

EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL TRAMO MEDIO DEL RÍO PARANÁ

Juan J. ALARCÓN⁽¹⁾, Ricardo SZUPIANY^(1,2), María D. MONTAGNINI⁽¹⁾,
Horacio GAUDIN^(1,2), Héctor H. PRENDES⁽¹⁾ y Mario L. AMSLER^(1,2)

⁽¹⁾ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral
C.C. 217, Santa Fe, Argentina. Fax: (54) (342) 4575224.

E-mail: mamsler@fich1.unl.edu.ar, hprendes@fich1.unl.edu.ar

⁽²⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.

Resumen

Utilizando información observada de concentraciones de carga de lavado y caudales líquidos en estaciones de aforo de los ríos que aportan los caudales sólidos de este tipo de sedimentos al tramo medio del río Paraná, se determinaron los transportes anuales entre los años 1991 y 1998. Se cuantificó la conocida importancia del río Bermejo en la magnitud de la carga de lavado que transporta el Paraná Medio y se logró información acerca de los volúmenes que quedarían retenidos en la llanura aluvial entre Confluencia y la sección del Túnel Subfluvial. Con fórmulas específicamente calibradas para el cálculo del transporte de fondo, se lograron establecer las magnitudes anuales de este tipo de transporte en un tramo aguas arriba de esta última sección. La suma de ambas cargas sedimentarias permitió conocer la cantidad de sedimentos total que transportó el río Paraná durante la última década del siglo pasado. Se brinda una descripción detallada de las metodologías utilizadas para el cálculo y se discuten los alcances de esos cálculos.

Abstract

Considering observed data of wash load concentrations and streamflows at gauge stations located in tributaries that supply this type of solid discharges at the Middle Paraná River reach, the annual transports of wash load between 1991 and 1998 were determined. The well known importance of the Bermejo River influence on the wash load amounts of the Paraná River was quantified. Information about the volumes of this type of sediment caught in the alluvial plain between Confluencia and the Túnel Subfluvial cross section was also obtained. By means of specifically calibrated bed material loads formulas, the annual transports of the bottom material were computed at a reach upstream of the Tunnel section. By adding the wash load to total bed material load, the total sediment transport of the Paraná River during the last decade of the 20th Century, was possible to know. A detailed description of the methodologies used in the computations and remarks about the results validity extent, are given

INTRODUCCIÓN

El sedimento transportado por el río Paraná es la materia prima con que la corriente modela el paisaje fluvial, tan variado y dinámico, que caracteriza a su tramo medio e inferior. Paradójicamente, si bien la magnitud anual del caudal sólido del río Paraná en su tramo medio ha sido estimada por diversos autores desde hace tiempo (Soldano, 1947; Cotta, 1963; Depetris y Griffin, 1968), hasta la primera mitad de los '90 no había estudios publicados basados en mediciones sistemáticas confiables y que brindaran demasiadas especificaciones en relación con los métodos usados para evaluarla y el tipo de sedimento transportado (carga de lavado, carga de fondo, de fondo en suspensión, carga total). Además, los diversos autores que se ocuparon de la materia, sólo realizaron estimaciones con series de datos aislados y de corta duración a lo ancho de una sección transversal y para distintos estados hidrométricos. Desde 1970 hasta el presente ha crecido la cantidad y calidad de la información disponible, como para realizar o efectuar este tipo de cuantificación con un grado de confiabilidad y precisión mayores que los conocidos hasta ese momento. Sin embargo, en las publicaciones disponibles posteriores (revistas especializadas, congresos, libros) no se presentan resultados en el sentido indicado, aunque se ha avanzado en el conocimiento respectivo (Drago y Amsler, 1988; Amsler y Prendes, 2000; Amsler y Drago, 2003, entre otros).

En esta contribución, se brinda una evaluación detallada del transporte total de sedimentos en el tramo medio del río Paraná, discriminando entre la fracción fina (carga de lavado, que constituye la mayor parte del sedimento transportado por la mayoría de las corrientes aluviales) y el material proveniente del fondo del cauce (carga de fondo y de fondo en suspensión). Se han utilizado, para la fracción fina, datos medidos de concentraciones y caudales entre 1990 y 1999 en los principales tributarios del tramo medio (río Bermejo, Alto Paraná y Paraguay). Los resultados muestran claramente la conocida influencia que presenta el río Bermejo sobre el material fino en el tramo medio del río Paraná. Se plantea luego una discusión sobre el balance entre la carga de lavado que ingresa al tramo medio y la que se mide inmediatamente aguas arriba de la ciudad de Paraná.

Las evaluaciones del sedimento de fondo se efectúan en un tramo situado entre la localidad de Villa Urquiza y el Túnel Subfluvial Hernandarias, utilizando fórmulas calibradas en la FICH para el Río Paraná en base a datos observados de este tipo de material.

Los resultados sobre este particular permitieron conocer no sólo las magnitudes anuales de transporte de material de fondo, sino también las relaciones entre los distintos modos en que se transporta este tipo de sedimento.

Finalmente, la consideración conjunta de carga de lavado y transporte de fondo permitió determinar los montos anuales del total de sedimento transportado por el río Paraná.

ASPECTOS METODOLÓGICOS.

Carga de lavado.

Se dispuso de información hidrométrica, de caudales líquidos y sólidos en cuatro secciones de aforo (Figura 1). Son las siguientes:

- a. Puerto Pilcomayo**, ubicada sobre el río Paraguay 376 km aguas arriba de su desembocadura en el río Paraná.
- b. El Colorado**, situada en el río Bermejo, 150 km aguas arriba de su desembocadura en el río Paraguay y 210 km aguas arriba de la confluencia entre los ríos Paraguay y Paraná.
- c. Itatí**, localizada sobre el río Alto Paraná, 40 km aguas arriba de la confluencia con el río Paraguay y 180 km aguas abajo del embalse de Yacyretá.
- d. Túnel Subfluvial “Uranga-Silvestre Begnis”**, en el tramo medio del río Paraná sobre el eje del Túnel interprovincial que une las ciudades de Santa Fe y Paraná, en el km 601 de la ruta de navegación fluviomarítima.

En todas estas secciones, la información disponible consistió en alturas hidrométricas diarias para toda una década (01-01-1990 a 31-12-1999), y caudales líquidos y sólidos en suspensión, para distintas fechas de medición (Tabla 1). Los aforos sólidos proporcionaron valores de concentraciones medias en las secciones, tanto de carga de lavado como de material de fondo en suspensión. El diámetro de separación entre ambos fue de 62,5 μm .



Figura 1.- Ubicación del tramo en estudio y secciones de aforo.

Tabla 1.- Características de la información disponible en las secciones de aforo consideradas.

| Río | Sección | Aforos líquidos | | Aforos sólidos | |
|--------------|--|--|------------------|--|------------------|
| | | Fechas extremas de los registros disponibles | Número de aforos | Fechas extremas de los registros disponibles | Número de aforos |
| Paraguay | Puerto Pilcomayo | 16-06-1993 a 26-02-1999 | 51 | 30-09-1993 a 26-02-1999 | 50 |
| Bermejo | El Colorado | 23-01-1990 a 06-01-1999 | 101 | 03-11-1993 a 06-01-1999 | 43 |
| Alto Paraná | Iratí | 01-06-1990 a 13-01-1999 | 45 | 24-11-1993 a 13-01-1999 | 43 |
| Paraná Medio | Túnel Subfluvial "Uranga-Silvestre Begnis" | 27-09-1993 a 03-03-1999 | 54 | 27-09-1993 a 03-03-1999 | 54 |

En cada sección se ajustaron las curvas de descarga que se presentan en Tabla 2, utilizando la totalidad de la información disponible de alturas hidrométricas y caudales.

Tabla 2.- Curvas de descarga ajustadas en las secciones de aforo consideradas.

| Río | Sección | Expresión curva h-Q | R ² |
|--------------|------------------|---|----------------|
| Paraguay | Puerto Pilcomayo | $Q = 50,466 H^2 + 544,25 H + 881,27$ | 0,95 |
| Bermejo | El Colorado | $Q = - 6,933 H^3 + 121,59 H^2 - 345,58 H + 321,29$ | 0,99 |
| Alto Paraná | Iratí | $Q = 319,34 H^2 + 179,45 H + 8334,4$ | 0,95 |
| Paraná Medio | Túnel | ⁽¹⁾ $Q = 124,4 H^3 - 1196,4 H^2 + 6540,2 H + 2117,9$ | |

donde:

H Lecturas hidrométricas en cada una de las secciones, en [m];

Q Caudales aforados, en [m³/s].

⁽¹⁾ Curva ajustada por la ex-Empresa Agua y Energía Eléctrica, utilizando todos los aforos disponibles en la sección del Túnel.

Para todas las secciones de aforo, los valores de concentraciones medias medidas de carga de lavado (C_w) fueron transformados a caudales sólidos diarios (G_w), expresados en [ton/día]. Luego, éstos se representaron en función de los caudales líquidos correspondientes, con el fin de analizar la posibilidad de obtener una curva de descarga sólida G_w -Q en cada sección. En general, salvo en el caso del río Bermejo, los resultados (que se sintetizan en Tabla 3), reflejan la conocida falta de correspondencia entre la carga de lavado y los caudales del escurrimiento. A continuación se detalla el procedimiento seguido en el caso particular de cada sección.

- a. **Puerto Pilcomayo** (río Paraguay): los resultados no fueron estadísticamente consistentes, ya que el valor del coeficiente de determinación entre ambas variables ($G_w - Q$) fue muy bajo. Debido a ello, para llevar a cabo los cálculos correspondientes se decidió, a partir del análisis de la dispersión de puntos, considerar dos valores de concentración media de carga de lavado en la sección para toda la serie de tiempo, según los caudales líquidos producidos.
- b. **El Colorado** (río Bermejo): se descartaron los aforos del año 1990, por carecer de mediciones en los meses de marzo y abril (período de máximos aportes de carga de finos). Fue el único caso en que ambas variables (G_w y Q) se correlacionaron a la manera clásica con buenos ajustes de curvas potenciales. Los excelentes valores de R² serían un índice de la rápida respuesta de la alta cuenca del Bermejo a las lluvias de primavera-verano, que

originan las extraordinarias cantidades de material fino que transporta este río. Los puntos representativos de los aforos utilizados se agruparon siguiendo claramente dos tendencias, por lo que se ajustaron dos curvas diferentes para cada una de ellas. El punto de quiebre entre ambas tendencias se produce para un caudal de aproximadamente 380 m³/s. Esta diferencia en el comportamiento, cuando que G_w y Q aumentan, es también informada en la literatura (Piest & Miller, 1975). En efecto, a medida que los caudales líquidos y sólidos se incrementan la pendiente de la curva potencial de ajuste disminuye, aproximándose a 1 en coordenadas log-log (Figura 2).

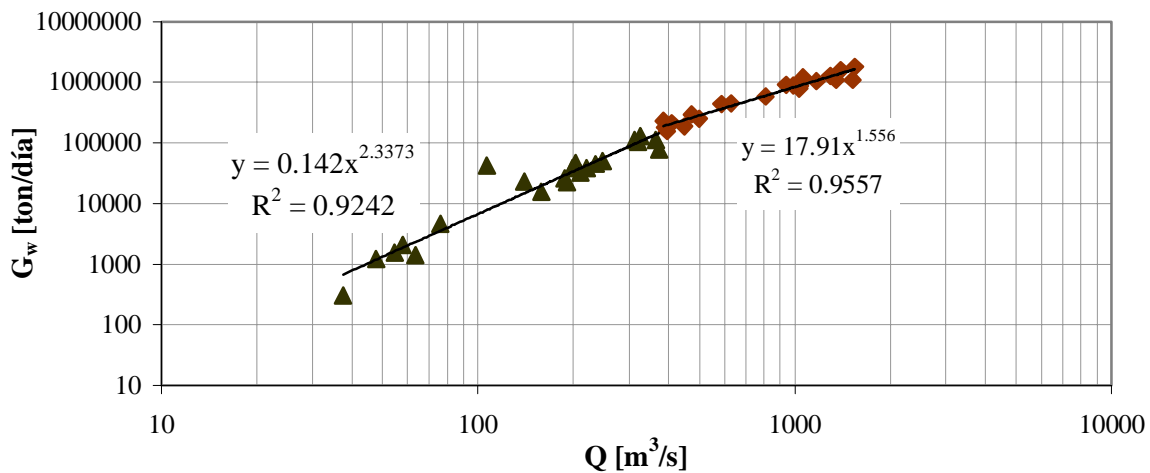


Figura 2.- Relación entre transporte de carga de lavado y caudal en la estación El Colorado (río Bermejo).

- c. Itatí (Alto Paraná):** se presentó aquí también la dificultad de lograr una buena correlación entre los pares de valores G_w-Q, dada la elevada dispersión de los puntos. Se buscó, entonces, el ajuste mediante dos criterios distintos: separando los registros disponibles en períodos que mostraran ciertas tendencias en los datos, y ajustando una única curva a la totalidad de los registros. En ambos casos los caudales sólidos resultantes no mostraron diferencias significativas, por lo que se optó por trabajar con la expresión obtenida a partir del total de aforos.
- d. Túnel Subfluvial (Paraná Medio):** en el tramo medio del río Paraná, las máximas concentraciones de carga de lavado originadas por los aportes del río Bermejo habitualmente están desfasadas (se registran con un cierto retardo) con respecto a los máximos caudales líquidos provenientes del Alto Paraná (Drago y Amsler, 1988). Este hecho impide una buena correlación entre ambas variables, a menos que se tenga en cuenta de algún modo el retardo mencionado durante el período de mayores suministros de ese tipo de sedimento. Para ello, se aplicó el siguiente razonamiento: dada la incidencia de los caudales sólidos del Bermejo en los del Paraná Medio (en este caso en la sección del Túnel) con las características señaladas, la carga de lavado en esta última sección, registrada en un cierto tiempo t del período de máximos aportes, es posible aproximarla mediante una función del siguiente tipo:

$$G_{wT_t} = \bar{C}_{wT_t} Q_{T_t} = \varphi_{Cw} [G_{wB_{t-\Delta t}}] \quad (1)$$

donde:

G_{wT_t} Carga de lavado en la sección del Túnel registrada en un tiempo t.

\bar{C}_{wT_t} Concentración media de carga de lavado en la sección del Túnel registrada en

| | |
|-----------------------|---|
| | un tiempo t. |
| Q_{T_t} | Caudal líquido correspondiente a \bar{C}_{wT_t} |
| $G_{wB_{t-\Delta t}}$ | Carga de lavado registrada en el río Bermejo (sección El Colorado) en el tiempo t- Δt responsable de G_{wT_t} |

En Tabla 3, se advierte que G_{wB} es una cierta función ($R^2 > 0,9$) de Q_B , es decir del caudal del Bermejo en El Colorado. Luego, (1) se puede expresar:

$$\bar{C}_{wT_t} Q_{T_t} = \phi'_{Cw} [Q_{B_{t-\Delta t}}] \quad (2)$$

y finalmente:

$$\bar{C}_{wT_t} = \phi''_{Cw} \left[\frac{Q_{B_{t-\Delta t}}}{Q_{T_t}} \right] \quad (3)$$

siendo:

ϕ_{Cw} , ϕ'_{Cw} , ϕ''_{Cw} símbolos de función.

Para definir la función ϕ''_{Cw} en la expresión (3) se seleccionaron del conjunto de aforos sólidos disponibles en el Túnel aquellos realizados durante los períodos de máximos aportes de carga de lavado, que correspondieron a los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo de los años 1994 a 1997, noviembre de los años 1994 y 1997, febrero y marzo de 1998 y enero de 1999. Resultó un conjunto de 24 pares de valores de Q_T y \bar{C}_{wT} .

Por otra parte, con la serie completa de alturas hidrométricas registradas en El Colorado, utilizando la curva H-Q de aquella sección (Tabla 2), se determinaron los caudales líquidos en el río Bermejo correspondientes a las mismas fechas de los 24 aforos disponibles en el Túnel, y a los 20 días previos a cada uno de ellos.

Se calculó luego la relación $Q_{B_{t-\Delta t}}/Q_{T_t}$ con Δt variando entre 6 días y 20 días, respecto de las fechas de aforos líquidos y sólidos disponibles en el Túnel. Los valores resultantes para cada Δt se correlacionaron con las \bar{C}_{wT} registradas en las fechas de los aforos en el Túnel. De los 15 ajustes realizados, el que mayor R^2 produjo correspondió a un Δt (retardo) de 10 días. La expresión obtenida para esta situación se presenta en Tabla 3 y Figura 3.

Para los 30 aforos realizados en los meses restantes (períodos de aportes mínimos), la gráfica de dispersión de valores de concentraciones medias medidas de carga de lavado en el Túnel en función de los caudales líquidos demostró, al igual que en el río Paraguay, que se puede adoptar un valor medio de concentración representativo de la misma (Tabla 3).

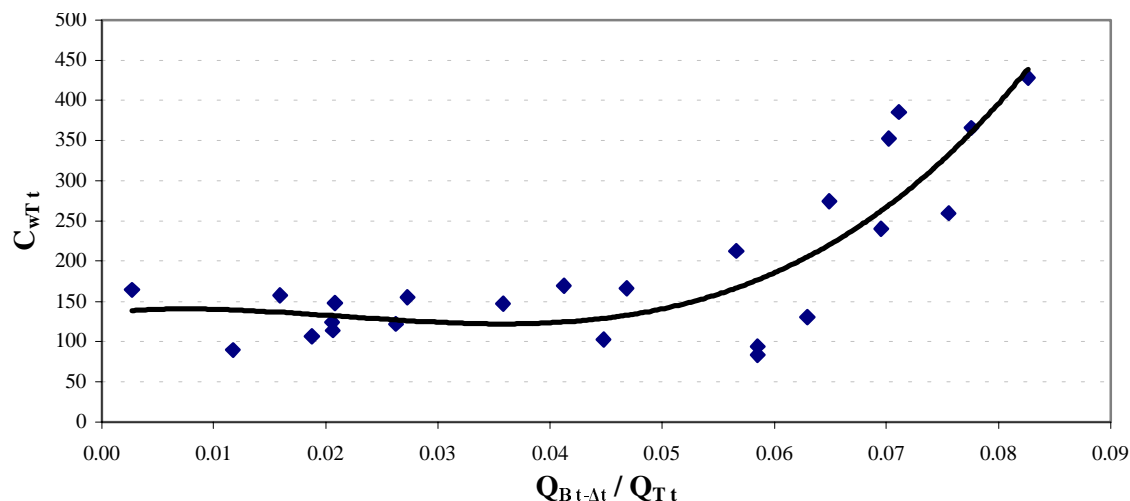


Figura 3.- Ajuste de la relación de C_{wTt} y la relación de caudales en El Colorado y en el Túnel, para $\Delta t = 10$ días.

Tabla 3.- Expresiones para determinar \bar{C}_w (G_w) en cada una de las secciones de aforo consideradas en este estudio.

| Río | Sección | Expresión | | R^2 |
|--------------|------------------|---|--|--------|
| Paraguay | Puerto Pilcomayo | Para $Q \leq 5500 \text{ m}^3/\text{s}$ | $\bar{C}_w = 44,4 \text{ mg/l}$ | -- |
| | | Para $Q > 5500 \text{ m}^3/\text{s}$ | $\bar{C}_w = 23,1 \text{ mg/l}$ | -- |
| Bermejo | El Colorado | Para $Q < 380 \text{ m}^3/\text{s}$ | $G_w = 0,142 Q^{2,3373}$ | 0,9242 |
| | | Para $Q > 380 \text{ m}^3/\text{s}$ | $G_w = 17,91 Q^{1,556}$ | 0,9557 |
| Alto Paraná | Itatí | $G_w = 6E-05 Q^2 - 1,6329 Q + 22506$ | | 0,5665 |
| Paraná Medio | Túnel | Período de máximos aportes | $C_{wTt} = 2E+06 (Q_{Bt-\Delta t} / Q_{Tt})^3 - 104987 (Q_{Bt-\Delta t} / Q_{Tt})^2 + 1304,1 (Q_{Bt-\Delta t} / Q_{Tt}) + 135,76$ $G_{wTt} = 0,0864 C_{wTt} Q_{Tt}$ | 0,7467 |
| | | Período de mínimos aportes | $\bar{C}_w = 79,6 \text{ mg/l}$ | -- |

Finalmente, con los procedimientos que se brindan en Tabla 3, en conjunto con las series de alturas hidrométricas diarias y las curvas de descarga de Tabla 2, se determinaron los transportes de carga de lavado diarios y anuales en cada sección de aforo.

Transporte de material de fondo.

La experiencia ganada en la FICH en sus estudios en el tramo medio del río Paraná, permitieron verificar que con las fórmulas de Engelund-Fredsøe (1976) y Engelund-Hansen (1967), es posible lograr una predicción confiable en este río de la carga de fondo, G_{sf} , y del transporte total de material de fondo, G_s , respectivamente (Amsler y Prendes, 2000).

En particular, con referencia a la fórmula de Engelund-Hansen, se presenta una verificación adicional de su aptitud aplicada en la sección del Túnel, aprovechando la información de caudales sólidos de arena en suspensión, G_{ss} , disponibles en ese lugar. Los datos hidráulicos

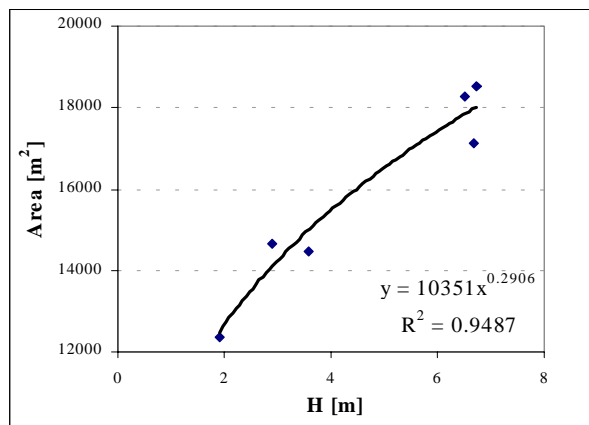
y sedimentológicos necesarios para el cálculo fueron obtenidos de mediciones realizadas por la FICH y otras instituciones durante la década del '90, en la sección del Túnel. El valor de la tensión de corte adimensional total, τ_* , se determinó mediante la expresión que la vincula con τ_*' , propuesta por Engelund (1967). Cabe destacar que Pujol et al (1985) verificaron la aplicabilidad de esta expresión en el río Paraná para predecir sus caudales líquidos. La tensión de corte adimensional debida al grano, τ_*' , por su parte, fue calculada utilizando el método de Van Rijn (1984). En Tabla 4 se brinda la información pertinente y los resultados del cálculo de G_s , y en Figura 4 se superpone la curva calculada a la ajustada con los datos observados de G_{ss} . Obsérvese que Engelund-Hansen sigue correctamente la tendencia de la curva observada y se ubica ligeramente por encima de ésta, lo cual es lógico ya que la fórmula además de G_{ss} , tiene en cuenta G_{sf} y la arena en suspensión de la "zona no medida" por el muestreador cercana al fondo. El grado de apartamiento entre ambas curvas también es lógico si se tienen en cuenta las proporciones de G_{ss} y G_{sf} en G_s , que se presentan en Tabla 6.

Tabla 4.- Cálculo de transporte total de material de fondo en la sección del Túnel, aplicando Engelund-Hansen.

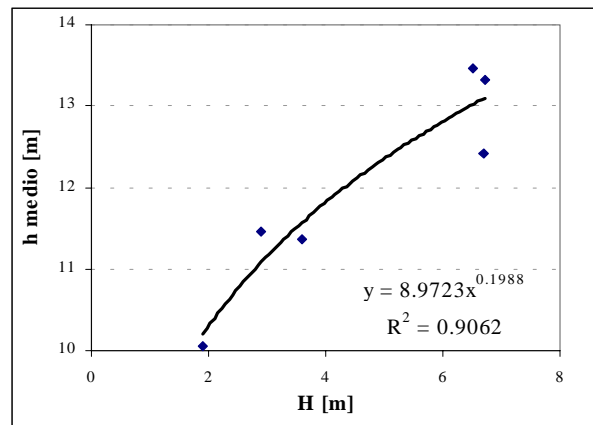
$d_s = 0,0004 \text{ m}$

| Valores medidos | | | | | Valores calculados | | | | | | | | | |
|-----------------|------|-------------------|------|-----------|--------------------|------------------------|---------------------|-------------|-------|--------|-----------|----------|----------|-----------|
| Fecha | H | Área | B | \bar{h} | Area (Curva 1) | \bar{h} (Curva 2) | Q_c | \bar{U}_c | C' | u_*' | τ_*' | τ_* | g_s | G_s |
| | [m] | [m ²] | [m] | [m] | [m ²] | [m] | [m ³ /s] | [m/s] | | | | | [kg/m s] | [ton/día] |
| 08-08-96 | 1,91 | 12379 | 1230 | 10,1 | 12492 | 10,2 | 11111 | 0,9 | 90,16 | 0,031 | 0,148 | 0,505 | 0,1869 | 19 857 |
| 09-09-97 | 3,58 | 14483 | 1275 | 11,4 | 14994 | 11,6 | 15906 | 1,1 | 91,13 | 0,036 | 0,205 | 0,672 | 0,4086 | 45 015 |
| 15-05-98 | 6,72 | 18528 | 1391 | 13,3 | 18005 | 13,1 | 29791 | 1,7 | 92,11 | 0,056 | 0,489 | 1,309 | 2,6995 | 324 435 |
| 17-05-98 | 6,68 | 17141 | 1380 | 12,4 | 17974 | 13,1 | 29501 | 1,6 | 92,10 | 0,056 | 0,481 | 1,294 | 2,6106 | 311 272 |
| 20-05-98 | 6,50 | 18256 | 1355 | 13,5 | 17832 | 13,0 | 28244 | 1,6 | 92,06 | 0,054 | 0,449 | 1,229 | 2,2514 | 263 580 |
| 23-06-00 | 2,90 | 14665 | 1280 | 11,5 | 14104 | 11,1 | 14056 | 1,0 | 90,81 | 0,034 | 0,183 | 0,609 | 0,3110 | 34 396 |

Curva 1



Curva 2



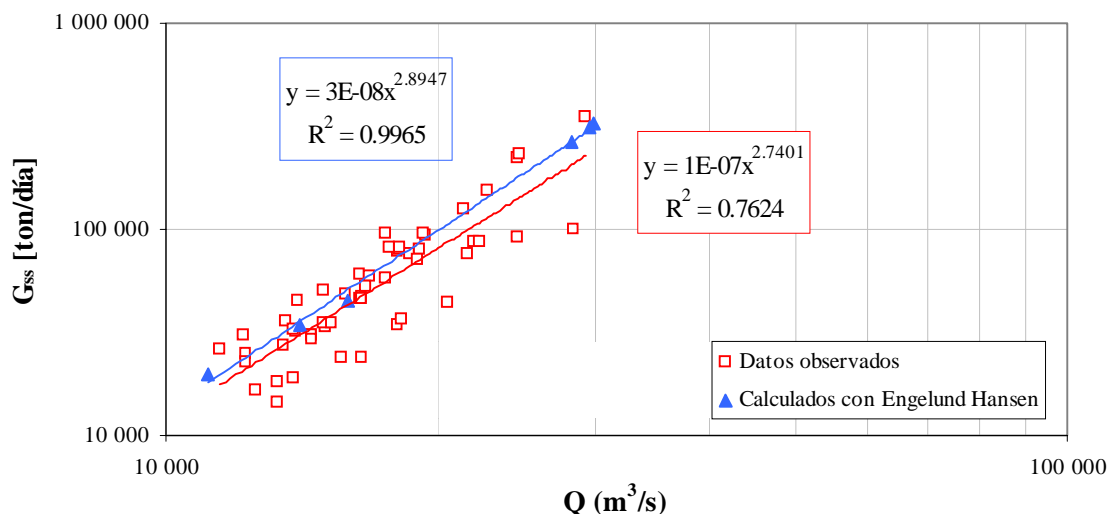


Figura 4.- Comparación entre datos observados de sedimento de fondo en suspensión y valores calculados con Engelund-Hansen en la sección del Túnel.

La carga de fondo, G_{sf} , y el transporte total de fondo, G_s , se calcularon con las fórmulas mencionadas en un tramo de cauce de 14 750 m de longitud, comprendido entre las escalas hidrométricas de Villa Urquiza y Puerto Paraná. Los caudales sólidos se determinaron diariamente desde 1976 hasta 1998, lo cual permitió luego establecer los transportes anuales. La diferencia entre G_s y G_{sf} permitió conocer el transporte de fondo en suspensión, G_{ss} .

Los parámetros geométricos del tramo para la aplicación de las fórmulas se obtuvieron en base a mapas batimétricos tratados por Gaudin y Vinzón (1983). Como resultado de ese tratamiento, estos autores determinaron áreas de secciones transversales, profundidades y anchos medios en el tramo para todo el rango de alturas hidrométricas disponible. Los caudales líquidos se establecieron con la curva de descarga ajustada en la sección del Túnel (Tabla 2).

El valor de la pendiente superficial media en el tramo fue calculado con la curva pendientes-alturas hidrométricas en Puerto Paraná, ajustada por Gaudin y Vionnet (1999), como consecuencia de un estudio en el que se analizaron niveles hidrométricos diarios en Villa Urquiza y Puerto Paraná, para el período 1970-1991.

La información de los tamaños medios del sedimento de fondo surgió de muestras captadas por el Instituto Nacional de Limnología (INALI-CONICET), a lo largo de los últimos 20 años.

RESULTADOS.

Carga de lavado.

De acuerdo a la disponibilidad de datos en cada una de las secciones de aforos, se logró determinar el transporte anual de carga de lavado para un período completo de 8 años (1991 a 1998). En Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos. Se incluyen allí los promedios para cada sección y una columna con los porcentajes que representan los aportes del río Bermejo en el suministro total de carga de lavado a la entrada del tramo medio del río Paraná.

Tabla 5.- Transporte anual de carga de lavado en cada una de las secciones de aforo consideradas en el estudio.

| AÑO | Transporte total anual de carga de lavado G_w [ton/año] | | | | Aporte de G_w del Bermejo al tramo medio del río Paraná [%] |
|----------|---|-----------|------------------|-------------|---|
| | El Colorado | Itatí | Puerto Pilcomayo | Túnel | |
| 1991 | 179 832 689 | 3 867 517 | 5 112 838 | 188 680 884 | 95,2 |
| 1992 | 106 440 651 | 4 661 241 | 5 006 728 | 103 341 850 | 91,7 |
| 1993 | 95 215 278 | 4 164 023 | 5 369 245 | 73 228 663 | 90,9 |
| 1994 | 88 265 243 | 4 311 988 | 4 338 442 | 67 266 130 | 91,1 |
| 1995 | 114 552 608 | 4 802 269 | 5 678 419 | 75 721 218 | 91,6 |
| 1996 | 87 016 925 | 3 998 611 | 5 056 951 | 67 229 182 | 90,6 |
| 1997 | 140 816 389 | 4 919 662 | 5 553 776 | 111 486 575 | 93,1 |
| 1998 | 61 857 964 | 5 587 376 | 5 597 156 | 66 642 549 | 84,7 |
| Promedio | 109 249 718 | 4 539 086 | 5 214 194 | 94 199 632 | 91,8 |

Transporte de material de fondo.

En Tabla 6 se presentan los resultados de los transportes anuales de sedimento de fondo, junto con los promedios correspondientes, en sus distintas modalidades: carga de fondo, en suspensión y total, y las proporciones entre G_{sf}/G_{ss} y G_{sf}/G_s .

Tabla 6.- Transporte anual de material de fondo en el tramo medio del río Paraná. Tramo: Villa Urquiza – Puerto Paraná.

| AÑO | G_{sf} (ton/año) | G_{ss} (ton/año) | G_s (ton/año) | G_{sf}/G_{ss} (%) | G_{sf}/G_s (%) |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|---------------------|
| 1976 | 2 284 966 | 21 537 495 | 23 822 460 | 10,61 | 9,59 |
| 1977 | 1 968 571 | 19 979 199 | 21 947 770 | 9,85 | 8,97 |
| 1978 | 1 533 937 | 15 152 869 | 16 686 806 | 10,12 | 9,19 |
| 1979 | 1 961 303 | 20 281 413 | 22 242 715 | 9,67 | 8,82 |
| 1980 | 2 225 220 | 22 776 214 | 25 001 434 | 9,77 | 8,90 |
| Promedio parcial | 1 994 799 | 19 945 438 | 21 940 237 | 10,01 | 9,09 |
| 1981 | 1 871 644 | 18 747 437 | 20 619 081 | 9,98 | 9,08 |
| 1982 | 2 845 895 | 28 572 857 | 31 418 752 | 9,96 | 9,06 |
| 1983 | 4 930 831 | 53 106 387 | 58 037 219 | 9,28 | 8,50 |
| 1984 | 2 326 337 | 23 181 216 | 25 507 553 | 10,04 | 9,12 |
| 1985 | 2 403 091 | 23 879 405 | 26 282 496 | 10,06 | 9,14 |
| 1986 | 2 182 363 | 20 865 769 | 23 048 132 | 10,46 | 9,47 |
| 1987 | 2 180 932 | 21 844 020 | 24 024 952 | 9,98 | 9,08 |
| 1988 | 1 958 831 | 19 170 682 | 21 129 512 | 10,22 | 9,27 |
| 1989 | 2 388 050 | 23 137 381 | 25 525 430 | 10,32 | 9,36 |
| 1990 | 2 595 000 | 26 151 649 | 28 746 649 | 9,92 | 9,03 |
| Promedio parcial | 2 568 297 | 25 865 680 | 28 433 978 | 10,02 | 9,11 |
| 1991 | 1 506 433 | 16 654 017 | 18 160 450 | 9,05 | 8,30 |
| 1992 | 2 398 570 | 26 654 725 | 29 053 295 | 9,00 | 8,26 |
| 1993 | 1 757 595 | 19 652 949 | 21 410 544 | 8,94 | 8,21 |
| 1994 | 1 551 167 | 17 301 689 | 18 852 855 | 8,97 | 8,23 |
| 1995 | 1 757 832 | 19 377 670 | 21 135 502 | 9,07 | 8,32 |
| 1996 | 1 589 881 | 17 489 213 | 19 079 094 | 9,09 | 8,33 |
| 1997 | 2 047 300 | 22 713 287 | 24 760 586 | 9,01 | 8,27 |
| 1998 | 2 852 396 | 31 148 866 | 34 001 262 | 9,16 | 8,39 |
| Promedio parcial | 1 932 647 | 21 374 052 | 23 306 699 | 9,04 | 8,29 |
| Promedio general | 2 222 528 | 23 016 366 | 25 238 893 | 9,68 | 8,82 |

Transporte total de sedimentos en la sección del Túnel.

Teniendo en cuenta el período (1991-1998) en que se contó con información sobre los transportes anuales, tanto de G_w como de G_s , en Tabla 7 se presentan los valores de transporte total anual de sedimentos, G_T , en la sección del Túnel Subfluvial. Se incluye, asimismo, la proporción que representa la carga de lavado en G_T .

Tabla 7.- Transporte total de sedimento en el tramo medio del río Paraná. Sección: Túnel Subfluvial.

| AÑO | G_w [ton/año] | G_s [ton/año] | G_T [ton/año] | G_w/G_T [%] |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| 1991 | 188 680 884 | 18 160 450 | 206 841 334 | 0,9122 |
| 1992 | 103 341 850 | 29 053 295 | 132 395 145 | 0,7806 |
| 1993 | 73 228 663 | 21 410 544 | 94 639 207 | 0,7738 |
| 1994 | 67 266 130 | 18 852 855 | 86 118 985 | 0,7811 |
| 1995 | 75 721 218 | 21 135 502 | 96 856 720 | 0,7818 |
| 1996 | 67 229 182 | 19 079 094 | 86 308 276 | 0,7789 |
| 1997 | 111 486 575 | 24 760 586 | 136 247 161 | 0,8183 |
| 1998 | 66 642 549 | 34 001 262 | 100 643 811 | 0,6622 |
| Promedio | 94 199 631 | 23 306 699 | 117 506 330 | 0,8017 |

El balance de carga de lavado en el tramo medio del Río Paraná.

En Tabla 8 se advierte que la suma de los suministros de carga de lavado en el período de máximos aportes a la entrada del tramo medio del río Paraná es mayor que los suministros registrados en la sección del Túnel en 7 de los 8 años analizados.

Cabe señalar que en la sección del Túnel los transportes de G_w fueron incrementados en un 17% para tener en cuenta los caudales que se derivan por el río Colastiné y el sistema Leyes-Setúbal (Figura 1). Ese porcentaje resulta de considerar los caudales en el tramo medio del Paraná en la sección del Túnel y antes de las derivaciones por los complejos fluviales señalados (Giacosa y otros, 2000).

En cuanto al período de máximos aportes de carga de lavado, con los que se obtuvieron los valores de Tabla 8, corresponde en general, como fuera señalado, al comprendido entre los meses de diciembre y mayo de cada año

Tabla 8.- Balance de transporte de carga de lavado en el tramo medio del río Paraná. Período de máximos aportes.

| AÑO | Colorado (1) | Itatí (2) | Pilcomayo (3) | Túnel (4) | Túnel (*) (5) | (1)+(2)+(3) (6) | (6)-(5) (7) |
|-------|-----------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------------|----------------|
| 1 991 | 172 280 098 | 1 686 842 | 1 686 077 | 167 349 452 | 201 625 846 | 175 653 017 | -25 972 829 |
| 1 992 | 101 080 628 | 1 968 314 | 2 240 563 | 73 532 603 | 88 593 498 | 105 289 505 | 16 696 007 |
| 1 993 | 90 569 100 | 1 785 209 | 2 372 790 | 51 044 269 | 61 499 119 | 94 727 099 | 33 227 980 |
| 1 994 | 79 029 948 | 1 769 604 | 1 570 979 | 45 744 564 | 55 113 933 | 82 370 531 | 27 256 598 |
| 1 995 | 109 533 417 | 2 119 515 | 2 403 726 | 54 273 794 | 65 390 113 | 114 056 658 | 48 666 545 |
| 1 996 | 80 866 066 | 1 466 222 | 1 933 801 | 46 097 928 | 55 539 672 | 84 266 089 | 28 726 417 |
| 1 997 | 137 899 719 | 2 186 577 | 2 196 711 | 78 766 902 | 94 899 882 | 142 283 007 | 47 383 125 |
| 1 998 | 53 831 716 | 2 386 629 | 1 942 019 | 44 046 920 | 53 068 579 | 58 160 363 | 5 091 784 |

- (*) Caudales sólidos anuales en el Túnel, incrementados un 17% a fin de considerar las derivaciones por el río Colastiné y el sistema Leyes-Setúbal.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

En base a mediciones disponibles en secciones de aforos en los cursos que aportan los caudales líquidos y sólidos que se transportan en el tramo medio del río Paraná, fue posible realizar estimaciones del transporte anual de carga de lavado en este último curso. Esas estimaciones fueron comparadas, asimismo, con las efectuadas empleando datos de una estación de aforos en el mismo tramo medio. De acuerdo a las características de la información medida, los resultados obtenidos son representativos de la situación ocurrida durante la última década del siglo pasado.

Paralelamente, y utilizando fórmulas específicamente calibradas en el tramo medio del Paraná, se determinaron los transportes anuales del material de fondo en sus distintas modalidades, carga de fondo, G_{sf} , de fondo en suspensión, G_{ss} , y la suma de ambos, el transporte total de material de fondo, G_s .

Con ambos tipos de transporte, carga de lavado y sedimento de fondo, fue establecido el transporte anual total de sedimentos del río Paraná en su tramo medio, entre 1991 y 1998.

De toda la labor realizada, las principales conclusiones surgidas son las siguientes:

- a. En el período mencionado se han suministrado en promedio al río Paraná aguas abajo de Confluencia, $120 \cdot 10^6$ ton/año de carga de lavado, de los cuales alrededor del 92% fue aportado por el río Bermejo. En la sección del Túnel, para los mismos años, fueron medidos $94,2 \cdot 10^6$ ton/año, pero si se tiene en cuenta lo que se deriva por el río Colastiné y el sistema Leyes-Setúbal, esta última cifra se eleva a los $113,5 \cdot 10^6$ ton/año, en el orden de la magnitud que entra al tramo medio (Tabla 5).
- b. Cuando se considera el período de máximos aportes de carga de lavado al sistema del Paraná Medio, normalmente entre diciembre y mayo de cada año, y exceptuando lo ocurrido en el año 1991, en la sección del Túnel se han registrado en promedio $30 \cdot 10^6$ ton de carga de lavado menos que la que ingresó al tramo medio (Tabla 8). Con referencia a este hecho caben las siguientes consideraciones:
 - Los casi 640 km de llanura aluvial entre Confluencia y el Túnel (con un ancho promedio de alrededor de 28 km), actuarían como una gran cubeta de retención de buena parte de los $30 \cdot 10^6$ ton de carga de lavado mencionados.
 - Cuando se analizan los datos de Tabla 8, se advierte que durante las dos grandes crecientes de 1992 y especialmente 1998, lo eventualmente retenido en la llanura aluvial alcanzó sus mínimos valores. Cabe especular que los aportes sedimentarios desde aguas arriba, combinados con las condiciones del escurrimiento sobre la llanura aluvial durante esos eventos, pueden haber favorecido las bajas tasas de retención detectadas.
 - No se cuenta con suficientes elementos de juicio como para explicar la situación ocurrida en 1991, donde se revirtió la tendencia señalada.
- c. En relación con el transporte de material de fondo, el río Paraná entre Villa Urquiza y Puerto Paraná vino transportando en promedio $25 \cdot 10^6$ ton/año de sedimento de lecho, de los cuales alrededor de un 9% es carga de fondo, G_{sf} , y el resto sedimento de fondo en suspensión, G_{ss} . Con los datos disponibles en la sección del Túnel sobre este tipo de

transporte, se verificó, una vez más, la confiabilidad de la fórmula de Engelund-Hansen para el cálculo de G_s .

- d. Para el período de 1991-1998, en que se dispuso de información sobre ambos tipos de transporte, carga de lavado y sedimento de fondo, surgió que el río Paraná en la sección del Túnel transportó en promedio un total de $137,1 \cdot 10^6$ ton/año de sedimento. A esta cifra habría que añadirle aún el transporte de fondo que se deriva por el río Colastiné y por el sistema Leyes-Setúbal, todavía no establecido. En este último caso, la mayor parte de la arena que penetra al sistema es el principal agente que conforma el delta del Leyes, el mayor delta interior del Paraná Medio, en las cabeceras de la laguna Setúbal (Pertovt y otros, 2003).
- e. Finalmente, corresponde destacar que el método utilizado para determinar los transportes anuales de carga de lavado combinando caudales diarios con la información de aforos sólidos puntuales, lleva implícito un error del 20%, según lo establecido por Colby (1963) y Walling (1977). En consecuencia, al evaluar los transportes anuales absolutos de carga de lavado debería tenerse en cuenta esta magnitud de imprecisión.

Agradecimientos.

A los organismos estatales y privados que proporcionaron desinteresadamente la información de base para este estudio:

Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

Empresa Evaluación de Recursos S.A.

Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables – Distrito Paraná Medio.

Centro de Informaciones Meteorológicas de la FICH.

Instituto Nacional de Limnología (INALI-CONICET).

LISTA DE SÍMBOLOS.

- B** Anchos de boca de secciones transversales, en [m].
- C_w Concentración de carga de lavado, en [mg/l].
- \bar{C}_{wT_t} Concentración media de carga de lavado en la sección del Túnel registrada en un tiempo t .
- C' Coeficiente de Chezy que considera solamente rugosidad debida al grano.
- d_s Diámetro medio del sedimento, en [m].
- G_w Caudales sólidos diarios de carga de lavado, en [ton/día].
- G_{wT_t} Carga de lavado en la sección del Túnel registrada en un tiempo t .
- $G_{wB_{t-\Delta t}}$ Carga de lavado registrada en el río Bermejo (sección El Colorado) en el tiempo $t-\Delta t$ responsable de G_{wT_t}
- g_s Transporte específico total de sedimentos de fondo, en [kg/m s].
- G_s Transporte total de sedimentos de fondo, en [ton/día].
- \bar{h} Profundidad media en la sección transversal, en [m].
- H Lecturas hidrométricas en cada una de las secciones, en [m].
- Q Caudales líquidos, en [m³/s].
- Q_{T_t} Caudal líquido correspondiente a \bar{C}_{wT_t}

| | |
|--|---|
| Q_B | Caudal del Bermejo en El Colorado. |
| τ_*' | Tensión de corte adimensional debida a la resistencia de grano. |
| τ_* | Tensión de corte adimensional total. |
| \bar{U}_c | Velocidad media de escurrimiento calculada en la sección transversal del Túnel, en [m/s]. |
| u_*' | Componente de la velocidad de corte debida a la resistencia de grano. |
| $\varphi_{c_w}, \varphi'_{c_w}, \varphi''_{c_w}$ | Símbolos de función. |

REFERENCIAS.

Amsler, M.L. y Drago, E.C. (2003). "A review of the suspended sediment budget at the confluence of the Paraná and Paraguay Rivers", *Hydrological Processes*. (En prensa).

Amsler, M.L. y Prendes, H.H. (2000). "Transporte de sedimentos y procesos fluviales asociados" (Capítulo 5: p. 233-306), en: *El Río Paraná en su tramo medio. Contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura*, Tomo 1. Centro de Publicaciones, U.N.L., Santa Fe, Argentina.

Colby, B.R. (1963). "Fluvial Sediments – A Summary of Source, Transportation, Deposition and Measurement of Sediment Discharge". *Contributions to General Geology*. U.S. Geological Survey Bulletin 1181-A. Washington.

Cotta, R. (1963). "Influencia sobre el Río Paraná del material sólido transportado por el Río Bermejo". *Comisión Nacional del Río Bermejo*. Publ. No. 92 EH.

Depetris, P.J. y Griffin, J.J. (1968). "Suspended load in the Río de La Plata drainage basin", *Sedimentology*, Vol. 11, No. 1/2, pp. 53-60.

Drago, E.C. y Amsler, M.L. (1988). "Suspended sediment at a cross section of the Middle Paraná River: concentration, granulometry and influence of the main tributaries", *Sediment Budgets*, IAHS Publ. No. 174, pp. 381-396.

Engelund, F. (1967). Closure to "Hydraulic Resistance of Alluvial Streams". *Journal of the Hydraulics Division*. ASCE, Vol. 93, No. HY4. Pp. 287-296.

Engelund, F. y Fredsøe, J. (1976). "A sediment transport model for straight alluvial channels". *Nordic Hydrology*, Vol. 7, pp. 293-306.

Engelund, F. y Hansen, E. (1967). "A monograph on sediment transport in alluvial streams". *Teknisk Vorlag*. Copenhagen, Denmark.

Gaudin, H.E. y Vinzón, S.B. (1983). "Parámetros geométricos medios representativos de un tramo de río" (Capítulo 2). En: *Proyecto Caracterización hidráulica del Río Paraná sus tributarios en el Litoral* (Director: Dr. Alfonso Pujol). Tercer Informe de Avance. DHGA-UNL Nro. 021/83. Departamento de Hidrología General y Aplicada. Universidad Nacional del Litoral. Secretaría de Estado de Ciencia y Tecnología.

Gaudin, H.E. y Vionnet, C. (1999). "Estudio de pendientes superficiales en un tramo medio del Río Paraná". Informe interno. Laboratorio de Hidráulica. Facultad de Ingeniería y

Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral.

Giacosa, R., Paoli, C. y Cacik, P. (2000). “Conocimiento del régimen hidrológico” (Capítulo 2: p. 69-103), en: *El Río Paraná en su tramo medio. Contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura*, Tomo 1. Centro de Publicaciones, U.N.L., Santa Fe, Argentina.

Pertovt, L., Ramonell, C., Amsler, M. y García, M.H. (2003). “The Leyes Delta: A Major Inland Delta in the Middle Paraná Fluvial System”. *Proceedings of the 3rd IAHR Symposium on River, Coastal and Stuarine Morphodynamics*. Barcelona, España.

Piest, R.F. y Miller, C.R. (1975). “Sediment sources and sediment yields” (Chapter IV: p. 472-481). En: *Sedimentation Engineering*. ASCE. V.A. Vanoni, Ed. Nro. 54. New York. 745 p.

Pujol, A., Amsler, M.L., Sabatier, M.A. y Gaudin, H. (1985). “Verificación de tres predictores Q-H en el río Paraná”. *XII Congreso Nacional del Agua*. Mendoza, Argentina.

Soldano, F. (1947). Régimen y aprovechamiento de la red fluvial argentina. Parte I. *Editorial Cimera*. Buenos Aires, Argentina. 277 p.

Van Rijn, L.C. (1984). “Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport”. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. Vol. 110. No. 10.

Walling, D.E. (1977). “Limitations of the rating curve technique for estimating suspended sediment loads, with particular reference to British rivers”. *Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters*. IAHS Publ. No. 122.