

EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE LA EMBOCADURA DE LOS RÍOS COLASTINÉ Y LEYES, PLANICIE ALUVIAL DEL PARANÁ MEDIO

María D. Montagnini⁽¹⁾, María A. Basualdo⁽¹⁾, Juan J. Alarcón⁽¹⁾, Claudio Frutos⁽¹⁾, Luis E. Pertovt⁽¹⁾, Carlos G. Ramonell^(1,2) y Mario L. Amsler^(1,2)

⁽¹⁾ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral.

⁽²⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

C.C. 217 - C.P. 3000 - Santa Fe - Argentina. Tel. (54) (342) 4575 244/5/6 - Interno 153. FAX (54) (342) 4575 224

E-mail: mdm@fich1.unl.edu.ar, abasuald@hotmail.com, jj_alarcon@yahoo.com.ar, luispertovt@yahoo.com.ar,

ramonell@fich1.unl.edu.ar, mamsler@fich1.unl.edu.ar - Web: <http://www.fich.unl.edu.ar>

RESUMEN

El área de las embocaduras del río Colastiné y arroyo Leyes se ubica aproximadamente 35 km al noreste de la ciudad de Santa Fe y es la vía de ingreso de caudales encauzados y de desborde provenientes del río Paraná al sistema formado por las lagunas Capón-Leyes –Setúbal, que luego escurren a la vera de aquel centro urbano.

La conjunción de condiciones topográficas regionales, variaciones de la geometría del cauce principal durante el siglo XX (gobernadas por el caudal efectivo del Paraná), intervenciones humanas en la planicie aluvial y los efectos erosivos de la gran creciente de 1982-83, condujeron a un escenario hidráulico-morfológico actual que propicia la transfluencia de caudales líquidos y sólidos hacia el sistema lagunar. Ello se verifica para todos los estados del río Paraná.

En el trabajo se detalla cómo se llegó a esta situación, que comenzó con la rectificación natural, iniciada en la década de 1930, del gran meandro compuesto que describía el río Colastiné a principios del S XX. Se describe cómo ello se combina con la influencia de la construcción y sucesivos alteos de la Ruta Provincial 1 (paralela al valle aluvial) sobre los flujos de inundación hasta la ocurrencia de la gran creciente mencionada. Durante su transcurso, el arroyo Leyes (la vía de conexión con el complejo lagunar) pasa a transformarse en uno de los cauces más importantes de la planicie aluvial del Paraná.

ABSTRACT

The mouths of the Colastiné and Leyes Rivers locate 35 km NE of Santa Fe City in an area where the channelized and flood discharges supplied by the Paraná River enter to the lake system Capón-Leyes-Setúbal. Downstream, those discharges flow bordering that city.

The combination of regional topographic features, changes of the main channel geometry during the XXth Century (governed by the Paraná River effective discharges), anthropic actions on the alluvial plain and erosive effects of the 1982-83 large flood, resulted in a hydraulic-morphologic environment at present favouring the liquid an solid discharges transfer to the lake system during all the Paraná River stages.

The origin of this scenario during the 1930 decade is described in the paper. At that time the large composite meander forming the entrance of the Colastiné River early in the past century, began its natural rectification. The phenomena combined with the influence on the flood flows exerted by de State Road 1 building parallel to the alluvial plain. This influence increased due to the road successive elevations and reached a maximum when the referred flood occurred. During this event the Leyes River morphology (the connection with the lake system) chanted dramatically becoming one of the most important secondary channels in the Paraná River alluvial plain.

INTRODUCCIÓN

Las embocaduras de los ríos Colastiné y Leyes al noreste de la ciudad de Santa Fe, han cobrado singular importancia dada su condición de ingreso de los caudales líquidos y sólidos

que alimentan el sistema de lagunas ubicado al norte de ese centro urbano. Las aguas desde allí escurren por el río Santa Fe bordeando a la ciudad por el este y el sur (Figura 1).

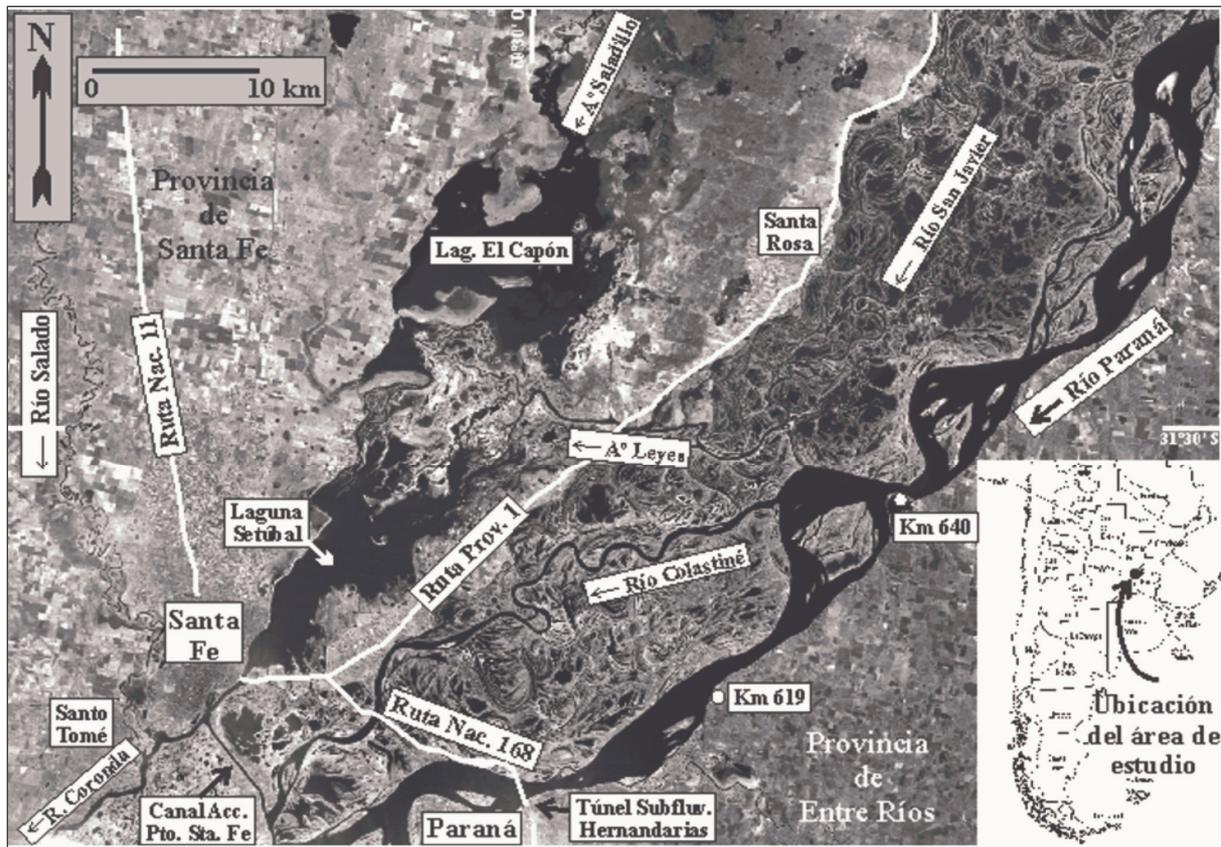


Figura 1.- Ubicación del área de estudio.

La compleja red hidrográfica y las particularidades de la zona de ingreso -con la aparición, activación, desactivación y hasta desaparición de cursos de diferente importancia- determinan que el estudio de ese área sea de gran interés por las implicancias que tienen los cambios morfológicos verificados en poco menos de un siglo, para la seguridad de los centros urbanos de aguas abajo.

Los registros hidrográficos sistemáticos disponibles desde principios del siglo XX, tratados en diversos antecedentes, dan cuenta de numerosos daños producidos en las ciudades de Santa Fe, San José del Rincón, La Guardia y Alto Verde, por la derivación a través de aquella red de drenaje de buena parte de los caudales de las grandes crecidas del Paraná hacia esas localidades.

El objetivo de este trabajo es describir los cambios morfológicos mencionados en base al análisis de la cartografía planibatimétrica disponible e imágenes aéreas (satelitales y aerofotos) y demostrar cómo estas transformaciones han estado estrechamente vinculadas a las variaciones del caudal efectivo en el río Paraná a lo largo del siglo pasado incluyendo los efectos atribuibles a la acción del hombre en el sistema. El papel jugado por la gran creciente de 1983 en todo ello es particularmente destacado, incorporando cómputos referidos al aumento del transporte de sedimentos hacia el sistema lagunar luego de ese evento.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El gran valle aluvial del río Paraná en su tramo medio, con 70 km de ancho a la altura de la localidad de San Javier en la provincia de Santa Fe y la Paz en la provincia de Entre Ríos, y su drástica reducción a 13 km a la altura del eje Santa Fe – Paraná, alberga una intrincada red hidrográfica que incluye, entre otros cauces de menor jerarquía y de acuerdo a su importancia, a los ríos Colastiné, San Javier, arroyo Leyes, riacho Colorado y arroyo Potrero.

El área específica de estudio en el presente trabajo puede observarse en Fig. 2, donde se han señalado estos principales cursos de agua.

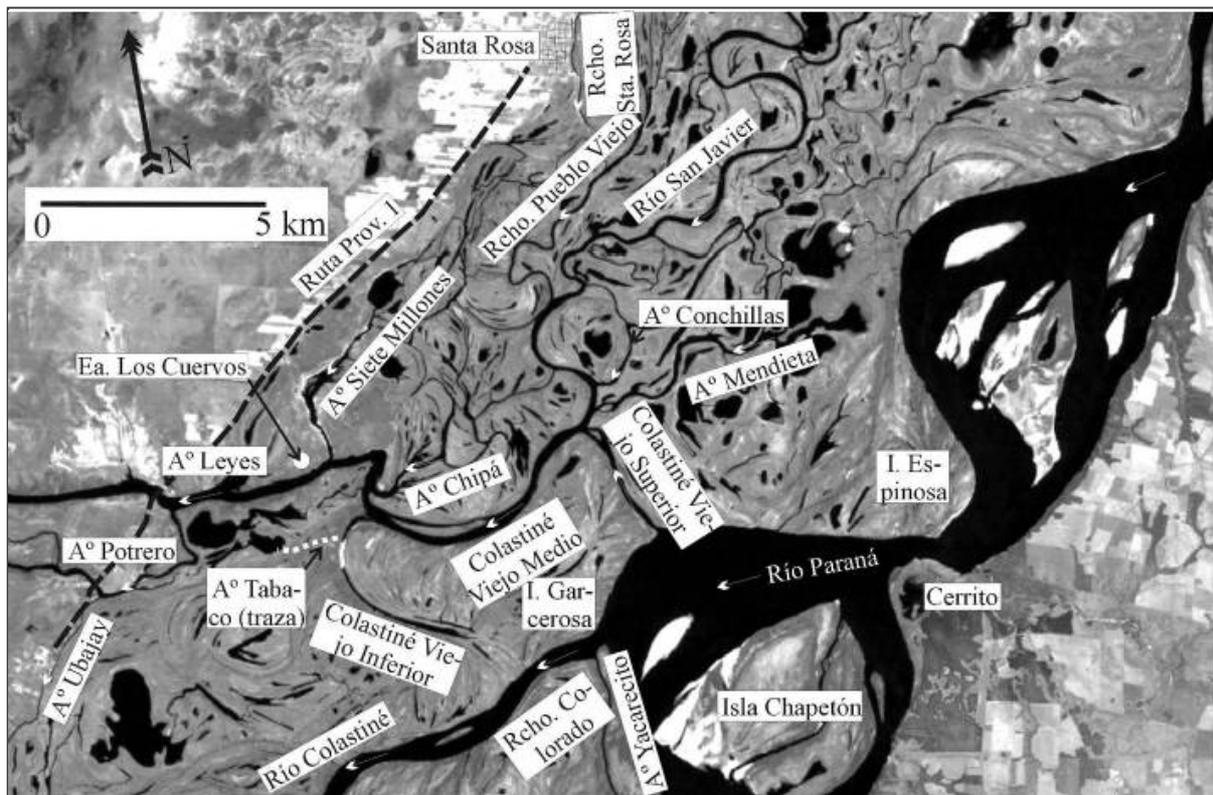


Figura 2.- Topónimos empleados. Base: imagen LandSat 5, canal 5, del 25 de enero de 2000 (altura hidrométrica en Puerto Santa Fe: $Hh_{SF} = 2,17$ m; altura hidrométrica en Puerto Paraná: $Hh_{PP} = 1,90$ m).

A nivel más general (Fig. 1), se pueden identificar tres grandes sub-sistemas: lagunar Capón-Leyes-Setúbal, Colastiné-Paraná y Ruta Nacional 168-Alto Verde.

Un límite natural entre el sub-sistema lagunar Capón-Leyes-Setúbal y Colastiné-Paraná lo constituye el denominado albardón costero, al sur de San Javier, en el lado santafesino. De orientación NE-SO, sobre el mismo se encuentra la traza de la Ruta Provincial Nro. 1 (en adelante, RP1) que une las ciudades de Santa Fe y Reconquista.

Al oeste del albardón, el sub-sistema Capón-Leyes-Setúbal está alimentado desde el norte por las aguas pluviales de la cuenca de los ríos Saladillos Dulce y Amargo y desde el este por los arroyos Leyes, Potrero y Santa Rita.

El arroyo Leyes, luego de su embocadura en el río Colastiné, recibe sobre su margen derecha los aportes de los arroyos Chipá y Siete Millones. Tras un recorrido de aproximadamente 17 km, descarga sus aguas a través de El Pando y Los Tachos a la laguna Leyes, desde El Falso Toro a la laguna el Capón, y por El Correntoso y la Zanja Brava a la laguna Setúbal. Este subsistema desagua en el río Santa Fe cuya sección de entrada se localiza a la altura del viejo Ferrocarril Francés (Fig.1).

El sedimento que transporta el Leyes va quedando depositado en el frente deltaico en plena evolución al norte de la laguna Setúbal. La progradación de este delta es asimétrica puesto que tiene un mayor desarrollo en sentido E-O siguiendo la pendiente regional del orden del decímetro por kilómetro. En sentido N-S, la pendiente longitudinal del valle es del orden del centímetro por kilómetro. Como se verá en lo que sigue, esta diferencia de pendientes constituyó uno de los factores claves en el comportamiento hidrosedimentológico del sistema que gobernaron los cambios morfológicos verificados en su red de drenaje.

Sobre la margen derecha del río Paraná y aproximadamente a la altura del eje imaginario que une la traza del Arroyo Leyes en el lado santafesino con Cerrito en la elevada ribera entrerriana, se encuentra la embocadura del río Colastiné en sus tramos denominados (a los fines de este trabajo) Viejo Superior, Medio e Inferior. Estos tramos son alimentados actualmente por los caudales del río San Javier, arroyo Mendieta y el Paraná.

Otro factor de sumo interés en el estudio de los cambios morfológicos en el área, lo constituye el escalón topográfico ubicado a la altura del km 640, siguiendo la traza del arroyo Leyes – Colastiné Viejo Medio (Fig. 3) conformando una suerte de embalse natural para los caudales provenientes del San Javier, aguas arriba. Originalmente este desnivel fue atribuido a un desplazamiento de bloques (Ramonell y otros, 2000). Estudios más recientes sugieren que podría estar originado por el desplazamiento lateral y sedimentación concomitante en la llanura aluvial, del antiguo tramo superior del Colastiné (Ramonell, 2005).

La actividad antrópica desde principios del S XX, ha incidido también marcadamente en la dinámica fluvial registrada en la zona. Numerosas obras realizadas acompañando el aumento de los asentamientos poblacionales en sitios del valle de inundación del Paraná, fueron en su mayoría planificadas sin tener en cuenta la poderosa capacidad de transformación de este sistema en su búsqueda de un equilibrio. Los procesos involucrados frecuentemente se aceleraron por la acción del hombre.

A los fines de este trabajo, la construcción de la RP1 constituyó la obra de mayor impacto en la evolución natural de la red de drenaje investigada. A continuación se efectúa una sintética cronología sobre este particular.

La progresiva ocupación de las zonas altas del albardón costero con el asentamiento de núcleos urbanos e incremento de la actividad ganadera y agropecuaria, hicieron necesaria la comunicación entre las poblaciones. Es así que en 1942 se ejecuta el “camino de la costa”, la RP1, desde La Guardia hacia el NE. Durante las crecidas de 1959 y 1961 las aguas se encontraron con el terraplén de esta vía de comunicación y, al ser retenidas, se sobreelevan, venciendo la resistencia de los terraplenes y cortando la ruta en varios puntos.



Figura 3.a.- Mosaico topográfico del área de estudio realizado con las cartas 3160-27-1 y 3160-27-2 del IGM. Las cotas corresponden a un relevamiento expeditivo realizado en la década del '60, donde se pone de manifiesto el resalto topográfico a uno y otro lado de la alineación Cerrito-arroyo Leyes.

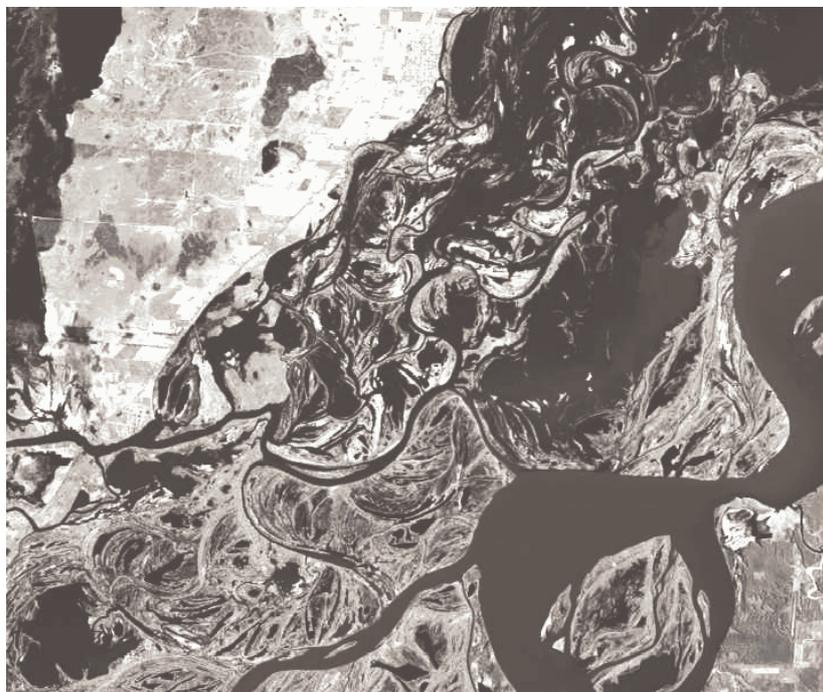


Figura 3.b.- Imagen satelital del área, correspondiente a una situación hidrométrica de aguas medias-altas. Nótese la influencia del desnivel siguiendo el eje arroyo Leyes-Cerrito, evidenciado por la disparidad del anegamiento fluvial al norte y al sur del mismo. Base: imagen LandSat 5 TM, del 25 de febrero de 1994 ($H_{hSF} = 4,58$ m; $H_{hPP} = 4,16$ m).

En el año 1963 se concluye la reconstrucción de la RP1, a una cota adoptada en base a datos de la crecida de 1961 y con defensas laterales en los bajos naturales de El Laurel y La Vuelta del Dorado, aguas arriba de Santa Rosa (Fig. 1).

Sin embargo, durante el gran evento de 1966, que culminó con una altura de 6,94 m en Puerto Santa Fe, la RP1 fue sobrepasada nuevamente por el nivel de las aguas en largos trechos entre las localidades de Saladero Cabal y Helvecia, entre Cayastá y Santa Rosa y cerca de San José del Rincón, produciéndose numerosos cortes (Cabral, 1967).

En la crecida extraordinaria de 1982/83, con una altura máxima en Puerto Santa Fe de 7,33 m, la RP1 y sus defensas fueron atacadas por las aguas, que las destruyeron en numerosos tramos. Luego de la crecida, en el período de reconstrucción, la ruta fue elevada a una cota acorde con los nuevos registros hidrométricos producidos. Es así como se transformó, actualmente, en un verdadero dique lateral de contención embalsando las aguas de inundación al este de la misma, impidiendo su transfluencia hacia el valle siguiendo la dirección natural E-O, y dejando como único paso al oeste las secciones debajo de los puentes de los arroyos Leyes y Potrero.

Ante eventos similares al mencionado, y a veces incluso de menor magnitud, adquieren significativa importancia el arroyo Siete Millones, el riacho Pueblo Viejo y el arroyo Chipá que vuelcan sus aguas en el sistema Colastiné Viejo Superior – arroyo Leyes, y desde allí alimentan el sistema lagunar Capón-Leyes-Setúbal (Ceirano y otros, 2000).

ASPECTOS METODOLÓGICOS

A fin de efectuar el examen de la evolución morfológica que ha experimentado la zona de estudio se analizaron antecedentes temáticos, se recopilaron y trataron cartografía específica e imágenes aéreas y satelitales. Todo ello se complementó con reconocimientos y toma de muestras de sedimentos en el terreno.

La cartografía recopilada data de principios del siglo XX, las fotografías aéreas más antiguas fueron obtenidas en 1954. En Tablas 1 y 2 se detalla la información utilizada, escalas, resolución espacial y alturas hidrométricas con respecto a las escalas de los puertos de Santa Fe y Paraná (en adelante H_{SF} y H_{PP} respectivamente).

Sobre una gran parte de la información disponible se realizaron análisis cuantitativos a través de mapeos y mediciones de parámetros de forma, a fin detectar la evolución morfológica de los cauces estudiados. El resto fue utilizado en carácter de apoyo cualitativo.

En los planos e imágenes existentes en soporte papel se digitalizaron los márgenes de los principales cauces del área y las isóbatas de 0 y 3 m (en los casos en que se contaba con esta información). La cartografía fue dibujada y georreferenciada con un software CAD al sistema de coordenadas planas Gauss Krüger. Para la cartografía generada por la Dirección Nacional de Vías Navegables (DNVN) se utilizó una serie de puntos obtenidos sobre la grilla de coordenadas de los mismos planos y para el caso de las imágenes satelitales, puntos extraídos de una imagen restituida Spot 3 de 1993.

Los valores de las variables morfológicas se obtuvieron de la siguiente manera: los cauces de los cursos analizados (i.e. Colastiné, Colorado, Colastiné Viejo en sus tres tramos, arroyo

Leyes y San Javier) se segmentaron en sectores para distintos períodos, se calculó el área en planta de cada uno tanto para las márgenes como para las isóbatas, y se midió la longitud de cada uno a través de un eje equidistante a las márgenes. Luego, el ancho medio del tramo se calculó mediante el cociente: área/longitud (Fig. 4, Tablas 3 y 4).

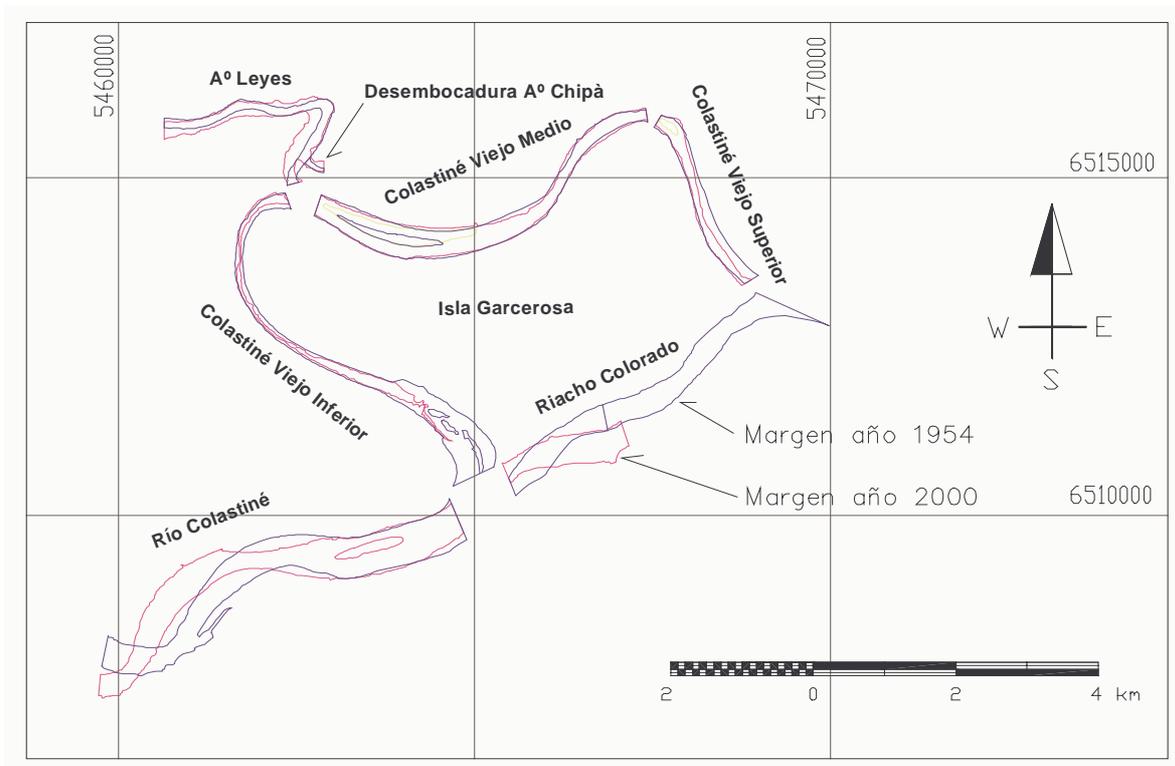


Figura 4.- Ejemplo de preparación de tramos de cauce para medición de áreas en planta.

Para el caso del arroyo Leyes (Tabla 5) se utilizaron además anchos obtenidos como un promedio de cuatro secciones transversales distribuidas en el tramo superior. Cabe aclarar que las secciones de inicio y fin de cada uno de los tramos considerados se mantuvieron para todos los años analizados, con la salvedad de aquellos en que el curso había experimentado una modificación marcada de su cauce impidiendo la aplicación de este criterio. Ejemplo de ello es el riacho Colorado en la Fig. 4 para los años 1954 y 2000, en donde hubo una migración de la embocadura debida a la erosión de la margen derecha del Paraná, por lo que se lo trató en un tramo de menor longitud.

Los resultados obtenidos deben considerarse teniendo en cuenta las posibles fuentes de error, a saber: diferencias de alturas hidrométricas en cada uno de los registros, imprecisiones asociadas a diferencias de escalas en la cartografía base, errores de digitalización y georreferenciación. Sobre este particular, las cuantificaciones realizadas están avaladas por verificaciones cruzadas de posición de líneas de ribera realizadas entre planibatimetrías e imágenes aéreas de fechas próximas, que arrojaron resultados concordantes.

Tabla 1.- Detalle de la cartografía planibatimétrica considerada.⁽¹⁾

Fuente	Nombre/ Código de origen	Soporte de origen	Fecha del relevamiento ⁽²⁾	Escala	Hh extremas durante el relevamiento (m)
<i>DNVN</i> ⁽³⁾	<i>Plano de navegación entre Paraná y Esquina</i>	<i>Papel</i>	<i>1907</i>	<i>1:100 000</i>	---
DNVN	Plano de navegación entre Esquina y la Desembocadura	Papel	1913	1:100 000	---
<i>DNVN</i>	<i>Plano de navegación del río Paraná</i>	<i>Papel</i> ⁽⁴⁾	<i>1939</i>	<i>1:100 000</i>	---
<i>DNVN</i>	<i>Planos Comparativos Paraná –Curtiembre, 10.668</i>	<i>Papel</i>	<i>1908 - 1913 - 1918 - 1922 - 1936 – 1943</i>	<i>1:100 000</i>	---
DNVN	Plano Río Paraná Tramo Bajada Grande – Abajo Curiembre, Láminas 5 y 6	Papel ⁽⁵⁾	1963	1:50 000	---
DNVN	13.357 Lámina 3	Papel	16/mayo/1971 a 16/julio/1971	1:5 000	Hh _{SF} = 3,50 - 3,69 Hh _{PP} = 2,95 - 3,22
DNVN	13.349 Láminas 1 a 5	Papel	27/noviembre/1971 a 8/mayo/1972	1:2 000	Hh _{SF} = 0,76 - 3,53 Hh _{PP} = 0,38 - 3,04
DNVN	14.676 Láminas 1 y 2	Papel	6-14/setiembre/1988 y 13-22/setiembre/1989	1:5 000	Hh _{SF} = 3,58 - 4,51 Hh _{PP} = 3,01 - 4,05
DNVN	14.721 Lámina 2	Papel	10-17/febrero/1989	1:5 000	Hh _{SF} = 4,17 - 4,37 Hh _{PP} = 3,36 - 3,65

⁽¹⁾ Los registros consignados en *itálica* fueron tratados en forma cualitativa. Los transcritos en fuente normal fueron usados en mediciones sistemáticas de parámetros de cauce (áreas en planta, anchos medios, etc.).

⁽²⁾ La cartografía donde sólo se indica el año del relevamiento corresponde a cartas de navegación. Las mismas sintetizan la configuración del sistema de cauces hacia tal año, pudiendo incluir la situación de tramos en tiempos inmediatamente previos. Por tal razón no se citan alturas hidrométricas extremas en esas filas.

⁽³⁾ Dirección Nacional de Vías Navegables (y denominaciones equivalentes del organismo en el pasado: Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables, Dirección General de Navegación y Puertos, Comisión del Paraná Inferior).

⁽⁴⁾ Reproducido en la carta 3160-27 “Villa Urquiza” del Instituto Geográfico Militar (IGM).

⁽⁵⁾ Reproducido en las cartas 3160-27-3 “Villa Urquiza” y 3160-27-1 “Santa Rosa” del IGM.

Tabla 2.- Detalle de imágenes aéreas consideradas.⁽¹⁾

Tipo de imagen	Soporte	Fecha de captura	Escala/Resolución espacial	Hh _{SF}	Hh _{PP}
Fotografías aéreas ⁽²⁾	Papel	1954	1:45 000	aguas medias	
Fotomosaicos (restituido y semicontrolado) ⁽³⁾	Papel	7-8/noviembre/1974	1:10 000 - 1:50 000	2,22-2,39	2,02-2,22
<i>Fotografías aéreas</i> ⁽⁴⁾	<i>Papel</i>	<i>15/diciembre/ 1975</i>	<i>1:20 000</i>	<i>3,42</i>	<i>3,07</i>
<i>Fotografías aéreas</i> ⁽⁴⁾	<i>Papel</i>	<i>21/marzo/1976</i>	<i>1:20 000</i>	<i>4,69</i>	<i>4,23</i>
<i>LandSat5, canal 5</i> ⁽⁵⁾	<i>Papel</i>	<i>16/agosto/1984</i>	<i>1:250 000</i>	<i>3,26</i>	<i>2,84</i>
Fotografías aéreas ⁽⁴⁾	Papel	3/abril/1987	1:25 000	4,27	3,66
<i>Fotografías aéreas</i> ⁽⁴⁾	<i>Papel</i>	<i>5/junio/1988</i>	<i>1:10 000</i>	<i>4,07</i>	<i>3,58</i>
<i>Fotografías aéreas</i> ⁽⁴⁾	<i>Papel</i>	<i>Febrero/1989</i>	<i>1:100 000</i>	<i>3,30-4,36</i>	<i>2,93-3,89</i>
<i>Fotografías aéreas</i> ⁽⁴⁾	<i>Papel</i>	<i>10/julio/1992</i>	<i>1:20 000</i>	<i>6,35</i>	<i>5,73</i>
<i>Fotografías aéreas</i> ⁽⁴⁾	<i>Papel</i>	<i>10/agosto/1993</i>	<i>1:10 000</i>	<i>3,33</i>	<i>2,91</i>
SPOT 3 (restituida) ⁽⁶⁾	Papel	24/diciembre/1993	1:50 000	3,85	3,36
<i>LandSat5 TM</i> ⁽²⁾	<i>Digital</i>	<i>25/febrero/1994</i>	<i>30 x 30 m</i>	<i>4,58</i>	<i>4,16</i>
<i>Fotografía aérea</i> ⁽⁷⁾	<i>Digital</i>	<i>28/marzo/1997</i>	<i>80 x 80 m</i>	<i>5,34</i>	<i>4,72</i>
LandSat5 TM ⁽⁵⁾	Digital	8/mayo/1997	30 x 30 m	3,08	2,63
LandSat5 TM ⁽⁵⁾	Digital	12/agosto/1997	30 x 30 m	4,26	3,85
LandSat5 TM ⁽⁵⁾	Digital	28/agosto/1997	30 x 30 m	4,42	3,96
LandSat5 TM ⁽⁵⁾	Digital	2/diciembre/1997	30 x 30 m	5,57	5,08
<i>LandSat5 TM</i> ⁽⁵⁾	<i>Digital</i>	<i>19/enero/1998</i>	<i>30 x 30 m</i>	<i>5,89</i>	<i>5,25</i>
LandSat5 TM ⁽⁵⁾	Digital	27/mayo/1998	30 x 30 m	6,62	6,12
<i>LandSat5 TM</i> ⁽⁴⁾	<i>Digital</i>	<i>25/enero/ 2000</i>	<i>30 x 30 m</i>	<i>2,17</i>	<i>1,90</i>
<i>LandSat7 ETM</i> ⁽⁵⁾	<i>Digital</i>	<i>18/diciembre/2000</i>	<i>15 x 15 m</i>	<i>3,08</i>	<i>2,70</i>

- (1) Los registros consignados en *itálica* fueron tratados en forma cualitativa; los transcritos en fuente normal se usaron en mediciones sistemáticas de parámetros de cauce (áreas en planta, anchos medios, etc.); los que aparecen en **negrita** se utilizaron en la evaluación de áreas anegadas vs. H_{hSF} en el análisis de dinámica hídrica.
- (2) Organismo ejecutor: IGM.
- (3) Organismo ejecutor: Spartan Air Service.
- (4) Organismo ejecutor: III Brigada Aérea, FAA.
- (5) Organismo ejecutor: CONAE.
- (6) Organismo ejecutor: Servicio de Catastro e Información Territorial, Provincia de Santa Fe.
- (7) Organismo ejecutor: NASA.

Tabla 3.- Evolución de parámetros morfológicos en planta de los cauces del área de estudio (evaluados a partir de planos de la Dirección Nacional de Vías Navegables)

Río	Año	Área (m ²)	Longitud (m)	Ancho medio (m)	Área bajo 0 m (m ²)	Área bajo 3 m (m ²)
Colastiné Viejo Superior	1913	1 276 263	2 711	471	1 038 621	365 781
	1963	664 062	2 790	238	S/d	S/d
	1972	426 156	2 852	149	189 682	13 017
	1988	465 252	2 881	161	240 481	26 524
Colastiné Viejo Medio	1913	2 373 635	5 629	422	2 245 558	1 373 139
	1963	1 616 870	5 718	283	S/d	S/d
	1972	1 017 246	5 608	181	816 564	479 870
	1988	1 350 835	5 646	239	952 155	457 232
Colastiné Viejo Inferior	1913	2 603 418	6 370	409	2 019 450	1 103 407
	1963	1 276 705	6 484	197	S/d	S/d
	1972	826 308	6 638	124	335 979	48 344
	1988	S/d	S/d	S/d	S/d	S/d
Colastiné	1913	2 525 754	5 182	487	2 097 228	861 407
	1963	2 146 893	6 978	308	2 035 837	S/d
	1972	2 146 965	5 357	401	1 806 662	736 210
	1988	S/d	S/d	S/d	S/d	S/d
Colorado Superior (aguas arriba arroyo Yacarecito)	1913	No existe	No existe	No existe	No existe	No existe
	1963	787 044	3 133	251	S/d	S/d
	1972	1 072 562	2 876	373	828 862	483 986
	1988	S/d	S/d	S/d	S/d	S/d
Colorado Inferior (aguas abajo arroyo Yacarecito)	1913	No existe	No existe	No existe	No existe	No existe
	1963	528 186	1 800	293	S/d	S/d
	1972	603 617	1 836	329	533 932	309 361
	1988	S/d	S/d	S/d	S/d	S/d
Arroyo Leyes	1913	S/d	S/d	S/d	S/d	S/d
	1963	633 776	6 121	104	S/d	S/d
	1972	946 034	5 878	161	782 131	611 797
	1988	1 353 986	5 869	231	1 146 713	962 645

Tabla 4.- Evolución de parámetros morfológicos en planta de los cauces del área de estudio (evaluados a partir de imágenes aéreas).

Río	Año	Área (m ²)	Longitud (m)	Ancho medio (m)
Colastiné Viejo Superior	1954	581 946	2 732	213
	1974	403 092	2 780	145
	1987	403 576	2 764	146
	1993	371 958	2 744	136
	2000	339 945	2 753	124
Colastiné Viejo Medio	1954	1 504 786	5 723	263
	1974	1 299 334	5 728	227
	1987	1 404 957	5 784	243
	1993	1 367 865	5 915	231
	2000	1 238 537	5 714	217
Colastiné Viejo Inferior	1954	1 320 349	6 318	209
	1974	1 093 797	6 360	172
	1987	844 516	6 432	131
	1993	734 383	6 261	117
	2000	398 786	5 842	68
Colastiné	1954	2 703 445	5 827	464
	1974	2 617 983	6 071	431
	1987	2 782 309	6 177	450
	1993	2 644 431	6 134	431
	2000	2 474 651	6 246	396
Colorado Superior (aguas arriba arroyo Yacarecito)	1954	986 778	3 799	260
	1974	1 005 231	2 979	337
	1987	773 402	2 193	353
	1993	177 389	624	284
	2000	92 960	343	271
Colorado Inferior (aguas abajo arroyo Yacarecito)	1954	553 375	1 687	328
	1974	534 504	1 666	321
	1987	577 151	1 582	362
	1993	590 388	1 619	365
	2000	596 287	1 575	379
Arroyo Leyes	1954	477 239	3 574	134
	1974	531 928	3 603	148
	1987	701 526	3 577	196
	1993	739 412	3 489	212
	2000	762 218	3 392	225
Arroyo Chipá	1954	20 625	292	71
	1974	19 583	292	67
	1987	28 934	292	99
	1993	36 643	292	125
	2000	35 508	292	122

Para la evaluación de la sedimentología del lecho se realizaron dos campañas en abril de 2002, donde se extrajeron muestras de los cauces investigados con un captador de sedimentos tipo cono de arrastre lastrado. En laboratorio se emplearon las técnicas habituales a fin de obtener la granulometría de las muestras (Fig. 5).

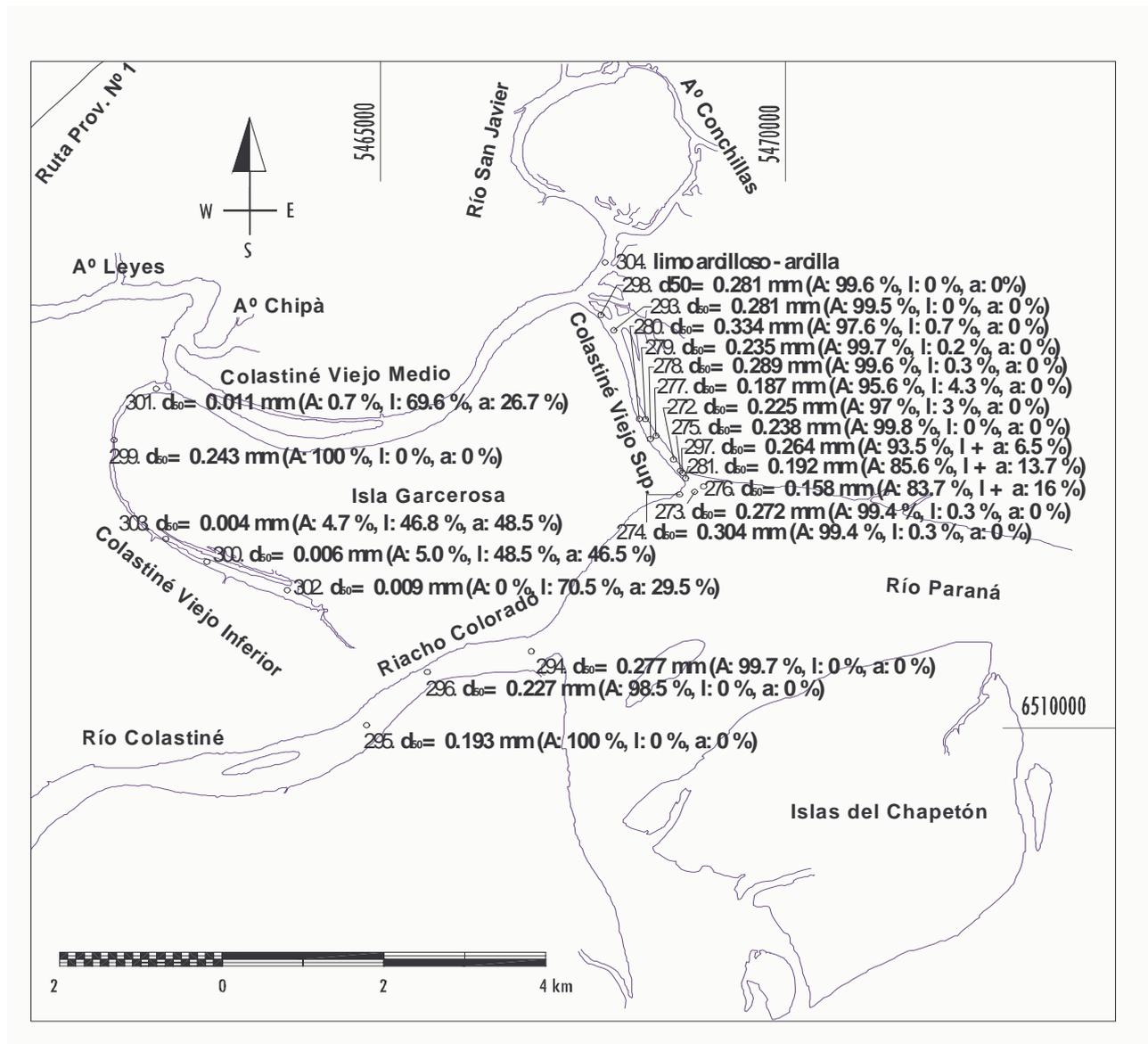


Figura 5.- Granulometría de sedimentos del lecho; se indica: número de muestra, tamaño del decil 50, porcentajes de arena (A), limo (I) y arcilla (a). Fechas de muestreo: 19 de febrero de 2002 (muestras 293 a 304) y 14 de abril de 2002 (muestras 272 a 281).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Río Colastiné.

El sector del río Colastiné entre su embocadura en el río Paraná y el extremo del Colastiné Viejo Inferior (Fig. 2), constituye el tramo de cauce que ha experimentado los cambios más notables en el área durante el período investigado.

Esas alteraciones morfológicas se describen a continuación, particularizadas para cada uno de los subtramos en que se ha dividido el gran meandro compuesto que describía ese curso al comienzo del siglo pasado, entre los dos puntos señalados (Fig. 6). Al mismo tiempo se discuten a nivel semicuantitativo los procesos que habrían originado las variaciones, y las

consecuencias que implicaron para el resto de los principales cauces fluviales de este sector del sistema.

Riacho Colorado.

La jerarquización de este curso constituyó uno de los hechos claves que condicionó todo el desarrollo posterior del complejo hidrográfico.

Su embocadura es registrada por primera vez hacia 1936. Aparece como curso propiamente dicho en cartografía de 1939, y ya en 1943 presenta un ancho idéntico al Colastiné Viejo Superior (Fig. 6). A partir de esa fecha, el Colorado se jerarquiza continuamente, tal como se demuestra en la cartografía comparativa de márgenes desde 1963 al presente (Fig. 7). Se han cuantificado incrementos de ancho medio de entre 20 m en su tramo superior hasta 50 m en su tramo inferior, a lo largo de este proceso.

A partir de principios de la década del '70, el Colorado adquiere un ancho equivalente al del Colastiné aguas abajo de la desembocadura del Colastiné Viejo Inferior (Fig. 8, Tablas 3 y 4). Estimaciones realizadas por FICH-CRL (1994) indicarían que en esa época el Colorado ya transportaba el 87% del caudal total del Colastiné.

La geometría en planta y uniformidad de granulometría del material del lecho actuales revelan que el proceso se ha completado, y la embocadura del Colorado en el río Paraná es, en realidad, la del Colastiné en su traza actual (Figs. 9 y 5).

Río Colastiné Viejo Superior.

Apenas iniciado el proceso de desactivación del meandro compuesto debido a la jerarquización del riacho Colorado, este tramo del Colastiné Viejo comenzó a perder capacidad de conducción con cambios morfológicos que se evidenciaron en reducciones del ancho medio en planta entre 1913 y principio de los '70, y en menor medida de las profundidades (Tablas 3 y 4; Fig. 6).

Entre los años 1970 y 2000 el ancho medio en planta entre márgenes varió entre los 160 y 124 m aproximadamente para condición de aguas medias. Ello sería indicador de que el proceso de desactivación del Colastiné Viejo Superior se habría desacelerado en las últimas décadas del siglo pasado; los mínimos anchos se registraron durante los últimos 10 años. El tramo ha mantenido en esta última condición una cierta capacidad de transporte de sus caudales líquidos y sólidos, evidenciada en la conformación arenosa del lecho a lo largo de todo el tramo, con tamaños medios levemente inferiores a los sedimentos del Paraná en su cauce principal (Fig. 5).

Los caudales de desborde que ingresan están en el orden de los 500 m³/s, con velocidades medias en la sección de aproximadamente 0,6 m/s, tres veces superiores que las máximas admisibles para permitir la depositación de las fracciones finas en suspensión (limos y arcillas) presentes en las aguas del Paraná (Mangini y otros, 2003).

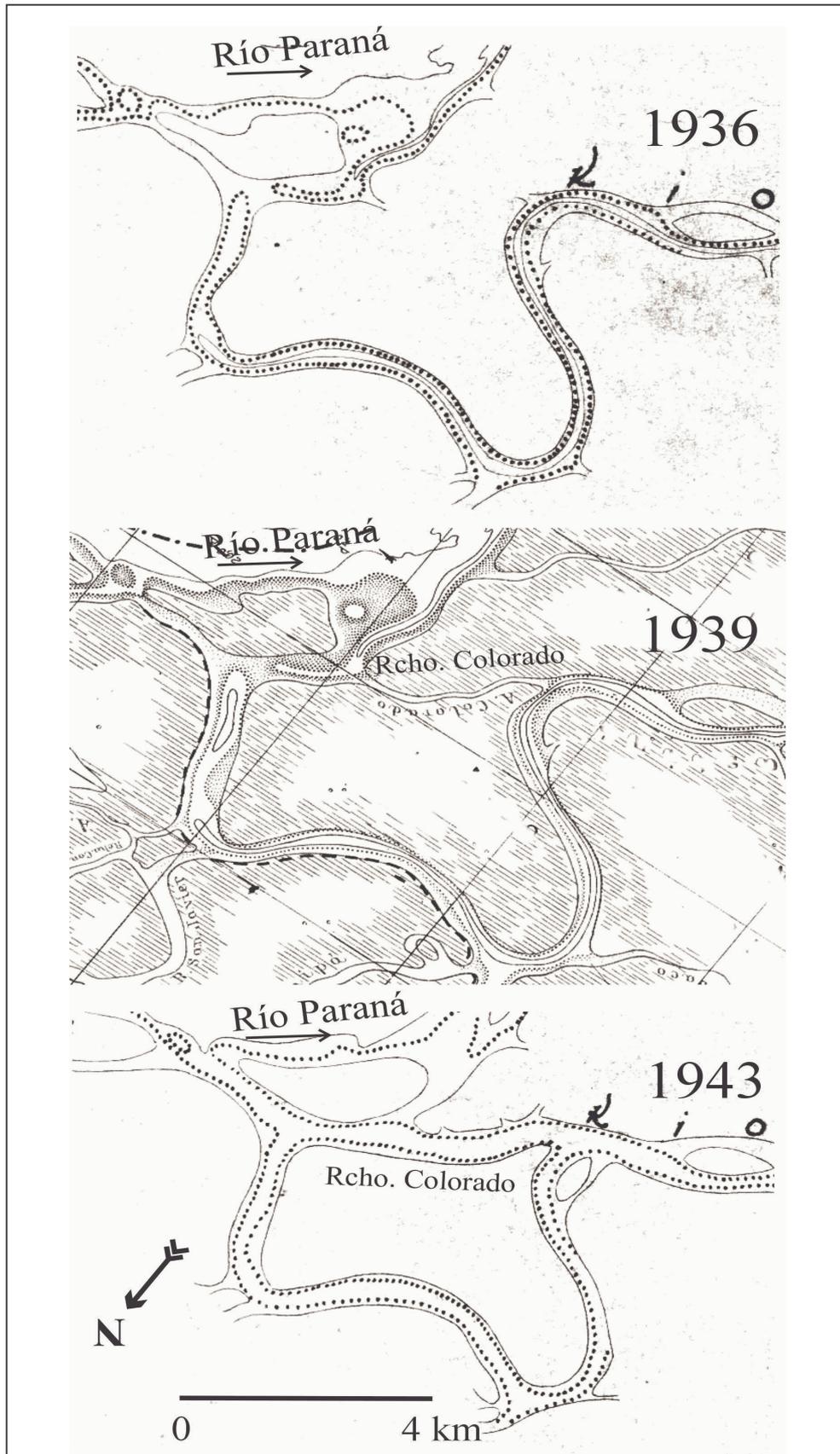


Figura 6.- Primeros registros del riacho Colorado en el siglo XX (las trazas de puntos corresponden al nivel de 0 m interpolado entre los hidrómetros más cercanos). Nótese la sedimentación sobre margen derecha del río Paraná obstruyendo la embocadura del río Colastiné y la progresiva rectificación de su tramo superior. Fuente: planos de la DNVN (ver Tabla 1).

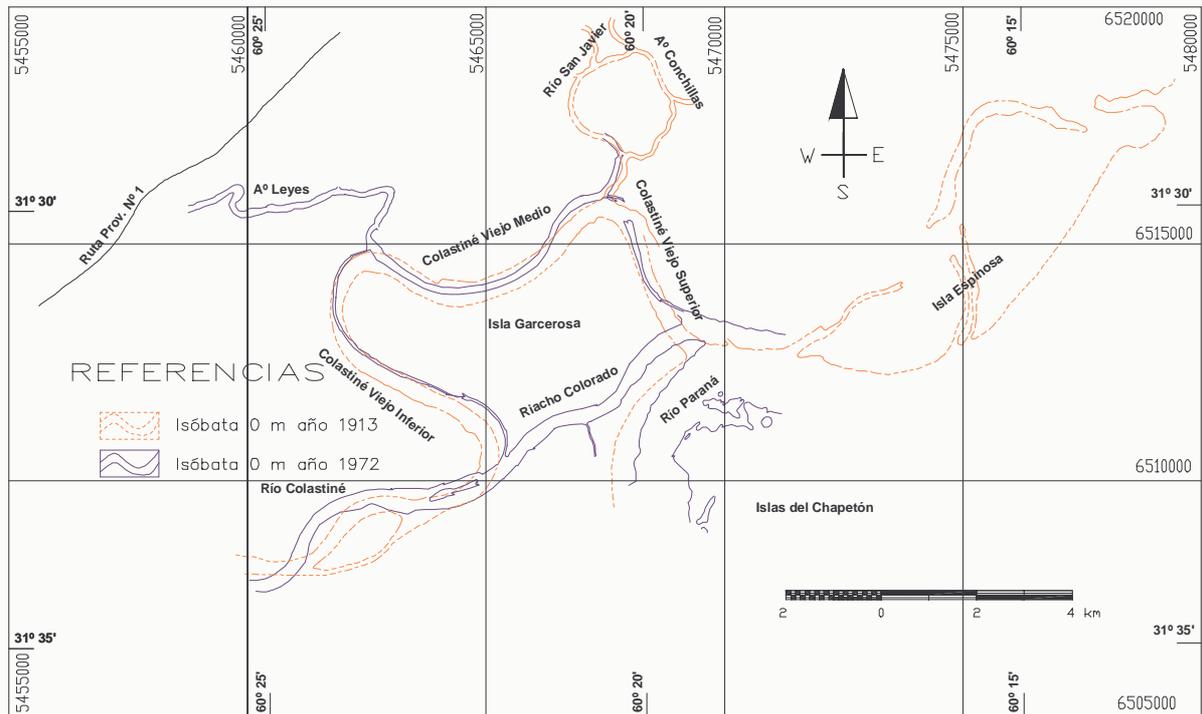


Figura 7.- Comparativo posición de isóbatas de 0 m años 1913 – 1972 (base de mapeo: carta de navegación y relevamientos batimétricos general y de detalle de la DNVN).

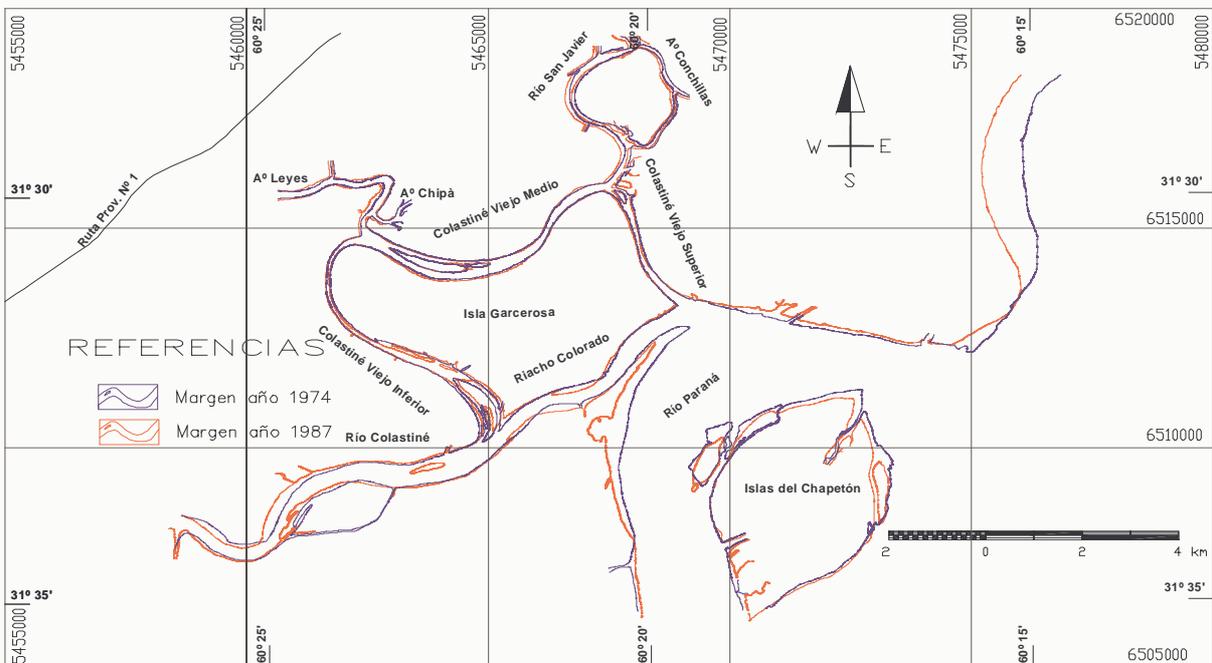


Figura 8.- Comparativo posición de márgenes años 1974 - 1987

(base de mapeo: fotos aéreas escalas 1:10 000 a 1:25 000;
 $Hh_{SF(1974)} = 2,50$ m; $Hh_{PP(1974)} = 2,10$ m; $Hh_{SF(1987)} = 4,27$ m; $Hh_{PP(1987)} = 3,66$ m).

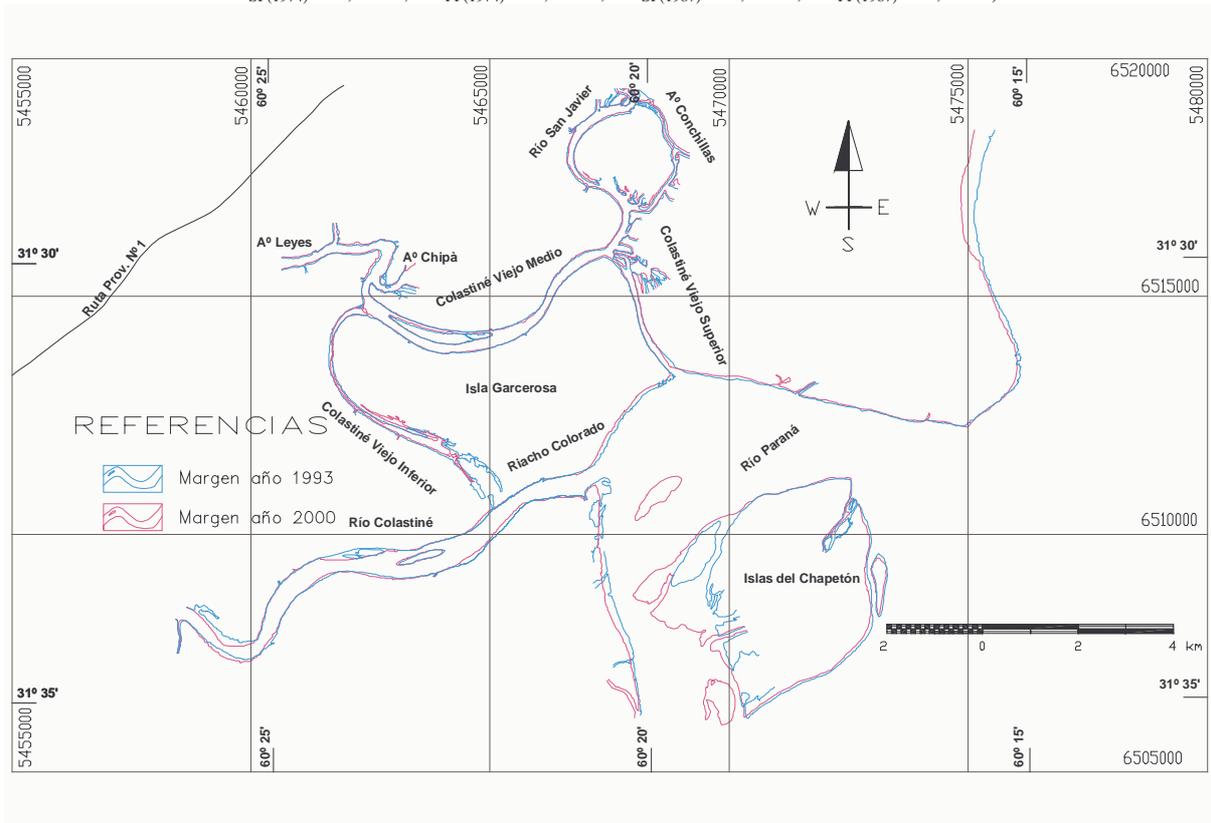


Figura 9.- Comparativo posición de márgenes años 1993 - 2000
 (base de mapeo: imágenes Spot y LadSat7, banda 8;
 $Hh_{SF(1993)} = 3,85$ m; $Hh_{PP(1993)} = 3,38$ m; $Hh_{SF(2000)} = 3,08$ m; $Hh_{PP(2000)} = 2,70$ m).

Colastiné Viejo Medio.

Experimentó una evolución similar a la del Colastiné Viejo Superior, con una desactivación progresiva desde la aparición del riacho Colorado y hasta 1970. Esto se tradujo en las reducciones del ancho medio en planta, que para los años '70 era aproximadamente la mitad del que poseía en 1913 (Tablas 3 y 4).

Nuevamente, desde comienzos de la década del '70 a la actualidad las dimensiones de este tramo mantuvieron una relativa estabilidad, con variaciones de un 30% de los anchos medios. Estos son mayores a los del tramo superior del Colastiné Viejo debido a los aportes del río San Javier y su llanura aluvial en condiciones de desborde.

Si bien no se dispone de muestras de sedimentos del fondo de este tramo, el comportamiento sedimentológico del río San Javier (que se describe más adelante), permite inferir que el lecho del Colastiné Viejo Medio estaría constituido por arenas de diámetros levemente inferiores a las que se encuentran en el tramo Superior.

Colastiné Viejo Inferior.

Este sector del Colastiné Viejo, aguas abajo de la embocadura del arroyo Leyes, es el que sufrió las mayores alteraciones morfológicas luego de la aparición del Colorado, que lo llevaron a una desactivación casi total en la actualidad.

En este proceso se destacan como hechos característicos de su colmatación, la aparición de un banco de arena a 900 m aguas abajo de su embocadura desde el Colastiné Viejo Medio, y el cegamiento de su confluencia con el Colastiné.

En 1987, en el análisis de imágenes aéreas de Fig. 10 en condición de aguas altas (4,27 m H_{hSF}) aparecen en la llanura aluvial depósitos de arena a ambos lados de este curso y a la altura del banco, atribuibles a la gran creciente de 1982-83. En la imagen de 1993 ya emerge de superficie el banco, aún en condición de aguas medias, y la desembocadura del tramo aparece totalmente cerrada (Fig. 9). La formación del banco, entonces, puede haber comenzado con la creciente de 1982-83, al producirse desbordes sobre ambas márgenes simultáneamente con una aceleración del cierre en la desembocadura por efecto de remanso del Colorado (ya para ese entonces definido como embocadura de la actual traza del Colastiné).

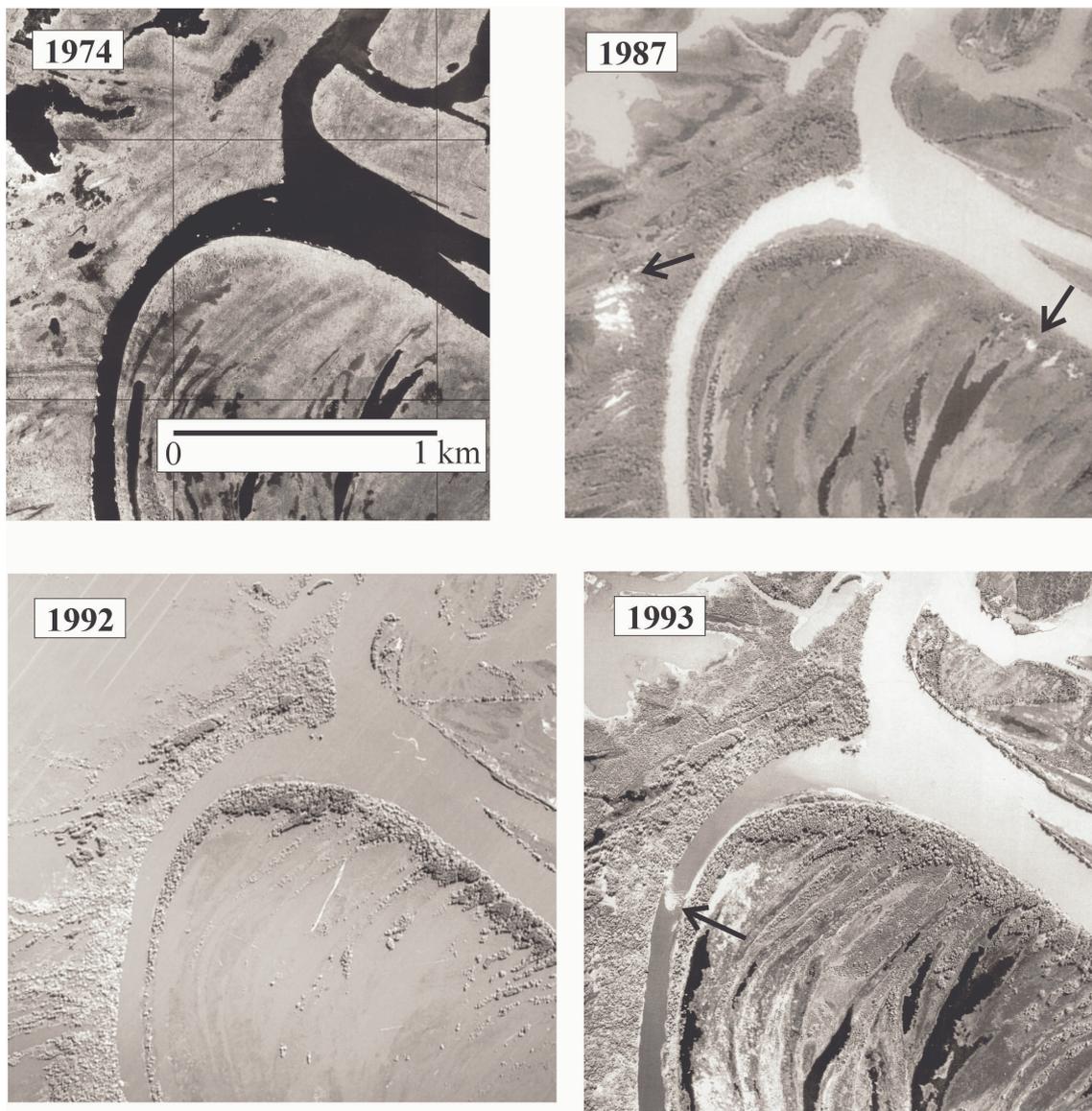


Figura 10.- Embocadura del Colastiné Viejo Inferior. Nótese el banco de arena emergiendo en el registro de 1993.

En la foto de 1987 las flechas indican los derrames de arena producidos por la creciente de 1982/83. Para niveles hidrométricos ver Tabla 2.

La granulometría del material del lecho brinda otro elemento para explicar este proceso de cierre, con presencia de limos finos en la embocadura del tramo, arenas constituyendo el banco y luego, aguas abajo de aquel, sedimentos típicos de ambientes lagunares de la llanura de inundación del Paraná (Fig. 5). En estos ambientes, de muy baja energía, las bajas velocidades y los largos tiempos de permanencia del agua posteriores a las crecientes favorecen la sedimentación de la carga de lavado (limo y arcilla). Nótese, en este sentido, que cerca de la antigua desembocadura del Colastiné Viejo Inferior los d_{50} corresponden a limos muy finos con porcentajes de arena que van del 5 al 0%.

En Tablas 3 y 4 y Figs. 7, 8 y 9 se puede apreciar cuantitativa y cualitativamente todo el proceso descrito de desactivación de este subtramo del viejo Colastiné.

El río San Javier en su desembocadura.

En FICH-CRL (1994) se informa acerca del incremento de una sección transversal del río San Javier próxima a su desembocadura de alrededor de un 30%, sucedido entre 1971 y 1989, atribuible a la creciente extraordinaria de 1982-83. Ese aumento del área de escurrimiento se debe, fundamentalmente, al agrandamiento de los anchos de la sección, que va de los originales 110 m a 140 m para el nivel de desborde.

Consecuentemente con esto, y de la aplicación de la expresión clásica de geometría hidráulica (que expresa el ancho de la sección como una función potencial del caudal elevado a la 0,5) con caudales del San Javier obtenidos de LHA (1974), se obtiene que la capacidad de conducción de este curso habría aumentado alrededor de un 60% a partir del evento de 1982-83, para niveles de desborde (de 850 a 1350 m³/s).

Respecto a la composición del material constitutivo del lecho del San Javier en el tramo cercano a su desembocadura, muestras tomadas en ese sitio evidencian que el fondo es compacto y está constituido por limos y arcillas, con ausencia total de arena (Fig. 5). Ya en LHA (1974) se informaban valores promedio de d_{50} en dos verticales de muestreo de material de fondo con medianas de 0,037 mm y 0,004 mm, respectivamente.

Estas características revelan que el lecho del río San Javier en este sector estaría constituido por sedimentos cohesivos, compactos y resistentes a la erosión. Coherente con ello, la descripción del subsuelo efectuada para la zona indica la presencia de un manto de sedimentos cohesivos con espesores que van de los 11 a los 16 m (Ramonell y otros, 2000). Ambos hechos demostrarían que el cauce del San Javier estaría encajado, al menos en el tramo próximo a su desembocadura, en esa formación resistente.

La ausencia de arena en el lecho del San Javier cerca de su desembocadura, sería consecuencia de la derivación de caudales líquidos y sólidos aguas abajo de la localidad de Cayastá debido a un complejo sistema de cauces anastomosados con lagunas intercaladas, donde el río va depositando su carga de lecho a medida que progresa hacia su desembocadura. En las cercanías de aquella ciudad el cauce del San Javier es francamente arenoso, con arenas de tamaño uniforme ($\sigma_g = 1,4$ a 1,6) con $d_{50} \approx 0,250$ mm (FICH, 2003).

En conclusión, este río arriba al Colastiné Viejo (Fig. 2) con caudales de desborde actuales en el orden de los ya mencionados, y transportando sedimentos esencialmente finos, del tamaño de los limos y arcillas.

Tramo superior del arroyo Leyes.

El arroyo Leyes ha sido definido como un río meandroso, con un fondo de arenas finas y medias en prácticamente toda su longitud (FICH-CRL, 1994).

En ese antecedente se demostró que la creciente de 1982-83 tuvo un efecto decisivo en el incremento de su capacidad de conducción, debido a un aumento de su sección transversal producido por erosión general de su ancho y profundidades. Estas últimas se recuperaron luego del pasaje de los caudales extremos, sin que sucediera lo propio con el ancho. Este proceso fue posible no sólo por la magnitud del caudal pico -similar al de otras crecientes importantes ocurridas en el siglo pasado- sino por su permanencia.

El ancho se ha mantenido hasta la actualidad, y las grandes crecientes de 1992 y 1998 habrían contribuido para ello.

En Tabla 5 se puede apreciar el incremento de los anchos medios del Leyes en un 40-50% a partir de la creciente de 1982-83 con respecto a la condición previa:

Tabla 5. Variaciones de anchos medios de los arroyos Leyes y Chipá.

Año	Fuente	Hh _{SF} (m)	Ancho medio (m)			
			Arroyo Leyes			Arroyo Chipá
			Márgenes	Isóbata 0 m	Isóbata 3 m	
1954	F	Aguas medias	134	--	--	71
1963	P	--	104	--	--	--
1972	P	0,76-3,69	161	133	104	--
1972	FICH-CRL	Cercano al desborde	137 ^(*)	--	--	--
1974	F	2,30	148	--	--	67
1987	F	4,27	196	--	--	99
1988	P	3,58-4,51	231	195	164	--
1989	FICH-CRL	Cercano al desborde	180 ^(*)	--	--	--
1993	F	3,85	212	--	--	125
1993	FICH-CRL	Cercano al desborde	235 ^(*)	--	--	--
2000	F	3,08	225	--	--	122

^(*) Promedio de 4 secciones transversales distribuidas en el tramo superior del arroyo Leyes.

P: planos de la Dirección Nacional de Vías Navegables.

F: imágenes aéreas.

La doble raya en el cuerpo de la tabla indica las situaciones previa y posterior a la crecida extraordinaria de 1983.

Nivel de desborde: 4,85 m (Hh_{SF}).

Promedio de ancho de márgenes del arroyo Leyes previo a 1983: 140 m.

Promedio de ancho de márgenes del arroyo Leyes luego de 1983: 215 m.

En la sección transversal del Leyes coincidente con el puente de la RP1, el ancho se incrementó en un 60 a 70%, con erosión en ambas márgenes. Durante la creciente de 1983 el área de escurrimiento aguas arriba de esa sección aumentó de 4 a 5 veces (Fig. 11).

En Tabla 5 también se incluyen valores de anchos medios del área de la desembocadura del arroyo Chipá en el Leyes, ubicada aproximadamente 400 m aguas abajo de la embocadura de este último (Fig. 2). El Chipá drena un sistema de lagunas y cursos menores de la llanura aluvial del río San Javier cercana a su desembocadura. El drenaje de este sector hacia el oeste actualmente, como se explica más arriba, se halla totalmente impedido por la traza de la RP1, al norte de los puentes sobre los arroyos Leyes y Potrero. De esta manera, el escurrimiento queda forzado en dirección N-S, y justifica la importancia que ha adquirido el arroyo Chipá luego de la crecida de 1982-83 en la dinámica hídrica del sistema para estados de inundación, drenando el vasto sector mencionado y descargando los caudales en el arroyo Leyes. La jerarquización del ancho medio del arroyo Chipá ha sido también de aproximadamente un 40% (ver también Figs. 7, 8 y 9).

Un proceso similar de aumento de anchos medios en planta afectó al arroyo Colorado-Potrero, principal distributario del arroyo Leyes sobre su margen izquierda, a la altura del cruce con la RP1 (Fig. 2). Su embocadura se encuentra aproximadamente 500 m aguas arriba del puente, presenta cauce único, entre recto y meandroso, y se diversifica en varias ramas en el área del delta del Leyes. Específicamente en su sección transversal coincidente con la RP1, el ancho medio se duplicó en la crecida de 1982-83 con erosiones en la margen izquierda. El cauce tampoco recuperó sus dimensiones con posterioridad a ese evento. Por el contrario, entre 1993 y 2000 se registró un nuevo incremento del ancho de alrededor del 20% aguas abajo del puente, presumiblemente por efecto de la crecida de 1998 (FICH, 2003).

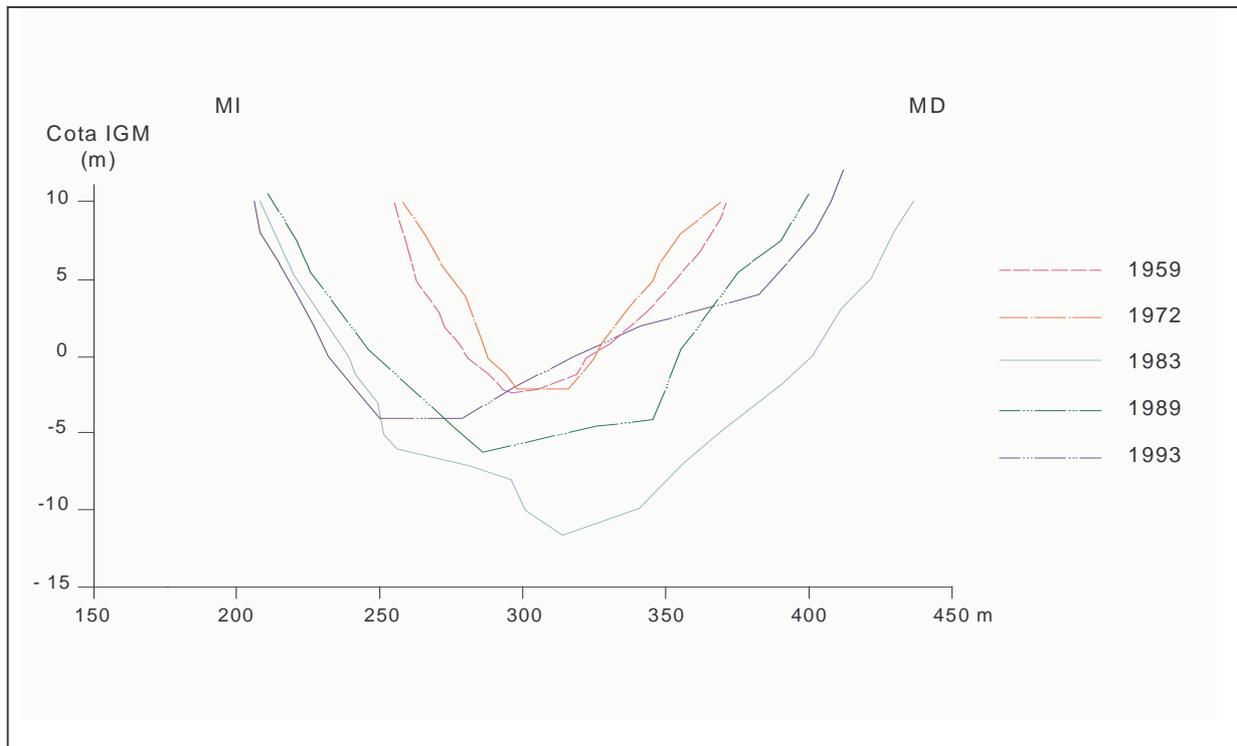


Figura 11.- Comparativo de evolución temporal de una sección transversal del arroyo Leyes ubicada aproximadamente 100 m aguas arriba del puente de la RP1.

En lo concerniente al gradiente hidráulico del arroyo Leyes, la pendiente regional mencionada del orden del decímetro por kilómetro en sentido E-O se traducía en una pendiente media de la

superficie de agua de 5-6 cm/km entre la embocadura y la laguna Leyes en la década del '70 (LHA, 1974). Esos valores eran entre un 10-30% superiores a la pendiente superficial del cauce principal y del Colastiné (ambos con dirección general N-S). Cabe señalar, asimismo, que los primeros ca. 15 km del Leyes presentaban en ese momento pendientes entre 1-3 cm/km, que se incrementaban a 8-12 cm/km en el último tramo de longitud comparable, lo cual produce los valores medios indicados.

Luego de la gran creciente de 1983 y hasta la actualidad, además de los cambios en ancho (y secciones transversales) descriptos, el curso del Leyes sufrió otras marcadas alteraciones en su morfología que involucraron rectificaciones de meandros y avulsiones (Ramonell, 2005). Ello se tradujo en una reducción de la longitud de su escurrimiento principal entre la embocadura y la laguna Setúbal de ca. 15 km. Suponiendo que los desniveles totales se mantienen similares a la situación previa a 1983, la disminución mencionada en longitud significa que el gradiente hidráulico medio del Leyes se incrementó a 8-11 cm/km, i.e. el doble de la pendiente media del río Paraná en la zona.

El resultado de los procesos anteriores implicó, a partir de aquella fecha, una importante derivación de volúmenes líquidos en dirección E-O que incrementó los caudales del arroyo Leyes para niveles altos, medios y bajos provenientes del Colastiné Viejo Superior, pero fundamentalmente del San Javier. Compárense en este sentido los caudales de desborde mencionados más arriba para ambos cursos (~500 m³/s y 1350 m³/s respectivamente). Los aumentos en la capacidad de conducción del Leyes a nivel de cauce lleno fueron del orden de 40-50% (FICH-CRL, 1994), lo cual contribuyó al fenómeno de cegamiento del Colastiné Viejo Inferior al captar progresivamente los caudales que se derivaban por este al curso del Colastiné.

Los cambios hidráulicos ocurridos en el arroyo Leyes han conducido a una modificación de su capacidad de transporte de sedimento del lecho, lo cual se ha reflejado en la evolución del gran delta interior formado en su desembocadura en el complejo lagunar Capón-Leyes-Setúbal (Fig. 1).

Este sistema de lagunas presenta una superficie de 179 km² para Hh_{SF} de 3 m, y profundidades promedio que oscilan entre los 2 m para niveles medios y 4,5 m para estados de creciente.

Pertovt y otros (2003) midieron valores de incremento de longitudes y áreas emergidas del delta, evaluadas en distintos puntos o frentes de avance. Si bien el crecimiento del delta no es homogéneo en todas las direcciones, se han registrado relaciones medias anuales de avance locales de 84 m/año para el período 1974-1997 hasta 690 m/año para 1997-2000, con incrementos de área emergida de 0,2 km²/año a 1,2 km²/año, para sendos períodos. Estos resultados preliminares indicarían una aceleración del crecimiento del delta hacia el presente, a tono con los efectos sufridos por el cauce del Leyes durante los últimos 25 años aproximadamente.

Los sedimentos depositados en el frente del delta presentan d₅₀ que van desde 0,435 mm en el propio arroyo Leyes, 4000 m aguas abajo de Zanja Brava (Fig. 1), a 0,287 y 0,334 mm, en los arroyos El Pando y Correntoso (Pertovt y otros, 2003). Compárense estos valores con los d₅₀ informados en LHA (1974) de 0,039 mm, 0,017 mm y 0,125 mm para tres verticales en la sección transversal del Leyes coincidente con el puente de la RP1. Los valores más recientes, sensiblemente mayores, indicarían que a partir de los cambios morfológicos ocurridos el Leyes

estaría transportando arenas que extrae de su propio lecho, a tasas sensiblemente mayores que ca. 30 años atrás.

Esta última observación es compatible con el comportamiento sedimentológico de los afluentes del Leyes, i.e. ausencia de arenas en el lecho en la desembocadura del río San Javier, sumada a la reducción de la capacidad de transporte inferida para el Colastiné Viejo Medio en los últimos años.

Se induce para el Leyes, en consecuencia, un progresivo encajamiento de su curso en el paquete sedimentario sobre el que escurre, conduciendo a una paulatina regularización de las pendientes a lo largo de su recorrido.

Depósitos de tamaños característicos de la fracción limo recién se encuentran en el ambiente de la laguna Setúbal, 22 km aguas abajo de Zanja Brava, con d_{50} del orden de 0,03 mm y menores (FICH, 1993; Ramonell, 2005).

Es posible alcanzar una primera apreciación cuantitativa del aumento de la capacidad de transporte de sedimentos en el arroyo Leyes, a fin de brindar un mayor sustento a las observaciones anteriores, aplicando la ecuación de Engelund-Hansen en forma comparativa, con información hidráulica previa y posterior a la crecida de 1983. Esta expresión ha sido verificada con excelentes resultados en el tramo medio del río Paraná (Amsler y Prendes, 2000; Alarcón y otros, 2003).

La comparación buscada con la ecuación de Engelund-Hansen queda referida del siguiente modo:

$$\frac{G_{s_2}}{G_{s_1}} = \frac{B_2}{B_1} \frac{U_2^2}{U_1^2} \left(\frac{h_2}{h_1} \frac{I_2}{I_1} \right)^{1,5}$$

donde:

1,2 refieren a las condiciones previa y posterior a la crecida de 1982-83.

VARIABLES como el diámetro característico de los sedimentos del lecho, gravedad específica y aceleración de la gravedad, se cancelan en la relación anterior ya que se consideran aproximadamente constantes en el tiempo.

El sector de cauce seleccionado para el cálculo es un tramo recto de geometría en planta regular del arroyo Leyes, ubicado entre 1875 y ~4000 m aguas arriba del puente de la RP1 (Fig. 1).

Los datos hidráulicos y morfométricos necesarios al nivel de desborde se obtuvieron de LHA (1974), FICH (1993 y 2003) y FICH-CRL (1994). En el siguiente cuadro se presenta la información utilizada en el cómputo y el resultado correspondiente.

Condición	B (m)	Q (m ³ /s)	Sección (m ²)	h (m)	U (m/s)	I	G _{s2} /G _{s1}
2	210	2000	2050	9,80	0,98	1,2 . 10 ⁻⁵	1,78
1	160	1300	1500	9,40	0,87	1,2 . 10 ⁻⁵	

Nótese que el Leyes a nivel de cauce lleno habría estado transportando alrededor de un 80% más de material de fondo luego de 1983. La mayor parte de ese sedimento, según lo ya explicado, lo ha estado extrayendo de su propio cauce. Adviértase, asimismo, que la pendiente utilizada en la situación posterior a 1983 es la misma que en la situación previa, la cual corresponde a la informada en LHA (1974) para los primeros ca. 15 km del curso de acuerdo a lo ya mencionado, donde se ubica el tramo de cálculo. Es decir: el incremento de la pendiente media verificado de 1983 en adelante no ha sido tenido en cuenta por carecer de información específica en la zona del cómputo. Como consecuencia de esto, el porcentaje de incremento obtenido en el transporte debería considerarse como un valor mínimo. Sobre este particular, si se supone que el coeficiente de rugosidad en la situación 1 no experimenta mayores variaciones con los cambios ocurridos, se puede establecer que el gradiente hidráulico para la situación 2 debería ser de $\sim 1,5 \cdot 10^{-5}$, con lo cual G_{s2} resulta aproximadamente 150% mayor que G_{s1} .

Influencia del caudal morfológico del río Paraná.

Ha sido demostrado que diversos rasgos morfológicos del cauce principal del Paraná en su tramo medio cambiaron durante los últimos 100 años, a tono con las variaciones de su caudal efectivo, Q_{ef} , o morfológico (Ramonell y otros, 2000; Amsler y otros, 2005).

En tal sentido se han identificado tres períodos:

- los primeros 30 años del S XX, con caudales relativamente elevados asociados a los máximos anchos y sinuosidades del thalweg de los que se tenga registro;
- un segundo período de 40 años, hasta fines de la década del '60, con caudales efectivos mínimos, durante el cual el río redujo su ancho y rectificó su thalweg, registrándose a principios de los '70 los menores anchos del cauce principal a lo largo de todo el tramo medio;
- un tercer período, desde 1970 hasta fines del S XX, caracterizado por valores elevados de Q_{ef} , mayores incluso que los del primero, que indujeron un nuevo ajuste de la morfología del cauce principal, con incrementos de anchos y sinuosidades del thalweg, aunque sin alcanzar aún en diversos sectores los valores registrados a principios de siglo, lo que ha sido interpretado como una condición de desequilibrio de la morfología del río Paraná a la nueva situación hidrosedimentológica.

Se presentan a continuación (Amsler y otros, 2005) valores de caudales efectivos del río Paraná, en dos sectores característicos del tramo medio, que permiten visualizar lo anterior:

Caudales efectivos del río Paraná durante el S XX – Tramo Villa Urquiza – Paraná

Período	Caudal efectivo (m ³ /s)
01-01-1904 a 31-12-1931	13 600
01-01-1932 a 31-12-1969	12 560
01-01-1970 a 31-12-1980	15 146
01-01-1981 a 31-12-1990	16 460
01-01-1991 a 31-12-1995	16 311

Caudales efectivos del río Paraná durante el SXX – Sección: Corrientes (km 1208)

Período	Caudal efectivo (m ³ /s)
01-01-1904 a 31-12-1920	18 489
01-01-1921 a 31-12-1931	21 550
01-01-1932 a 31-12-1969	15 424
01-01-1970 a 31-12-1980	18 315
01-01-1981 a 31-12-1990	24 467

Concretamente a la altura de la zona de estudios estas variaciones se reflejaron hacia mediados del S XX en anchos mínimos del cauce principal del Paraná (Tabla 6), debido a fuertes depositaciones sobre su margen derecha justamente a la altura de la embocadura del Colastiné, obstruyendo su boca (Figs. 6 y 7). En ese período, entre 1936 y 1943, fue cuando se verificaron los primeros registros del riacho Colorado, tal lo ya explicado, lo que a la postre permitió una rectificación en la entrada de caudales desde la margen derecha del brazo principal del Paraná hacia el Colastiné. Con ello éste ganó en eficiencia para el transporte de sus caudales líquidos y sólidos, de por sí reducidos en consonancia con las condiciones hidrológicas del período. La jerarquización (y/o aparición) del riacho Colorado se ha atribuido (Ramonell y otros, 2000) a la canalización de caudales de desborde provenientes de crecientes ocurridas durante esa época.

Tabla 6.- Evolución del ancho máximo del río Paraná en el ensanchamiento de isla Chapetón.

Año	Ancho máximo zona isla Chapetón (m ²)
1908	6 650
1913	6 700
1918	6 650
1922	6 600
1936	5 600
1943	5 700
1965	5 600
1984	6 500 / 6 900
1989	6 300 / 6 900
1994	6 600 / 7 400

La desaceleración del proceso de desactivación del Colastiné Viejo Superior y Medio a partir de 1970, sería otra consecuencia del comportamiento del Q_{ef} del Paraná. En ese momento (ver cuadros anteriores) comienza un nuevo período de valores elevados de Q_{ef} e incrementos consecuentes de anchos en el cauce principal (Tabla 6). Esto produjo mayores ingresos de caudales líquidos y sólidos a través de la embocadura del Colastiné Viejo, que detuvieron el proceso de obstrucción de los tramos superior y medio, no sucediendo lo mismo con el tramo inferior, debido a las dimensiones adquiridas por el riacho Colorado, el cual al capturar ya la mayor parte de caudales de ingreso al Colastiné, impide una reversión a la situación de principios de siglo.

A ello se añade, luego de 1983, la jerarquización del Leyes y tributarios del mismo, con la consecuente derivación de la mayor parte de los caudales líquidos y sólidos, que condujo al cegamiento definitivo del Colastiné Viejo Inferior.

Cabe destacar, por último, que en un contexto con Q_{ef} elevados del Paraná, como los de los 30 años últimos, el escalón topográfico existente en el área descripta en relación con la Fig. 3, actuaría como un factor, en este caso “estático”, que contribuye a acentuar los procesos morfo-hidráulicos mencionados. El efecto de “embalse” que ejerce para los caudales en situaciones de desborde provenientes de aguas arriba favorece, dada su dirección general E-O, la derivación de los volúmenes líquidos hacia el sistema Leyes.

CONCLUSIONES

- a) Se ha demostrado que la evolución morfológica de las embocaduras del río Colastiné y el arroyo Leyes a lo largo del S XX es el producto de factores naturales y antrópicos que han interactuado con diversa intensidad durante ese período.
- b) Los sucesos naturales intervinientes conllevan diferentes escalas temporales que, en el presente caso, se han combinado de tal modo entre sí y con la acción del hombre que originaron un escenario actual de transfluencia de caudales líquidos y sólidos crecientes desde el cauce principal del Paraná hacia los centros urbanos que conforman la ciudad de Santa Fe y zonas aledañas.
- c) La aseveración del párrafo anterior se fundamenta en lo siguiente:
 - La existencia de un escalón topográfico transversal a la planicie aluvial ubicado en la margen izquierda del Colastiné Viejo Medio, y pendientes transversales de tal planicie en el orden del doble de las longitudinales son variables producto de la evolución a largo plazo de la región, directamente relacionadas con su historia geológica.
 - En ese marco, un fenómeno a mediano plazo como implican los cambios verificados en el caudal efectivo (o morfológico) del río Paraná en el transcurso de los últimos 100 años y su incidencia en la geometría del cauce principal, promovieron en la zona de estudio la jerarquización del riacho Colorado desde la década de 1930. Ese cauce, en definitiva, terminó controlando la casi totalidad de los caudales líquidos y sólidos del río Colastiné, lo que se tradujo en el cegamiento completo del Colastiné Viejo Inferior y la desactivación parcial de los otros dos tramos que conformaban su embocadura a comienzos del S XX. La progresiva anulación del Colastiné Viejo Inferior determinó una creciente importancia del papel del escalón topográfico mencionado como derivador hacia el oeste (i.e. la embocadura del Leyes) de los caudales encauzados y de inundación provenientes del norte.
 - Los sucesivos alteos de la RP1 comenzados a principios de la década del '60, constituyeron el “factor humano” que fue transformando a esa vía de comunicación en un verdadero dique lateral que impide la transfluencia de las aguas de inundación hacia el oeste, excepto en las secciones de los puentes de los arroyos Leyes y Potrero, donde se concentra el grueso de las mismas.
 - En 1983, en un período de caudales efectivos elevados del río Paraná comenzado en 1970, se produjo la mayor creciente en magnitud y duración registrada que originó, entre otros efectos de índole morfológica, un marcado incremento del ancho del arroyo Leyes en todo su cauce y de su gradiente hidráulico medio, que se mantiene hasta el presente.

- El resultado de la conjunción de todos los hechos anteriores fue el aumento significativo de la derivación de caudales líquidos en todos los estados del río Paraná y del transporte de sedimentos hacia el complejo de lagunas a cuya vera se encuentra la ciudad de Santa Fe. De hecho la presencia de la RP1, el “impacto antrópico”, en coincidencia con el gran evento de 1983, aceleró un proceso que se venía verificando de manera natural en el sistema (Ramonell, 2005).
- d) El escenario planteado y su evolución futura, esto último de crucial importancia para la seguridad de personas y bienes en la región, requiere la profundización de estudios básicos del tipo del presentado sucintamente en este trabajo. Ello involucra contemplar debidamente la compleja dinámica del sistema, asociada fundamentalmente al funcionamiento de su llanura aluvial tanto aguas arriba como aguas abajo del nudo fluvial crítico estudiado.

Agradecimientos. Al Departamento Paraná Medio de la Dirección Nacional de Vías Navegables, que proporcionó todos los planos batimétricos esenciales para los resultados presentados.

LISTA DE SÍMBOLOS

- G_S : transporte total en la sección transversal de material de lecho (por el fondo y en suspensión).
- B : ancho medio de la sección de escurrimiento para nivel de desborde.
- U : velocidad media en la sección.
- h : tirante medio en la sección para condición de cauce lleno (de desborde); corresponde a cota 15 m I.G.M. para el caso del arroyo Leyes, en el tramo estudiado.
- I : pendiente media en el tramo considerado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alarcón, J. J.; Szupiany, R.; Montagnini, M. D.; Gaudin, H.; Prendes, H. H. y Amsler, M. L. (2003). “Evaluación del transporte de sedimentos en el tramo medio del río Paraná”, *Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos: nuevas tendencias en hidráulica de ríos*, Ezeiza, Buenos Aires, Argentina. (En CD ROM).

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

Amsler, M. L., Ramonell, C. G. y Toniolo, H. A. (2005). “Morphologic Changes in the Paraná River Channel (Argentina) in the light of the Climate Variability during the 20th Century”. *Geomorphology*, Elsevier. En prensa.

Cabral, S. (1967). “*La creciente anual 1965-66. Interpretación de sus efectos*”. Secretaría de Obras Públicas. Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables. Departamento Paraná Medio. Paraná, Argentina.

Ceirano, E. B., Paoli, C. U. y Schreider, M. I. (2000). “Las inundaciones en el área de Santa Fe. Interpretación de sus efectos y simulación de los subsistemas Leyes-Setúbal y Ruta Nacional 168-Alto Verde” (Tomo 2, Capítulo 11, p. 239-296), en: *El Río Paraná en su tramo medio. Contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura*. Centro de Publicaciones, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.

FICH (Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas) (1993). “Proyecto de reconstrucción de Av. 7 Jefes. Estudios Básicos. Hidráulica e ingeniería fluvial”. Comitente: INCOCIV S.R.L. Santa Fe, Argentina.

FICH (Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas) (2003). “Estudios morfológicos, de erosión y estabilidad de márgenes en sitios de emplazamiento de puentes y obras de protección ubicados en los arroyos Leyes y Potrero y en los ríos Salado y San Javier”. Comitente: Dirección Provincial de Vialidad, Gobierno de la Provincia de Santa Fe. Santa Fe, Argentina.

FICH-CRL (Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – Centro Regional Litoral del Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas) (1994). “Estudio geomorfológico”. En: *Estudio de prefactibilidad subsistema hídrico Leyes-Setúbal*, 3er. Informe Parcial, Convenio Consejo Federal de Inversiones-Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

LHA (Laboratorio de Hidráulica Aplicada del Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas) (1974). “Estudio del sistema fluvial Paraná – Santa Fe. Trabajos de campaña y análisis preliminar de datos”, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo SF/ARG/66/521, Volumen II, Ezeiza, Argentina.

Mangini, S.; Prendes, H. H.; Amsler, M. L. y Huespe, J. (2003). “Importancia de la floculación en la sedimentación de la carga de lavado en ambientes del río Paraná, Argentina”. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XVIII, núm. 3, p. 55-69. Julio – setiembre de 2003.

Pertovt, L. E., Ramonell C. G., Amsler, M. L. y García, M. H. (2003). “The Leyes Delta: a Major Inland Delta of the Middle Paraná Fluvial System”. *3rd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Barcelona, España, p. 1207-1216.

Ramonell, C. G., Amsler, M. L. y Toniolo, H. (2000). “Geomorfología del cauce principal” (Tomo 1, Capítulo 4, p. 173-232), en: *El Río Paraná en su tramo medio. Contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura*. Centro de Publicaciones, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.

Ramonell, C.G. (2005). “Geología y geomorfología de la laguna Setúbal y su entorno (Santa Fe, Argentina)”. Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas, T. I-II. Dpto. de Geología, Universidad Nacional de San Luis.