

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**ESTUDIOS FLUVIALES EN CUENCAS MULTINACIONALES DE  
MORFOLOGÍA COMPLEJA: EL CASO DEL RÍO PILCOMAYO**

*José Daniel Brea, Pablo Spalletti, Martín Irigoyen*

*Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua (INA), Argentina*

*E-mail: dbrea@ina.gov.ar, pspallet@ina.gov.ar, mirigoyen@ina.gov.ar*

**RESUMEN**

Se presentan trabajos realizados con el fin de mejorar el conocimiento sobre el comportamiento hidrosedimentológico del río Pilcomayo en la zona de divagación. La cuenca del río Pilcomayo cubre un área de 290.000 km<sup>2</sup>, que se extiende sobre los territorios nacionales de Argentina, Bolivia y Paraguay. Las nacientes del río se ubican a unos 3.500 msnm, debiendo recorrer las aguas unos 1.000 km para llegar al río Paraguay. En la cuenca trinacional viven aproximadamente 1.500.000 habitantes. Considerado como uno de los ríos con mayor tasa de producción y transporte de sedimentos del mundo, el río Pilcomayo presenta un complejo comportamiento hidrosedimentológico y morfológico, que constituye su rasgo natural distintivo y debe ser estudiado en profundidad.

**ABSTRACT**

This paper presents studies carried out to improve knowledge about the Pilcomayo river hydrosedimentological behavior in its divagation stretch. The Pilcomayo river basin covers an area of 290,000 km<sup>2</sup>, which extends over the national territories of Argentina, Bolivia and Paraguay. The headwaters of the river are located about 3500 meters over sea level, and the water must travel 1000 km to reach the Paraguay river. At the trinational basin population is about 1.500.000 people. Considered as one of the rivers all around the world with higher sediment yield and suspended transport, the Pilcomayo river has a complex hydrosedimentological and morphological behavior, which is its distinctive natural feature and should be extensively studied.

**PALABRAS CLAVES:** morfología fluvial, cuencas multinacionales

## INTRODUCCIÓN

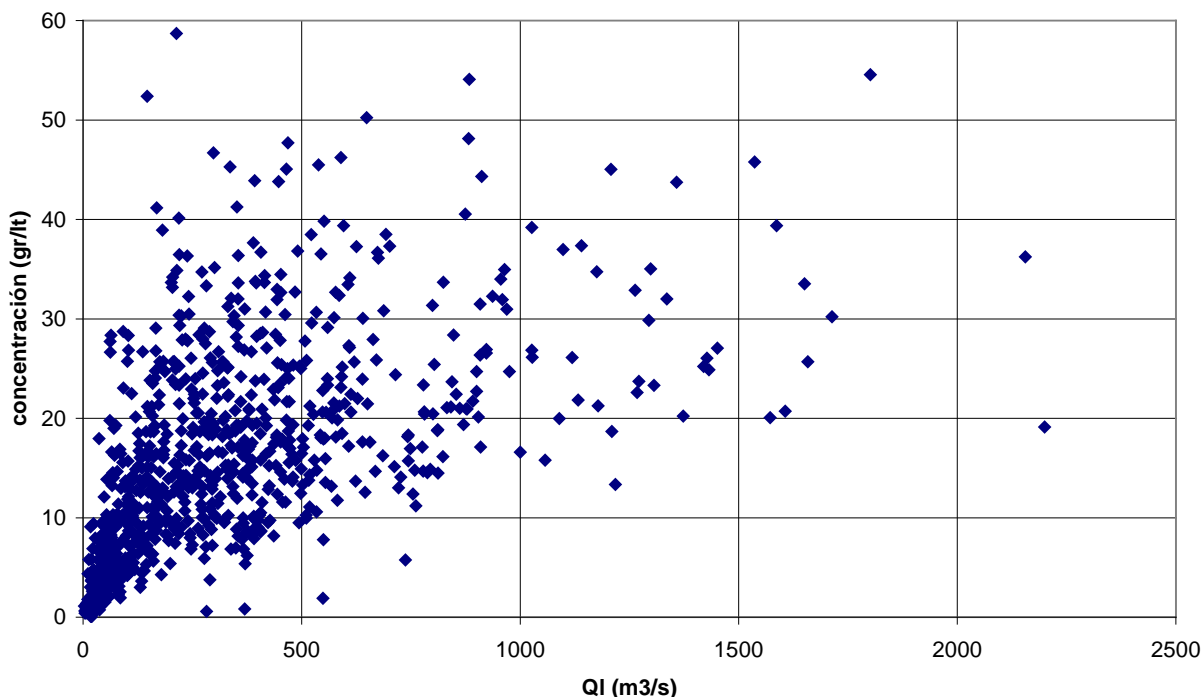
La cuenca del río Pilcomayo cubre un área de 290000 km<sup>2</sup>, que se extiende sobre los territorios nacionales de Argentina, Bolivia y Paraguay. Las nacientes del río se ubican a unos 3500 msnm, debiendo recorrer las aguas unos 1000 km para llegar al río Paraguay. En la cuenca trinacional viven aproximadamente 1500000 habitantes.

Considerado como uno de los ríos con mayor tasa de producción y transporte de sedimentos del mundo, el río Pilcomayo presenta un complejo comportamiento hidrosedimentológico y morfológico, que constituye su rasgo natural distintivo en la región (Brea et al., 2007), y que no ha sido aún resuelto por el estado del arte en la materia. Esta situación resulta un desafío para los ingenieros fluviales, y se hacen importantes esfuerzos de tomas de datos básicos, que permitan alimentar modelos para tratar de caracterizar estos fenómenos. Debe señalarse que el contexto en el que se desarrollan estos procesos incluyen situaciones tales como pérdida de cauce, retroceso del río, aporte de sedimentos contaminados, obras de control, repartición equitativa del agua para usos múltiples, migración de peces, entre otros, lo que obliga a tener en cuenta esa multiplicidad de variables en los estudios, haciéndolos aún más complejos (Spalletti et al., 2009).

El presente trabajo resume los avances realizados en el conocimiento de los procesos fluviales del río desde Misión La Paz, incluyendo la recopilación de datos, y los resultados de los modelos numéricos uni y bidimensionales implementados.

## CARACTERIZACIÓN HIDROSEDIMENTOLÓGICA

La única estación activa de aforos líquidos y sólidos sistemáticos en la zona de estudio es la de Misión La Paz, ubicada en la provincia de Salta. En esta estación se cuenta con mediciones de caudal líquido y sólido en suspensión desde 1960 hasta la fecha. En el período 1993-2009, se contó con 982 pares de valores caudal líquido-caudal sólido (Figura 1). Los mismos incluyen el total de datos en el período, abarcando épocas de crecida y estiaje.



**Figura 1.-** Río Pilcomayo Misión La Paz 1993-2009, concentración sólidos en suspensión en función del caudal líquido

Resulta de interés conocer algunos valores típicos relacionados con la concentración: el valor máximo medido es de 59 gramos/litro, el valor medio de 7 gramos/litro y el mínimo de 0.02 gramos/litro. Si dentro del período de análisis se consideran sólo las mediciones de los meses de aguas altas (enero, febrero y marzo), el valor de la concentración media resulta entonces de 21 gramos/litro.

Debe tenerse presente que en ocasiones de picos de crecida de importancia, es habitual que no se pueda llevar a cabo el aforo, perdiéndose la posibilidad de contar con medición de eventos de gran magnitud. En este contexto, debe señalarse que los valores máximos de concentración reales serán seguramente superiores a los máximos medidos, especialmente en eventos extremos.

Para el conocimiento del comportamiento hidrosedimentológico del sistema y la modelación del mismo, resulta necesario además conocer las granulometrías del material del lecho y del sedimento en suspensión. A partir de estos datos se definen otros parámetros claves, tales como la velocidad de caída de los sólidos suspendidos.

La base de datos de aforos antes descripta, constituye el aporte principal de información en este campo. Existen algunos datos de aforos consignados en informes del INA (Brea et al. 2007), para el período 1966-1968 en la estación, fuera de servicio, de Fortín Pilcomayo. Se trata de un período muy corto, con registros discontinuos y en algunos períodos, ilegibles, razones por las cuales no fueron utilizados.

Finalmente, en la referencia de la Subsecretaría de Recursos Hídricos (2010), en el marco de un interesante trabajo sobre la dinámica hidrosedimentológica del río Pilcomayo, se efectuaron algunos aforos sólidos recientes también en Misión la Paz, que se incluyeron en el análisis. En la referencia precitada se presenta valiosa información sobre las características granulométricas del material del lecho y en suspensión en Misión La Paz. Dicho trabajo tuvo como objetivo estudiar la dinámica hidrosedimentológica del río Pilcomayo analizando algunos parámetros físico-químicos de sus aguas. Se extrajeron muestras de sedimentos transportados en suspensión y en el fondo del cauce, con medición de la profundidad del canal y de la velocidad superficial de la corriente, con determinación en laboratorio, de concentración total de sedimentos suspendidos y granulometría de sedimentos suspendidos y de fondo de cauce.

Las mediciones se hicieron aguas arriba del Puente Internacional entre Misión La Paz (Argentina) y Pozo Hondo (Paraguay). De rutina se operó en la sección empleada para los aforos permanentes que allí se llevan a cabo, a fin de facilitar los cálculos de caudal sólido en suspensión y contar con un registro permanente de nivel hidrométrico. Las Tablas 1, 2 y 3 muestran algunos de los datos registrados.

**Tabla 1.-** Río Pilcomayo, concentración de sedimentos en suspensión

| Fecha      | Concentración promedio de arena en suspensión (mg/l) | Concentración promedio de limo y arcilla en suspensión (mg/l) | Concentración promedio total de sedimentos en suspensión (mg/l) | % fino | % grueso |
|------------|--|---|---|--------|----------|
| 14/02/2008 | 4694   | 8579  | 13274   | 65     | 35       |
| 24/07/2008 | 475  | 989   | 1464  | 67     | 33       |
| 30/10/2008 | 3709   | 3809  | 7518  | 51     | 49       |
| 19/02/2009 | 3830   | 6777  | 10608   | 64     | 36       |

**Tabla 2.-** Río Pilcomayo, tamaño de finos en suspensión

| Río Pilcomayo - Sección: Misión La Paz (Salta, Argentina)             |            |        |         |       |          |
|---|------------|--------|---------|-------|----------|
| Clases granulométricas (% en peso) de la fracción arena en suspensión |            |        |         |       |          |
| Fecha   | Muy gruesa | Gruesa | Mediana | Fina  | Muy fina |
| 24/07/2008  | 0,05       | 0,35   | 0,75    | 51,36 | 47,49    |
| 30/10/2008  | 0,10       | 0,55   | 1,22    | 60,05 | 38,09    |
| 19/02/2009  | 0,00       | 0,00   | 1,80    | 13,15 | 85,06    |

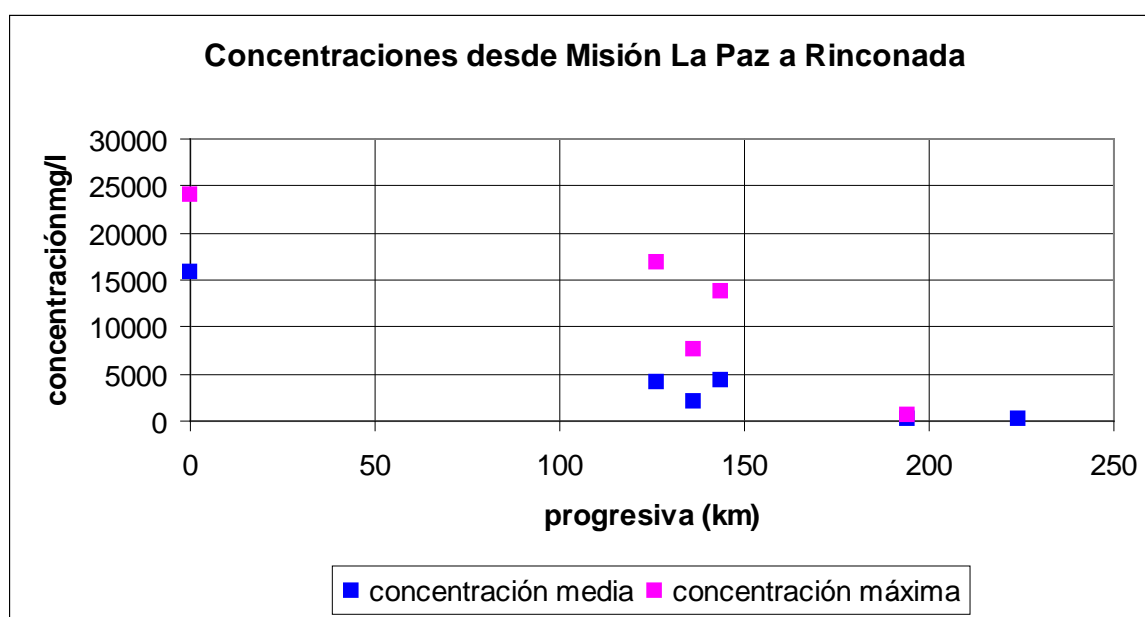
**Tabla 3.-** Río Pilcomayo, granulometría de sedimentos

| Río Pilcomayo (La Paz, Salta, Argentina)         |         |        |           |
|--|---------|--------|-----------|
| Abundancia granulométrica en sedimentos de fondo |         |        |           |
| Vertical 2 - centro del cauce                    |         |        |           |
| Fecha  | % ARENA | % LIMO | % ARCILLA |
| 11/02/2008                                       | 97,63   | 2,37   | 0,00      |
| 24/07/2008                                       | 69,22   | 27,36  | 3,42      |
| 30/10/2008                                       | 99,43   | 0,57   | 0,00      |
| 19/02/2009                                       | 99,47   | 0,13   | 0,40      |

En la Tabla 3 puede apreciarse que los sedimentos de fondo son considerablemente homogéneos y están integrados por más del 95% de arena (muy fina a fina).

Lamentablemente, aguas abajo de Misión La Paz no existen estaciones de medición de parámetros hidrosedimentológicos lo que limita y dificulta en muchos aspectos el conocimiento acabado del comportamiento del río. En este sentido, se efectuaron algunas mediciones en crecida que reflejaron la dificultad y aleatoriedad de este tipo de muestreos.

Puede decirse que es evidente que existe un decaimiento de las concentraciones en función de la progresiva desde Misión La Paz hacia aguas abajo, tal como se puede apreciar en la Figura 2. Las limitaciones expresadas en las mediciones referidas, impiden hablar de montos válidos de sedimentos en suspensión. La metodología de medición con muestreos a 0.50 m de profundidad llevan a subvaluar las concentraciones.



**Figura 2.-** Río Pilcomayo. Variación de las concentraciones con la progresiva

Se resalta nuevamente al alto grado de dificultad que implica hacer mediciones de concentración de sólidos en el río Pilcomayo en época de crecida, y se valora la intención de los trabajos llevados a cabo en esta línea de acción.

## MODELOS IMPLEMENTADOS. RESULTADOS

En el marco de los estudios previstos en la referencia (Halcrow Hidrocontrol, 2010), resultó de singular importancia la caracterización hidrosedimentológica del río Pilcomayo en la zona en estudio. Dicha caracterización se realizó sobre la base de la información disponible recopilada, especialmente caudales líquidos y sólidos, concentraciones de sólidos en suspensión,

granulometrías de material en suspensión y granulometrías de material del lecho e informes antecedentes sobre el tema.

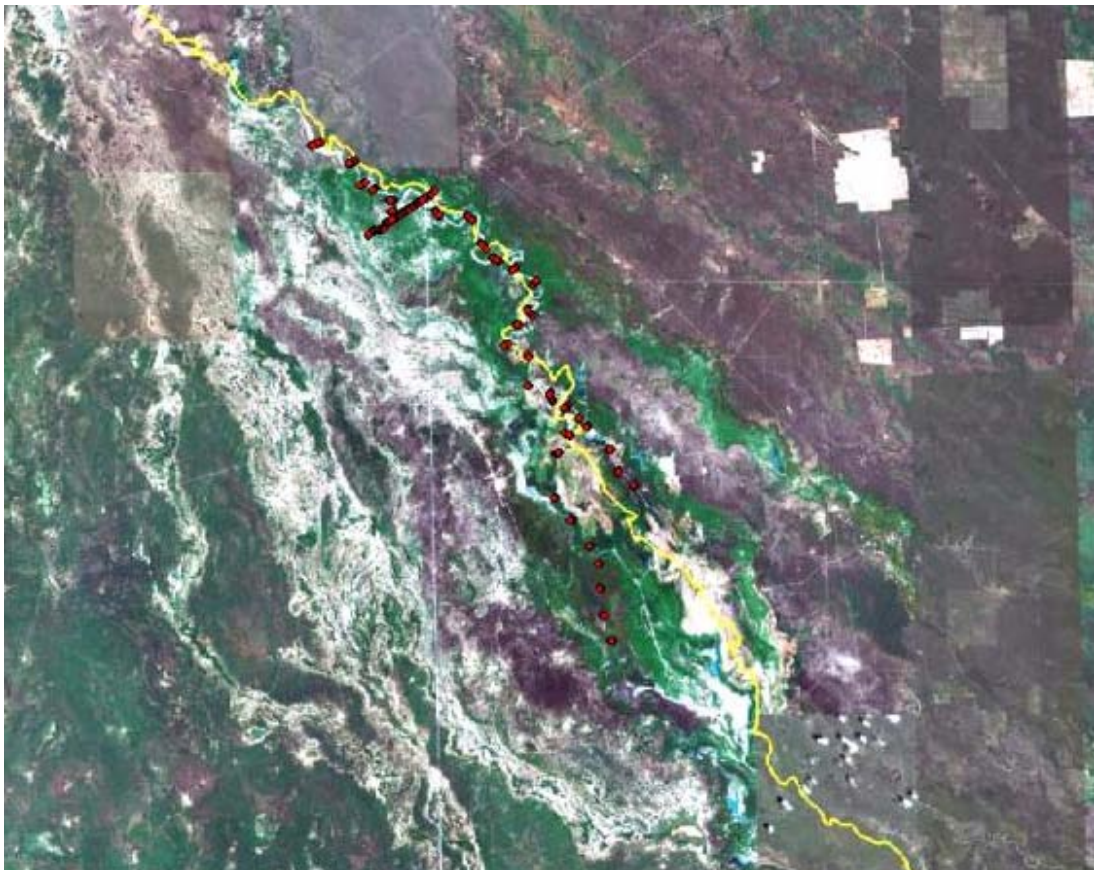
También fueron de gran ayuda los análisis realizados con los modelos numéricos unidimensionales y bidimensionales implementados en el desarrollo de los estudios, los que permitieron lograr una acabada comprensión de la compleja dinámica hidrosedimentológica en la zona de divagación del cauce del río Pilcomayo. El modelo unidimensional seleccionado fue el HEC-RAS 4.0, y como modelos bidimensionales se trabajó con el RMA2, y el Isis2D.

### ***Modelo unidimensional:***

Con HEC-RAS 4.0 se modeló un tramo del río desde Misión la Paz hasta la zona de La Rinconada.

Para la implementación del modelo matemático debieron incorporarse las variables antes indicadas con una adecuada distribución, de forma tal de reflejar adecuadamente las características de la zona de estudio, que abarcó el tramo del río Pilcomayo desde Misión la Paz hasta la zona del Pantalón y su continuación en los escurrimientos encauzados en territorio argentino hasta La Rinconada.

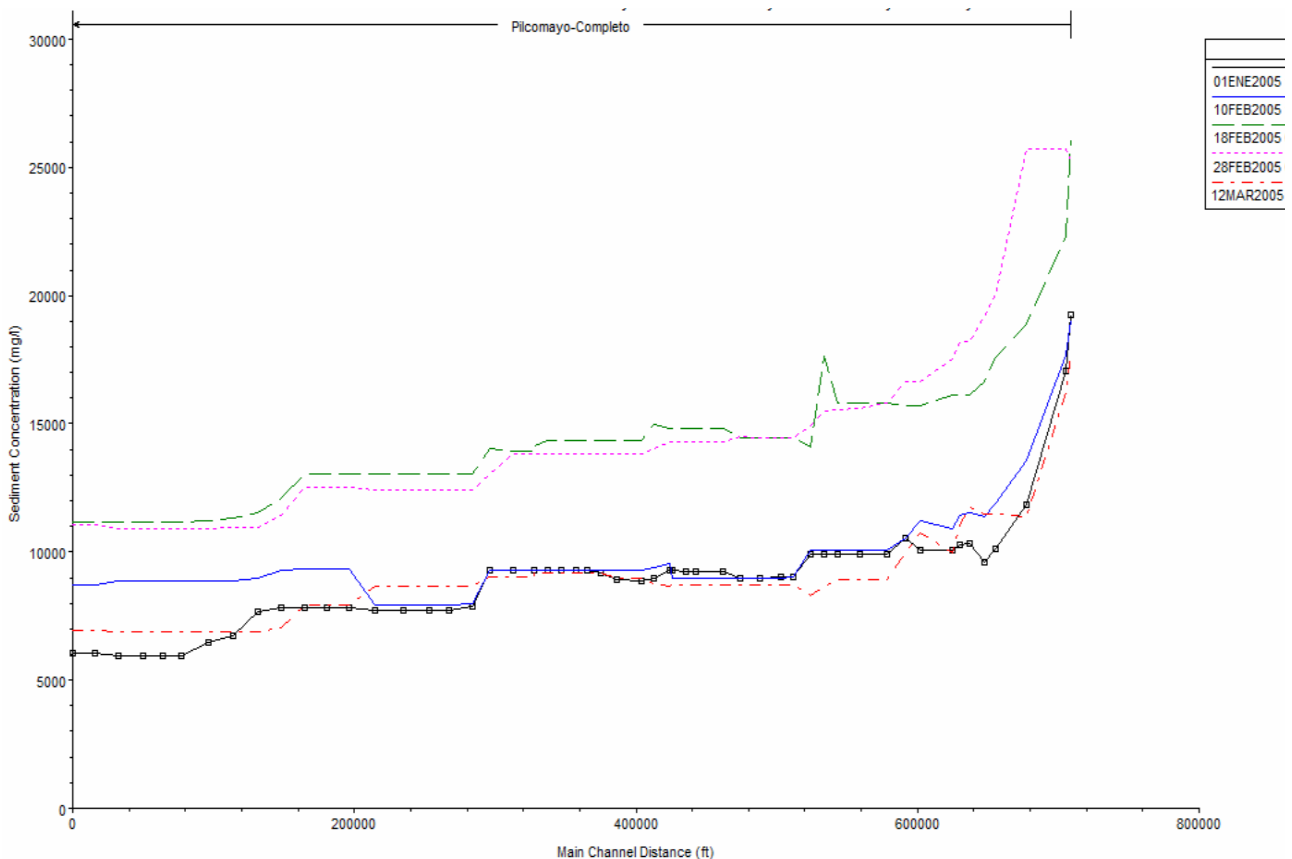
Para caracterizar geoméricamente los cauces a modelar, se dispuso de secciones transversales del río Pilcomayo a lo largo del tramo de estudio (Figura 3). Adicionalmente se contó con el modelo digital del terreno (MDT), que permitió complementar la información en los sectores inundables de los perfiles transversales, así como caracterizar secciones en tramos sin relevamientos específicos. Se trabajó así con 54 secciones trasversales que permitieron caracterizar geoméricamente el cauce del río Pilcomayo en el tramo bajo estudio, para analizar su comportamiento hidromorfológico mediante el modelo HEC-RAS. Estas secciones transversales representan tanto el cauce como el valle de inundación en forma esquemática sobre la traza del cauce principal.



**Figura 3.-** Ubicación de información topobatimétrica en el río Pilcomayo, sobre imagen satelital.

El tramo representado abarcó una extensión total de 216 kilómetros, con el extremo superior en correspondencia con Misión La Paz, que se localiza unos 87 kilómetros aguas arriba, a lo largo del cauce del río Pilcomayo, de la actual posición del canal de derivación de Paraguay (Spalletti & Brea, 2009); y el inferior en la zona de La Rinconada en territorio argentino.

Los resultados de las corridas del modelo unidimensional, desde el punto de vista del funcionamiento hidromorfológico del sistema, reflejaron interesantes conclusiones sobre las concentraciones. Se observa la forma en que se produce el decaimiento de las concentraciones a lo largo del perfil longitudinal del cauce del río Pilcomayo, para distintos tiempos durante el desarrollo de la crecida (Figura 4). Estos resultados se corresponden con el ingreso de sedimentos en suspensión con la granulometría de los registros disponibles en la zona de la estación de aforo de Misión La Paz.



**Figura 4.-** Río Pilcomayo, ejemplo de decaimiento de la concentración con la progresiva.

Pero más allá del decaimiento en las concentraciones observado, en el extremo final de la zona bajo estudio, se tienen valores superiores a los 5 g/l, que se ubican entre la mitad y la tercera parte de las concentraciones en la sección inicial. Esto se debe a que cuando el agua escurre encauzada hay una fracción de sedimentos finos que no puede sedimentar y se mantiene en suspensión (Van Rijn, 1993). Pudo observarse un acelerado proceso de disminución de las concentraciones en el primer tramo del río modelado, que se corresponde con la sedimentación de los materiales de mayor tamaño, para luego presentar una variación mucho más gradual a lo largo del resto del sistema de escurrimiento.

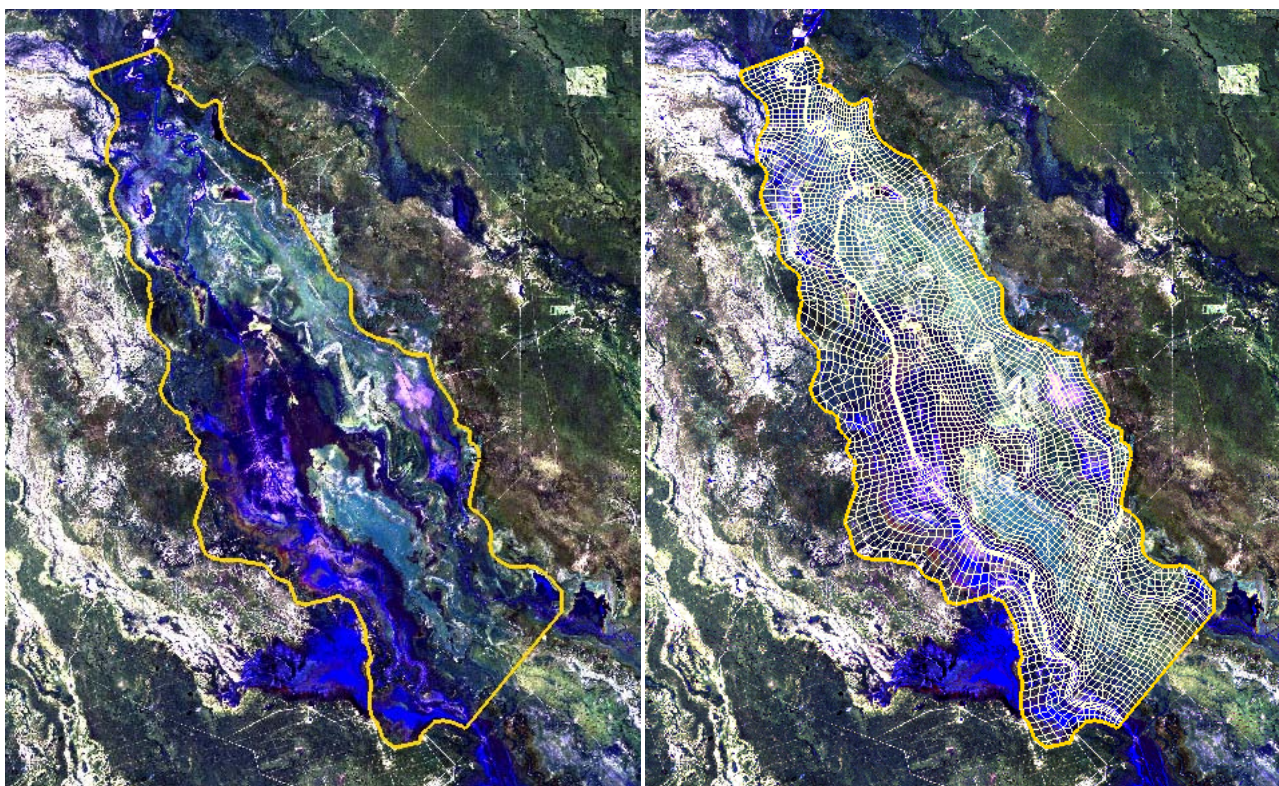
Para analizar esta situación con mayor claridad, se realizó una corrida con las mismas condiciones iniciales y de contorno, pero considerando en la cabecera sedimentos en suspensión más finos compuestos en un 80% por arcilla. Para estas condiciones los resultados obtenidos indicaron una disminución progresiva de las concentraciones con el recorrido, con altas concentraciones en el extremo final del tramo de estudio.

Los modelos unidimensionales, al trabajar con velocidades medias en distintos sectores de la sección transversal, explican con mayor claridad el funcionamiento morfológico de flujos encauzados, situación en la que los parámetros hidrosedimentológicos pueden ser caracterizados mediante valores medios en la sección, dado que los procesos de sedimentación en las zonas de desborde se presentan en sitios puntuales, donde las tensiones de corte adquieren valores suficientemente pequeños como para que las partículas puedan caer.

### ***Modelo bidimensional:***

La modelación 2D se realizó con el modelo hidrodinámico RMA2, al que se acopló el módulo sedimentológico SED2D.

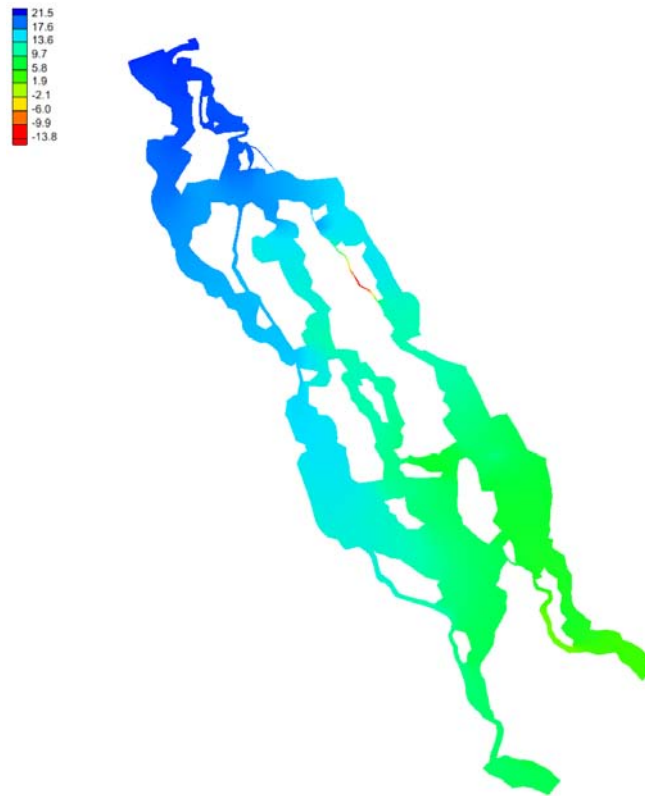
Abarca el tramo del río Pilcomayo y su zona de desbordes en Argentina y Paraguay, desde aproximadamente 10 kilómetros aguas arriba del Pantalón hasta una sección extrema aguas abajo, localizada entre El Simbolar y El Potrillo en la margen argentina (Figura 5). Tiene una longitud del orden de los 70 kilómetros y un ancho medio de 20 kilómetros.



**Figura 5.-** Zona modelada en el RMA2 y malla de cálculo

Siendo el aspecto de mayor interés en esta etapa del estudio la forma en que se producen y desarrollan los depósitos en la zona de desborde y el consecuente decaimiento en las concentraciones, debe caracterizarse el material en suspensión y definir a partir de allí la velocidad de caída típica del sedimento suspendido.

Los resultados del modelo SED2D se presentan en la Figura 6 para una condición de crecida, donde se indica la distribución de concentraciones de sedimentos suspendidos en gramos/litro en la malla de cálculo luego del secado de la misma, es decir sin tener en cuenta los sectores donde no se producen desbordes.



**Figura 6.-** Distribución de concentraciones [g/l]. Condición de crecida, caudal 3201m<sup>3</sup>/s. Con secado de malla

El estudio de la deposición de limos y arcillas transportados en suspensión como carga de lavado, presenta serias dificultades por la complejidad de los fenómenos involucrados (Van Rijn, 1993), incluyendo aspectos tales como la formación y rotura de flóculos, velocidad de caída de las partículas individuales y de los flocs, características de los escurrimientos, turbulencia, concentración de sólidos, etc.

Por ello, históricamente la descripción de los mecanismos de sedimentación de las fracciones finas, se ha basado en estudios experimentales a partir de los cuales se han desarrollado metodologías para cuantificar los procesos. Estas metodologías, basadas en observaciones empíricas, han caracterizado los procesos de deposición en función de las características de los sedimentos en suspensión, las concentraciones y la tensión de corte en el fondo (Mehta et al., 1975).

Los modelos numéricos incorporando estos conceptos, consideran que los limos y las arcillas se transportan sin deposición mientras el esfuerzo de corte en el lecho sea superior a cierto valor considerado crítico. Si dicho esfuerzo es menor que el valor crítico, la tasa de deposición se calcula en función de parámetros característicos del flujo como la tensión de corte en el fondo, la concentración y la velocidad de caída de las partículas.

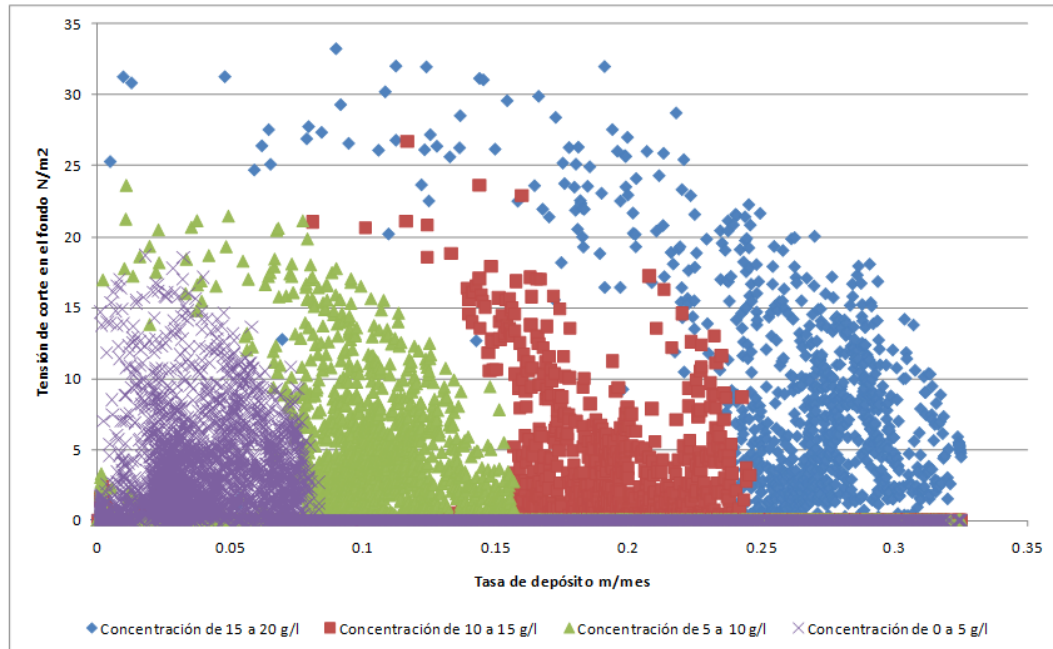
Teniendo en cuenta la forma en que los modelos matemáticos cuantifican la sedimentación de finos, se determinó una función o ecuación de transferencia para extrapolar los resultados del modelo morfológico implementado con el SED2D, con el objeto de poder estimar los depósitos que se registrarían con los parámetros hidráulicos (tirante y velocidad) obtenidos de las corridas con cualquier modelo hidrodinámico. En este caso particular dicha aplicación se realizó a partir de resultados del modelo ISIS2D (Halcrow Hydrocontrol, 2010).

La ecuación de transferencia relaciona la tensión de corte en el fondo, que puede calcularse mediante parámetros hidráulicos que se tienen en cada nodo de la malla de cálculo, con la tasa de deposición, en función de la concentración.

A partir de los resultados de la corrida del SED2D para un caudal de crecida permanente de 1715 m<sup>3</sup>/s y una concentración de ingreso en el extremo de aguas arriba del modelo de 20 g/l, se

procedió a graficar los pares de valores “tensión de corte en el fondo – tasa de sedimentación” para todos los nodos de la malla de cálculo, asignando rangos en función de la concentración.

En la Figura 7 se muestra el análisis efectuado, en donde se agruparon los pares de valores para concentraciones de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 15 y 15 a 20 g/l. Puede notarse, para los distintos grupos de puntos, la tendencia al aumento en los depósitos para menores tensiones de corte en el fondo.



**Figura 7.-** Pares de valores “tensión de corte en el fondo – tasa de deposición” en función de la concentración. Corrida  $Q=1715 \text{ m}^3/\text{s}$   $C_0=20 \text{ g/l}$

Del gráfico anterior es posible obtener expresiones para caracterizar la relación entre tensiones y tasa de deposición para diversas concentraciones. Tomando por ejemplo una concentración del orden de 10 g/l, la ecuación obtenida fue:

$$\Delta z = \left[ \frac{(25 - \tau_b)}{26700} \right]^{1/4} \quad [1]$$

donde las unidades de la tasa de sedimentación están expresadas en metros por mes.

Considerando que la tensión de corte en el fondo puede expresarse mediante la relación:

$$\tau_b = \frac{\rho \cdot g \cdot U^2 \cdot n^2}{h^{1/3}} \quad [2]$$

donde “n” es el número de Manning, puede determinarse la distribución areal de la tasa de sedimentación a partir de los resultados de corridas de cualquier modelo hidrodinámico con el que se obtengan valores de la velocidad “U” y del tirante “h”.

## CONCLUSIONES

Se han presentado estudios desarrollados tendientes a enriquecer el conocimiento del comportamiento fluviomorfológico del río Pilcomayo en la zona de divagación, apoyados por series de datos básicos de caudales líquidos y sólidos, y granulometrías de material del lecho y en suspensión.

Para la realización de los estudios se recopilaron todos los registros disponibles de aforos líquidos y sólidos, además de datos de granulometrías de material del lecho y suspensión en Misión La Paz.

Los intentos de medir parámetros del escurrimiento aguas abajo en crecida no dieron el resultado esperado, fundamentalmente por el alto grado de dificultad que involucra esta tarea en el río Pilcomayo, en aguas altas. Deben explorarse metodologías de medición que permitan obtener resultados, al menos de tipo cualitativo.

Los modelos numéricos utilizados cumplieron los objetivos buscados, aportando interesantes conclusiones sobre el comportamiento del río encauzado y en la planicie, y los patrones de sedimentación. Debe, no obstante, seguir estudiándose el tema, que aún presenta aspectos no resueltos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Brea, J.D.; Jaime, P.; Spalletti, P.** (2007). *Estudios de Erosión, Transporte y Sedimentación en la Cuenca Alta del Río Pilcomayo*. Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo. Contrato Comisión Europea n.ASR/B7-3100/99/136. Proyecto LHA 628. Informe Final - LHA 03-628-07. Ezeiza, Octubre de 2007.

**Halcrow Hydrocontrol** (2010). *Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Pilcomayo. Obtención de Información Básica para la Realización del Estudio de Prefactibilidad de la Obra del Dique Distribuidor*. Referencia de Publicación: SERV/002/2009/1.

**Metha, A.J.; Partheniades, E.** (1975.) "An Investigation of the depositional properties of flocculated fine sediments". *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 13, No. 4 (1975).

**Spalletti, P.; Brea, J.D.** (2009). "Análisis de los escurrimientos en territorio argentino de caudales provenientes del río Pilcomayo". *Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Salta, Argentina.

**Subsecretaría de Recursos Hídricos** (2010). *Subsecretaría de Recursos Hídricos. Programa de Monitoreo Sistemático del río Pilcomayo (Misión La Paz, Prov de Salta, Argentina). Período 2008-2009 – Informe Consolidado, 42 páginas*. Producido por Orfeo, Oscar. Unidad Ejecutora CONICET: CECOAL (Centro de Ecología Aplicada del Litoral) Documento Técnico de Circulación Restringida.

**Van Rijn, L.C.** (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Acqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.