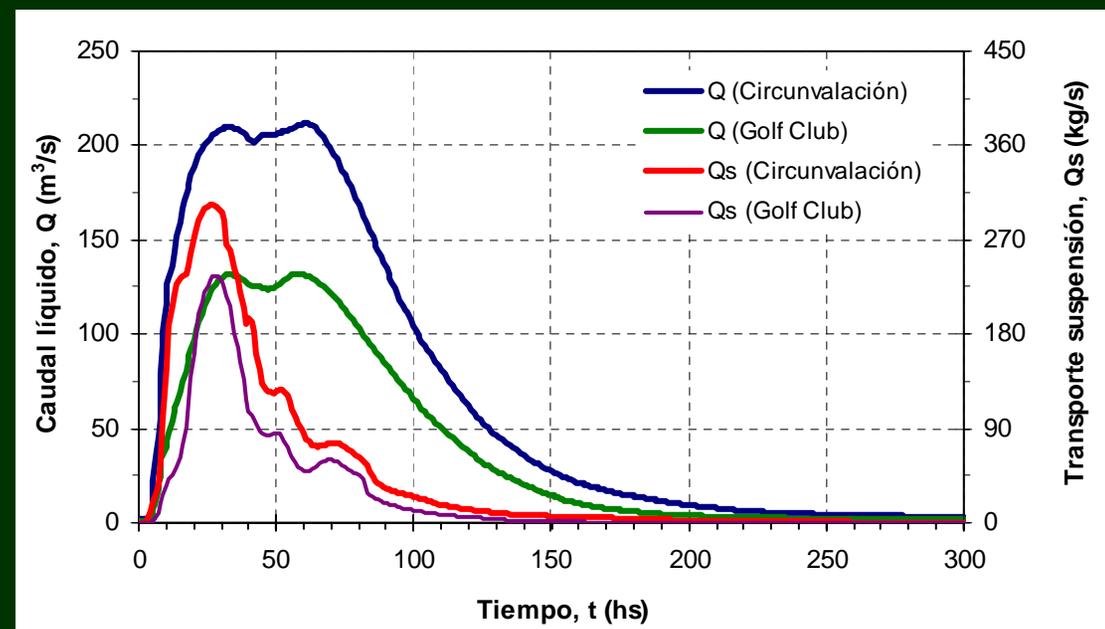
Coef. ec. de Engelund-Hansen :  $\alpha = 0.002$ ,  $z=1.7$ ,  $x=1.65$ ,  $y=0.7$ ,  $w=1$ ,  $r=0.3$

# Hidrogramas y Sedimentogramas. Cuenca A° Ludueña. Evento 3-4-94

Hidrogramas calculados y observados (Circunvalación y Golf Club)



Hidrogramas y Sedimentogramas calculados (Circunvalación y Golf Club)



## Síntesis de resultados de la aplicación del CTSS8-SED

### Aº Ludueña (Circunvalación) :

Producción bruta (impacto + overland) = 207474 T

Sedimentos transportados = 49410 T

Re-deposición interna = 158064 T

SDR = 0.24

Degradación específica = 71 T/km<sup>2</sup>

$\Delta z_e = 0.053$  mm

### Aº Ludueña (Golf Club) :

Sedimentos transportados = 29402 T

### Sistema Ibarlucea-Salvat :

Sedimentos transportados = 20008 T

## Conclusiones

---

- Se han efectuado desarrollos propios y posteriormente aplicado en la cuenca del A<sup>0</sup> Ludueña modelos de erosión/sedimentación de tipo empírico, híbrido y físicamente basado.
- Los modelos desarrollados tienen en cuenta las particularidades de sistemas hidrológicos de llanura de nuestra región, en lo que respecta a la dinámica hídrica y a los procesos sedimentológicos relevantes.
- Mediante la aplicación del modelo EROSUP-U se ha estimado la producción bruta y la producción neta de sedimentos media anual a largo plazo en el Sistema Hidrológico del A<sup>0</sup> Ludueña, considerando tanto el proceso de erosión real como la erosión potencial en el sistema.
- Se han realizado los balances de sedimentos para ambas situaciones, los cuales han permitido establecer el orden de magnitud relativo de los procesos de sedimentación a largo plazo que experimenta la presa de retención de crecidas y el entubamiento del A<sup>0</sup> Ludueña en la ciudad de Rosario.
- En los dos escenarios simulados (erosión real y potencial) la capacidad de almacenamiento de la presa de retención de crecidas no se ve sustancialmente afectada por el proceso de sedimentación a largo plazo (horizonte 100 años).

## Conclusiones (cont.)

---

- El sistema de conductos sufre un severo proceso de sedimentación, razón por la cual deberían adoptarse medidas para la gestión y control de sedimentos en el área.
- La sedimentación en el sistema de conductos disminuye la eficiencia de funcionamiento para descargar caudales durante crecidas y agrava el problema de inundaciones aguas arriba.
- En función de los aportes sólidos estimados, eventuales tareas de limpieza del sistema de conductos (incluyendo platea y tramo entre desembocadura entubamiento y desembocadura en río Paraná) podrían tener una permanencia estimada de aproximadamente 7 años.
- Los resultados obtenidos con el modelo físicamente basado CTSS8\_SED son muy satisfactorios y alentadores. El modelo desarrollado constituye una herramienta de cálculo apropiada para nuestra región y permite simular procesos de erosión/sedimentación espacialmente distribuidos en la cuenca, ante diferentes escenarios hidrológicos y estados del complejo suelo-vegetación.

**Santa Fe**

**Paraná**

**Río Uruguay**

**Rosario**

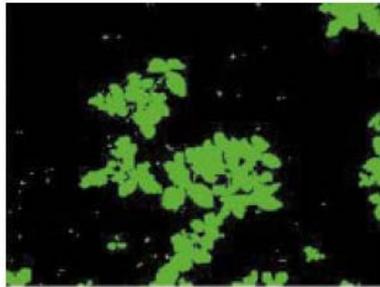
**Río Paraná**

**Muchas Gracias !!**

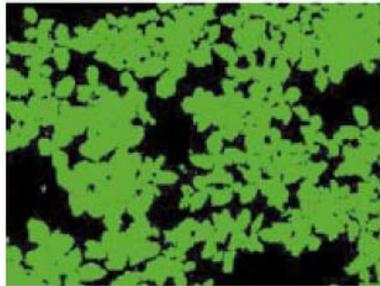
**Buenos Aires**

**Río de la Plata**

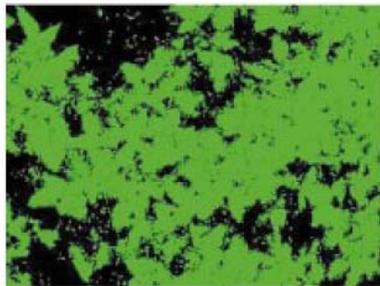




0.13



0.49

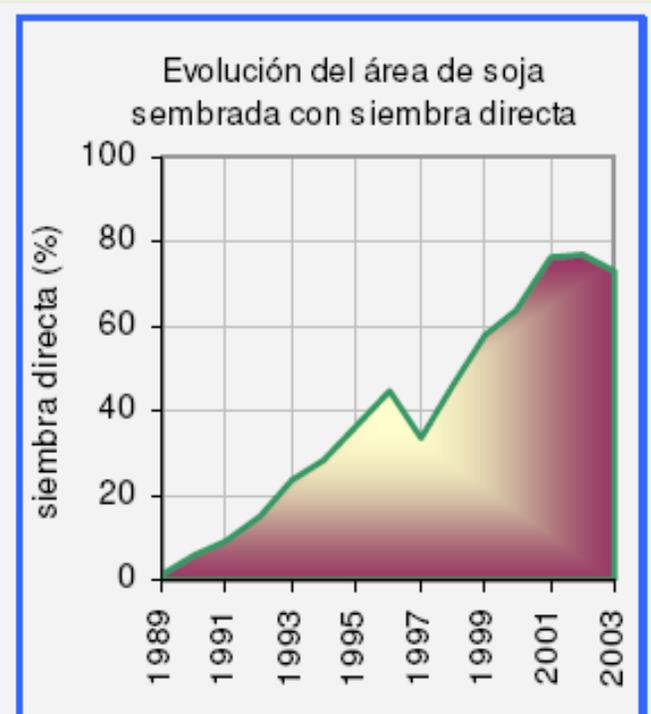
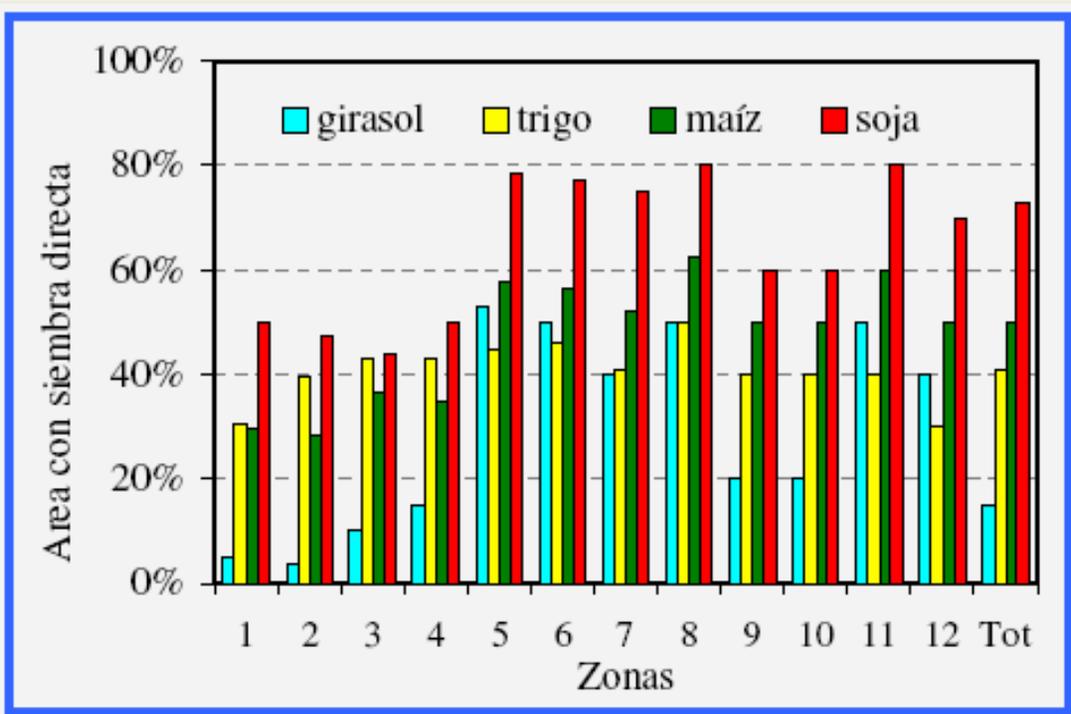


0.65



0.93





**Figura 2.5:** Proporción de área cultivada bajo labranza cero durante la campaña 2001/2002 (izquierda), y evolución de siembra directa en el cultivo de soja (derecha).