

# ANÁLISIS DE LA CARGA DE FONDO Y DINÁMICA DE TRANSPORTE EN EL RÍO CUARTO, PROVINCIA DE CORDOBA, COMO BASE PARA UNA MINERÍA DE ARIDOS SUSTENTABLE

Susana DEGIOVANNI<sup>1</sup>, Mónica VILLEGAS<sup>1</sup> y Juan P. ULLA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Río Cuarto (5800) Río Cuarto. Email: sdegiovanni@exa.unrc.edu.ar

## RESUMEN

El río Cuarto, como la mayoría de los cursos fluviales del sur de Córdoba, presenta alteraciones en su funcionamiento (incisión y erosión lateral en cuenca media) vinculadas, a causas naturales (climáticas y tectónicas) y antrópicas (minería de cauce, rectificaciones, construcción de azudes). Algunos sectores técnicos-administrativos adjudican a la extracción de áridos la desestabilización del río Cuarto en su tramo medio, pero aún son necesarios estudios integrales que consideren las particularidades de las distintas subcuencas (morfológicas, hidrológicas, sedimentológicas) para analizar el impacto de diversas actividades, incluida la minería. Con el propósito de contribuir a la gestión sustentable del espacio fluvial, el objetivo de este trabajo es caracterizar la carga tractiva, definir su procedencia y analizar las tasas y dinámica de transporte. Para ello se analiza la geología, geomorfología y el régimen hidrológico de las subcuencas Piedras Blancas, Las Cañitas y La Invernada; se tipifica la granulometría de la carga tractiva y se aplican métodos directos e indirectos para estimar volúmenes transportados. Se concluye que: los materiales psefíticos son aportados predominantemente por el río Piedras Blancas y los psamíticos por los ríos Las Cañitas, La Invernada y Seco; estos aportes se vinculan exclusivamente a crecidas de verano; en estiaje el río Cuarto moviliza su lecho aluvional a razón de 30-50 m<sup>3</sup>/día; la extracción de áridos potencia localmente el desbalance de sedimentos por lo que debe contemplar los ritmos estacionales de reposición para disminuir los impactos negativos y contribuir a la sustentabilidad. La incisión generalizada responde principalmente a causas climáticas y tectónicas y secundariamente, antrópicas.

**Palabras clave:** *Proveniencia, transporte, árido, sustentabilidad, río Cuarto*

## ABSTRACT

*Tractive load and transport dynamic analysis in the Cuarto river as a basis for a sustainable sand and gravel mining.*

Like most streams in south of Córdoba Province, the Cuarto river shows changes in its operation (downcutting and lateral erosion in the middle basin) related to natural (climatic and tectonic) and anthropogenic causes (channel mining, rectifications, dam constructions). Some technical and administrative sectors assign to sand and gravel mining the destabilization of Cuarto river in its middle reach, but comprehensive studies are still required to consider the particularities of different sub-basins (morphological, hydrological, sedimentological) to analyze the impact of various activities, including mining. In order to contribute to the sustainable management of the river systems, this work intends to characterize the tractive load, defining their origin and analyzing rates and dynamics of transport. For this aim, geological and geomorphological features in the upper basin are set, hydrology of sub-basins Piedras Blancas, Las Cañitas and La Invernada are analyzed, tractive load grain size is typified, and direct and indirect methods for estimating transported volumes are applied. Conclusion are: psephitic sediments are predominantly provided by Piedras Blancas river and psammitic sediments by Las Cañitas, La Invernada and Seco rivers. These contributions are related exclusively to summer floods; in low flow conditions Cuarto river mobilizes its riverbed sediments at 30-50 m<sup>3</sup>/day rate; sand and gravel mining locally powers the imbalance of sediment, so seasonal rates of replacement should be considered to reduce negative impacts and contribute to sustainability; regional downcutting is mainly related to climatic and tectonic causes and, subordinately, to anthropogenic causes.

**Keywords:** *Provenance, transport, sand and gravel mining, sustainability, Cuarto river*

## INTRODUCCIÓN

La red de drenaje del Sur de la provincia de Córdoba, a excepción del río Quinto, está integrada por un conjunto de cursos permanentes y temporarios, que drenan el extremo meridional de las Sierras de Comechingones y desarrollan sus cuencas medias y bajas en la Llanura Pampeana. La mayoría de estos sistemas fluviales están en vías de ajuste y exhiben en general un marcado proceso de incisión (del orden de 4 m hasta más 20 m), vinculado a causas naturales (climáticas y tectónicas) y antrópicas (canalizaciones, trasvases, uso de la tierra, minería de áridos, entre otras), tal como fuera señalado en numerosos trabajos, entre ellos Blarasin *et al.* (1994, 2005); Doffo (2007); Degiovanni (2008); Degiovanni *et al.* (2009); Doffo *et al.* (2010) y Cholaky *et al.* (2005). La minería de áridos, tanto de cauce como de canteras, sólo se lleva a cabo en el río Cuarto y Chocancharava.

A nivel mundial, los efectos de las explotaciones mineras en cauces fluviales han sido abordados por numerosos autores. Entre los trabajos clásicos pueden citarse los de Kondolf (1994, 1997) que analiza las alteraciones geomorfológicas y ambientales de la actividad. Entre los trabajos más recientes, pueden citarse las contribuciones de Rovira *et al.* (2005) quienes abordan la influencia en el almacenamiento de sedimentos en procesos extractivos prolongados; Rinaldi *et al.* (2005) analizan los efectos físicos y proponen pautas de manejo; y Chen y Liu (2009) y Chen *et al.* (2008) aplican modelos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos para simular el impacto de la actividad sobre el sistema fluvial.

El río Cuarto, desde fines de la década del '70, ha incrementado notoriamente la tasa de profundización y erosión lateral en el tramo medio, causando importantes afectaciones a la infraestructura vial y a sectores urbanizados (Río Cuarto, Alejandro Roca, Reducción, La Carlota). En los últimos años, y vinculado a un marcado aumento de los volúmenes extraídos desde el año 2000, se ha generado una fuerte controversia respecto a la incidencia de la minería de áridos sobre la dinámica del curso, que incluye posiciones variadas. Así, Corral *et al.* (2005, 2006, 2007a y b, 2009), señalan

que la extracción de áridos supera a la reposición, por lo que atribuyen a esta actividad el marcado proceso de incisión y desestabilización lateral que el curso exhibe en este sector. Estos autores basan sus conclusiones en estudios cuantitativos realizados en el tramo próximo a la ciudad de Río Cuarto, que incluyen estimaciones (directas e indirectas) de la tasa de transporte y un balance sedimentológico simplificado obtenido a través de la cuantificación de la erosión de fondo, erosión lateral y volúmenes de áridos extraídos. Por su parte, Azcurra *et al.* (2001), Villegas *et al.* (2002), Degiovanni *et al.* (2005a), a través del monitoreo de geoindicadores morfológicos y sedimentológicos en la cuenca media del río Cuarto, que concentra la mayor presión minera, consideran que el impacto de la actividad sobre la dinámica del curso, si bien es negativa, no explica totalmente el proceso de profundización y erosión lateral que exhibe el río Cuarto en su cuenca media, el cual también responde a los controles regionales ya señalados. En Degiovanni *et al.* (2000 a y b, 2004, 2005a y b) y Villegas *et al.* (2000 y 2002), se analizan las alteraciones morfodinámicas de este curso en las últimas décadas, como resultado de múltiples intervenciones que coexisten en espacio y tiempo, entre las que se cuentan, además de la minería de áridos, obras ingenieriles en cauce, como varias rectificaciones y construcción de azudes, que implicaron modificaciones locales del gradiente y ajustes en el perfil longitudinal.

Paralelamente al análisis de las causas que originan cambios en el comportamiento del río Cuarto es necesario efectuar un ordenamiento y gestión sustentable de las actividades relacionadas a este sistema fluvial, entre ellas, la extracción de áridos, tanto de cauce como de terrazas o paleocanales, que permita definir más adecuadamente los sitios de extracción, fijar cupos acordes con la tasa de reposición estacional, considerar pasivos ambientales relacionados a la actividad, entre otros, (Degiovanni y Villegas 2009).

Para llevar a cabo esta tarea, es imprescindible disponer de información acerca del funcionamiento de la cuenca del río Cuarto, desde un punto de vista sistémico, que permita un análisis integral considerando las

particularidades de las distintas subcuencas (morfológicas, hidrológicas, sedimentológicas) para, en este marco contextualizar las diversas actividades antrópicas, entre ellas la minería de áridos. En Villegas *et al.* (2006), ya se presenta una tipificación del comportamiento de algunas subcuencas del río Cuarto, sobre la base de estudios morfológicos y sedimentológicos. Con esta concepción holística y con el propósito de avanzar en el conocimiento del transporte de sedimentos en esta cuenca, el objetivo de este trabajo es analizar la carga tractiva del río Cuarto, su procedencia y las tasas y dinámica de transporte.

Ubicación del área de estudio

El área de estudio comprende el sector sur de la cuenca alta del río Cuarto, desarrollada en la Sierra de Comechingones, y el tramo extraserrano hasta aproximadamente 4 kilómetros aguas abajo de su confluencia con el río Seco, departamento Río Cuarto, Córdoba, involucrando las subcuencas de los ríos Piedras Blancas, Las Cañitas y La Invernada (Fig. 1).

## CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

### Clima

La región posee clima mesotermal subhúmedo-húmedo, con temperaturas medias del orden de 16,5 °C y precipitaciones medias anuales que varían desde 939,4 mm, en proximidades de las sierras, a 856,3 mm hacia el SE, en todos los casos concentradas en primavera-verano (75-80 %). En la curva cronológica anual de la Serie Los Chañares-Las Tapias (1941-2010, Fig. 2), muy próxima al área de estudio, la precipitación media anual (PMA) es de 915,4 mm, se observa una marcada alternancia de períodos húmedos y secos y, a partir del año 1972, una clara tendencia ascendente de las precipitaciones que en la mayoría de los años superan el valor medio. Entre los más lluviosos se destacan 1979, 1991, 1992, 1999 y 2004- donde las lluvias excedieron en 300-450 mm la PMA, mientras que los años más secos de este ciclo fueron 1974, 1986, 2003 y 2005.

### Hidrología superficial

La cuenca alta del río Cuarto (en su ex-

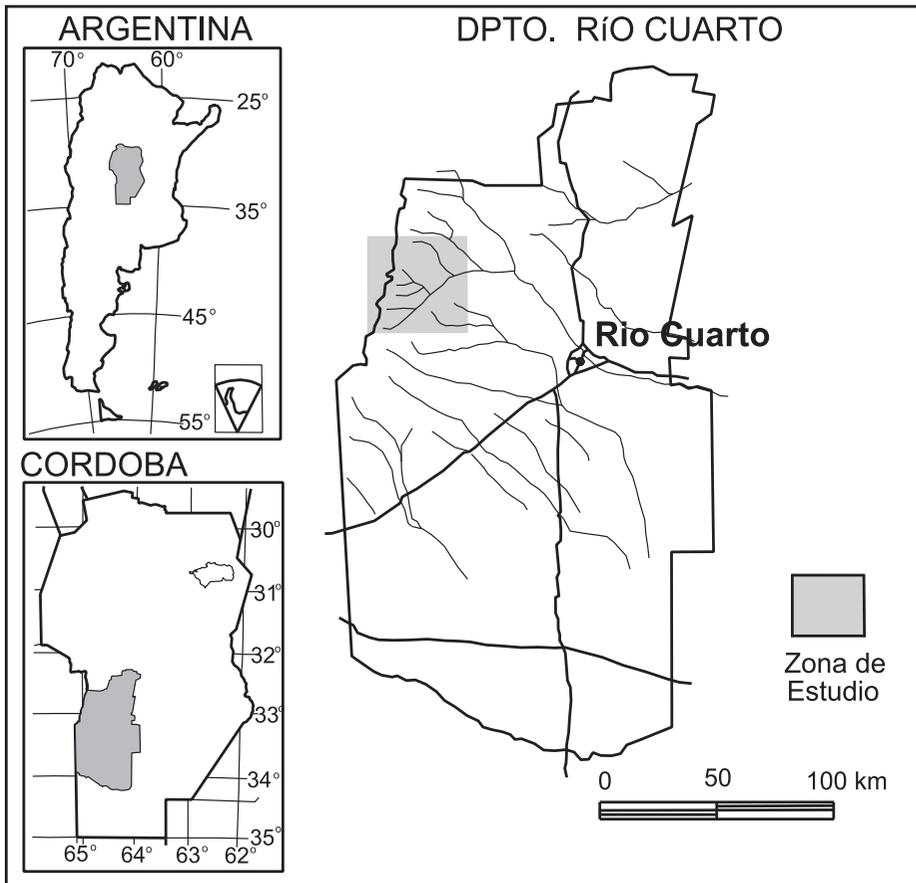


Figura 1: mapa de ubicación del área de estudio.

tremo meridional), está integrada por las subcuencas de los ríos Piedras Blancas, Las Cañitas y La Invernada (Fig. 3). El sector septentrional está drenado por el río Alpa Corral – Seco.

Considerando los datos provenientes de la red de estaciones hidrométricas dependiente de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación, puede observarse en la figura 3, que existe una relación directa entre área drenada y caudal en las estaciones de aforo localizadas inmediatamente a la salida del área serrana de estos cursos. Así los ríos Piedras Blancas, La Tapa y Las Tapias, tienen módulos de 2,93- 1,63 y 0,56 m<sup>3</sup>/s, respectivamente), vinculación menos notoria en la estación Tincunacu (3,57 m<sup>3</sup>/s), situada en el tramo extraserrano del río Cuarto, debido a la influencia de otros factores (por ej. cambios en tasa de infiltración).

En todos los casos la distribución de caudales medios mensuales es asimétrica y muestra los máximos valores entre los meses de

Octubre-Abril, con picos en Diciembre y Febrero, en coincidencia con la distribución de precipitaciones. Todos los cursos tienen régimen torrencial vinculado a la

alta intensidad de las precipitaciones y a las características geológico-geomorfológicas del área, que favorecen escurrimientos rápidos con cortos tiempos de concentración (caudales máx. diarios del orden 416, 402 y 57 m<sup>3</sup>/s en las estaciones Piedras Blancas, La Tapa y Las Tapias, respectivamente). Los aforos instantáneos mensuales (2006-2008) presentados en Ulla (2008), indican que el caudal de base de los ríos Piedras Blancas, Las Cañitas, La Invernada y Cuarto es del orden de 0,7 – 0,13 – 0,2 y 4 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. En general los años con importantes excesos hídricos se corresponden con crecidas de magnitud. Entre los eventos importantes se destaca la crecida extraordinaria del 7/1/ 2007, asociada fundamentalmente a la subcuenca del río Piedras Blancas, que alcanzó 1060 m<sup>3</sup>/s en el río Cuarto, a la altura de la ciudad homónima (dato proveniente limnómetro instalado en Azud puente Carretero, Corral *et al.* 2009).

**Geología**

La zona se sitúa en Sierras Pampeanas y borde occidental de la Llanura Pampeana y exhibe el clásico modelo de bloques que caracteriza a estos ambientes. En el sector serrano afloran metamorfitas del Complejo Monte Guazú integrado por migmatitas con intercalaciones de anfibolitas, ortogneises, gabros, granitoides y pegmatoides. El borde oriental de esta unidad presenta una zona de esquistocidad milonítica que

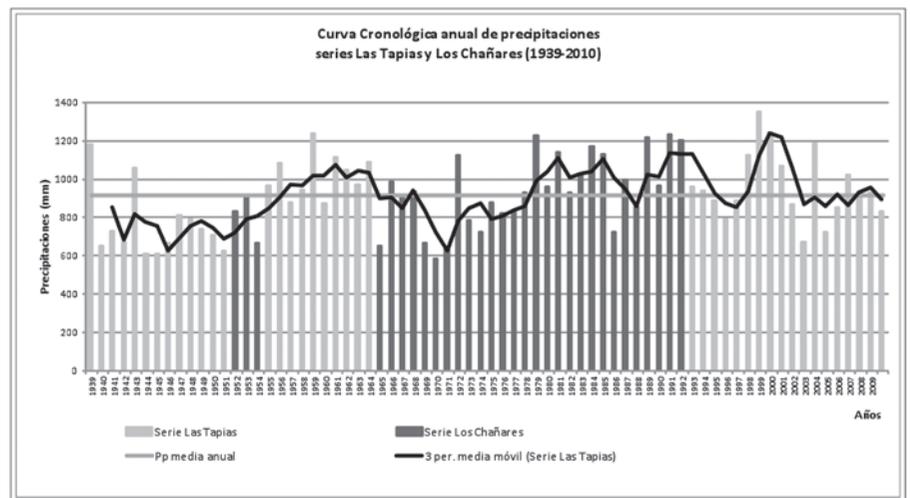


Figura 2: curva cronológica anual de precipitaciones serie Los Chañares.

corresponde a la faja de cizalla regional Guacha Corral. Hacia el Norte, la secuencia metamórfica fue intruida por el batolito granítico Cerro Áspero-Alpa Corral, mientras que hacia el sudoeste, a través de la faja de cizalla Las Lajas, se pone en contacto con el Complejo Achiras compuesto por esquistos biotíticos, anfibolitas y mármoles con inyecciones aplopegmatoides y granitoides anatócticos. (Fagiano 2007)

En el sector extraserrano afloran secuencias finas cuaternarias de abanicos aluviales, parcialmente cubiertas por depósitos loesoides. En las fajas fluviales de los cursos principales se reconocen sedimentos psamíticos y psefticos y, en la parte cumbre de algunos altos se exponen materiales lóesicos holocenos. La Formación Pampiano (Fidalgo *et al.* 1973; Cantu 1992), es la

unidad aflorante más antigua (Pleistoceno medio-superior) y está constituida por sedimentos de granulometría limo a limo-arenosa muy fina, con diferente grado de cementación.

**Geomorfología**

La cuenca alta del río Cuarto se desarrolla en la pendiente oriental del bloque de la Sierra de Comechingones, macro unidad denudativa, donde los procesos de incisión fluvial son los dominantes. En este ambiente se preservan paleosuperficies erosivas pre-terciarias con cubierta eólica cuaternaria (pampas de altura). La zona pedemontana, forma parte de una extensa bajada cubierta por sedimentos eólicos, afectada por eventos neotectónicos, incidiendo por la red de drenaje actual, la cual pre-

senta una tasa de profundización importante. La traza de los cursos principales está fuertemente controlada por estructuras conjugadas de rumbo NO-SE y SO-NE y, en menor grado meridionales, las que a su vez definen bloques que presentan distinto comportamiento hidrológico y morfodinámico. Analizando la faja fluvial del sistema Piedras Blancas-río Cuarto, Ulla (2008) indica que hasta la confluencia con el río Las Cañitas, el canal es rectilíneo, tiene baja relación ancho/profundidad ( $a/p=9-36$ ) y el lecho es predominantemente rocoso/cohesivo, y localmente está cubierto por un delgado aluvión pseftico (Fig. 5-a). Desde este tributario hasta el río Seco, la sinuosidad también es muy baja observándose "meandros rectangulares" encajados en tosca, con mínima-nula migración la-

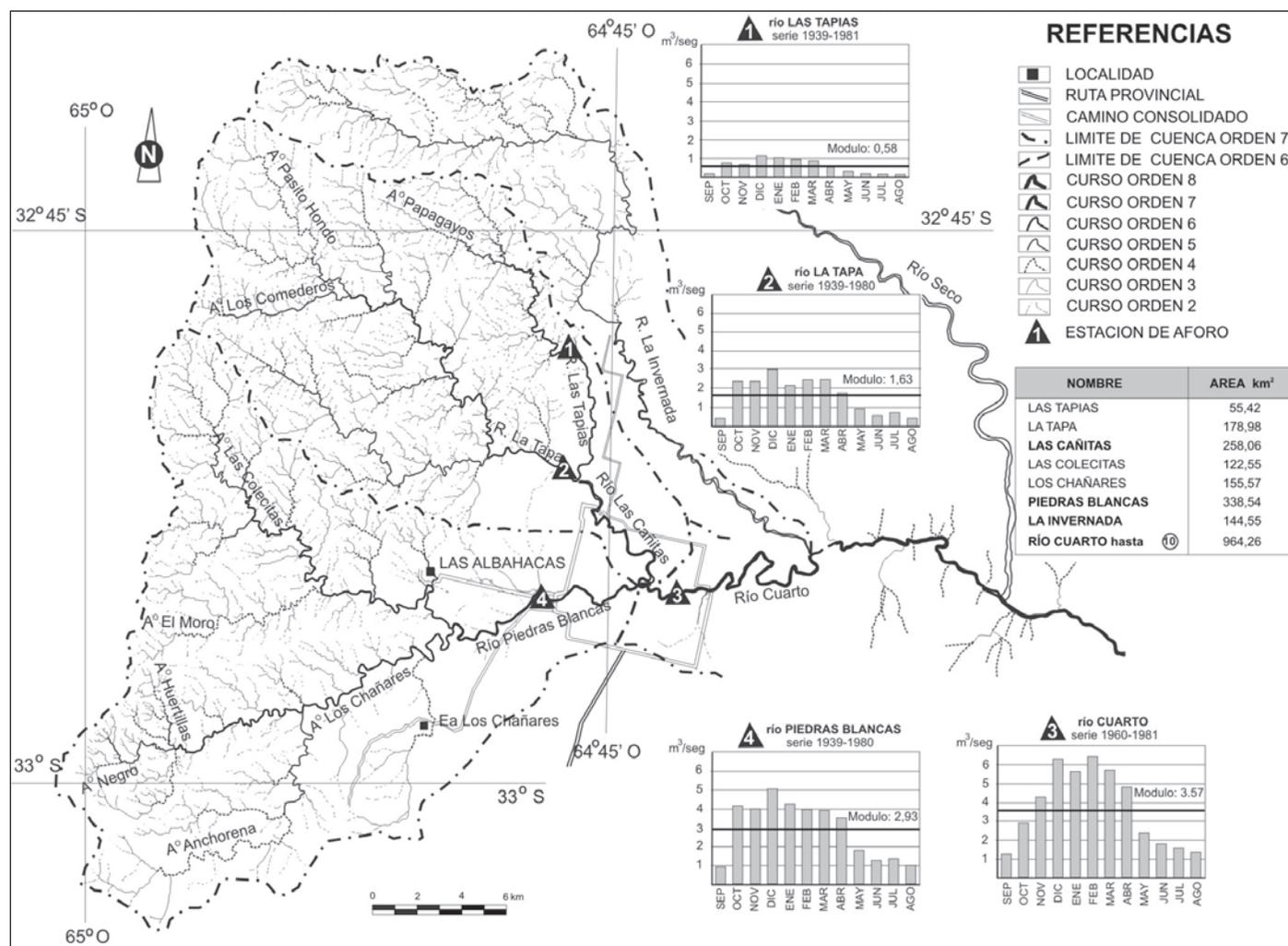


Figura 3: mapa Hidrográfico del sector sur de la cuenca alta del río Cuarto y distribución de caudales medios mensuales.

teral, el aluvión de fondo es más potente y de textura areno-gravosa por los aportes de los ríos Las Cañitas y de La Invernada. La relación a/p es muy baja ( $a/p=6$ ) en los segmentos incididos y se incrementa localmente en algunos tramos de agradación ( $a/p=71$ ) donde además se generan barras centrales y laterales. Frente al abanico del río Seco, e inmediatamente aguas abajo, el canal se ensancha ( $a/p= 60-80$ ) es ligera-

mente sinuoso y entrelazado, de lecho areno-gravoso y hay sitios de erosión lateral activa. (Fig. 5-e).

Los ríos La Invernada y Seco, en sus tramos inferiores tienen canales entrelazados, de lecho areno-gravoso y alta relación a/p, especialmente éste último ( $a/p=300$ ); el río Las Cañitas, por su parte, es meandriforme y exhibe mayor tasa de profundización que los anteriores. (Fig. 5-b).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para caracterizar la carga tractiva se tomaron muestras de sedimentos de fondo (barras y canal) en el curso de mayor orden y en el tramo final de los tributarios principales (estaciones de muestreo E1 a E10, figura 6).

Se efectuó el análisis textural mediante tamizado de las fracciones psamíticas y psefi-

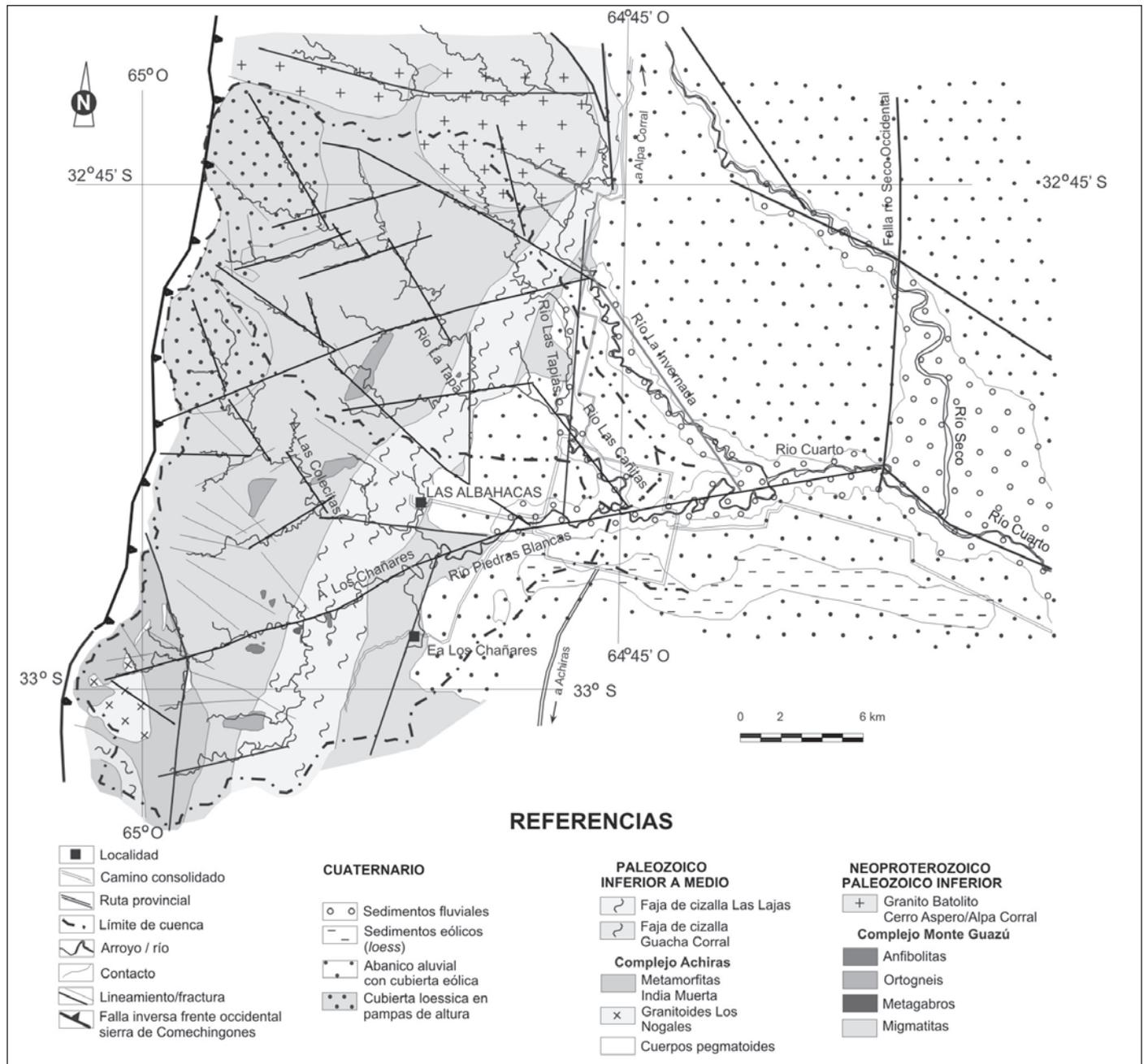


Figura 4: mapa Geológico sector Sur cuenca alta del río Cuarto.

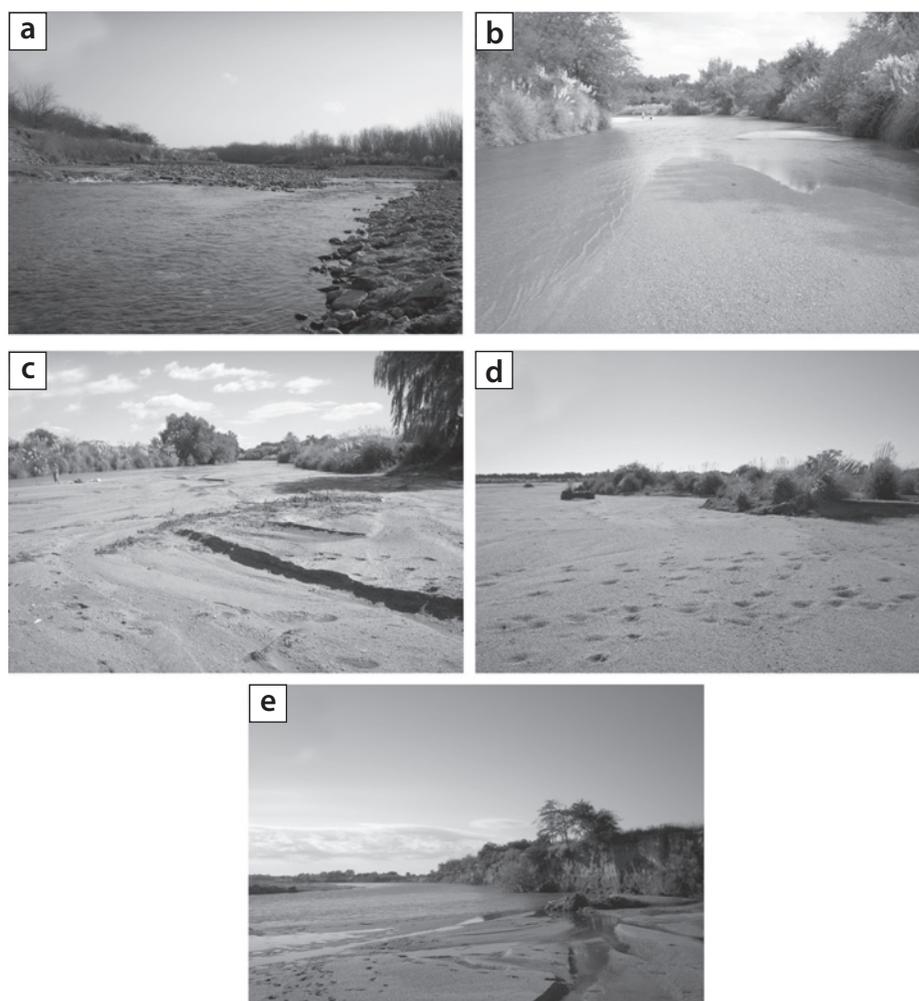
ticas finas, mientras que los materiales más gruesos fueron analizados a partir del tratamiento digital de imágenes fotográficas. Para la clasificación granulométrica se utilizó la escala de Udden-Wentworth (1922). A cada muestra se le aplicó un procesamiento estadístico convencional, descriptivo, donde los intervalos se establecieron siguiendo la escala de Krumbein (1934) y los estadísticos se obtuvieron mediante la aplicación de los coeficientes de Folk y Ward (1957). La procedencia se definió sobre el análisis de antecedentes, caracterización geológica-petrográfica de campo y laboratorio tanto del área fuente como de los materiales aluviales de los canales tributarios.

Para la estimación del transporte de la carga de fondo se utilizaron dos métodos:

**a-** indirectos: se aplicó la ecuación de Shields (1936), basada en el exceso del esfuerzo de corte:  $\theta_c = T_{0c} / (\rho_s - \rho) g D$  (donde,  $T_{0c}$  = esfuerzo tangencial crítico;  $\rho_s$  = densidad de las partículas del lecho;  $\rho$  = densidad del fluido;  $g$  = aceleración de la fuerza de gravedad y  $D$  = diámetro de la partícula). La ecuación obtenida por Shields (1936) es la siguiente:  $(G_s/Q)(\gamma_s - \gamma)/\gamma S = (T_0 - T_{0c})/(\rho_s - \rho)gD$ ; donde  $G_s$  es la masa de sedimentos por unidad de ancho y tiempo, y  $Q$  se refiere a la descarga del fluido. Para la determinación del esfuerzo de corte ( $T_0$ ), se aplica la ecuación basada en la pendiente de energía, que obedece a la expresión:  $T_0 = \rho g d S$ , donde  $d$  es la profundidad y  $S$  la pendiente de energía.

**b-** directos, se midió mediante trampa de sedimentos (Ulla 2008). En ambos casos se trabajó con datos granulométricos relevados en aquellas secciones en las que la disponibilidad de arena era importante y que, a su vez, son las más próximas a los sectores de explotación de áridos.

La información morfométrica e hidrológica utilizada para estimar tasas de transporte surge de trabajos antecedentes (Villegas *et al.* 2006, Ulla 2008) y trabajo de campo. Este último incluyó el relevamiento topográfico de tramos de canal para definir gradiente ( $S$ ) y determinar el área de secciones transversales que incluyan marcas de crecida. Los caudales asociados a estos eventos se obtuvieron indirectamente aplicando la ecuación de Manning para estimar la velocidad media.



**Figura 5:** vistas de segmentos de canal representativo de los cursos del área de estudio, a) río Piedras Blancas. Canal rectilíneo de lecho psefítico; b) río Las Cañitas canal sinuoso, areno gravoso; c) río La Invernada, canal entrelazado areno-gravoso; d) río Seco canal entrelazado areno-gravoso; e) río Cuarto aguas abajo confluencia río Seco. Canal sinuoso-entrelazado areno-gravoso.

## RESULTADOS

### Caracterización de la carga de fondo

Como se observa en la figura 6 y cuadro 1, el *tamaño* en general disminuye hacia aguas abajo; en E1 y E2 (río Piedras Blancas) barra y canal presentan bimodalidad bien marcada, representando 2 poblaciones de simetría negativa, asignadas a eventos de crecidas y estiaje, respectivamente. Son predominantemente gravas medias a gruesas, estando mejor representada la más fina en el canal. En E3 (río Las Cañitas) los sedimentos, tanto de barra como canal, son predominantemente arenosos, sin diferenciación en poblaciones, estando mejor seleccionado el canal. En E4 (río Cuarto) se observa la

diferenciación de poblaciones en las barras mientras que el canal es unimodal arenoso. En E5 (canal del río Cuarto antes de recibir al río La Invernada), se observan materiales predominantemente arenosos, pobremente seleccionados, con moda poco marcada en la fracción sábulo. En la estación E6 (río La Invernada) los materiales son similares a los del río Las Cañitas, son arenosos a sabulíticos, unimodales, presentan un escaso porcentaje de finos y están pobremente seleccionados, aunque en el canal la selección es ligeramente mayor. En E7 (río Cuarto), las muestras (canal y barras) exhiben dominio de materiales arenosos, con moda de phi -1 muy bien marcada en el canal, en tanto que la selección es moderada. En la barra la se-

lección es pobre. En E8 (río Cuarto antes de la confluencia del río Seco) la muestra de canal se mantiene predominantemente arenosa y la moda sabulítica casi se ha perdido, manteniendo la selección moderada y falta de material pelítico. En la E9 (río Seco) tanto barras como canal, casi siempre secos, están constituidos por sedimentos arenosos (canal) a sabulíticos (barra), con selección pobre a moderada. En E10, barra y canal presentan granulometrías arenosas, con distribución bimodal (sábulo-arena gruesa) a unimodal (sábulo), con selección pobre a moderada, y material pelítico sólo presente y en baja proporción, en las barras.

La *competencia* en general disminuye hacia el colector principal aunque en los sedimentos de estiaje se mantiene ( $\phi = -2$ ). La competencia del río Cuarto en las últimas estaciones E7, E8 y E10 está representada por bloques de hasta 50 cm en el primer caso y gravas gruesas (hasta 25 cm) en las restantes.

La *composición* mineralógica de las muestras analizadas en la fracción arenas medias permiten sintetizar que el cuarzo constituye el mayor porcentaje en volumen (más del 52%), le siguen los feldspatos (35% predominando la plagioclasas-oligoclasas) el porcentaje restante está representado por micas, lititos, óxidos y minerales pesados, provenientes del ambiente de basamento (Coniglio *et al.* 2008). Los componentes líticos disminuyen en dirección aguas abajo y, desde el punto de vista composicional, en cuenca alta corresponden a fragmentos de basamento mientras que, en las tres últimas estaciones, los líticos corresponden tanto a basamento como a materiales fuertemente cementados de la Formación Pampiano. De la misma manera los líticos de basamento disminuyen hacia las fracciones más finas mientras que los sedimentarios aumentan en relación inversa (toscas varían del 3% en gravas hasta 15% en arenas muy finas).

El *material fino* se encuentra en muy bajas proporciones pero aumenta aguas abajo, con excepción de E2 donde hay mayor concentración. En general el material pelítico es mayor en el canal que en las barras en el río Piedras Blancas disminuyendo aguas abajo. Esta relación se invierte en los ríos Las Cañitas y La Invernada donde las barras son cubiertas de material pelítico cuando

estos cursos son endicados en eventos de crecidas del colector principal. La *rugosidad* del fondo del lecho disminuye también en este sentido en relación inversa al contenido de pelitas pero éstas no la afectan debido a su baja proporción.

### Transporte de sedimentos como carga de fondo

**A.- Métodos indirectos analíticos:** Considerando que en el río Cuarto el tamaño de grano que normalmente se presenta como moda corresponde al valor de  $\Phi -1$  (2 mm), del diagrama de Shields (1936) se obtienen valores de  $\theta$  de aproximadamente 0,043- lo que permite determinar un  $T_{0c}$  de 1,45 N/m<sup>2</sup>. Para aquellas muestras cuya moda de  $\Phi$  es igual a 0 (1 mm), aplicando el mismo procedimiento, el  $T_{0c}$  sería del orden de 0,60 N/m<sup>2</sup>. Para calcular el esfuerzo de corte ( $T_0$ ) se consideró una pendiente de **0,4%** que es representativa del tramo analizado, corres-

pondiente a la estación de muestreo E10.

Para validar los resultados obtenidos, se analizaron las muestras de la E10, que fueron contrastadas con datos reales obtenidos en el campo y los inferidos de los sitios de extracción.

Siendo constantes los valores de densidad, aceleración de la gravedad y pendiente, la única variable para el cálculo de  $T_0$  en una sección transversal en un instante dado, es la profundidad (Fig. 7).

Obtenidos los valores de  $T_{0c}$  y  $T_0$ , despejando  $G_s$  de la ecuación de Shields (1936) se obtuvieron los resultados de transporte de sedimentos como carga de fondo para cada uno de los puntos en donde se efectuó una medición de profundidad (Fig. 8).

Al obtener el valor del área por debajo de la curva, se obtuvo el valor total de sedimentos transportados como carga de fondo que atraviesan la sección por unidad de tiempo: Sección 10 = **0,588 kg/s**, lo que

CUADRO 1: Caracterización de las muestras de lecho

Est	M	Posición	Textura (moda princip)	C	Selección	% pelitas	Rug
1	1	Canal	Gravas gruesas (-7)	-8	Moderada	0.06	-1.73
	2	Barra	Gravas medias a gruesas (-6)	-7	Moderada	-----	-2.94
2	3	Barra	Gravas medias a gruesas	-8	Moderada	0.12	-2.42
	4	Canal	Arenas gruesas (0)	-2	Moderada	1.18	0.35
3	5	Canal	Sábulo-Arena gruesa (-1)	-3	Mod. a buena	0.12	0.41
	6	Barra	Sábulo (-1)	-2	Moderada	0.26	0.82
4	7	Canal	Arenas muy gruesas (0)	-2	Moderada	0.36	0.72
	8	Barra	Gravas gruesas, arenas gruesas	-8	Moderada	0.42	0.30
5	9	Canal	Sábulo	-2	Pobre	-----	0.602
6	10	Canal	Sábulo (-1)	-2	Moderada	-----	0.31
	11	Barra	Arena muy gruesa (0)	-4	Pobre	0.14	0.957
7	12	Canal	Sábulo	-2	Moderada	-----	-0.088
	13	Barra	Arena gruesa-Sábulo (1)	-8	Pobre	0.51	0.853
8	14	Canal	Sábulo-Arenas muy gruesas(-1)	-2	Moderada	-----	0.453
	15	Canal	Sábulo (-1)	-2	Pobre	0.58	0.81
9	16	Barra	Sábulo-Arenas muy gruesas (-1)	-8	Moderada	0.07	-0.16
	17	Canal	Arena muy gruesa (-1)	-2	Moderada	-----	0.475
10	18	Barra	Arena muy gruesa (0)	-8	Pobre	1.91	0.819

Est.-Estación; M-Muestra; C-Competencia; Rug.-Rugosidad

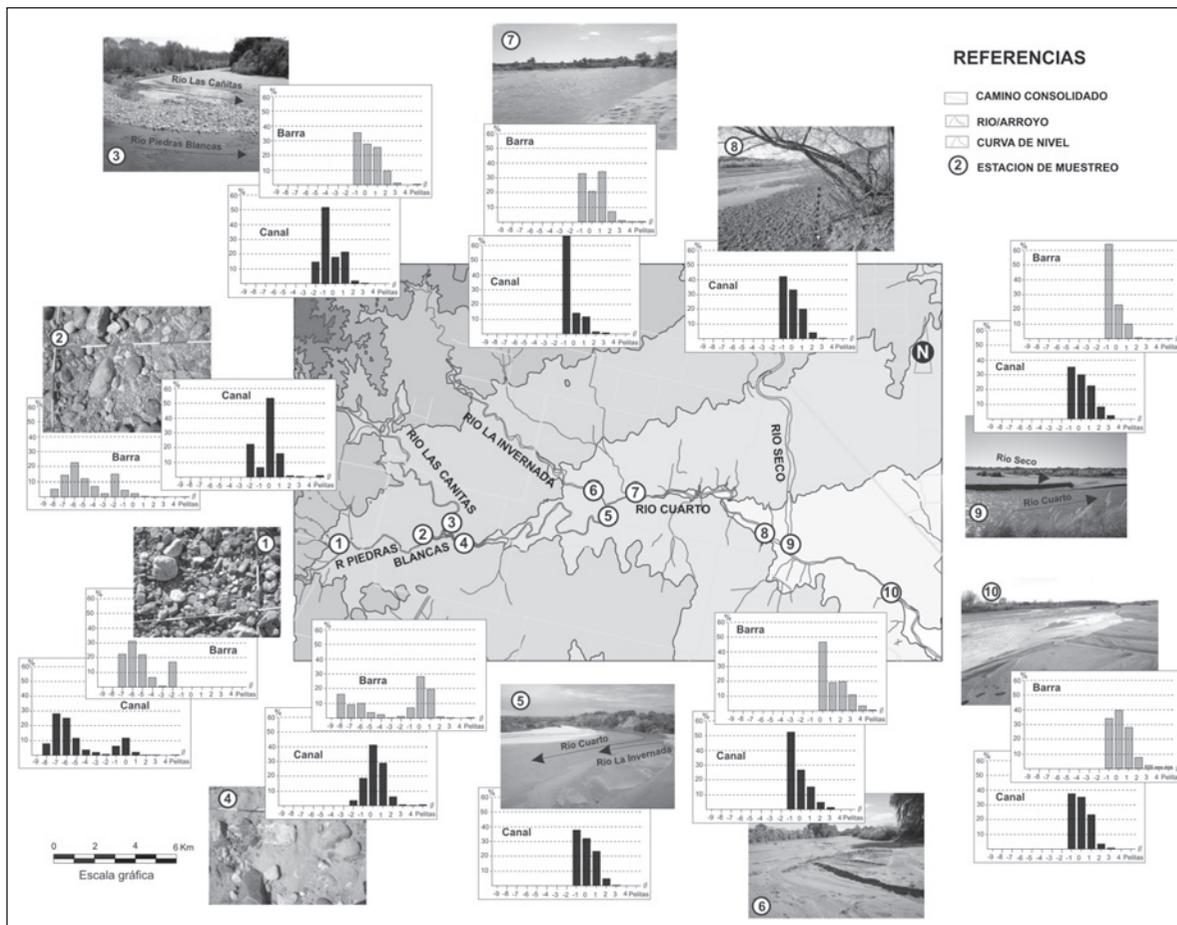


Figura 6: caracterización de materiales tractivos de las subcuencas que aportan al río Cuarto.

implica un total anual de 18.500 toneladas, equivalentes a **30 m<sup>3</sup>/día**, para un caudal de 4,35 m<sup>3</sup>/s.

En los ríos Las Cañitas y La Invernada bajo condiciones de estiaje, se obtuvo una capacidad de transporte de sólo uno 1 kg/día, tal como resulta de las observaciones de campo donde ambos cursos muestran un transporte de sedimentos como carga de fondo prácticamente nulo. Considerando condiciones de crecidas que se repiten varias veces en el año, con secciones reconstruidas por observaciones de marcas de altura de agua, donde la profundidad = 1 m, ancho= 20 m, velocidad = 1,5 m/s y caudal de 30 m<sup>3</sup>/s y un gradiente de 1%, se obtiene una capacidad de transporte de arenas de 40 kg/s, **2000 m<sup>3</sup>/día**. Debe aclararse que las velocidades y gradientes utilizados en el cálculo son valores mínimos, por lo cual el valor calculado está subestimado.

*B- Resultados de la aplicación de la trampa de sedimentos:* Para efectuar la medición con trampa de sedimentos se discretizó la sec-

ción transversal del canal en varios segmentos según sus variaciones hidrodinámicas y sedimentológicas. Se determinó el transporte total para la sección, obteniéndose un valor de 50 m<sup>3</sup>/día, lo cual es coincidente con el resultado obtenido por medio de la ecuación de Shields (1936) en el sitio (ve-

locidad media= 0,9 m/s; área= 8,16 m<sup>2</sup> y caudal= 7 m<sup>3</sup>/s), (Fig. 9) y con los valores obtenidos por Corral *et al.* (2005, 2007). Sumado a lo ya expuesto, y tal como se propuso anteriormente, en condiciones de crecidas, el aporte proveniente de las cuencas de los ríos Las Cañitas y La Invernada,

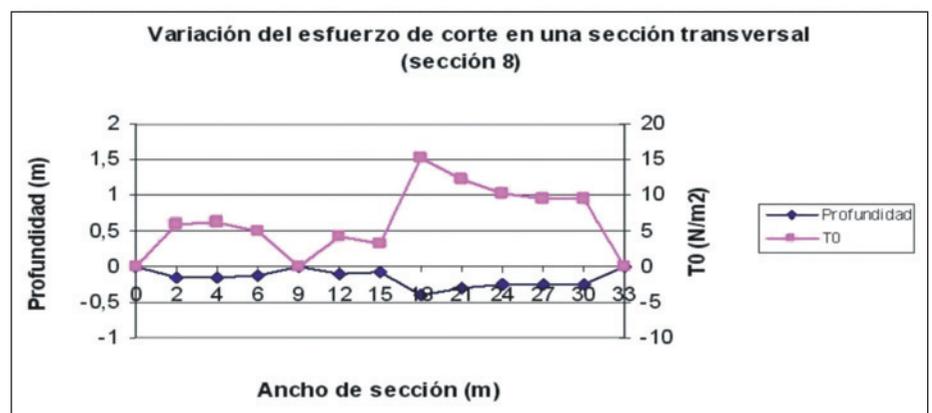


Figura 7: sección transversal y variación del esfuerzo de corte en la Sección 10 Q = 4,35 m<sup>3</sup>/s, vel. media = 0,73 m/s, área = 6 m<sup>2</sup>

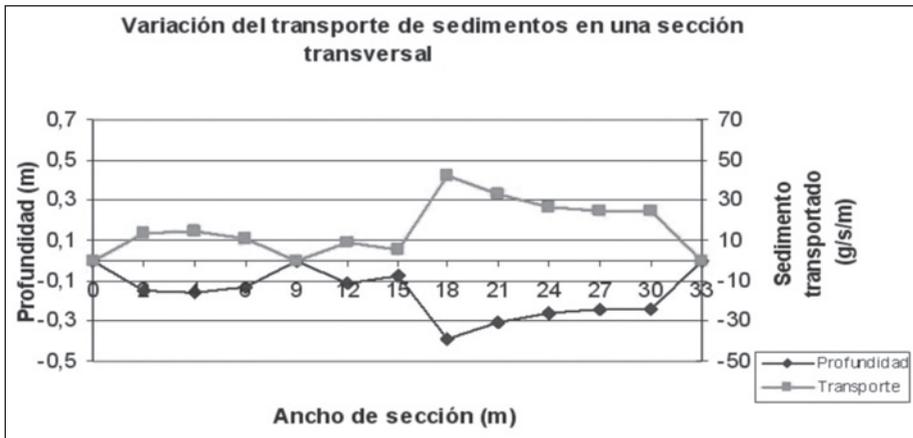


Figura 8: variación del transporte de sedimentos en la sección transversal 10.  $Q = 4,35 \text{ m}^3/\text{s}$ , vel. media =  $0,73 \text{ m/s}$ , área =  $6 \text{ m}^2$

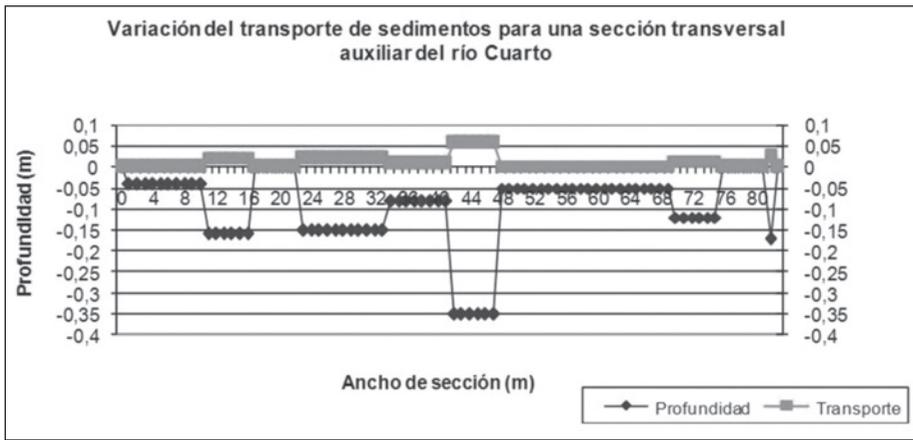


Figura 9: representación de la sección transversal auxiliar y variación del transporte de acuerdo a la ecuación de Shields a lo largo de la misma

superaría los  $60.000 \text{ m}^3$  cada uno, para un período de tiempo acumulado anual de un mes en condiciones de crecida. Si se consideran eventos mayores (de hasta 2 m de profundidad) se alcanzarían volúmenes de  $8.000 \text{ m}^3/\text{día}$ . Sumado a esto se debe tener en cuenta la magnitud de los aportes provenientes desde el río Seco el cual, si bien solo lo hace en eventos de crecidas, con sección de 120 m de ancho y manteniendo constantes los otros valores propuestos para el río Las Cañitas, el volumen aportado sería aproximadamente seis veces superior.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el contexto geológico y los análisis composicionales realizados,

se puede definir que la proveniencia de los materiales que componen la carga de fondo del río Cuarto tiene fuentes perfectamente individualizables:

Los materiales psefíticos, predominantemente de composición metamórfica, son aportados por el río Piedras Blancas, mientras que la principal fuente de materiales psamíticos-sabulíticos son las rocas graníticas del Plutón Talita y Alpa Corral, drenado por los ríos Las Cañitas, La Invernada y Seco. En el sector extraserrano y coincidente con los segmentos de incisión de canal se incorporan fracciones psefíticas provenientes de la erosión de la Formación Pampiano.

Respecto a la dinámica de transporte y considerando los aspectos hidrológicos y

de proveniencia, puede indicarse que no existe una relación directa entre valores de caudales de crecida, medidos en el tramo medio del río Cuarto donde se concentran la mayor cantidad de areneras, y la tasa de reposición de áridos al sector, ya que este aporte se vincula a los eventos de crecida ocurridos en las subcuencas fuentes. Así eventos originados en la subcuenca del río Piedras Blancas, erosionan fondo y márgenes de canal, pero aportan muy poco material areno-gravoso proveniente del sector serrano. En contrapartida las subcuencas de los ríos Las Cañitas, La Invernada y Seco incorporan importantes volúmenes de materiales areno-gravosos al colector principal, aún en eventos de crecida de menor magnitud.

El río Piedras Blancas, que aporta el mayor caudal líquido, no es competente para transportar su carga durante la mayor parte del año, por lo que el esfuerzo de corte desde el punto de confluencia con el río Las Cañitas, genera un exceso que permite erosionar y transportar las fracciones arenosas aportadas por las otras subcuencas. Por esta razón, en condiciones de estiaje el río Cuarto posee un balance negativo en la reposición de sedimentos a partir de este punto. En condiciones de estiaje, los ríos Las Cañitas y La Invernada, prácticamente carecen de capacidad para transportar sedimentos como carga de fondo, mientras que pocos kilómetros aguas abajo de la confluencia, el río Cuarto, posee una capacidad de transporte superior a  $30 \text{ m}^3/\text{día}$ . Esto indica que el río Cuarto moviliza su propio lecho y que la principal reposición de sedimentos arenogravosos tiene lugar a modo de pulsos durante eventos de crecidas y su magnitud es realmente importante como para compensar parcialmente este desbalance.

Considerando que el desbalance negativo se pone de manifiesto aguas arriba de la ubicación de las areneras no puede adjudicarse como principal causal de los procesos de erosión en el tramo medio del río Cuarto a esta actividad.

Por otra parte, la tasa de reposición estimada mediante la aplicación de modelos numéricos (Corral *et al.* 2009) no contempla la variabilidad en el aporte según donde se originen los eventos de crecidas (procedencia). Así, el caudal sólido variará no solo

con la magnitud de los caudales de crecida sino con la proveniencia de los mismos. Considerando valores similares de caudales líquidos, los originados en el sector norte de la cuenca (ríos Seco, La Invernada, Las Cañitas) proveerán mayor cantidad de sólidos que los generados en las subcuencas del sector sur (río Piedras Blancas).

Finalmente, en concordancia con otros autores se considera que la extracción de áridos potencia el desbalance de sedimentos, aunque los resultados obtenidos permiten indicar que su incidencia, en el caso analizado, es mayormente local. El proceso de incisión fluvial es regional y se observa en la mayoría de los cursos aún cuando en ellos no se registra actividad extractiva. Las características de los materiales expuestos en perfiles, la morfología del canal y de la faja fluvial, indican que el proceso de incisión se desarrolla desde períodos mayores que los históricos y más aún respecto del inicio de la actividad extractiva en el río.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Azcurrea, M., Caviglia, L., Gómez, L., Grosso, F., Marclé, R. y Palma, Y. 2001. Informe Final Pasantía Convenio EMOS- Dpto. Geología, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédito), 53 p., Río Cuarto, Córdoba.
- Blarasin, M., Degiovanni, S. Cantú, M. Eric. C., Cabrera A., Cisneros J., Gonzalez, J. y Cholaky, C. 1994. "Diagnóstico global del funcionamiento hídrico de las cuencas que afectan las trazas de las rutas Nacional 7, entre las ciudades de Laboulaye y Villa Mercedes y la ruta Nacional 8, entre Canals y Villa Mercedes. Informe Técnico, Convenio Universidad Nacional de Río Cuarto - Empresa Caminos del Oeste S.A. (inédito), 98 p., Río Cuarto, Córdoba.
- Blarasin, M., Degiovanni S., Cabrera A. y Villegas M. (ed.) 2005. Aguas superficiales y subterráneas en el Sur de Córdoba: Una perspectiva geoambiental. 1ª ed.- Universidad Nacional de Río Cuarto, 346 p., ISBN: 950-665-350-X, Río Cuarto, Córdoba.
- Cantú, M. 1992. Holoceno de la provincia de Córdoba. En: M. Iriondo (ed.) Holoceno de la República Argentina, Tomo 1: 1-16. Paraná, Argentina.
- Coniglio, J., Villegas M., Degiovanni S., Gentile L., Petrelli H., Villalba G. y Felizzia J. 2008. Extracción de áridos en el río Cuarto. Importancia del recurso, tipificación y factores de calidad. 1º Congreso Nacional de Áridos y 6º Jornadas Iberoamericana de Materiales de Construcción. Acta 1: 55-62. Mar del Plata, Argentina.
- Corral, M., Hillman G., Pagot M., Moya G., Baldissone M., Rodriguez A., Lopez F., Hiruela J., Martínez R., Díaz A., González J., Bazán G. y Muratore H. 2005. Influencia de la extracción de áridos en los ríos II y IV de Córdoba. En Farias H. D, Brea. J. D. y Cazeneuve R. (eds) RIOS 2005: Principios y Aplicaciones en Hidráulica de Ríos. CD: 1-25, ISBN 987-20109-4-3 (CD-ROM) 987-20109-5-1. Neuquén, Argentina.
- Corral M., Baldissone M., Díaz A., Farías H., Pagot M., Rodriguez A., López F., González J., Plenkovich G., Bartolomei R., Bazán G. y Muratore H. 2006. Influencia de la extracción de áridos en el Río IV, Córdoba. III Congreso Iberoamericano sobre Control de la Erosión y los Sedimentos, Fundación INMAC y Asociación Internacional para el Control de la Erosión (IECA), Buenos Aires, Argentina.
- Corral M., Baldissone M., García C., Díaz A., González J., Rodriguez A. y Farías H. D. 2007a. Modelo de onda difusiva para procesos erosivos a largo plazo. Caso de estudio: río Cuarto, Córdoba. En RIOS 2007: 3º Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Actas Resúmenes: 33-34, Santiago del Estero, Argentina.
- Corral, M., Baldissone M., Hidalgo M., Díaz A., Farías H., Rodriguez A. y López F. 2007b. Influencia de la extracción de áridos en Río Cuarto: Modelación y Mediciones. En RIOS 2007: 3º Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Actas Resúmenes: 33-34, Santiago del Estero, Argentina.
- Corral, M., Baldissone M., Farias H., Rodriguez A. y López F. 2009. Balance sedimentológico simplificado para el río Cuarto, Córdoba. En RIOS 2009: 4º Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Actas CD: 1-13. Salta, Argentina.
- Chen, D., Acharya K. y Stone M., 2008. Modeling of Gravel Mining in the Rio Salado, Arizona. In: Babcock, R., Walton R. (eds), World Water & Environmental Resources Congress 2008, American Society of Civil Engineers, 1-10, ISBN 978-0-7844-0976-3 Hawaii.
- Chen, D. y Liu, M. 2009. One- and Two-dimensional modeling on deep gravel mining in the Río Salado. In: Starrett, S. (ed), World Water & Environmental Resources Congress 2009: Great rivers, American Society of Civil Engineers, 1-9, ISBN 978-0-7844-1036-3, Kansas City, Missouri.
- Cholaky, C., Reynero M., González J., Cisneros J., Degiovanni A. y Cantero Gutiérrez A. 2005. Avance de la erosión lineal y producción de sedimentos en los arroyos menores del Sur de Córdoba. 20º Congreso Nacional del Agua. 29: 627-644, Mendoza, Argentina.
- Degiovanni, S. 2008. Análisis geoambiental del comportamiento de los sistemas fluviales del Sur de Córdoba, en especial del Aº Achiras-del Gato, como base para su gestión sustentable. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita). 597 p., Río Cuarto, Córdoba.
- Degiovanni, S., Villegas M. y M., Doffo N. 2000a. Actividad Humana /Procesos Geomorfológicos: Incidencia en la calidad de vida de la ciudad de Río Cuarto, República Argentina. Actas 5º Seminario Latinoamericano de Calidad de Vida Urbana. Actas CD: 1-11 Chillan, Chile.
- Degiovanni, S., Villegas M. y Doffo N. 2000b. Rectificación de meandros: evolución del perfil longitudinal de un tramo del río Chocancharava, provincia de Córdoba. En: H.D. Farias, M.T. Pílan, M.J. Borsellino, F.J. Pece, M.T. Mattar y A.R. Storniolo (eds): Uso y Preservación de los Recursos Hídricos en los Umbrales del siglo 21º, Edición en CD ROM:363-364, ISBN 987-99083-4-1.
- Degiovanni, S., Villegas M., Doffo N. y Origlia D. 2004. Erosión Fluvial. Peligrosidad Geológica en Argentina. Metodologías de análisis y mapeo. Estudio de casos. En: M.A. Gonzalez y N.J. Begerman (eds), Publicación Especial Nº 4. Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, Capítulo 2.4., Tomo 1: 173-216. ISBN: 987-21766-0-4.
- Degiovanni, S., Villegas M. y Doffo N. 2005a. Monitoreo del comportamiento del río Cuarto en un tramo del curso medio sometido a fuerte presión antrópica. En Blarasin M., De-

- giovanni S., Cabrera A. y Villegas M. (eds) Aguas superficiales y subterráneas en el Sur de Córdoba: 105-116. ISBN: 950-665-350-X., Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto.
- Degiovanni S., Origlia D., Grosso F., Doffo N. y Santángelo A. 2005b. Erosión de márgenes: análisis de los factores que regulan la evolución de un meandro en la cuenca media del río Cuarto. En Blarasin M., S. Degiovanni, A. Cabrera y M. Villegas (eds) Aguas superficiales y subterráneas en el Sur de Córdoba: 117-128, ISBN: 950-665-350-X. - Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto.
- Degiovanni, S., Villegas M., Blarasin M. y Sagripanti G. 2005c. Hoja Geológica Río Cuarto-3263-III Secretaría de Minería de la Nación - Servicio Geológico Minero Argentino, 95 p. ISSN 0328-2333. Buenos Aires.
- Degiovanni, S., Doffo N. y Villegas M. 2009. Rejuvenecimiento de la red de drenaje del Sur de Córdoba como consecuencia del cambio climático durante la última centuria. En Sayago y Collantes (eds), Geomorfología y Cambio Climático- Capítulo 6, Instituto de Geología y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Tucumán- Actas 1: 79-96. ISBN: 978-987-9390-96-2. MAGNA Ediciones, Tucumán
- Degiovanni S. y Villegas M. 2009. Impacto de la actividad minera en la dinámica del río Cuarto. Informe Técnico. Cámara de Areneros de Río Cuarto- Universidad Nacional de Río Cuarto (inédito), 7 p., Río Cuarto.
- Doffo, N. 2007. Alteraciones en el régimen hidrológico de la cuenca del arroyo Las Lajas, Cba: causas naturales y antrópicas, umbrales de resistencia al cambio. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita). 342 p., Río Cuarto, Córdoba.
- Doffo, N., S. Degiovanni, S., y Villegas M. 2010. Integración de cuencas de drenaje en áreas de llanura durante la última centuria. El caso del arroyo Las Lajas, Córdoba, Argentina. En Varini, M., Entraigas, I. y Vives, L. (eds). Hacia la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en Zonas de Llanura. 1º Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. 131-138. ISBN: 978-987-543-393-2, Azul.
- Estadística Hidrológica de la República Argentina. 2004. Secretaría de Obras Públicas. Subsecretaría de Recursos Hídricos. Tomo 11: 494 p.
- Fagiano, M., Pinotti L., Esparza A.M. y Martino R. 2002. La faja de cizalla Guacha Corral, Sierras Pampeanas de Córdoba, Argentina. 15º Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 259-264. Asociación Geológica Argentina, Buenos Aires.
- Folk, R.L. y Ward W.C. 1957. Brazos River bar: a study of the significance of grain size parameters. *Journal of Sediment Petrology*, 27:3-26
- Kondolf, G. M. 1997. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, 21(4), 533-551. Springer-Verlag New York
- Kondolf, G. M. 1994. Geomorphic and environmental effects of in stream gravel mining. *Landscape and Urban Planning*, Elsevier, 28: 225-243
- Krumbein, W.C. 1934. Size frequency distributios of sediments. *Journal of sedimentary Petrology*. 4:65-77.
- Laboratorio de Hidráulica-UNC, 2007. Estudio sobre la influencia de la extracción de áridos en el cauce del río Chocancharava. Informe final 2º Convenio Universidad Nacional de Córdoba-Dirección Provincial de Aguas y Saneamiento (inédito), 68 p., Córdoba.
- Perillo, G. 2003. Dinámica del transporte de sedimentos. Asociación Argentina de Sedimentología, Publicación Especial N° 2. 201 p., Buenos Aires.
- Rinaldi, M., Wyzga, B. y Surian, N. 2005. Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management respectives. *River Research and Applications*, Wiley, 21: 805-828.
- Rovira, A., Batalla, R.J. y Sala, M., 2005. Response of a river sediment budget after historical gravel mining (the Lower Tordera, NE Spain). *River Research and Applications*, Wiley, 21: 829-847.
- Shields, A. 1936. Anwendung der Ahnlichkeitsmechanik und der Turbuenzforschung auf die Geschiebebewegung, Mitteilungen der Preuss, Versuchanst ftr Wasserbau und Schiffbau, 26: 26 p., Berlin
- Ulla, J.P. 2008. Variación de parámetros sedimentológicos y su relación con la descarga e intervenciones de cauce en la cuenca media alta del río Chocancharava, Córdoba. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédito) 159 p., Río Cuarto, Córdoba
- Villegas, M., Villalba G. y Degiovanni S. 2000. Parámetros texturales como geoindicadores de la respuesta de sistemas fluviales ante intervenciones antrópicas. 2º Taller sobre Sedimentología y Medio Ambiente. Actas 1: 61-62, Buenos Aires.
- Villegas, M., Degiovanni S., Caviglia L. y Palma Y. 2002. Monitoreo de sistemas fluviales: evaluación de la presión de la minería de áridos sobre el río Cuarto utilizando Geoindicadores. 19º Congreso Nacional del Agua. Ed. CD. 10 p., ISBN: 987-20378-0-9, Carlos Paz, Córdoba.
- Villegas, M., Degiovanni S. y Ulla J.P. 2006. Tipificación del comportamiento del sector sur de la cuenca del río Cuarto a través del análisis de variables morfológicas y sedimentológicas. Actas 3º Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Tomo I: 221-231, Córdoba.
- Wentworth, C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30:377-392.

Recibido: 29 de noviembre, 2012

Acceptado: 27 de enero, 2013