

INFLUENCIA DE LA EXTRACCIÓN DE ÁRIDOS EN LOS RÍOS II Y IV DE CÓRDOBA

Corral M.¹, Hillman G.¹, Pagot M.¹, Moya G.¹, Baldissone M.¹, Rodriguez A.¹, Lopez F.^{1,2}, Hiruela J.¹, Martínez R.¹, Díaz A.^{1,2}, González J.^{1,2}, Bazán G.² y Muratore H.¹

¹Laboratorio de Hidráulica, FCEfyN, UNC.

²Dirección Provincial de Aguas y Saneamiento (DIPAS)

Av. Veléz Sarsfield 1601. TE: 4334446

E-mail: mcorral@com.uncor.edu

RESUMEN

En las últimas décadas se ha observado un continuo descenso generalizado de los cauces naturales de los ríos Segundo y Cuarto de Córdoba. En ambos casos se presentan las actividades de extracción de áridos que se realizan, las cuales comprometen la estabilidad de las estructuras civiles que se emplazan en dichos cauces. Por ejemplo se han desprotegido las fundaciones de las pilas de varios puentes de la ciudad de Río Cuarto (Malvinas Argentinas, Carretero, Ferroviario, Antártida Arg.), también se ha producido el destape del poliducto privado REPSOL-YPF. De igual manera las actividades de explotación que se realizan en el Río Segundo, han provocado un desequilibrio del sistema y aceleraron procesos de erosión general y local. Algunos ejemplos de esto son cambios de pendiente del cauce, erosiones locales en curvas, el destape del sifón del Canal Los Molinos – Córdoba, la obra de toma de Cosme se ha tornado inutilizable y una diversidad de pilas han sido erosionadas en varios puentes (Capilla del Carmen, Villa del Tránsito, Arroyito). En orden a estudiar la influencia de esta actividad, se localizaron las principales canteras a lo largo de los ríos en estudio y se han cuantificado los volúmenes de extracción de áridos. Posteriormente para un estudio experimental, se han seleccionado 10 secciones en el Río Cuarto, en donde se ha realizado dos campañas de muestreo (nivelación topográfica, muestreo de sedimentos, aforos líquidos y sólidos).

Finalmente se presentan algunas simulaciones numéricas realizadas con HEC-6. Los resultados preliminares consideran la erosión general del Río Cuarto para un caudal asociado a baja recurrencia (2 años y 160 m³/s) y la sedimentación de los azudes localizados aguas abajo de los Puentes Carretero y Ferroviario.

ABSTRACT

In the last decades continuous generalized reductions of the natural bed level of rivers Segundo and Cuarto of Cordoba have been observed. In both cases several activities of sand mining are presented, which compromise the stability of the civil structures located in these rivers. For instance foundations of piers of several bridges of the city of Rio Cuarto are unprotected (Malvinas Argentinas, Carretero, Ferroviario, Antártida Arg.), also the pipe of REPSOL-YPF company has been eroded under its bed level. In the same way the mining activities in the Segundo river, have caused an unbalance of the sediment system and accelerated processes of general and local erosion. Some examples of them, are bed slope changes, local erosion in bends, the uncover of the syphon conduct of the Los Molinos–Córdoba channel, the water supply pipe of Cosme town has become useless, and a diversity of piers are eroded in various bridges (Capilla del Carmen, Villa del Tránsito, Arroyito). In order to study the mining influence, the sites were located along the river and the extraction volumes have been quantified. After that ten sections of Cuarto River were selected for an experimental study, where two field campaigns have been carried out (topographic surveys, sediment sampling and liquid and solid measurements).

Finally some numerical computations using HEC-6 model are presented. The preliminary results appear to consider both, the general erosion of the river reach during a small flood (2 years and 160 m³/s), and the sedimentation due to the small dams downstream of the Carretero and Ferroviario bridges.

INTRODUCCIÓN

Las actividades de extracción provocan un claro desequilibrio en el escurrimiento, modificando su resistencia y acelerando procesos de erosión que se manifiestan en el cauce con cambios de pendiente, erosiones localizadas, etc.

Así, durante las últimas décadas se ha observado un continuo descenso generalizado de los cauces naturales de los ríos Segundo y Cuarto de Córdoba, sometidos en ambos casos a actividades de explotación como la extracción de áridos. Como consecuencia, se presentan erosiones locales y generales que ponen en riesgo la estabilidad de diversas estructuras emplazadas en los mismos.

Es importante mencionar que aguas arriba de la ciudad de Río Cuarto se han contabilizado un total de 22 canteras, no existiendo un registro objetivo de los volúmenes explotados pero si de los declarados. Este hecho imposibilita la determinación concluyente de su efecto en la evolución del río, imprescindible para la planificación integral del recurso.

Las obras civiles que se emplazan en el cauce han visto comprometidas su estabilidad, como por ejemplo la erosión de pilas que se manifiesta en prácticamente todos los puentes de la ciudad de Río Cuarto (Malvinas Argentinas, Carretero, Ferroviario, Antártida Arg.) como así también en obras privadas como el destape actual del poliducto REPSOL-YPF. En la Figura 1 se presenta una fotografía de las pilas del Puente Carretero en donde se observa el descenso del tramo. En la Figura 2 se presenta el sitio del poliducto REPSOL-YPF (7 Km aguas arriba del Puente Malvinas o del ingreso a la ciudad) en donde se puede destacar en el sector derecho de la fotografía el destape del poliducto y en el izquierdo protecciones de las márgenes.



Figura1.- Descalce de pilas del Puente Carretero por descenso del cauce del Río Cuarto.



Figura 2.- Destape del poliducto REPSOL-YPF (der) y protección en margen con pantalla metálica (izq).

De igual manera las actividades de explotación se realizan en el Río Segundo, contabilizándose 20 canteras autorizadas para la extracción de áridos en el tramo, que comprende desde la localidad de Despeñaderos hasta la desembocadura en la Laguna Mar Chiquita.

Las actividades de extracción provocan un claro desequilibrio en el escurrimiento, modificando su resistencia y acelerando procesos de erosión que se manifiestan en el cauce con cambios de pendiente, erosiones localizadas, etc. Un relevamiento actual del cauce del río Segundo (UNC, 2005) presentó claros signos derivados de este proceso, como el destape del entubamiento del Canal Los Molinos – Córdoba, el colgamiento de la obra de toma de Cosme y una diversidad de pilas erosionadas en puentes como Capilla del Carmen, Villa del Tránsito, Arroyito, etc. (Figura 3).



Figura 3.- Pila de Puente Canal sobre Río Segundo en Va. del Tránsito

Las causas que dan origen a este proceso son diversas, pudiendo clasificarse en naturales y antrópicas. Entre las primeras se incluyen las propias del cauce y cuenca de aporte, como aquellas derivadas de un cambio general del régimen de aporte de caudales al río.

Entre las antrópicas, que se registraron en las cuencas de aporte a cada río y en los mismos cauces, pueden mencionarse modificaciones del uso del suelo en la cuenca de aporte (desmonte de bosque natural), intervención sobre el escurrimiento natural del río (azudes), o bien modificaciones en las tasas de aporte sedimentológico (extracción de áridos).

Si bien desde el LH de la UNC se ha participado activamente tanto en la modelación física de

los azudes del Río IV (Moya et. al, 2003) como en la solución ingenieril de protección del poliducto REPSOL-YPF (Corral et. al, 2003), estos estudios apuntaban a solucionar problemas locales. Sin embargo no fue objetivo de estos estudios la cuantificación de la actividad de extracción de áridos en el cauce.

Los procesos que modifican el nivel del lecho del río mencionados anteriormente, entre los cuales se destaca a la extracción de áridos, han acarreado problemas en la estabilidad de los puentes que en esa ciudad se emplazan provocando inversiones millonarias por parte del estado provincial en la construcción de los Azudes de los Puentes Carreteros y Ferroviarios para salvaguardar la estabilidad de dichas estructuras.

Estas razones han motivado la realización de un proyecto que permita establecer los límites admisibles de extracción de sedimentos en estos cauces naturales, a través de un trabajo integrador entre la UNC y la DIPAS.

Estas causas pueden actuar en forma aislada o bien combinadas, siendo la interacción entre ellas difícil de cuantificar por métodos tradicionales.

OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo es la caracterización hidrosedimentológica de los ríos Cuarto y Segundo, determinando el impacto generado por la presencia de la extracción de áridos.

Los objetivos generales son:

- Identificar y caracterizar los procesos morfodinámicos activos en el cauce.
- Obtener un diagnóstico de la situación actual, relacionado a la erosión y sedimentación.
- Evaluar la influencia de la extracción de áridos sobre cada caso en particular.

De los anteriores surge la necesidad de analizar y definir temas específicos tales como:

- Tasa admisible de extracción de material granular en el cauce.
- Mapas de zonificación, temáticos etc. que permitan diseñar un esquema de explotación que minimice el impacto ambiental sobre el ecosistema.
- Programa de monitoreo y control sistemático de las explotaciones areneras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las actividades planificadas para llevar a cabo comprenden varios tópicos de la geomorfología y la hidráulica fluvial, entre las cuales se destacan:

- Análisis de información cartográfica, fotos aéreas, imágenes satelitales y topografía del tramo.

- Identificación de secciones claves para aforos de caudales líquidos y sólidos en períodos de crecida y estiaje, registro a largo plazo de sección de control
- Relevamiento de las explotaciones, tasa de extracción e influencia local y general en el cauce.

Estas actividades se encuentran en desarrollo por lo que se presenta en este trabajo el avance en esta temática.

El análisis de información cartográfica consiste en la inspección y comparación temporal de márgenes erosionadas, la migración lateral de meandros, el cambio de la sinuosidad, etc.

En primer lugar se ha realizado un relevamiento de las secciones transversales del río y su vinculación entre sí a través de una poligonal geométrica sobre la margen derecha, para la comparación y el seguimiento de los perfiles a lo largo del período de estudio.

Para la medición de caudales líquidos se utilizan las técnicas convencionales de aforos con molinetes, como así también se han emplazado escalas en el vertedero del azud del puente Carretero y en breve se emplazará un limnígrafo en esta sección consideradas clave para el estudio. La frecuencia de muestreo ha sido bimensual en estiaje y durante crecidas se combinarán aforos con molinetes y trazadores en el flujo.

Para la medición de caudales sólidos en fondo se está desarrollando instrumental similar a la trampa para sedimentos diseñada por Helley y Smith (1971) con modificaciones ad hoc. Esta consiste en una caja metálica rectangular con una boca abierta hacia el flujo y una bolsa receptora colocada detrás de ésta para el almacenamiento de sólidos. (Figura 4). Los aforos sólidos se realizan simultáneamente a los líquidos y en consecuencia tienen una frecuencia bimensual en estiaje pero se prevé la medición de transporte sólido en situaciones de crecida.

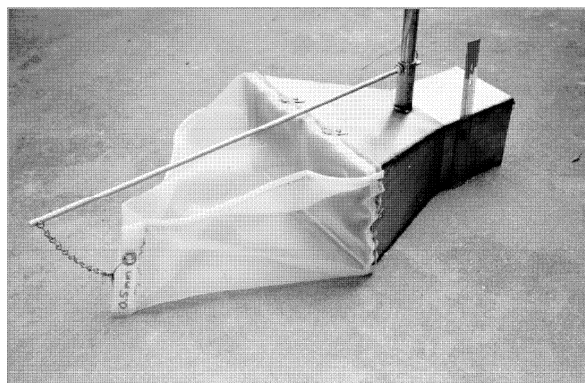


Figura4.- Trampa H-S para transporte de fondo.

Para el transporte en suspensión se emplea el muestreador tipo US DH-48 (Figura 5), que se inserta en la columna de agua, durante un tiempo establecido, integrando la concentración de sedimentos en suspensión en la dirección vertical. El agua ingresa a través de una boquilla en la parte frontal y es captada por una botella colocada dentro del cuerpo de aluminio de la trampa, mientras se la hace recorrer entre la superficie del agua y las proximidades del fondo del lecho, así el agua colectada representa toda la dirección vertical.



Figura5.- Muestreador US DH-48 para sedimentos en suspensión

Además se realizarán experimentos de cubicación en la zona de emplazamientos de areneras (tramo 6 Km aguas arriba de la ciudad) y en los azudes. Esto complementariamente permitirá evaluar el impacto de las obras hidráulicas de retención en el cauce.

Desde el punto de vista teórico se utilizan expresiones para estimar el caudal sólido en las secciones relevadas, por lo que en breve se complementará el trabajo con un balance de la fase sólida. Este balance se realizará con el apoyo de planillas electrónicas y de modelos numéricos fluviales como HEC-6 (USACE, 1993), ya utilizado para modelar la influencia de los azudes en el cauce del Río Cuarto.

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y ACTIVIDADES DE EXPLOTACIÓN

Río Cuarto

La cuenca imbrífera del Río Cuarto comprende desde la Sierra Alta de Comenchingones a los Bañados del Río Saladillo abarcando una superficie aproximada de 2300 Km², y dividiéndose en 2 zonas: la cuenca alta serrana y la cuenca baja o de llanura.

La zona en estudio se ubica en el ingreso a la cuenca baja, en la cual recibe el aporte de unos 1600 Km², presentando características regionales geomorfológicas de suaves pendientes, terrenos muy permeables y cultivados casi en la totalidad de su extensión.

En particular se estudia el tramo entre Costa del Tambo - Ciudad de Río Cuarto (donde se encuentra el sector en estudio), se caracteriza por una pendiente que alcanza los 4,10 m/Km, un ancho de cauce variable entre 100 y 450 m con altura de barrancas del orden de 5 a 6 m. Desde la ciudad de Río Cuarto hasta Alejandro, la pendiente se reduce a 2,85 m/Km, con un cauce variable entre 60 y 140 m.

Las explotaciones se ubican entre las nacientes del Río Cuarto o Chocancharava y el paraje Sol de Mayo, donde se encuentra 22 explotaciones comerciales. En la Figura 5 se presenta la ubicación de las mismas.

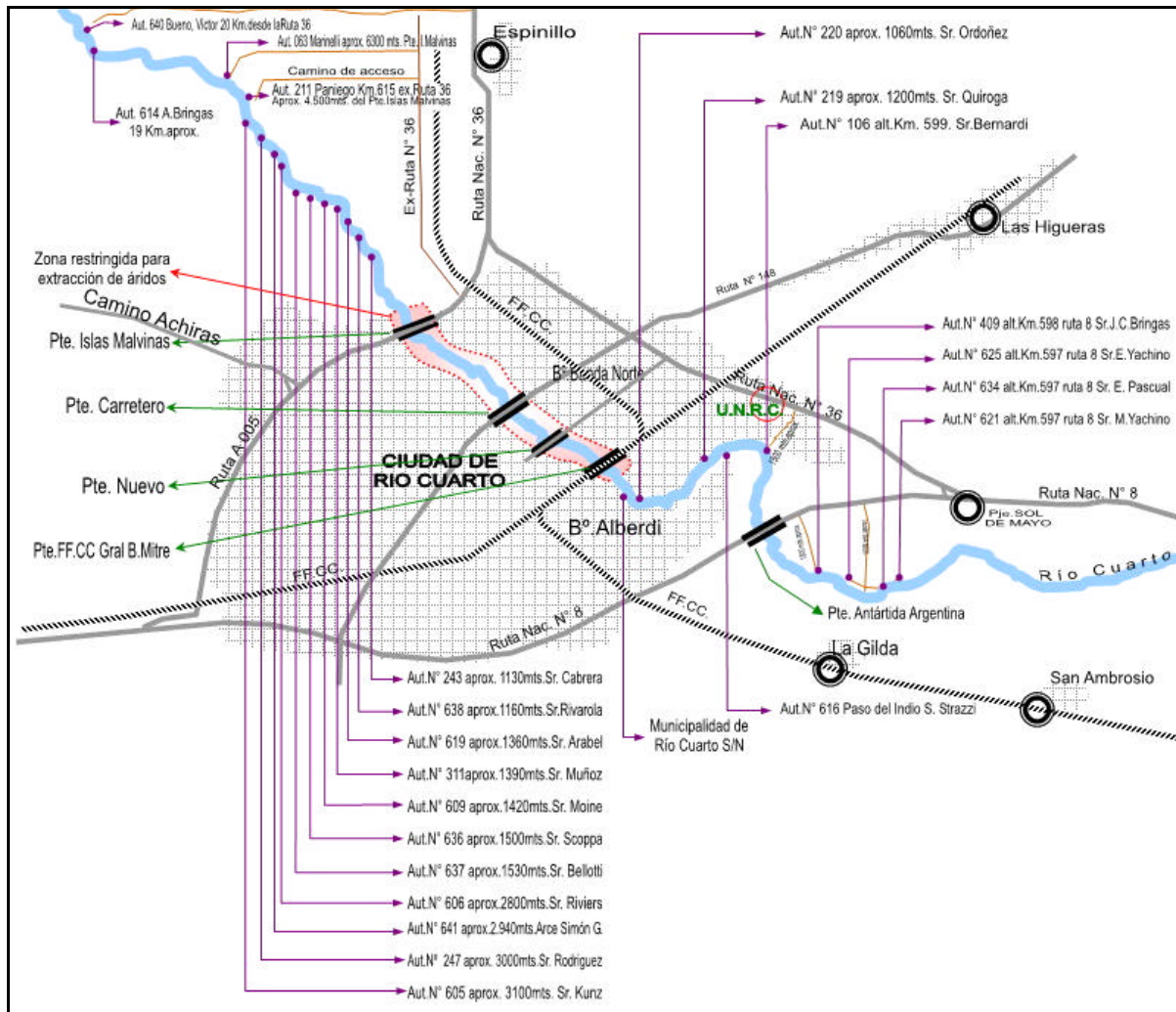


Figura6.- Ubicación de las explotaciones en Río Cuarto (DiPAS).

Entre los métodos utilizados para la extracción de áridos se utiliza generalmente el "sistema manual" que consiste en extraer los áridos por medio de una pala manual o una pala de buey cuyo arrastre es, en general, con tracción a sangre. Además en dos explotaciones se emplea el balde volcador (o dragadina) que consiste en arrastrar una pala en forma transversal al río arrojando el material hacia las zonas de acopio dejando una zanja en el río. (Figura 7)



Figura7.- Extracción con Balde Volcador.

En el siguiente gráfico se muestran el total de áridos extraídos entre todas las canteras durante

1998 y 2004, según los registros de la DiPAS, alcanzando un máximo de 80.000 m³ en 1998 y un mínimo de aprox. 45.000 m³ en 2003.

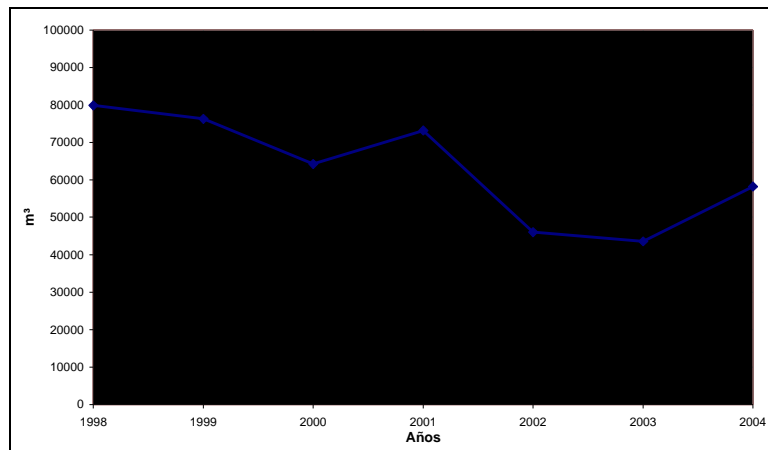


Figura8.- Variación de volúmenes extraídos anuales en m³ (DiPAS).

Río Segundo

La cuenca del Río Segundo abarca aproximadamente 12.000 Km², en donde se destacan 3 zonas. La zona serrana que comprende las cuencas imbríferas de los principales tributarios, ríos Los Molinos y Anizacate, la zona de llanura, en que se unen ambos ríos, antes mencionados, para formar el río Segundo, corriendo éste por un cauce bien definido hasta Villa del Rosario y la zona de divagación y bañados que abarca no sólo el cauce del río Segundo entre Villa del Rosario y la laguna Mar Chiquita, sino también los bañados que provocan sus desbordes y el de otros arroyos y cañadas paralelos a su cauce.

Entre los antecedentes obrantes en DiPAS con relación a las canteras autorizadas para extracción de áridos se contabilizan un total de 20 canteras (Figura 9), ubicadas aproximadamente desde la localidad de Despeñaderos hasta la desembocadura en la Laguna Mar Chiquita.

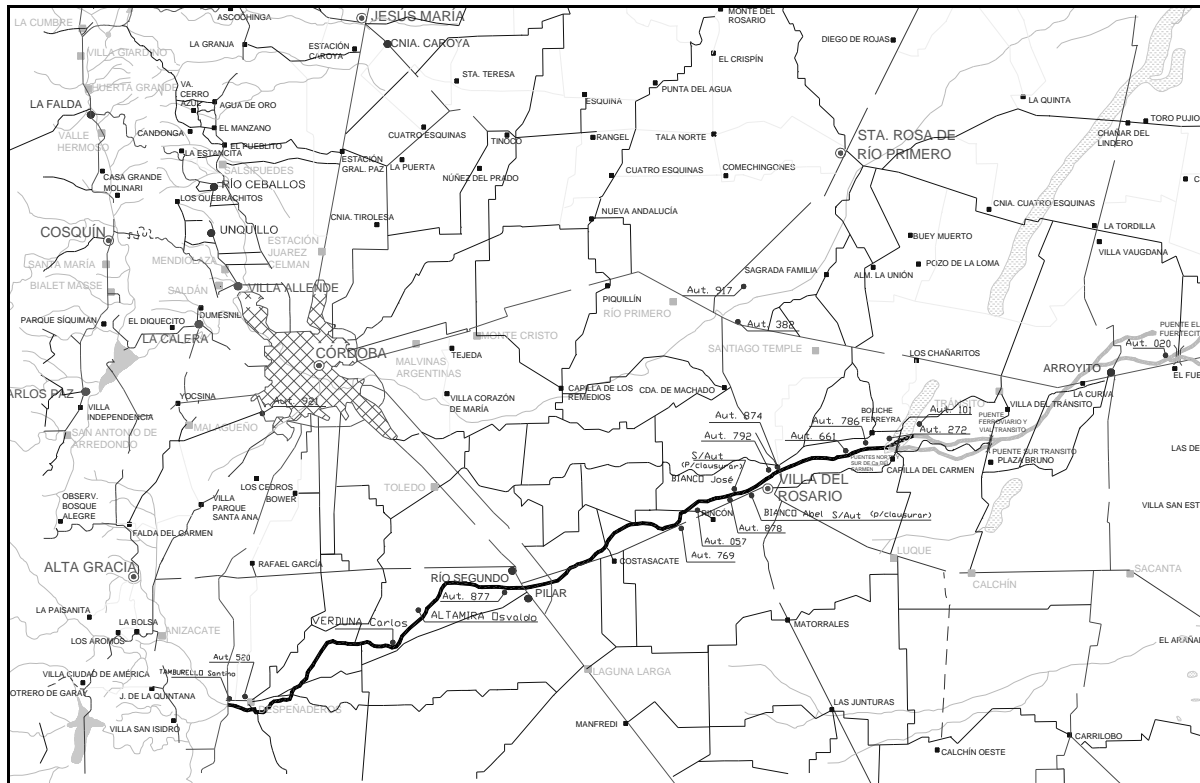


Figura8.- Ubicación de las canteras autorizadas en Río Segundo (DIPAS)

Los métodos utilizados para la extracción de áridos en el Río Segundo se pueden resumir en: “sistema manual”, balde volcador o “dragalina”, bomba aspirante que succiona el material del cauce y lo deposita en el acopio (Figura 9) y métodos mecánicos como topadoras, retroexcavadoras, camiones, trabajando dentro del cauce de los ríos en épocas de estiaje.



Figura9.- Balsa con bomba aspirante trabajando en el cauce del Río Segundo, tramo Plujunta

Los volúmenes mensuales de áridos extraídos en el cauce del Río Segundo (Xanaes) se presentan en la Figura 10.

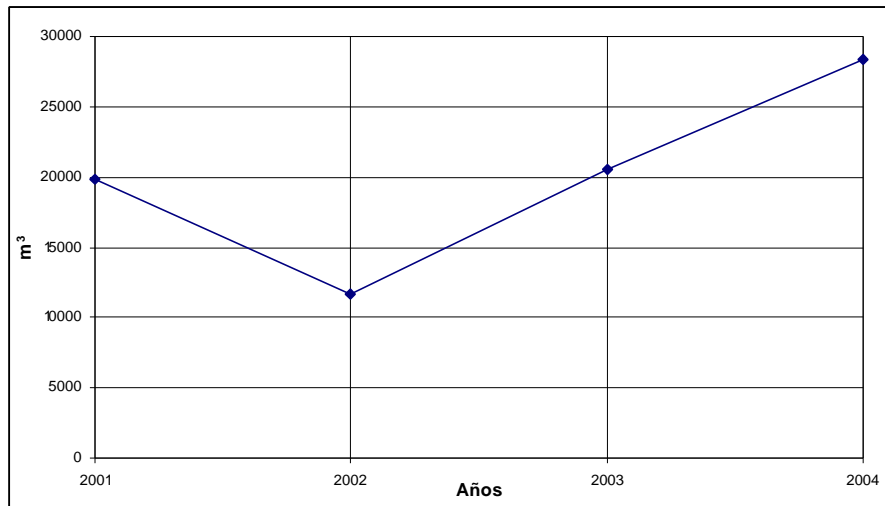


Figura 10.- Variación de volúmenes extraídos anuales en m³ (DiPAS).

Analizando la curva de volúmenes de áridos extraídos, se observa que en el año 2002, el volumen extraído se mantuvo por debajo del promedio aportado por el Río Xanaes (estimado en 1300 m³), mientras que en los restantes años del periodo analizados la extracción resultó superior el volumen aportado por el río.

Los volúmenes totales anuales registrados por declaraciones de canteristas a DiPAS durante los años 2001 a 2004 indican un valor máximo en el año 2004 con 28349 m³ y una media de 2362 m³ superior en aprox. 1000 m³ al promedio de aporte del río.

ACTIVIDADES REALIZADAS Y RESULTADOS

Experimentos en Laboratorio

En primer lugar se construyó una trampa modelo en chapa para verificar el funcionamiento general del instrumento, con la que se efectuaron una serie de ensayos en el canal de vidrio de pendiente variable del Laboratorio de Hidráulica (U.N.C.). Es importante mencionar que los ensayos realizados sólo tienen por objetivo mejorar el diseño de la trampa H-S para las condiciones locales del estudio, pero que éstos no deben ser tomados como una calibración de la trampa.



Figura 11.-Vista de la trampa en uno de los ensayos.

Se describe a continuación las características de cada ensayo y las particularidades del mismo, así como también el objetivo de cada uno:

- E1: Canal con fondo fijo, con trampa: Estudio de las líneas de corriente en el entorno de la trampa.
- E2: Canal con fondo móvil, sin trampa: Analizar el comportamiento de las condiciones de contorno en el canal y el transporte de sedimentos.
- E3: Canal con fondo móvil, con trampa: Verificar funcionamiento y obtener resultados.
- E4: Idem E3, pero la trampa ubicada a distinta posición longitudinalmente.

Se presentan los resultados del E1 (sin trampa – Figura 12) y E4 (con trampa – Figura 13), esta es una comparación del perfil del lecho móvil para cuantificar la influencia del muestreador sobre el lecho, así como también ver la influencia local producida por ésta. Esto permitió proponer modificaciones sobre la original con el objetivo de aislar las mediciones de sólidos del arrastre por la turbulencia generada en la entrada.

La modificación consiste en una extensión metálica en la base de la trampa hacia la parte de aguas arriba, evitando así que la turbulencia generada por la nariz de ésta haga que más sólidos que los transportados por la corriente entren a la misma. Así se pasó de eficiencias de 2,83 a la eficiencia final lograda de 1,46. Sin embargo en Rosatti (1989) se obtuvieron eficiencias del orden de 1,3 a 1,4.

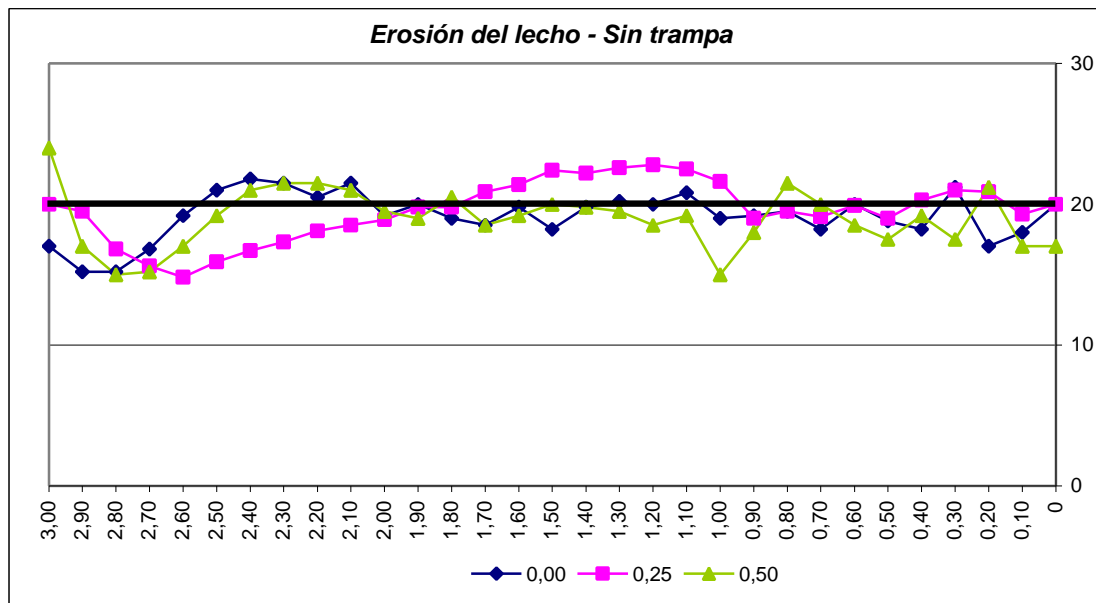


Figura 12.- Topografía resultante luego del ensayo E1. Sin trampa.

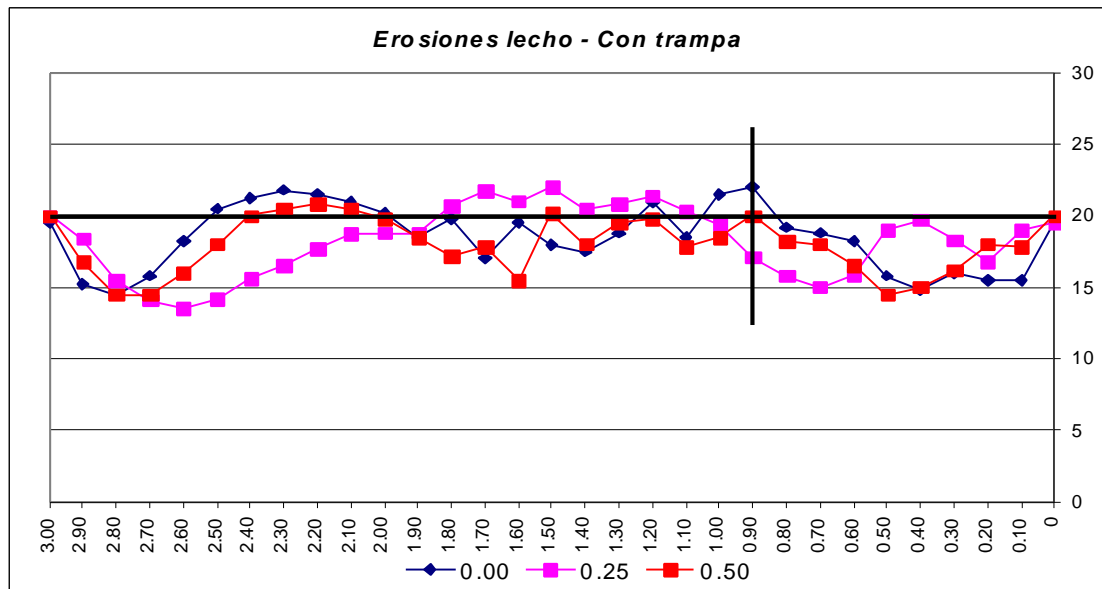


Figura 13.- Topografía resultante luego del ensayo E4. Trampa en el canal.

Experimentos en Campo

Río Segundo

Evaluación del estado del cauce

El proceso de extracción de áridos también ha afectado a éste río de la misma manera que en el Río Cuarto, afectando a puentes, obras de toma para riego, conductos, etc.,. En la Tabla N° 1 se muestra el resumen del relevamiento llevado a cabo en dicho río donde se muestra el descenso en sitios de relevancia.



Figura 14.- Vista del destape de la fundación del Puente Ferroviario Tránsito sobre el Río Xanaes

Tabla 1.- Resultado del relevamiento

Localidad	Erosión	Altura Barrancas	Material del Lecho
	(m)	(m)	
Cosme	1.2	s/d	s/d
Puente Autopista Pilar -Cba	1.5	s/d	s/d
Villa del Rosario - Pte. Viejo	0.5	1.5	Arenoso
Villa del Rosario - Pte. FFCC	0.5	1.5	Arenoso
Villa del Rosario - Pte. RP10	0.5	1.5	Arenoso
Capilla del Carmen-Pte.Vial	1.5	2	Arena fina
Villa del Tránsito-Pte. Vial	2	4	Arena fina
Villa del Tránsito-Pte. Canal	2.5	4	Arena fina
Arroyito - Pte. RP19	0.5	4	Limo arenoso
Arroyito - Pte. FFCC	0.5	4	Limo arenoso
Arroyito - Pte. Vial	1.5	4	Arena fina
El Fuertecito-Pte. Viejo	3	6	Arena fina
El Fuertecito-Pte. Nuevo	0.5	5	Arena fina
Villa Concepc.del Tío	2.5	6	Arena fina
Ea. La Feliciania	10	10	Tosca dura
Canal Plujunta	15	15	Arenoso
San Rafael	8	11	Limo arenoso
Marull - Pte. RP17	0	4	Limo arenoso
Azud Nivelador	0	1.5	Limo arenoso

Hasta el canal de Plujunta se observan una erosión media en pilas de puentes de aproximadamente 1,3 m. El cauce escurre con barrancas de altura promedio de 1,5 m a 6 m a la altura del Puente Romagosa en Villa Concepción del Tío. Ya desde la proximidad del Canal Plujunta se observan cárcavas de 11 m promedio de profundidad.

Debido a los procesos de extracción del material del lecho un estudio llevado a cabo por el Laboratorio de Hidráulica de la U.N.C. concluyó en la recomendación a las autoridades de suspender las actividades extractivas como mínimo hasta tanto se produzca una recuperación significativa en el tramo más afectado del cauce.

Comparación de aportes y extracciones

Para la estimación del material sólido transportado por el Río Xanaes o Segundo se siguió una metodología diferente a las propuestas anteriormente usadas en el Río IV. Esta se basa en determinar el volumen de sedimentos aportados por los ríos tributarios a los embalses y

relacionarlo con el tiempo, para ello se puede aprovechar los relevamientos batimétricos realizados con el fin de determinar el grado de colmatación de los mismos.

El Río Xanaes, se inicia en la confluencia de los ríos Los Molinos y el Río Anizacate, sobre el primero se construyó el dique los Molinos a partir del año 1953, lo que implica que a partir de dicho año, el río Xanaes recibe sedimento solamente del Río Anizacate.

Para la determinación del aporte de sedimento en el río Xanaes, se realizó una interpolación directa en función de las áreas de la cuenca con el río Los Molinos, debido a que las características de las cuencas son semejantes. El material arrastrado por éste se determinó en forma volumétrica utilizando un relevamiento batimétrico expeditivo realizado en el embalse Los Molinos en el año 1972 por Drago y Depetris (1975). Luego se determinó el material transportado por el río Xanaes de la forma descripta anteriormente.

El volumen total de sedimentos aportados por los afluentes del embalse Los Molinos desde el año 1953, año de realización de la obra, hasta 1972, año en el que se realizó el estudio batimétrico del embalse (19 años) se estimó en 9 Hm^3 que significa $0.47 \text{ Hm}^3/\text{año}$. La fracción de arena totaliza $33180 \text{ m}^3/\text{año}$.

Siendo la superficie de la cuenca Río Los Molinos de 980 km^2 y de la cuenca del río Anizacate de 460 Km^2 , resulta una relación entre áreas de $(460/980) = 0,47$, por lo que el volumen de arena aportado por el río Anizacate es $15.594 \text{ m}^3/\text{año}$ ó aproximadamente $1300 \text{ m}^3/\text{mes}$.

A modo de comparación se presentan en la figura 15, los volúmenes extraídos y aportados.

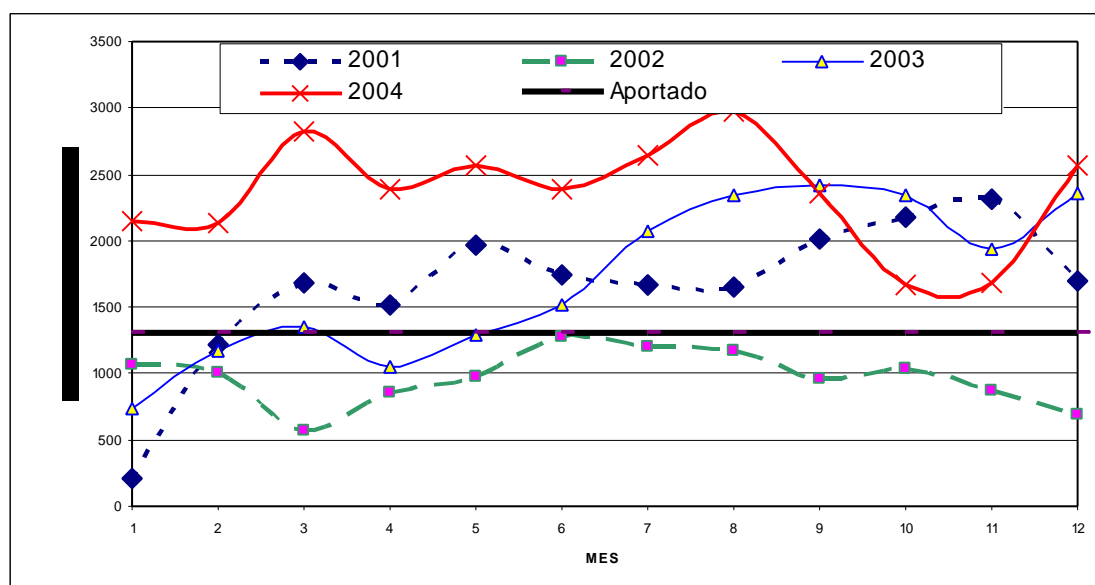


Figura 15.- Variación de volúmenes extraídos y aportados anuales en m³ (DiPAS).

Se puede observar que a partir del mes de mayo, prácticamente se supera el aporte anual.

Diagnóstico

El relevamiento realizado y las obras civiles evaluadas permitieron diferenciar las principales características que presenta el cauce en la actualidad, las cuales se mencionan a continuación:

- El aporte de sedimento al Río Xanaes lo realiza principalmente el Río Anizacate debido que la construcción del embalse Los Molinos a partir del año 1953 retiene los sedimentos de la cuenca de Los Molinos.
- La ubicación de “canteras secas”, en las márgenes del río provoca el debilitamiento de las mismas, con el peligro de producir cambios en el cauce e inundaciones. La mayoría de las canteras de extracción de áridos se ubican en el tramo de divagación y bañados, aguas abajo de Villa del Rosario, en la zona de depositación.
- Se supone que el volumen real de áridos extraídos del río Xanaes es superior a los existentes en los archivos de DIPAS, debido entre otras causas a la existencia de canteras no registradas por la DiPAS.

En el río Xanaes se ha producido erosión generalizada de cauce, puesto en evidencia por el descalce producido en las obras de artes construidas en el mismo. La principal causa identificada de la erosión generalizada en el cauce es la interrupción del caudal sólido producido por la construcción del Dique Los Molinos además del déficit existente entre la extracción de áridos y el aporte de sedimento por el río.

Río Cuarto

El tramo a estudiar se ha considerado desde 3 km aguas arriba del Puente Malvinas en la ciudad de Río IV hasta 200 m aguas abajo del Azud del Puente Carretero. De acuerdo a inspecciones del lugar se definieron 10 secciones desde la cantera de Marinelli (6 Km aguas arriba de la ciudad de Río Cuarto) hasta aproximadamente 300 m aguas arriba del Puente Ferroviario. Se presentan las secciones en la Figura 16.

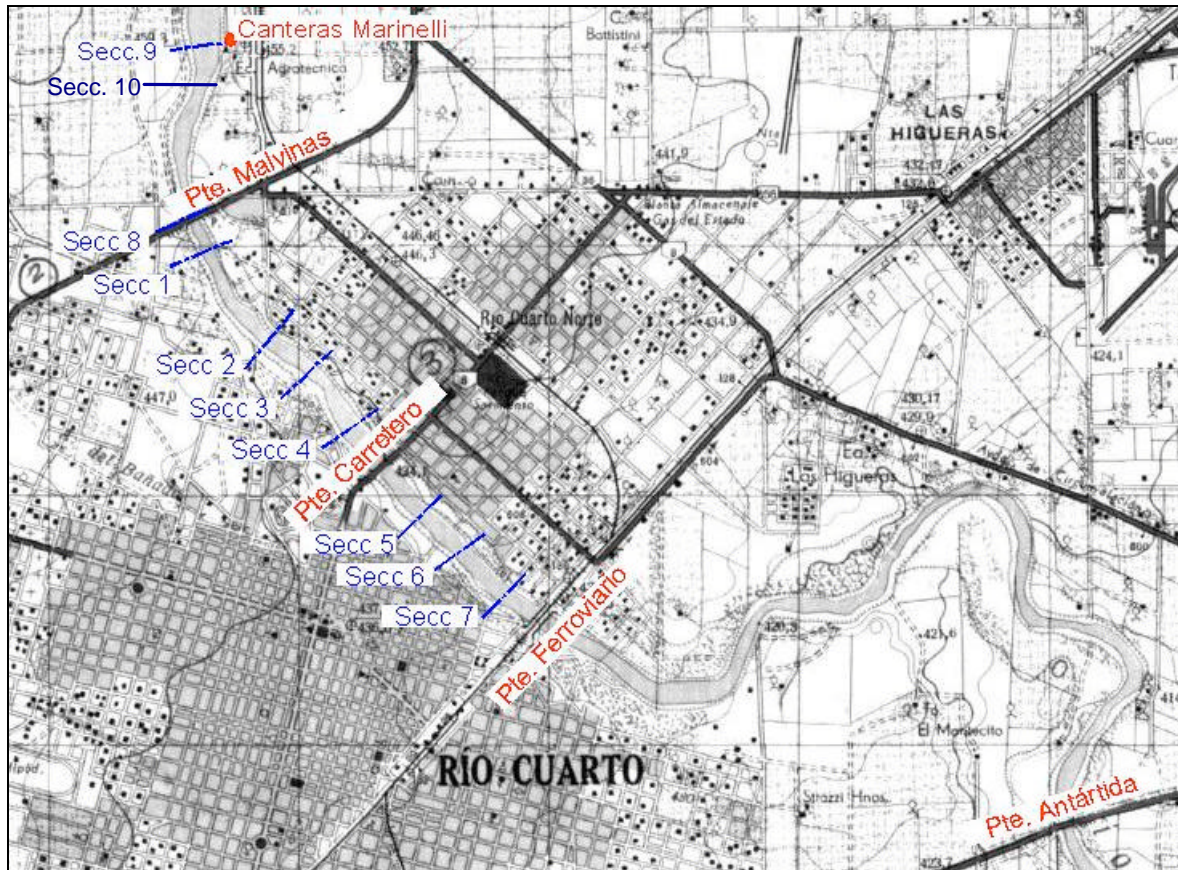


Figura 16.- Ubicación de secciones sobre carta del IGM a escala 1:50.000.

Resultados en campañas

Los datos obtenidos en las campañas tienen que ver con el relevamiento de las secciones claves y su vinculación entre sí, así como también medición de velocidades y de transporte de sedimentos en el fondo.

Durante la primera campaña se tomaron muestras del material del lecho del río. Se tomaron 3 muestras correspondientes a las secciones 2, 3 y 4 (Ver Figura 16 entre los puentes Malvinas y Carretero). En la Figura 17 se muestra la curva granulométrica correspondiente a la sección N°4. Se determinó el diámetro característico d_{50} de las muestras para cada sección que se resume en:

?	Sección N°2:	$d_{50} = 1,72 \text{ mm}$
?	Sección N°3:	$d_{50} = 1,20 \text{ mm}$
?	Sección N°4:	$d_{50} = 1,40 \text{ mm}$

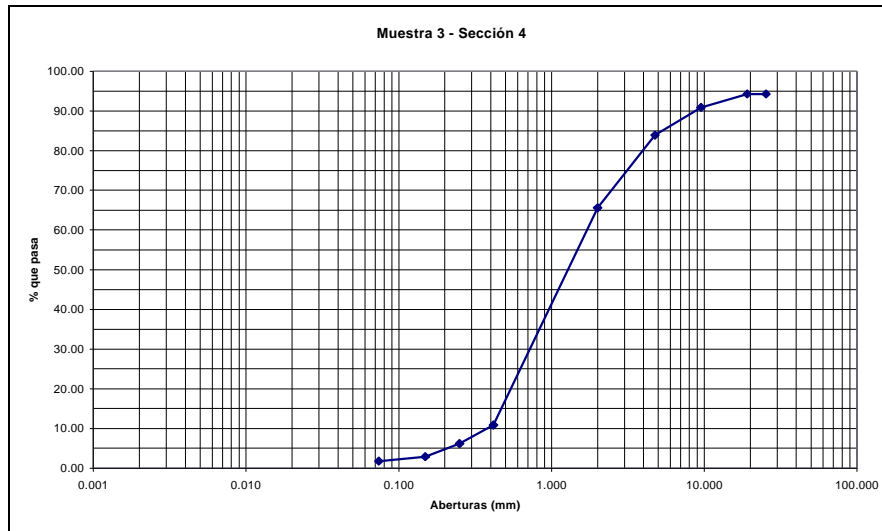


Figura 17.- Curva granulométrica. Sección N° 4.

Se realizaron conjuntamente los relevamientos de las secciones consideradas claves para su posterior seguimiento y comparación a lo largo del estudio. En las Figura 18 y 19 se muestran las secciones N°8 y N°9 respectivamente para las distintas fechas de aforo.

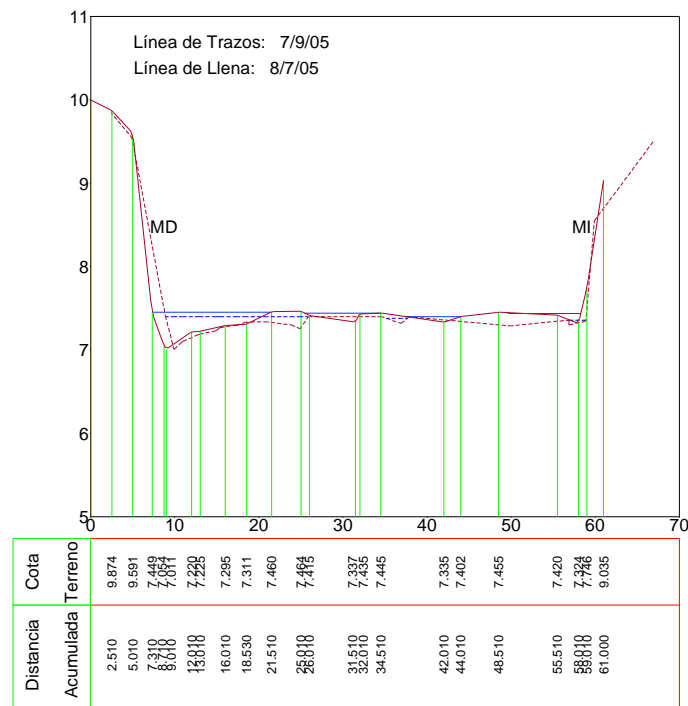


Figura 18.- Perfil transversal N°8. Fechas 7/9 y 8/7 de 2005

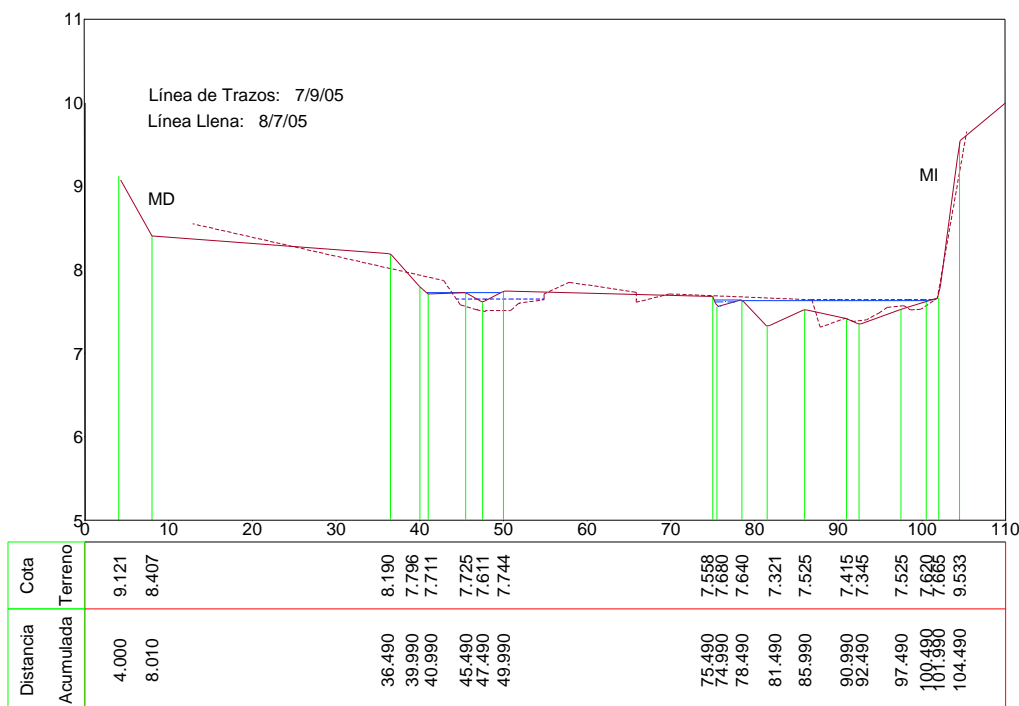


Figura 19.- Perfil transversal N°9. Fechas 7/9 y 8/7 de 2005

Los resultados de los aforos líquidos obtenidos de las campañas se presentan en la Tabla 2, observándose que el caudal en estiaje es aproximadamente $4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 2.- Caudales líquidos aforados.

FECHA	SECCION	CAUDAL LIQUIDO		
		V (m/s)	Area (m ²)	Caudal L. (m ³ /s)
08/07/2005	8	0.78	5.17	4.02
	9	0.96	4.07	3.89
	2	0.62	6.45	4.01
07/09/2005	8	0.75	5.00	3.75
	9	0.78	4.98	3.89
	10	1.07	3.56	3.79

El transporte de sedimento asociado a las condiciones del flujo del río y para cada sección transversal se determinó a partir de ecuaciones empíricas tales como las de Meyer-Peter y Müller, Shields para arrastre de fondo y total, Einstein-Brown, Engelund-Hansen, Yang para arenas y Ackers-White; también se presentan los resultados obtenidos a partir del muestreados H-S con las modificaciones desarrolladas en el Laboratorio de Hidráulica de la U.N.C.

Tabla 3.- Caudales sólidos aforados y estimados.

FECHA	SECCION	CAUDAL SOLIDO							
		ARRASTRE DE FONDO				ARRASTRE TOTAL			
		M-P-M (m ³ /día)	SHIELDS (m ³ /día)	E-B (m ³ /día)	Trampa (m ³ /día)	SHIELDS (m ³ /día)	E-H (m ³ /día)	Yang (m ³ /día)	A-W (m ³ /día)
08/07/2005	8	81.06	79.62	27.64		464.07	44.37	51.87	10.58
	9	169.72	137.26	15.31		1365.89	47.53	60.81	63.98
	2	82.95	107.04	26.24		326.29	39.96	45.54	17.51
07/09/2005	8	40.54	64.14	31.25	53.82	203.67	32.02	35.67	11.60
	9	63.46	51.49	20.85	34.50	384.36	31.74	37.26	19.15
	10	38.61	46.54	43.15	25.89	333.25	56.55	63.82	19.15

En resumen, en la zona de las areneras (Sección 9 y 10) el transporte de sedimentos por fondo es aproximadamente $30 \text{ m}^3/\text{día}$, mientras que aguas arriba del Puente Malvinas, se incrementa aproximadamente a $50 \text{ m}^3/\text{día}$. Las muestras de sólido en suspensión se encuentran en laboratorio para su análisis, por lo que no se pueden presentar su resultado.

MODELACIÓN CON HEC-6

El programa HEC-6 (USACE, 1993) estima la erosión o sedimentación utilizando datos geométricos o topográficos de las secciones transversales del tramo de estudio, propiedades de los sedimentos (granulometría, d_{50} , etc.), distintas ecuaciones de capacidad de transporte y datos hidrológicos (caudales, hidrogramas, temperatura del agua y duración del evento).

El modelo HEC-6 combina las ecuaciones hidrodinámicas de régimen permanente (HEC-2/HEC-RAS) con las ecuaciones de transporte sólido, realizando el balance en cada sección transversal del tramo analizado. HEC-6 resuelve la hidrodinámica mediante la ecuación de energía unidimensional, utilizando para las pérdidas friccionales la ecuación de Manning e incorporando las pérdidas por contracción ó expansión. La condición de borde aguas abajo se puede especificar con una relación altura-caudal de la sección transversal ó por la elevación de la superficie del agua.

Las expresiones que cuantifican el transporte de sedimentos son en primer lugar una ecuación de transporte (Meyer-Peter-Muller, Yang, Chang, Laursen, etc.) combinada con la ecuación de continuidad del sedimento.

Se presenta el informe de la modelación realizada en entorno al problema. Se propuso la implementación de éste modelo matemático el cual abarca la totalidad del tramo de río a estudiar, en el cual se resolvieron las ecuaciones hidráulicas y de transporte de sedimentos con el objetivo de analizar el comportamiento del cauce respecto de la erosión generalizada y la sedimentación en los azudes, así como la evolución morfológica del lecho.

Los escenarios hidrológicos planteados en U.N.C. (2003) se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4.- Caudales extremos en el Río Cuarto (DIPAS).

Escenario	Caudal [m ³ /s]
E1	161 m ³ /s
E2	700 m ³ /s
E3	1900 m ³ /s
E4	2900 m ³ /s

En el presente sólo se presentan los resultados correspondientes a caudal líquido de $160 \text{ m}^3/\text{s}$, asociado a una recurrencia de 2 años.

El tramo de estudio modelado comprende 700 m aguas abajo del azud del Puente Ferroviario y 1200 m aguas arriba del Puente Carretero, teniendo en cuenta los resultados de la simulación hidráulica realizada con HEC-RAS, los cuales verificaban la existencia de flujo uniforme en estas dos secciones límites.

Para determinar la capacidad de transporte del río se utilizó la formulación semiempírica

propuesta por Meyer-Peter y Müller, con las condiciones hidráulicas resueltas por HEC-RAS, los resultados se presentan en la Figura 20.

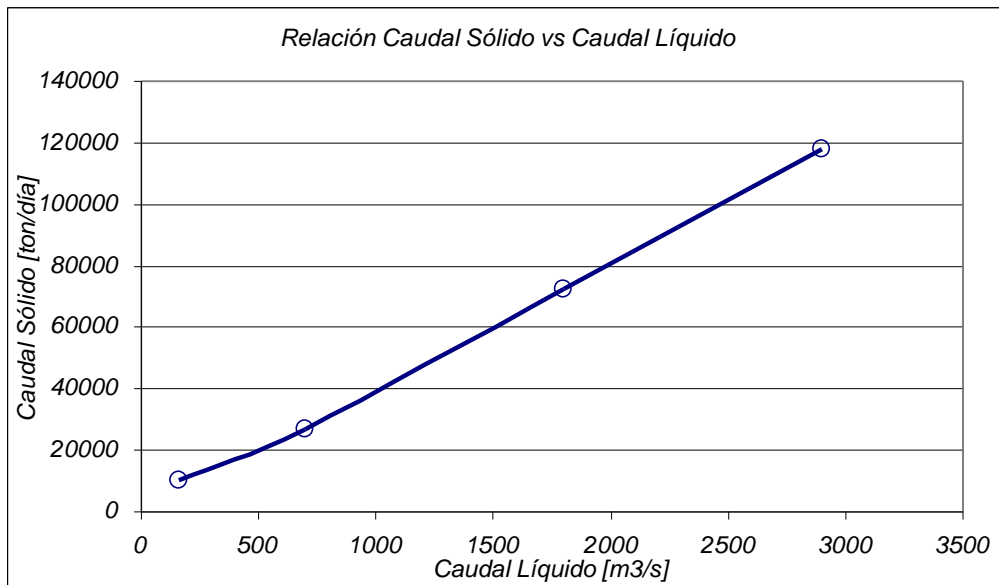


Figura 20.- Relación Caudal líquido - Caudal sólido, Río Cuarto. Prog. 7500

Dado que en el problema en estudio la carga de sólidos de ingreso al tramo no se encuentra cuantificada, se establecieron en la sección de aguas arriba, escenarios en donde se utiliza la expresión de Meyer-Peter y Müller (Figura 20) como límites máximos o capacidad potencial de transporte.

Las simulaciones realizadas presentan el comportamiento del cauce ante escenarios conservadores (caudal sólido equivalentes al 0%) y no conservadores (caudal sólido potencial, equivalentes al 100%) realizando alternativas intermedias en función de la carga de sólidos actuante que comprenden el 25%, 50, 75% de la capacidad de transporte.

En general las duraciones de la simulaciones fueron de 60 días con un paso de tiempo de aproximadamente 15 minutos teniendo en cuenta la integración de la ecuación de transporte y verificándose el equilibrio individual de las secciones (condición de equilibrio).

Se presenta en la figura 21 los resultados para un caudal líquido de 160 m³/s y sin las obras de los azudes.

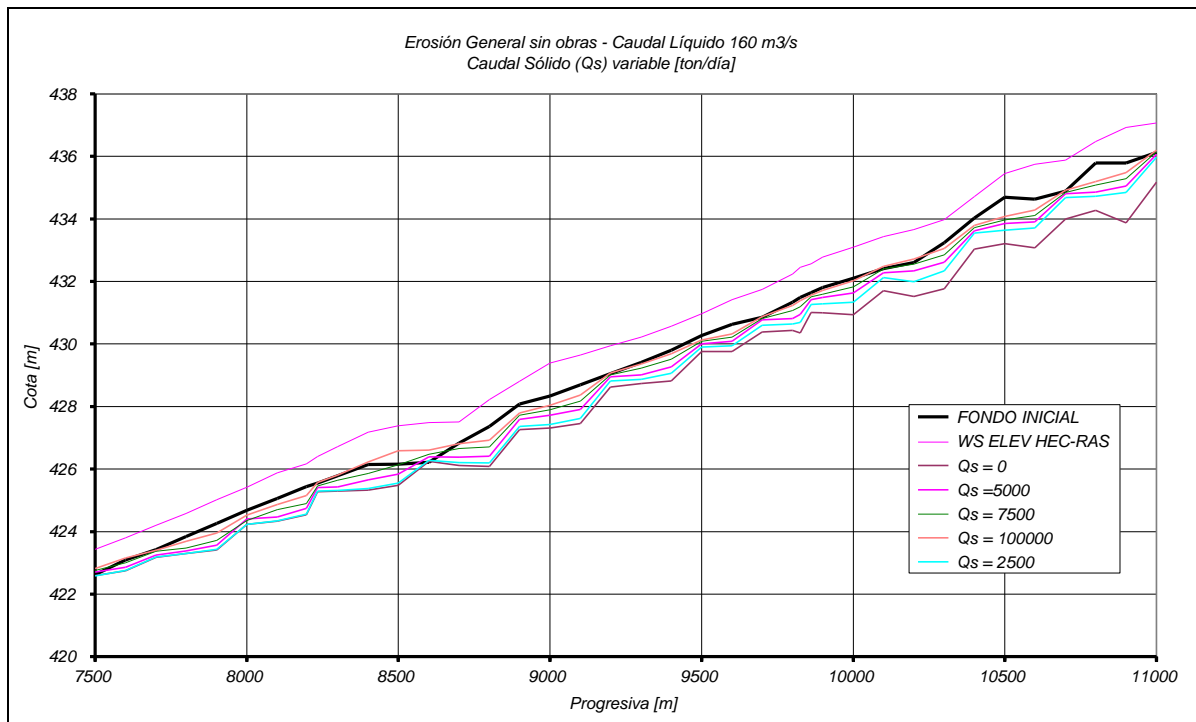


Figura 21.- Erosión general del cauce con HEC-6. Escenario sin azudes

De la observación del gráfico anterior se destaca que los valores medios de erosión simulados en HEC-6, desde Prog. 7500 hasta Prog. 11000, oscilan entre un mínimo de 1,00 m hasta un máximo de 1,80 mts y en términos medios es de 0,85 m.

Otro aspecto importante es que los resultados del modelo HEC-6 permiten visualizar que para condiciones de caudal sólido máximo (capacidad de transporte) la configuración del cauce, en general su pendiente longitudinal, mantiene las condiciones originales.

Se presenta además en la figura 22 los resultados para un caudal líquido de 160 m³/s, pero con la implementación de las obras de los azudes.

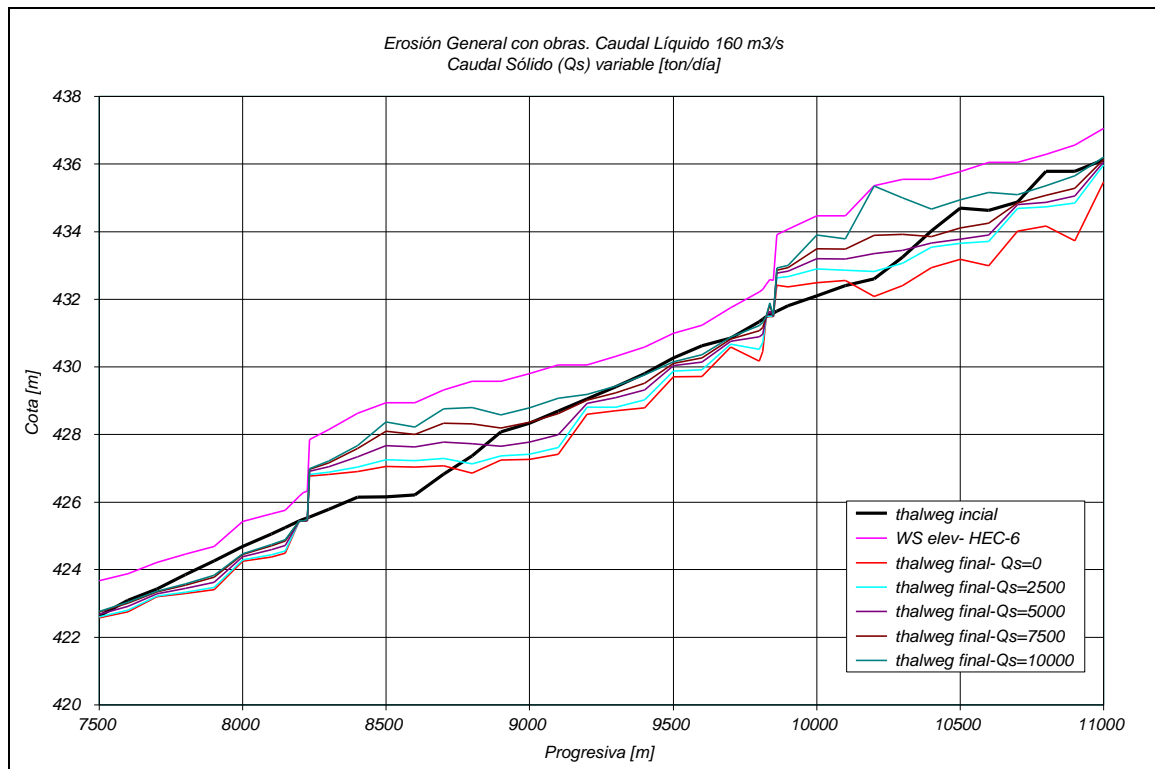


Figura 22.- Erosión general del cauce y deposición en azudes con HEC-6

De la observación del gráfico anterior se concluye que el emplazamiento de los azudes en el cauce del Río Cuarto provoca los efectos físicos deseados, ya que se produce la colmatación de los mismos.

Se verificó en la modelación el cumplimiento de la ecuación de continuidad de la fase sólida en cada sección transversal, lo que asegura que las condiciones finales resultantes presentan una condición de estabilidad general del cauce dado que la configuración final adoptada depende solamente de las condiciones hidráulicas impuestas y de la tasa de aporte de sedimentos, independizándose de la duración de la modelación.

Un aspecto importante de destacar es que la pendiente del tramo influenciado por el remanso, copia la pendiente longitudinal de la superficie del agua. Además se destaca que en las secciones no influenciadas por el remanso producido por los azudes, la erosión general es prácticamente la misma que en la situación sin azudes.

Finalmente, en la Figura 23 se presentan los resultados de la erosión general del cauce estimada con HEC-6 y comparada con las mediciones realizadas durante julio y agosto de 2004 (después de terminada la obra de los azudes). Las mediciones han comprendido tramos de 200 m aguas abajo y aguas arriba de los azudes del Puente Ferroviario y Carretero. La topografía medida se muestra en azul brillante y los azudes en verde claro. También se muestra la ubicación relativa de los puentes Ferroviario, Nuevo y Carretero en color rojo.

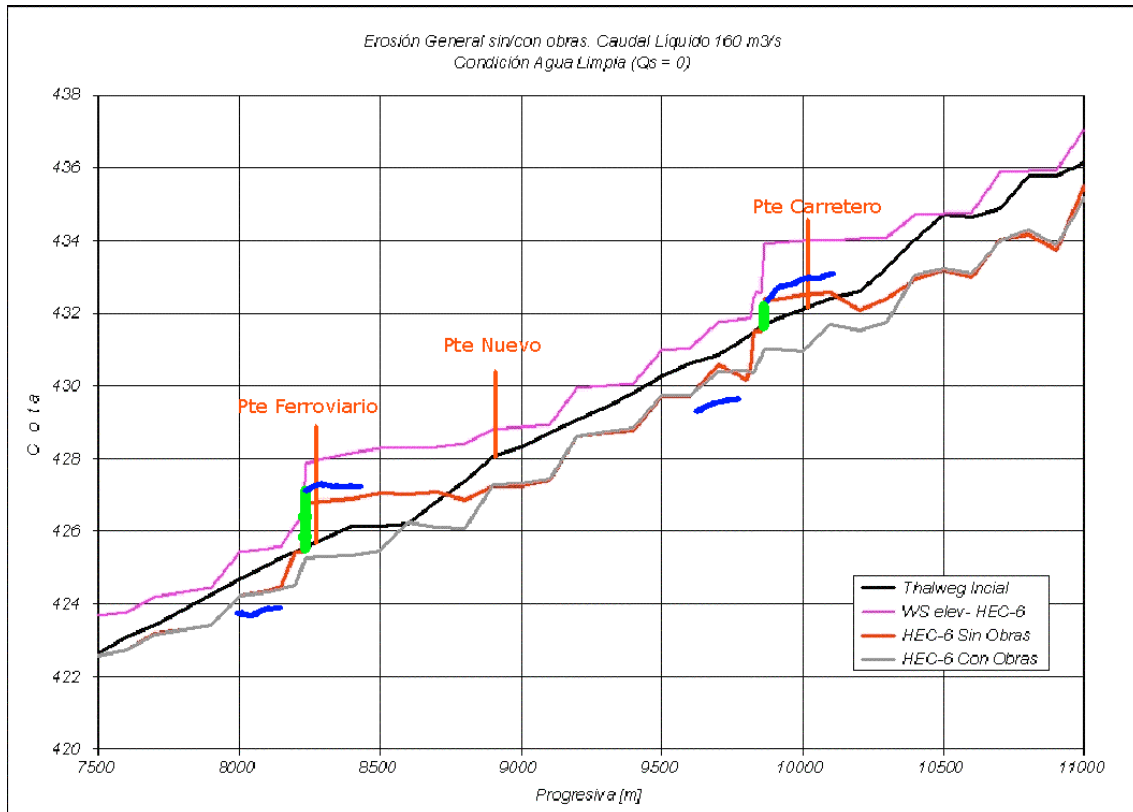


Figura 23.- Erosión general del cauce con HEC-6 con $Q_s=0$. Comparación escenario sin y con obras

Se puede observar que en el azud del Puente Carretero, la pendiente de colmatación de los azudes es similar a la original del fondo, situación que se correspondería con un caudal sólido entre 5.000 a 7500 ton/día para un caudal líquido de 160 m³/s. Además se observa en ambos azudes que la retención de sedimentos en los azudes, provoca erosión aguas abajo mayor a la estimada con HEC-6, posiblemente porque han sido mayores los caudales líquidos en este período.

Además se destaca que aguas arriba del azud del Puente Ferroviario, la pendiente de colmatación es notablemente inferior a la observada aguas arriba del azud del Puente Carretero, posiblemente porque en el tramo comprendido entre ambos todavía no se ha llegado a una situación de equilibrio. A priori parecería que durante este período se ha llenado el azud del Puente Carretero y que recién en la actualidad se produce sobrepaso de sedimentos hacia el azud del Puente Ferroviario. Sin embargo estas hipótesis deben ser confirmadas con mediciones más actualizadas.

CONCLUSIONES

La extracción de áridos tanto sobre el Río Xanaes como el Cuarto, han contribuido a provocar erosión generalizada del cauce manifestándose notablemente en los dos tramos estudiados. En particular, las secciones aguas arriba y abajo de la ubicación de las canteras, se ven muy perturbadas y presentan claros signos del déficit de aportes de sedimentos, por lo que se deben limitar las actividades de extracción en el cauce, hasta que se produzca una recuperación en el tramo. En futuros estudios se prevé la localización de nuevas zonas de extracción que provoquen alteraciones mínimas al equilibrio del río.

En Río Cuarto, los volúmenes extraídos declarados durante 1998 y 2004 oscilan entre 45.000 y 80.000 m³ anuales y en promedio 60.000 m³. En Río Segundo las declaraciones de canteristas DiPAS, indican una media de 20.000 m³ anuales, que en comparación con los aportes estimados (15.600 m³), demuestran el déficit del tramo.

De acuerdo a las mediciones, para el caudal de estiaje de 4,0 m³/s se ha obtenido un caudal sólido en la zona de las areneras de aproximadamente 30 m³/día, mientras que aguas arriba del Puente Malvinas se incrementa en 54 m³/día. De las fórmulas empíricas utilizadas si bien todas estiman correctamente el orden de magnitud para la carga de fondo.

Según la modelación en HEC-6, la erosión generalizada para caudal líquido de 160 m³/s (recurrencia de 2 años) y con agua limpia, oscila entre un mínimo de 1,00 m hasta un máximo de 1,80 mts y en términos medios es de 0,85 m. Además si el transporte real se iguala al potencial, la configuración del cauce, en general su pendiente longitudinal, mantiene las condiciones originales.

El emplazamiento de los azudes en el cauce del Río Cuarto provoca los efectos físicos deseados, ya que se produce la colmatación de los mismos. La pendiente del tramo influenciado por el remanso, copia la pendiente longitudinal de la superficie del agua y además en las secciones aguas abajo de los azudes la erosión general es prácticamente igual que en el escenario sin azudes.

De la comparación entre los resultados en HEC-6 y las mediciones en campo, se observa que en el azud del Puente Carretero, la pendiente de colmatación de los azudes es similar a la original del fondo, situación que se correspondería con un caudal sólido entre 5.000 a 7500 ton/día para un caudal líquido de 160 m³/s. Además se observa en ambos azudes que la retención de sedimentos en los azudes, provoca erosión aguas abajo mayor a la estimada con HEC-6, posiblemente porque han sido mayores los caudales líquidos en este período.

Aguas arriba del azud del Puente Ferroviario, la pendiente de colmatación es notablemente inferior a la observada aguas arriba del azud del Puente Carretero, posiblemente porque en el tramo comprendido entre ambos todavía no se ha llegado a una situación de equilibrio. Esto sugiere que durante este período se ha llenado el azud del Puente Carretero y que todavía no se ha producido un sobrepaso notable de los sedimentos hacia el azud del Puente Ferroviario. Sin embargo estas hipótesis deben ser confirmadas con mediciones más actualizadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbeito O., Massera L., Ambrosino S. (2000): Fotocarta Geomorfológica, Río Chocancharagua, ciudad de Río Cuarto.

Corral M., Castello E., Gerbaudo C., Hillman G., Plencovich G., Ambrosino S., Pagot M., Rodriguez A., Martínez R. y Farías H. (2003): Análisis hidromorfológico y solución ingenieril para el cruce del poliducto Repsol-YPF sobre un tramo del Río Cuarto (Córdoba, Argentina). Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Bs. As. 2003.

Helley, E.J. y Smith, W. (1971): Development and calibration of a pressure difference bedload sampler. USGS Water Resources Division Open-file report. 18 p.

Moya G., Diaz A., Rodriguez A., Muratore H., Gaspari E., Martínez R., Hillman G., Corral M., Castello E., Plencovich G., Pozzi C. (2003): Modelado a fondo móvil de azudes para protecciones de pilas de puentes en el Río Cuarto, Córdoba, Argentina. Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Bs. As. 2003.

Rijn, Leo C. van. (1993): Principles of sediment transports in rivers, estuaries and coastal seas. Amsterdam

Rosati, J.D. and N.C. Kraus. (1989): Development of a portable sand trap for use in the nearshore. Technical Report CERC-89-11, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

U.S. Army Corps of Engineers (1993): HEC-6, A numerical sediment's model. User Manual

Universidad Nacional de Córdoba, Laboratorio de Hidráulica (2005): Informe de extracción de áridos en el Río Segundo o Xanaes. A DiPAS

Universidad Nacional de Córdoba, Laboratorio de Hidráulica (2003): Informe sobre Modelación Física Tridimensional a Fondo Móvil de los Azudes de la Ciudad Río Cuarto.

Villegas M., Degiovanni S., Caviglia L., y Palma Y. (1998): Monitoreo de sistemas fluviales: evaluación de la presión de la minería de áridos sobre el Río cuarto utilizando geoindicadores. Universidad Nacional de Río Cuarto, Dpto. Geología