

Segunda  
edición  
actualizada

~

# El río Paraná

en su tramo medio

**Tomo I**

Contribución al conocimiento  
hidrológico, geomorfológico  
y sedimentológico



**Carlos Ubaldo PAOLI**  
**Mario Isaac SCHREIDER**  
Editores

Mario Luis AMSLER  
Pablo Alberto CACIK  
Ignacio Martín CRISTINA  
Norberto Oscar GARCÍA  
Ricardo Hugo GIACOSA

Rosana del Carmen HÄMMERLY  
Martín Horacio IRIONDO  
José Luis MACOR  
María Daniela MONTAGNINI  
Carlos Ubaldo PAOLI

Héctor Hugo PRENDES  
Carlos Guillermo RAMONELL  
Ricardo Nicolás SZUPIANY  
Horacio Antonio TONILO  
Ofelia Clara TUJCHNEIDER

**UNIVERSIDAD**  
**NACIONAL DEL LITORAL**





**Embarcadero Santa Fe.** Juan Sol.

MAC. Museo de Arte Contemporáneo de la Universidad Nacional del Litoral

*Brazo de la luna que bajo el sol,  
el cielo y el agua rejunta.  
Hijo de las cumbres y de la selva  
que extenso y dulce recibe el mar.*

El Paraná en una zamba (fragmento)  
**Jaime Dávalos**



El río Paraná  
en su tramo medio

*Edición especial  
50 aniversario  
Facultad de Ingeniería  
y Ciencias Hídricas*



**UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DEL LITORAL**

Rector **Enrique Mammarella**

Secretario de Planeamiento Institucional y Académico **Miguel Irigoyen**

Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas **Raúl Predaza**

.....

El río Paraná en su tramo medio: contribución al conocimiento hidrológico, geomorfológico y sedimentológico / Mario Amsler... [et al.]; editado por Carlos Ubaldo Paoli; Mario Schreider; prefacio de Víctor Pochat [et al.]; prólogo de Carlos Ubaldo Paoli; Mario Schreider –2a ed. ampliada– Santa Fe : Ediciones UNL, 2020. Libro digital, PDF – (Ciencia y tecnología)

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-749-267-5

1. Cuenca Hidrográfica. 2. Hidrología. 3. Santa Fe. I. Amsler, Mario. II. Paoli, Carlos Ubaldo, ed. III. Schreider, Mario, ed. IV. Pochat, Víctor, pref. CDD 551.483

.....

© Amsler, Cacik, Cristina, García, Giacosa, Hämmerly, Iriondo, Macor, Montagnini, Paoli, Prendes, Ramonell, Szupiany, Toniolo, Tujchneider, 2020.



© ediciones **UNL**, 2020

ISBN OC 978-987-749-266-8

ISBN Tomo I 978-987-749-267-5

ISBN Tomo II 978-987-749-268-2

Consejo Asesor

Colección Ciencia y Tecnología

**Graciela Barranco**

**Ana María Canal**

**Miguel Irigoyen**

**Luis Quevedo**

**Gustavo Ribero**

**Ivana Tosti**

Directora Ediciones UNL

**Ivana Tosti**

Coordinación editorial

**María Alejandra Sedrán**

Revisión de textos de las actualizaciones

**Mariana Romanatti**

Diagramación de interior y tapa

**Alejandro Gariglio y Nicolás Vasallo**

—

editorial@unl.edu.ar

www.unl.edu.ar/editorial



# El río Paraná en su tramo medio

Contribución al conocimiento  
hidrológico, geomorfológico  
y sedimentológico

Carlos Ubaldo Paoli  
Mario Isaac Schreider  
Editores

Mario Luis Amsler · Pablo Alberto Cacik · Ignacio  
Martín Cristina · Norberto Oscar García · Ricardo Hugo  
Giacosa · Rosana del Carmen Hämmerly · Martín Horacio  
Iriondo · José Luis Macor · María Daniela Montagnini ·  
Carlos Ubaldo Paoli · Héctor Hugo Prendes · Carlos  
Guillermo Ramonell · Ricardo Nicolás Szupiany ·  
Horacio Antonio Toniolo · Ofelia Clara Tujchneider



COLECCIÓN  
**CIENCIA Y TECNOLOGÍA**



## Índice General

### TOMO 1

- 8 **Presentación a la segunda edición**
- 11 **Prólogo a la segunda edición**
- 14 **Presentaciones a la primera edición**
- 22 **Capítulo 1. Características de las cuencas de aporte**  
Carlos Paoli, Martín Iriondo, Norberto García
- 64 **Actualización**  
José Luis Macor, Ignacio Cristina, Ofelia Tujchneider
- 81 **Capítulo 2. Conocimiento del régimen hidrológico**  
Ricardo Giacosa, Carlos Paoli, Pablo Cacik
- 116 **Actualización**  
Ricardo Giacosa, Carlos Paoli, Pablo Cacik
- 130 **Capítulo 3. Régimen de crecidas y análisis de caudales máximos**  
Carlos Paoli, Pablo Cacik
- 196 **Actualización**  
Carlos Paoli, Rosana Hämmerly, Pablo Cacik
- 210 **Capítulo 4. Geomorfología del cauce principal**  
Carlos Ramonell, Mario Amsler, Horacio Toniolo
- 270 **Capítulo 5. Transporte de sedimentos y procesos fluviales asociados**  
Mario Amsler, Héctor Prendes
- 344 **Actualización**  
Mario Amsler, Héctor Prendes, María Daniela Montagnini, Ricardo Szupiany

## **TOMO 2**

- 8 **Presentación a la segunda edición**
- 11 **Prólogo a la segunda edición**
- 14 **Presentaciones a la primera edición**
- 22 **Capítulo 6. Determinación de parámetros hidrológicos de diseño**  
Pablo Cacik, Carlos Paoli
- 55 **Actualización**  
Pablo Cacik, Carlos Paoli
- 70 **Capítulo 7. Modelos de pronóstico**  
Mario Silber, Susana Vanlesberg
- 104 **Actualización**  
Jorge Collins, José Luis Macor
- 117 **Capítulo 8. Erosión en obras de Ingeniería Fluvial**  
Mario Schreider, Graciela Scacchi, Felipe Franco
- 171 **Actualización**  
Graciela Scacchi, Marcela Reynares, Mario Schreider
- 188 **Capítulo 9. Erosión de márgenes**  
Norberto Morbidoni, Mario Amsler, Mario Schreider
- 238 **Actualización**  
Marcela Reynares, Felipe Franco, Norberto Morbidoni,  
Mario Schreider
- 249 **Capítulo 10. Aspectos hidráulicos y sedimentológicos de la hidrovía fluvial**  
Héctor Prendes, José Huespe
- 305 **Actualización**  
Héctor Prendes, José Huespe, Silvina Mangini
- 320 **Capítulo 11. 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**  
Eduardo Ceirano, Carlos Paoli, Mario Schreider
- 379 **Actualización**  
Carlos Paoli, Ricardo Giacosa, Mario Schreider

## Presentación a la segunda edición

Este año 2020 es muy especial para la comunidad de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas ya que celebramos los primeros 50 años de historia de esta Institución, cuyo origen se remonta al año 1970, cuando se creó el Departamento de Hidrología General y Aplicada de la Universidad Nacional del Litoral.

Cuando los ingenieros Carlos Paoli y Mario Schreider me propusieron realizar la reedición del libro *El río Paraná en su tramo medio* no dudé un instante en apoyar la iniciativa. Lo hice convencido del aporte científico-técnico que representa una actualización de los conocimientos sobre el río Paraná, desarrollados en las últimas 2 décadas, y por el valor simbólico de estas nuevas publicaciones en la agenda de los eventos conmemorativos del 50º aniversario de la FICH.

Desde comienzos del siglo XXI, las actividades de ciencia y técnica en la facultad tuvieron un crecimiento y una diversificación disciplinar significativos, en un contexto nacional en el que se promovió la formación e incorporación de recursos humanos calificados a las universidades nacionales, así como el desarrollo de proyectos de I+D+i. También contribuyó en este sentido el sostenimiento del programa «Curso de Acción para la Investigación y Desarrollo (CAI+D)» de la UNL, a inicios de la década del 90, a partir del cual se comenzaron a financiar proyectos de investigación en esta universidad.

En las últimas dos décadas, el Programa Hidrológico Intergubernamental de UNESCO (PHI) incorporó un enfoque holístico e integrado, poniendo el foco en el análisis de los aspectos sociales de los recursos hídricos y destacando la necesidad de mejorar su evaluación y gestión, en particular a nivel transfronterizo. Esta etapa comprendió tres fases del PHI: la Sexta (2002 a 2007) titulada «El agua, fenómeno de interacción: sistemas en peligro y problemas sociales», la Séptima (2008 a 2013), «Dependencias de los recursos hídricos: Sistemas sometidos a estrés y respuestas sociales»



y la Octava (2014 a 2021), «Seguridad hídrica: Respuestas a los desafíos locales, regionales y mundiales».

Como resultado del crecimiento de las actividades de docencia e I+D en recursos hídricos, se crearon en la FICH el Centro de Informaciones Meteorológicas (1997), el Centro de Estudios de Grandes Ríos (2001), el Centro de Estudios Hidro–Ambientales (2001), el Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático (2003) y, más recientemente, el Centro de Hidrología y Gestión del Agua (2019).

También aumentó la participación de docentes investigadores en eventos científicos nacionales e internacionales, la formación de docentes a nivel de posgrado y la obtención de financiamiento externo para proyectos de investigación, a través de la ANPCYT y de otras fuentes. Docentes investigadores de la FICH participaron activamente en importantes estudios de la Cuenca del Plata, con financiamiento internacional, como el «Proyecto de Protección Ambiental y de Desarrollo Sostenible Integrado del Sistema Acuífero Guaraní» (2003–2011) y el «Programa Marco para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Plata, en relación con los efectos hidrológicos de la variabilidad y el cambio climático» (2003–2005 y 2011–2016).

En esta etapa, el crecimiento de las actividades sustantivas en los campos de recursos hídricos y medioambiente han impulsado una fuerte proyección internacional de la FICH. La facultad es sede de la Cátedra UNESCO «Agua y educación para el desarrollo sostenible» (2013), es componente del Centro Regional de Formación de Argentina de la Organización Meteorológica Mundial para Sudamérica en Hidrología y Recursos Hídricos (2018), cuenta con un convenio de asistencia técnica con la Universidad José Eduardo Dos Santos de Angola (África) para la formación de profesionales en recursos hídricos (2014 y continúa), tiene seis convenios vigentes de doble titulación con universidades de Europa y América Latina para las carreras Ingeniería en Recursos Hídricos e Ingeniería Ambiental; participa en actividades de formación de profesionales, docentes e investigadores de distintos países de América Latina junto con organismos multilaterales de América, como el Banco Interamericano de Desarrollo y el Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (2018 y 2019), y participa activamente en distintas redes internacionales y en programas de movilidad de estudiantes y docentes.

Durante este período, también cobraron impulso las actividades de vinculación y transferencia tecnológica de la FICH con el sistema socioprodutivo, en las disciplinas recursos hídricos y medioambiente, a través de asistencias técnicas, estudios y proyectos relacionados con: obras y medidas no estructurales para el uso y control de recursos hídricos, aprovechamientos hidroeléctricos sustentables, las hidrovías Paraná, Paraguay y Uruguay,

puertos fluviales públicos y privados, conexiones viales de importancia estratégica (Santa Fe–Paraná, Santa Fe–Santo Tomé), gestión de riesgo hídrico, revisión del proyecto de Ley de Aguas de la Provincia de Santa Fe, evaluación de impactos ambientales regionales, inventario nacional de humedales, gestión de residuos sólidos y tratamiento y aprovechamiento de efluentes industriales, entre otros.

La edición original del libro, publicada por Ediciones UNL en el año 2000, tuvo una excelente repercusión en distintos ámbitos, académicos, de ciencia y técnica y de gestión. Varios avances en el conocimiento del río Paraná en su tramo medio, obtenidos de las investigaciones y transferencias realizadas en las últimas dos décadas, son incorporados en estas reediciones actualizadas de los tomos I y II y en el nuevo tomo III, previsto a publicar el próximo año. En consecuencia, cabe esperar que estas nuevas publicaciones sean tan o más exitosas que la edición original.

Deseo felicitar a los ingenieros Carlos Paoli y Mario Schreider, por su iniciativa para realizar estas nuevas publicaciones y por la rigurosa tarea desarrollada como editores.

Debo destacar también la labor de los docentes investigadores que han realizado aportes a estas nuevas publicaciones desde distintas disciplinas, para avanzar en un conocimiento integrado del río Paraná en su tramo medio.

Un agradecimiento a la Editorial de la UNL, por su excelente predisposición y trabajo profesional para plasmar, con su reconocida calidad, estas nuevas ediciones de la obra.

El avance del conocimiento es una meta que debemos perseguir indefinidamente, como lo simboliza el emblema adoptado para nuestra universidad por el Consejo Superior en 1926: un efebo en actitud de marcha, esparciendo la luz de una antorcha que levanta en alto y un lema: *Lux Indeficiens* (luz inagotable).

Estas publicaciones son nuevos hitos en la marcha del efebo, que continúa su camino y un motivo de legítimo orgullo para toda la comunidad de la FICH, en el año de nuestro 50º aniversario.

**Dr. Raúl Predaza**  
*Decano Facultad de Ingeniería  
y Ciencias Hídricas*

## **Prólogo a la segunda edición**

El último párrafo de la primera edición del libro *El río Paraná en su tramo medio* señalaba:

El desafío no termina aquí, el trabajo continúa y el día de mañana significa un nuevo paso hacia una mejor comprensión de los problemas que nos rodean y nuevas soluciones superadoras de las que hoy podemos brindar como respuesta a la comunidad. Decir esto es pensar en un próximo libro, pero no como un objetivo en sí mismo, sino como el resultado natural del trabajo cotidiano que indefectiblemente mantendrá a muchos de nosotros unidos al río para toda la vida.

Ese desafío del que hablábamos veinte años atrás hoy encuentra su respuesta. La actualización que aquí se presenta da cabal muestra del trabajo diario de los docentes e investigadores de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral en pos cumplir con la consigna arriba señalada: más y mejor conocimiento para responder a las demandas de la naturaleza y de la sociedad.

Además de los trabajos de investigación y extensión, profundizando y actualizando los temas que han sido desarrollados en el ámbito de la FICH en este último período, otras instituciones públicas y privadas se basaron en la información, los análisis y los resultados que se brindaron en la obra para realizar sus propios estudios y proyectos. En todos los casos se ha reconocido el origen y valor del antecedente y es por ello que en la actualización de algunos de los capítulos se resumen los resultados de estudios y proyectos realizados por terceros, pero en los cuales se han utilizado ampliamente los conocimientos del libro.

Estos 20 años han sido testigos de profundas transformaciones. Nuevos desafíos se presentan y los cambios a nivel global constituyen un llamado de alerta universal para alcanzar nuevos estándares para el desarrollo sostenible de los recursos hídricos. Ello en el marco de los objetivos mundiales



que comenzaron junto a la primera edición de este libro a través de los objetivos de desarrollo del milenio, y se continúan hoy con la agenda 2030.

Poder dar cumplimiento a estos objetivos exige conocer el recurso, evaluarlo a través de las modernas técnicas de medición que las nuevas tecnologías ofrecen y desentrañar aspectos de los fenómenos naturales hasta hace poco desconocidos o que eran objeto de teorías o conjeturas. Pero ese conocimiento debe tener un fin virtuoso. Esto se vincula con un nuevo enfoque en las intervenciones humanas que —al tiempo que brindan respuestas a las demandas sociales— deben asegurar el sostenimiento de los servicios ecosistémicos que el medio natural brinda.

Es en el marco de estas ideas que se ha diseñado la nueva edición del libro que se habrá de llevar a cabo en dos etapas.

La que presentamos aquí incluye actualizaciones de los capítulos de la edición anterior. En todos los casos tales actualizaciones resultan temáticamente coherentes con los contenidos del capítulo original y representan un avance en el conocimiento del tema, ya sea a partir del desarrollo de nuevos conceptos sobre la misma temática o la actualización debido a la incorporación de nueva información generada en el último período.

La incorporación de un nuevo tomo a presentarse en el año 2021 habrá de contener temáticas novedosas que resultan de los procesos de cambio y de la evolución tecnológica a los que hicimos referencia y que constituyen aspectos no abordados en la edición anterior. Se habrá de lograr así una diversidad disciplinaria y un enfoque transversal e integrador acorde a los nuevos paradigmas para la gestión sostenible de los recursos hídricos. Asimismo, en esta segunda edición ampliada uno de los temas centrales tratados es el de las crecidas e inundaciones, mientras que en el nuevo tomo se presentará un pormenorizado análisis de las situaciones de bajante del río que ha asolado a la región litoral durante el año 2020.

De este modo, la nueva edición de la obra reúne el conocimiento adquirido por la FICH durante estas últimas dos décadas acerca de un ámbito geográfico tan propio e identitario de la Universidad Nacional del Litoral y de la región toda, como es el río Paraná en su tramo medio. Conocimientos que la facultad ha construido a través de sus diversas investigaciones y servicios tecnológicos. Para ello se ha recurrido a los resultados de los numerosos proyectos de investigación que trabajan en el tema, como también a relevantes estudios técnicos que a lo largo de este siglo han permitido entender y dar respuesta a problemas complejos cuyas soluciones fueron demandados por diferentes sectores y actores de la sociedad.

Se ha conformado de este modo una valiosa base de información que esta nueva edición del libro pretende compilar y sistematizar. Se ofrece así al conjunto de la comunidad técnica y académica una herramienta de conocimiento completa y accesible que aborda la complejidad del río Paraná en su tramo

medio desde las múltiples miradas que lo describen y analizan. Al igual que la anterior, esta nueva edición pretende llegar a un público que, aunque de perfil técnico, posea un grado de generalidad mayor que el de los especialistas que habitualmente comparten los resultados de nuestros trabajos.

Por todo ello, esta edición tiene como objetivo final actualizar el conocimiento disponible sobre las mismas temáticas señaladas en los diferentes capítulos de los tomo 1 y 2 *El río Paraná en su tramo medio* con el fin de llevar el resultado del trabajo hecho por los docentes e investigadores de la FICH en estos últimos 20 años a la consideración del conjunto de la comunidad interesada en estas temáticas.

Queremos destacar la cooperación recibida de los autores de todas las actualizaciones. A dos décadas del primer libro, los autores de este, en algunos capítulos, pueden ser los mismos que los originales, pero en otros ese listado ha sido ampliado o modificado tanto por razones cronológicas, como por el tenor de las actualizaciones y los protagonistas que las llevaron a cabo.

Deseamos expresar nuestro agradecimiento y el de los autores de las actualizaciones a todos los que han ayudado a hacer realidad esta idea. Al Ing. Cristóbal Lozeco y su equipo de la Secretaría de Extensión y Vinculación Tecnológica de la FICH, quien asistió en toda la logística necesaria para el desarrollo del trabajo, más aún en estas particulares condiciones que la pandemia del COVID 19 impuso. A la Lic. Mariana Romanatti, quien tuvo a su cargo la revisión de estilo de las actualizaciones de todos los capítulos, permitiendo agilizar el trabajo y hacerlo más eficiente. A Ediciones UNL, a su directora, Lic. Ivana Tosti, a María Alejandra Sedrán, a los diseñadores Nicolás Vasallo y Alejandro Gariglio, quienes no solo acompañaron la idea desde su mismo origen, sino que hicieron aportes muy valiosos para que esta edición sea hoy una realidad. Al decano de la FICH, Dr. Raúl Pedraza, y todo su equipo de gestión, por el decidido apoyo a esta iniciativa desde el mismo momento en que se lo propusimos, facilitándonos los medios a su alcance para concretarla.

Al igual que en el último párrafo del prólogo de la primera edición, cabe decir aquí que esto no es más que un nuevo hito en un camino de crecimiento. Satisfechos con los logros alcanzados, pero ya empeñados en que el año próximo podamos sumar —a esta síntesis de conocimiento y práctica ingenieril que representa el libro *El río Paraná en su tramo medio*— nuevas temáticas resultado de un proceso de diversificación disciplinar de la FICH y producto de los nuevos desafíos que el desarrollo sostenible impone en búsqueda del equilibrio entre sociedad y naturaleza.

**Ing. Carlos Ubaldo Paoli**  
**Ing. Mario Isaac Schreider**  
*Editores*

## PRESENTACIONES A LA PRIMERA EDICIÓN

### Presentación del Señor Rector de la Universidad Nacional del Litoral

Su presencia se yergue como una prodigiosa metáfora de la vida. Desde el fondo de los tiempos su nombre evoca el devenir fecundo. Vocablos antiguos como *rivus* y *rhed*, etimológicamente, testimonian un poético reconocimiento a su existencia: “*fluir sonoro, correr haciendo ruido*”. Así, como la vida, el río fluye, y en su tránsito marca el destino de los que crecen en su entorno.

Como tantos otros, en latitudes distantes, pero con singular y portentosa dinámica, el río Paraná, desde hace siglos, vertebra el desarrollo de pueblos y culturas. Su caudaloso y ancho camino prodiga alimento, riega y calma la sed, transporta y vincula, genera energía y pinta de ocres el paisaje costero, el mismo que con peculiar recurrencia invade y modifica.

En las adyacencias de la generosa y vulnerable ribera de este gran río del sur de América, la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) ha evolucionado académica y científicamente, potenciando en las últimas décadas el estudio y reconocimiento de las bondades y riesgos que supone la presencia del río Paraná en su tramo medio.

En un tiempo en donde el conocimiento se valoriza como paradigma de época, este nuevo emprendimiento editorial de la Universidad Nacional del Litoral (UNL) perfila una contribución científica y un compromiso institucional. Por un lado, resume el aporte de quienes, durante años, han sistematizado el estudio del río Paraná como insumo necesario para el desarrollo sustentable, la preservación de ecosistemas y la armónica defensa de los espacios urbanos. Y, por otro, revela el convencimiento de avanzar sustantivamente en la generación de espacios, servicios y extensión técnica, como contribución efectiva para intervenir sobre el ambiente, a la altura de las actuales exigencias.

*EL RÍO PARANÁ EN SU TRAMO MEDIO. Contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura* es un libro que propone una compilación panorámica, gestada al amparo de décadas de crecimiento

académico y científico en la UNL. Pero más allá del legado cognitivo e instrumental que supone, es un texto que marca un rumbo, un camino institucional, llamado a fluir y evolucionar como el mismo curso de agua que ha movilizad las investigaciones que esta Casa de Estudios presenta con justificado orgullo.

Como Ingeniero en Recursos Hídricos, mi reconocimiento a los colegas de la FICH que han llevado a cabo las investigaciones que reseña el libro; como Rector de la Universidad Nacional del Litoral, mi compromiso y apoyo, para que las investigaciones sobre el río Paraná obren como un limo académico a partir del cual podamos sustentar el desarrollo que, como región y país, nos debemos.

**Ing. Mario BARLETTA**

## **Presentación del Señor Subsecretario de Recursos Hídricos de la Nación**

El conocimiento de nuestros ríos, la evaluación de sus potencialidades para diversos usos y, por otra parte, la determinación de sus efectos nocivos en ciertas circunstancias, llevaron a nuestros antepasados a explorarlos concienzudamente, superando las limitaciones asociadas con las grandes distancias y los peligros de una naturaleza poco conocida.

A las primeras crónicas de la época de la conquista, reveladoras del impacto que produjeron la extensión de nuestro territorio y la magnitud de nuestros recursos naturales sobre los primeros colonizadores, siguieron, ya en la época de nuestra organización nacional de fines del siglo XIX y primeras décadas del XX, las minuciosamente detalladas publicaciones que nos legaron profesionales y técnicos, pioneros que honraron a nuestras instituciones ligadas con la Meteorología, la Hidrología y la Geología, entre otras disciplinas, y con desarrollos como el riego, la energía y la navegación.

Esa valiosa costumbre de plasmar ordenadamente en el papel los resultados de las experiencias vividas y de los proyectos consiguientes, raramente fue adoptada por las generaciones que los sucedieron, perdiéndose de esta manera muchas e irrepetibles observaciones.

De ahí que resulta particularmente destacable este esfuerzo de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral, al recopilar, seleccionar, sistematizar y publicar estos volúmenes sobre *EL RIO PARANÁ EN SU TRAMO MEDIO. Contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura*, producto de alrededor de un cuarto de siglo de trabajo de sus docentes e investigadores.

El conocimiento profundo de nuestros recursos hídricos es la base insustituible para su gestión integrada hacia un desarrollo sostenible. En mi carácter de titular de la Subsecretaría de Recursos Hídricos, organismo respon-

sable a nivel nacional de impulsar esa gestión integrada, quiero expresar mi especial agrado por tan trascendente iniciativa.

Es de esperar que esta obra sirva de ejemplo a ser continuado por la misma FICH e imitado por otras instituciones, contribuyendo así al desarrollo y preservación de nuestros recursos hídricos, en la búsqueda de una mejor calidad de vida para las futuras generaciones.

**Ing. Víctor POCHAT**

## **Presentación del Decano de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas**

Desde su origen en los años '70 como Departamento de Hidrología General y Aplicada, la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), ha estado vinculada al río Paraná y al sistema socioproductivo que se desarrolla en la rica geografía de sus cursos de agua y su valle de inundación.

La ubicación de esta Unidad Académica en Santa Fe ha sido un factor decisivo en su proceso de integración al medio. En efecto, esta ciudad, ubicada a la vera del valle inundable del río Paraná, ha sufrido los efectos a veces devastadores de este gran curso de agua, pero también ha gozado de sus potencialidades. En uno y otro caso, los aportes de la FICH estuvieron siempre marcados por un compromiso con la sociedad, en un marco de respeto al medio natural.

La concepción de la carrera de Ingeniería en Recursos Hídricos, eje fundamental de la formación de recursos humanos durante más de dos décadas en la FICH, conformó un capital humano y técnico que, desde una estructura multidisciplinaria, permitió profundizar el conocimiento de los recursos naturales de la región y en particular de este coloso fluvial de América del Sur.

Muchos docentes han contribuido a este logro, pero quizás la figura del Dr. Alfonso Pujol permita resumir en su persona el esfuerzo de tantos otros que han convertido a nuestra institución en un referente obligado al hablar del río Paraná. No es casual, entonces, que se lo haya elegido para la presentación de este libro. El Dr. Pujol es un símbolo trascendente de esta Casa de Estudios, fundador de la misma y permanente propulsor del conocimiento de dicho río, tanto en sus aspectos de investigación básica, como en la resolución de problemas para los que la sociedad reclama respuestas ingenieriles concretas.

Deseo resaltar especialmente la labor de los ingenieros Carlos Paoli y Mario Schreider, quienes tuvieron a su cargo la tarea de diseñar la estructura del libro, rescatando los aspectos sobresalientes de la labor de nume-

rosos docentes a lo largo de los últimos años, en los diversos aspectos que el conocimiento del río Paraná encierra.

En particular, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todos los docentes que participaron en la redacción del libro, no sólo aquellos que figuran en la autoría de los capítulos sino también los que colaboraron en la elaboración de los trabajos de base sobre los que se sustenta el mismo. Son ellos los verdaderos artífices de esta publicación, que seguramente contribuirá a sostener en lo más alto el prestigio institucional de la FICH como generadora de conocimientos y formadora de recursos humanos altamente calificados en el tema.

Un agradecimiento especial al Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral que, con su permanente y meritoria labor, permite que los docentes de las distintas Unidades Académicas puedan hacer conocer a la sociedad el fruto de sus trabajos e investigaciones.

También deseo expresar mi reconocimiento a las instituciones que han auspiciado la edición de este libro. Se suma en ello el aporte económico necesario para materializar la obra, así como el aval a una labor académica que hoy se traduce en este material puesto a disposición de la comunidad de la región.

No quiero finalizar esta presentación sin destacar mi orgullo como Decano de la FICH por el logro obtenido; el cual, a la vez que marca el camino recorrido mostrando con satisfacción las metas alcanzadas, renueva nuestro compromiso de trabajo en pos de una mejor comprensión de la realidad que nos rodea, indispensable para brindar soluciones apropiadas a los problemas que esa misma realidad presenta día a día.

**Ing. Cristóbal LOZECO**



## Presentación académica

A comienzos de los '70, los que fuimos fundadores del entonces Departamento de Hidrología General y Aplicada de la Universidad Nacional del Litoral lo imaginamos como el futuro centro de irradiación académica en lo referente a los recursos hídricos de la Cuenca del Plata argentina. La realidad, esa conjunción de posibilidades y esfuerzos, ha resaltado algunos aspectos de ese proyecto y ha limitado otros. En lo que respecta a la investigación y la participación en la actividad profesional especializada, este libro es una rendición de cuentas al cabo de tres décadas de fecunda actividad.

No es casual el título elegido: *EL RIO PARANÁ EN SU TRAMO MEDIO. Contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura* para mostrar los frutos más logrados de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH). Por un momento, durante la gran crecida de 1982-83 sólo podíamos acceder a su sede por la delgada cinta de un terraplén asfaltado a través del “mar de agua” que inundaba el valle del *Padre de las Aguas*. ¿Qué podía prosperar en esa “ínsula académica”? el estudio de la Hidrología, la Hidráulica y Geomorfología Fluvial, la Ingeniería Fluvial y las disciplinas de la Ingeniería y las Ciencias Hídricas que intentan dar una forma más sensata a la impronta del hombre en la naturaleza. ¿Y cuál ha sido la virtud de los líderes de la Casa? Haber comprendido el desafío y trabajar en pos del desarrollo de estas temáticas.

Como podemos advertir, casi una mitad de la producción académica -sin contar la formación de profesionales- documenta las contribuciones al control, conservación y aprovechamiento del río mediante soluciones novedosas e imaginativas o el perfeccionamiento de metodologías preexistentes. Quizás por eso, los mejores aportes en investigación y desarrollo tecnológico se han originado o han acompañado las contribuciones profesionales de alta especialización, lo cual es lógico y deseable. En una fracción menor, la motivación ha sido el conocimiento científico de los fenómenos hídricos por sí mismos. Y es bueno que haya sido así, por-

que la inspiración para las tareas académicas es más genuina si se nutre de las necesidades económico-sociales del ámbito de influencia de la Universidad.

Durante el final de los '70 y en la década de los '80, construimos el Laboratorio de Hidráulica con la idea de ensayar, en modelos reducidos, los proyectos de obras hidráulicas o analizar detalladamente los fenómenos hidrodinámicos de esas obras y las modificaciones impuestas al río. También se establecieron cuencas experimentales para la observación de la Hidrología de las regiones Chaco-pampeana y Mesopotámica. Aunque el proyecto inicial de nuestro Laboratorio reflejó las tendencias profesionalistas de la Universidad Nacional de La Plata y del Laboratorio de Hidráulica Aplicada de Ezeiza, con el tiempo ha ampliado su componente de investigación científica. En contrapartida, a partir de una propuesta puramente científica en relación con las investigaciones hidrológicas, en el presente hemos fortalecido su componente aplicada.

En la década pasada, nuestra Facultad ha adoptado el criterio de desarrollo sustentable de los recursos hídricos en todos sus objetivos y actividades, lo cual se ha traducido no sólo en un enfoque distinto de las disciplinas tradicionales sino también en una oferta educacional de grado novedosa, como por ejemplo la reciente creación de la carrera de Ingeniería Ambiental.

También en la década pasada se pusieron en marcha los posgrados: Maestría y Doctorado en Ingeniería, con una de sus menciones en Recursos Hídricos. Un punto esencial de los mismos ha sido la imposición de criterios de rigurosidad científica y técnica como patrón de medida de esfuerzos y resultados. Con aquella decisión apuntalamos nuestra común voluntad de excelencia, según puede advertirse en el creciente número y calidad de las contribuciones científico-técnicas de los años recientes.

Las tres décadas de trabajo de los docentes e investigadores de la FICH han constituido la columna vertebral del conocimiento y la experiencia que se expone en este libro. Es natural, entonces, pensar en él como un texto de consulta y referencia para todos aquellos que, de uno u otro modo, encuentran en el río Paraná un ámbito de trabajo, de estudio, de esparcimiento o una pasión en sí misma.

**Dr. Alfonso PUJOL**

# 1.

## **CARACTERÍSTICAS DE LAS CUENCAS DE APORTE**

Aspectos Físicos: Carlos PAOLI,  
Aspectos Geológicos y Geomorfológicos:  
Martín IRIONDO y  
Aspectos Climatológicos: Norberto GARCÍA

# 1.



## Introducción



### **Características físicas generales de la Cuenca del Plata y de las subcuencas de los ríos Paraguay y Paraná**

Las grandes áreas de aporte

Río Paraguay

Río Paraná

Río Uruguay



### **Características geológicas y geomorfológicas**

Origen del Río Paraná

Geología de la cuenca

La llanura Chaco-pampeana

Relación con el Río Uruguay

Neotectónica

Cambios Climáticos

La Formación Ituzalngó

El tramo Paraná Medio



### **Características climatológicas de la Cuenca del Plata**

Caracterización general

Campos medios de presión y vientos

Campos medios de temperatura

Campos medios de precipitación



## Bibliografía

## Introducción

En este capítulo se pretende efectuar una síntesis de las características físicas, geológicas, geomorfológicas y climatológicas de la Cuenca del Plata y dentro de ella de la Cuenca del Río Paraná, puesto que las condiciones de funcionamiento que se presentan en el tramo medio del río, se originan en gran parte en la cuenca de aporte del tramo superior y por ello es necesario el conocimiento de las mismas para la comprensión de los fenómenos que se presentan en el tramo de interés específico del libro.

Obviamente no se pretende hacer un tratamiento exhaustivo de estas características de toda la cuenca puesto que excede los alcances del libro, razón por la cual se ha echado mano a estudios y obras antecedentes en los cuales se trata adecuadamente estas características. Uno de los trabajos tomados como referencia es el realizado por la OEA en 1969, «Cuenca del Río de la Plata, Estudio para su Planificación y Desarrollo», del cual se sintetizaron los aspectos generales.

Con mayor detalle se tratan los temas que han sido objeto de estudios e investigaciones específicas llevadas a cabo por docentes e investigadores de la FICH.

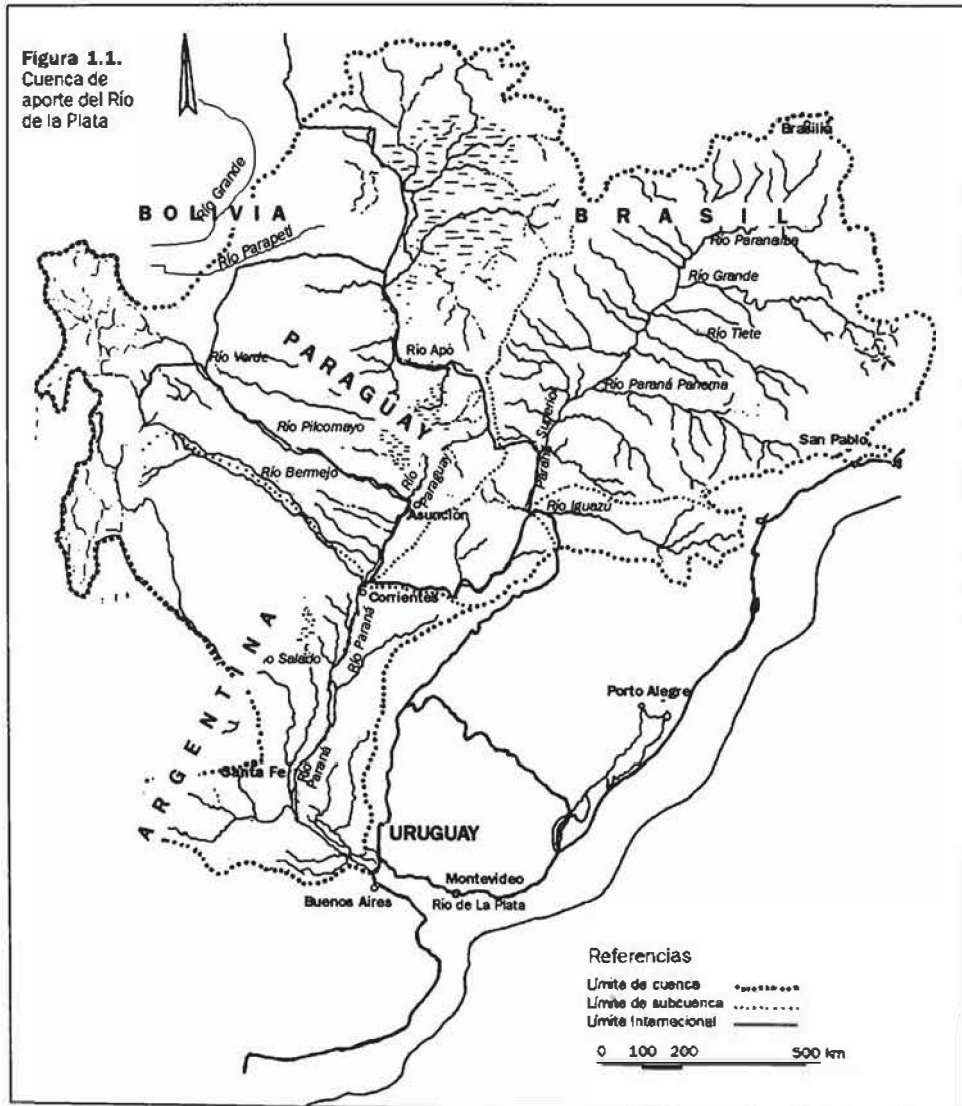
Por tal razón se tratan las características geológicas y geomorfológicas de la cuenca del río Paraná y en particular la descripción de las áreas de aporte que tienen una relación directa con el tramo medio del río. Se incluyen los conceptos más actuales sobre neotectónica y cambios climáticos que están siendo actualmente estudiados. Asimismo se describen las características geomorfológicas del tramo medio, desde Corrientes hasta el delta del río.

Para las características climatológicas se siguen los lineamientos del referido Informe de la OEA, pero el análisis de los campos de temperatura y precipitación se efectúa con las series actualizadas 1961-1990.

## Características físicas generales de la Cuenca del Plata y de las subcuencas de los ríos Paraguay, Paraná y Uruguay

### Las grandes áreas de aporte

El sistema fluvial del Río de la Plata, uno de los mayores del mundo, abarca una superficie de cerca de 3.100.000 km<sup>2</sup>, que se extiende por los territorios de la Argentina, Brasil, Bolivia, Paraguay y Uruguay. Las coordenadas extremas se ubican entre los meridianos 67° 00' y 43° 00', y los paralelos 14° 05' y 37° 37', abarcando desde el altiplano de Bolivia al Océano Atlántico.



La mayor extensión de esta gran área de aporte se encuentra en el Brasil, donde alcanza 1.415.000 km<sup>2</sup>. A la República Argentina corresponden 920.000 km<sup>2</sup>, a Paraguay, 410.000 km<sup>2</sup>, a Bolivia, 205.000 km<sup>2</sup>, y al Uruguay, 150.000 km<sup>2</sup>.

Dentro del sistema cabe diferenciar tres grandes unidades hidrográficas, el Paraguay, el Paraná y el Uruguay. Los dos últimos concurren a formar el Río de la Plata mientras que el primero tributa directamente al Paraná.

|   |                                 |
|---|---------------------------------|
| Cuenca del río Paraná                   | 1.510.000 km <sup>2</sup>       |
| Cuenca del río Paraguay                 | 1.095.000 km <sup>2</sup>       |
| Cuenca del río Uruguay                  | 365.000 km <sup>2</sup>         |
| Cuenca propia del Río de la Plata       | 130.000 km <sup>2</sup>         |
| <b>Cuenca total del Río de la Plata</b> | <b>3.100.000 km<sup>2</sup></b> |

**Cuadro 1.1.**  
Áreas de las subcuencas

### Río Paraguay

La cuenca del río Paraguay, como se indicó en el Cuadro 1.1., abarca 1.095 000 km<sup>2</sup>, de los cuales una tercera parte corresponde al Brasil, otra fracción similar al Paraguay y el resto a la Argentina y Bolivia, en porciones aproximadamente iguales.

Las nacientes septentrionales se encuentran en la Chapada de Paresís, que después de recorrer 2.550 km, desemboca en el Paraná, al norte de la ciudad argentina de Corrientes.

En su porción noroeste, en territorio boliviano, la divisoria se vuelve difusa, hasta indefinida, en los Bañados de Izozog.

Excluyendo las cabeceras de los ríos Pilcomayo y Bermejo, que descienden del altiplano boliviano con sus valles profundos y de laderas abruptas, y la parte meridional de la margen izquierda del Paraguay, comprendida entre los ríos Apa y su confluencia con el Paraná – que presenta un relieve ondulado con pendientes fluviales de cierta magnitud – el resto de la cuenca se extiende por una inmensa llanura de naturaleza aluvial, de muy escasa pendiente y con extensas planicies de inundación.

En la parte superior de la cuenca, las márgenes del Paraguay son bajas e inundables y presentan una zona de expansión denominada Pantanal, vastísimo lecho mayor que cubre cerca de 60.000 km<sup>2</sup> y que periódicamente queda cubierto por las aguas.

La pendiente del terreno en esta zona es muy reducida, al igual que la del lecho fluvial, cuyo valor medio entre el Pantanal y su confluencia con el Paraná es de cerca de 0,037 metros por kilómetro. El lecho es arenoso, poco estable, no habiendo llegado aún al estado de equilibrio y el río presenta numerosos meandros. Existen algunos trechos rocosos, pero no son muy numerosos y no afectan el carácter general del río.

En la zona siguiente, que se extiende desde la desembocadura del río Apa hasta unos 40 km aguas abajo de Asunción (Punta Itá – Perú), la zona inundable se restringe a un ancho variable de 5 a 10 km y ocupa solamente la margen derecha, siendo el terreno de la margen izquierda más alto y firme. Con el aumento de la sección transversal y de la pendiente media en este tramo, la velocidad y capacidad de descarga son mayores.

La profundidad media del río es algo menor y son frecuentes los altofondos y los mantos de piedra que cruzan el lecho del río. El límite inferior de la zona es bien marcado por el cambio brusco en la profundidad del cauce, el cual determina una quebradura acentuada del perfil longitudinal. Desde este límite hasta el río Paraná (cerca de 300 km por el río), se extiende la zona de desembocadura. En las grandes crecidas el río se desborda sobre las dos márgenes en toda la extensión de la zona, ocupando una faja de un ancho que varía entre 10 y 15 km.

La naturaleza aluvial del terreno en las márgenes, el enorme volumen de material sólido acarreado por el río Bermejo y los remansos producidos por las aguas del Paraná, que determinan una marcada movilidad del lecho en esta zona y una extensa irregularidad del régimen fluvial, así como las transformaciones que sufre en cuanto a su variación interanual, constituyen sus características principales.

### **Río Paraná**

El Paraná es, indudablemente, el río más importante del sistema hidrográfico del Río de la Plata, debido a la magnitud de sus derrames, la extensión de su área tributaria, la longitud de su curso y por los distintos rasgos dimensionales que caracterizan una cuenca fluvial.

La superficie de la cuenca, como ya se dijo, abarca 1.510.000 km<sup>2</sup>, sin contar la de la subcuenca del río Paraguay, su afluente más importante, y que ya se trató separadamente. Esta enorme extensión se distribuye en 890.000 km<sup>2</sup> en territorio brasileño, 565.000 km<sup>2</sup> con jurisdicción argentina y 55.000 km<sup>2</sup> correspondientes a Paraguay.

Todo el Paraná superior se encuentra en Brasil, para ser luego sucesivamente límite brasileño - paraguayo, argentino - paraguayo y, finalmente, después de confluir con el río Paraguay internarse en territorio argentino hasta su desagüe en el Río de la Plata.

Su longitud, siguiendo el cauce y contando la distancia desde la confluencia con el Paranaíba y el río Grande, que le dan origen, hasta su desembocadura en el Río de la Plata, es de 2.570 Km. Pero si se le agrega el recorrido de su afluente principal, el Paranaíba, esta longitud se alarga en 1.200 km más, alcanzando un total de 3.740 km.



El Paranaíba y el río Grande limitan entre sí la zona mesopotámica conocida en el Brasil como el Triángulo Mineiro y son los ríos más importantes de toda la cuenca superior del Paraná. El primero de ellos, que alcanza las latitudes más septentrionales de la hoya, colecta los derrames de un área con más de 200.000 km<sup>2</sup>, extendida entre los paralelos 15° 30' y 20° 00'sur y posee una extensa red de tributarios que se originan en las sierras de Caipó, Santa Marta, dos Pirineus, dos Piloos, da Mata da Corda y da Cabastra.

Al nordeste del Pico de Itatiaia, perteneciente al sistema de las sierras de Mantiqueira, nace el río Grande, que luego de un recorrido de más de 1.000 km, se une al Paranaíba para formar el río Paraná.

En su extenso recorrido, recogiendo los aportes de la importante red tributaria, el curso principal del Paraná presenta algunas características dignas de destacar. En primer lugar, el rumbo NE-SO que domina todo el tramo superior hasta cortar el meridiano 56° 00' 0 se convierte decididamente en E-O hasta confluir con el río Paraguay, para tomar luego la dirección que le imprime este tributario, es decir, hacia el SO, la que sólo abandona ya próximo a su desembocadura, volcándose hacia el SE.

El rasgo más característico de la región es su delineamiento en altiplanos escalonados. Partiendo de la costa se trasponen sucesivas líneas de escarpas que representan los escalones. En el estado de Paraná este aspecto es muy nítido. De este a oeste, un primer altiplano limitado por una escarpa de falla, Serra do Mar, es seguido por el segundo planalto central (Permiano), al cual sigue un tercero, el Planalto Occidental de la Sierra Geral. En Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Goiás y Mato Grosso, las características morfológicas son sensiblemente distintas, si bien el planalto presenta la misma fisionomía general: superficies regulares, relativamente monótonas, seccionadas bruscamente por líneas de escarpas.

Otra característica del curso superior del río es el perfil escalonado del lecho, que presenta dos notorios quiebres de la pendiente en los saltos de Urubupungá y Guaira, donde el Paraná corta la Serra de Maracajú. Otras caídas menores y la presencia de rápidos caracterizan el perfil longitudinal del Alto Paraná, consecuentemente con la estructura geológica y sus accidentes tectónicos.

El lecho es de dimensiones muy irregulares: de 4.000 m en el represamiento que precede a las cataratas del Guaira a únicamente 60 m de ancho al pie de las mismas. Hasta confluir con el Paraguay su anchura fluctúa entre los 150 m y los 2.500 m frente a Posadas. Al oeste de esta ciudad argentina el río Paraná diversifica su cauce presentando una serie de islas, que determinan la formación de brazos que dividen el escurrimiento fluvial. Esta zona de diversificación cubre una extensión considerable, con unos 25 km de ancho por 100 km de largo.

Luego de unirse al Paraguay, el río desciende con muy leve pendiente, 0,036 m/km, hasta su desembocadura. Su anchura va disminuyendo desde los 4.200 m frente a Corrientes, a 2.600 m frente a Bella Vista; 2.300 m en Santa Fe, y 2.000 m en Rosario. El lecho de inundación es, sin embargo, bastante mayor y extendido casi totalmente sobre la margen derecha, mucho más baja. El ancho de esta planicie de inundación, que varía entre 13 km frente a Corrientes y 56 km en la sección Rosario-Victoria, señala la enorme extensión que puede abarcar el Paraná en sus grandes avenidas.

En este tramo medio e inferior, el cauce principal presenta numerosas islas, diseminadas a lo largo de su curso y que las aguas de crecida cubren totalmente.

El delta terminal del Paraná se inicia a 320 km de la desembocadura que, con un ancho que varía entre los 18 y 61 km, cubre un área de 14.100 km<sup>2</sup>. El avance frontal de este delta que puede estimarse entre 70 y 90 m por año, puede explicarse si se tiene en cuenta la extraordinaria cantidad de sedimentos que transporta el río, particularmente los provenientes de algunos de sus afluentes, como el Bermejo, que descarga unos 100 millones de toneladas anuales.

Por los numerosos brazos del delta, tales como el Paraná Bravo, Paraná Guazú, Barca Grande, Barca Chica, Paraná Miní y Paraná de las Palmas, se descarga al Río de la Plata el espectacular derrame de la cuenca del Paraná.

### **Río Uruguay**

El río Uruguay es el segundo sistema fluvial en importancia de la Cuenca del Plata, con un desarrollo fluvial de cerca de 1.600 km. Como los dos ríos anteriores, el Uruguay nace, también, en territorio brasileño, en la Serra Geral que toma el nombre de río Pelotas, aproximadamente a 1.800 m de altura y a 28° 10' de latitud. Las grandes altitudes de más de 1.000 m se mantienen hacia el norte y noroeste, a lo largo de toda la divisoria con los ríos Iguazú e Itajaí, hasta la altura de Clevelandia. Desde este punto hasta las nacientes de Peperi-Guaçú, donde el Uruguay pasa a ser el límite entre la Argentina y el Brasil, la divisoria se desenvuelve en altitudes que se sitúan entre 850 y 1.000 metros.

Algunos kilómetros más allá de la confluencia del Peperi-Guaçú, el río se estrecha entre paredes rocosas en el salto Grande de Misiones. En las cataratas, el río pasa de 450 a cerca de 20 m de anchura.

Los afluentes más importantes del río Uruguay, provienen del este. El Ijuí, el Ibicuí y el Quarái son ríos con cuencas relativamente pequeñas, pero de considerable caudal. El último sirve de límite entre el Brasil y el Uruguay. El mayor tributario del Uruguay es el río Negro, con cerca de 500 m de desarrollo y que desemboca en el Uruguay a menos de 100 m del estuario del Plata. Luego de la confluencia con el río Negro, el Uruguay se ensancha unos 6 a 10 m y se convierte, virtualmente, en una extensión del Río de la Plata.

## Características geológicas y geomorfológicas

### Origen del río Paraná

El río Paraná se formó en el Plioceno, alrededor de 3 a 4 millones de años atrás, y nunca dejó de correr desde entonces. Su origen se debe a los levantamientos tectónicos que formaron la Serra do Mar junto al Atlántico y la Cordillera de Los Andes (algo anterior) cerca del océano Pacífico. Estos cambios mayores en la topografía de Sudamérica aislaron a las regiones tropicales de sus niveles de base anteriores y las reunieron en un gran colector que tomó dirección norte-sur. Los controles mayores del río, y de toda la cuenca, son estructurales. El cauce está sometido a una fuerte influencia neotectónica, que es el fracturamiento ocurrido en los últimos dos millones de años.

### Geología de la cuenca

La cuenca del Paraná está compuesta por varias provincias geológicas, que influyen en diferentes grados en la hidrología y sedimentología del colector. El mapa geológico (Figura 1.2.) muestra que tanto el escudo brasileño como la cordillera de los Andes tienen áreas relativamente modestas en la cuenca. Esto sugiere que la influencia de ambas regiones geológicas no es tan importante como se ha creído tradicionalmente. La composición geológica de la cuenca del Paraná es la siguiente (Iriondo, 1992):

- Escudo Brasileño – Forma una faja irregular en el rincón noreste de la cuenca, con 7,4 % del área total. Predominan gneisses y otras rocas metamórficas. Loess tropicales cuaternarios cubren la región. El escudo es una fuente de cuarzo y caolinita para las áreas situadas aguas abajo.

- Cordillera de los Andes – El sector andino de la cuenca del Paraná está formado por las Sierras Subandinas y el altiplano boliviano, además de un sector de la Puna argentina. El área describe un rectángulo de 170.000 km<sup>2</sup> de superficie (aproximadamente 7,4 % del total) en el oeste de la cuenca. Está formada por una sucesión de montañas plegadas terciarias, con orientación norte-sur. En esta región se encuentran numerosos tipos de rocas, entre las cuales predominan lutitas, filitas y sedimentarias de grano fino. Esta región provee abundantes sedimentos finos a la red hidrográfica, principalmente limo cuarzoso e illita. Dichos sedimentos son transportados por los ríos Pilcomayo y Bermejo hacia el Paraná.

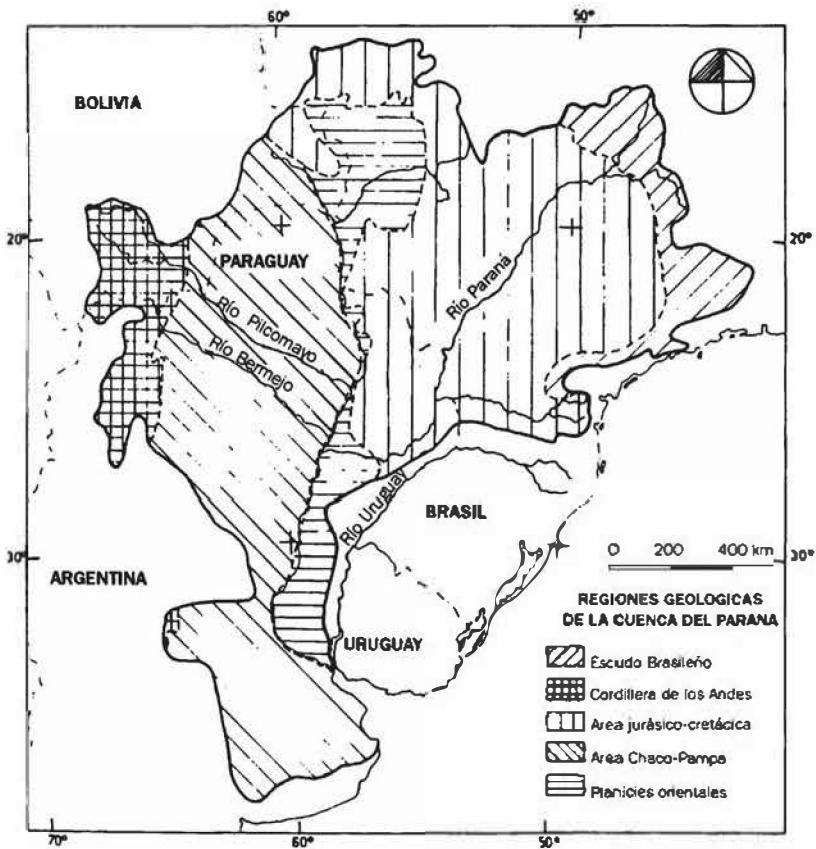
- Provincia jurásico-cretácica del Alto Paraná – Esta región abarca casi el 29 % del total de la cuenca; está formada por basaltos y areniscas silíceas eólicas y fluviales. Ambos tipos de roca forman extensiones similares en la región y están cubiertos por una delgada capa de eólicos cuaternarios en su mayor parte. Es una fuente de cuarzo y caolinita para los ríos.

- Provincia carbonífera del Alto Paraná – Se trata de rocas glaciales y periglaciales del Carbonífero superior, principalmente tillitas, areniscas y lodolitas. Estas rocas forman dos fajas bordeando el área jurásico-cretácica. Comprende 5,6 % del total de la cuenca.

- Llanura Chaco-pampeana – Es la región geológica de mayores dimensiones de la cuenca (29,8 % del área total). Está compuesta por sedimentos cuaternarios, principalmente arena fina, limo y arcilla asociada (illita). Los sedimentos se originaron en el oeste y suroeste de la región. La mayor parte de los sedimentos contiene sales solubles. La mayor contribución de la llanura Chaco-pampeana al Paraná son sales solubles acarreadas por afluentes pequeños y filtraciones de agua subterránea.

- Las planicies orientales – Las planicies orientales están formadas por dos áreas localizadas en la margen izquierda del lineamiento Paraguay-Paraná. Abarca 10,9 % del total de la cuenca. El área norte es el Pantanal del Mato Grosso, compuesto por grandes abanicos aluviales de arena cuarzosa; su colector es el río Paraguay. El área sur, conocida como

**Figura 1.2.**  
Regiones  
Geológicas  
de la Cuenca  
del Plata



“Mesopotamia”, está localizada en el noreste de Argentina. Los niveles superiores de la columna geológica están compuestos por arenas cuarzosas y arcillas montmorilloníticas. Los sedimentos que cubren ambas áreas en algunas decenas de metros son de edad cuaternaria.

Otras regiones geológicas – Un diez por ciento de la cuenca está formado por rocas y sedimentos diversos, predominantemente sedimentarias paleozoicas.

### La llanura Chaco-pampeana

La llanura Chaco-pampeana es de especial importancia desde el punto de vista hidrológico general, geográfico y económico en cualquier análisis del Paraná Medio. Su historia geológica desde que apareció el río Paraná es sumamente interesante. Forma la mayor parte de la gran Depresión Llanos-Chaco-Pampa, una cuenca geológica continental ubicada entre el cinturón móvil de la Cordillera de los Andes y las regiones estables del este de Sudamérica. La Depresión alcanza desde los 13° de latitud sur hasta los 40°S. Está geológicamente dividida en sectores menores, que coinciden en general con nombres geográficos clásicos. Dichos nombres fueron definidos empíricamente en tiempos coloniales (Pampa, Chaco) sobre la base de criterios ambientales y de vegetación. Sin embargo, esas definiciones son realmente sólidas cuando se considera la historia de los últimos diez millones de años de la región (Figura 1.3.).



Figura 1.3.  
Llanura Chaco-pampeana

 Formación Ituzaingó

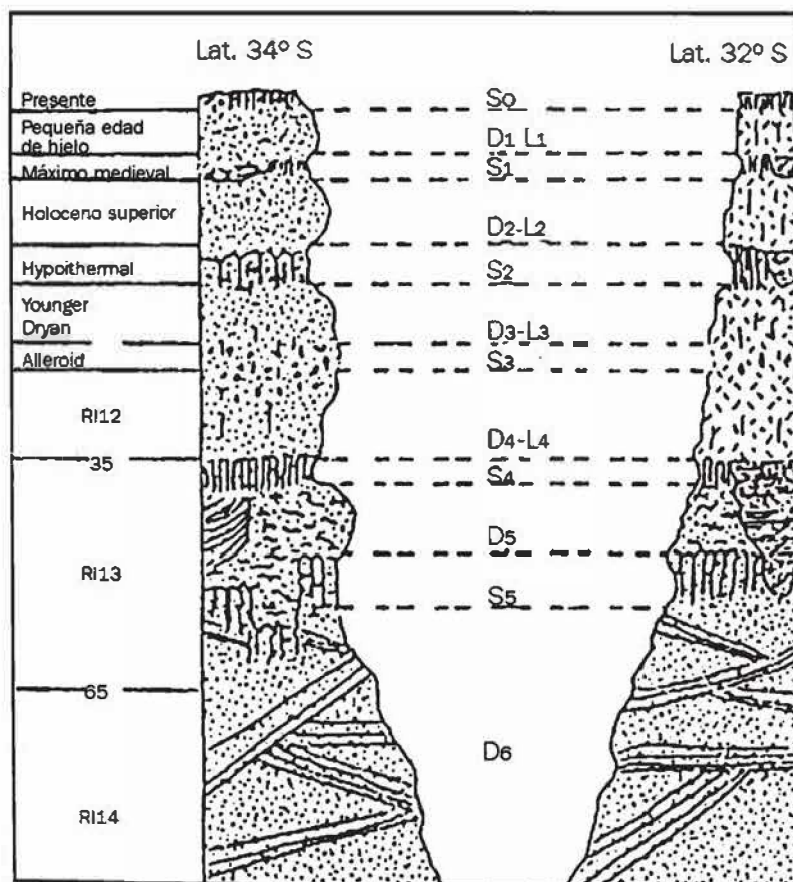
 Abanicos aluviales del oeste

La Depresión está conectada hacia el norte y el este con bloques análogos, tectónicamente hundidos, tales como el Pantanal de Mato Grosso, Ucumara en Perú y Napo-Pastaza en Ecuador.

Los sistemas sedimentarios más persistentes en la llanura son una sucesión de abanicos aluviales muy grandes y poco inclinados, originados en las montañas occidentales (Iriondo, 1984). Resulta bastante simple reconocer que esos depósitos fueron formados por los afluentes mayores actuales. Durante los intervalos áridos se depositaron campos de arena y mantos de loess en la Pampa y el Chaco mientras en las montañas ocurrían glaciaciones (Iriondo, 1999). Son frecuentes las lluvias erráticas de cenizas volcánicas en toda la llanura, que cobran importancia en el sureste pampeano, en la provincia de Buenos Aires. En el noreste de la Pampa y en el este del Chaco los sedimentos son principalmente fluviales, transportado a la región por los grandes ríos Paraná, Uruguay y Paraguay (Iriondo, 1993). En general, limo y arena fina son las fracciones sedimentarias más comunes (Figura 1.4.).

Figura 1.4.  
Columna  
estratigráfica  
típica.  
(Cuenca del río  
Carcarañá)

S: suelo  
D: arena eólica  
L: loess





Los principales afluentes del Paraná en la llanura Chaco-pampeana son los siguientes, de sur a norte:

### El río Carcarañá

Tiene sus nacientes en el sur de las Sierras Pampeanas. Está formado por la unión de los ríos Tercero y Cuarto en la llanura cordobesa, siendo el Tercero el más importante. Durante los últimos miles de años ha tenido importancia variable; su época de mayor influencia fue cuando recibía como tributario al río Dulce, durante el Pleistoceno medio. Posteriormente se hundió el bloque tectónico de Mar Chiquita y quedó aislado de la mayor parte de su cuenca (Figura 1.5.).

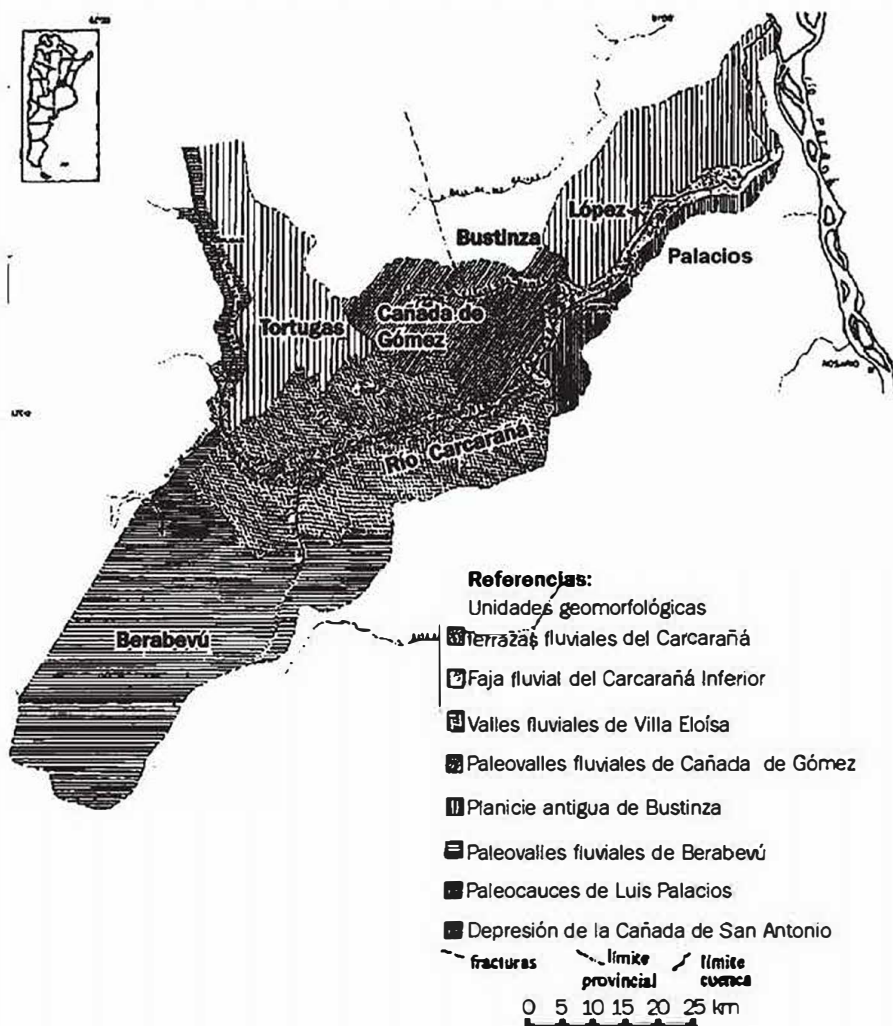
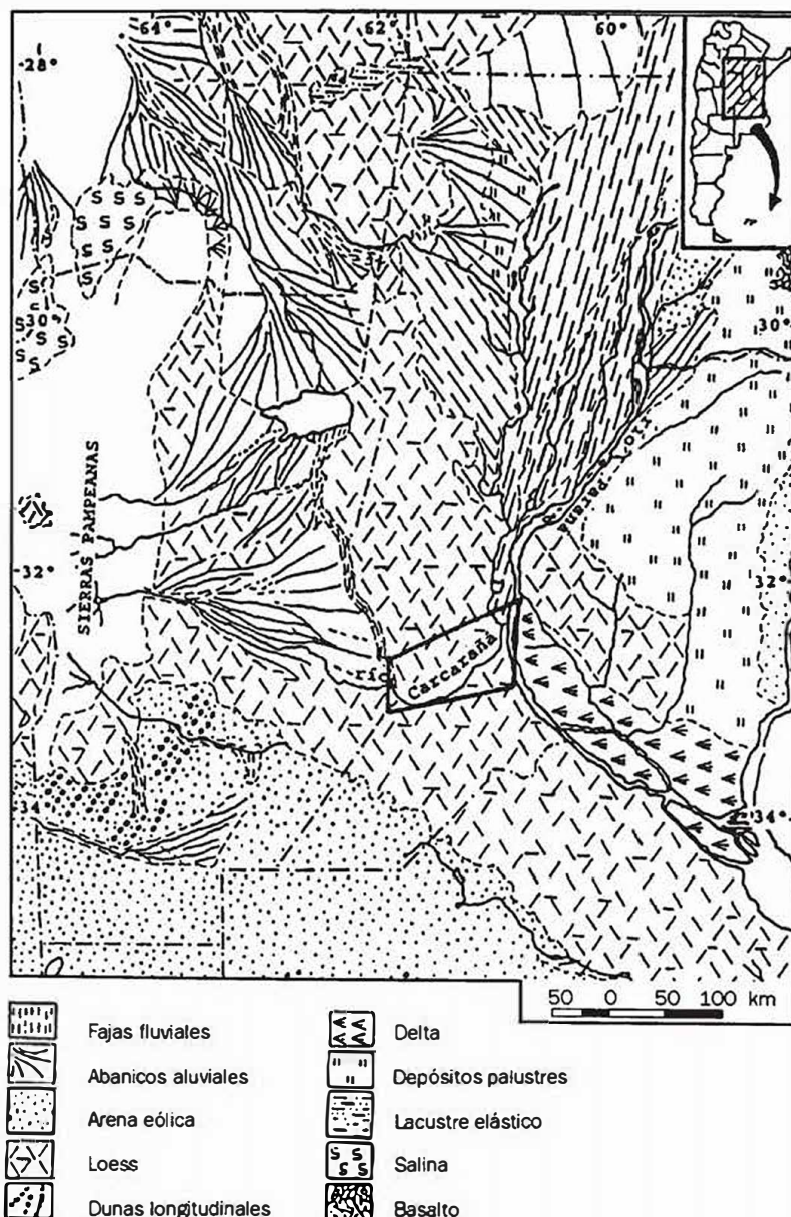


Figura 1.5. Columna estratigráfica típica. (Cuenca del río Carcarañá (Kröhlung, 1998))

La cuenca del Carcarañá se encuentra geológicamente dentro del Sistema Eólico Pampeano, caracterizado por una dinámica general de acumulación. La historia de los últimos 65.000 años es una sucesión de períodos secos con acumulación de loess y arenas eólicas, intercalados con fases húmedas con formación de suelos ((Iriondo y Kröhling, 1995; Kröhling, 1999) Figura 1.6.). Desde el punto de vista geoquímico, el río Tercero aporta agua clorurada, mientras que el río Cuarto acarrea agua sulfatada (Kröhling, 1996).

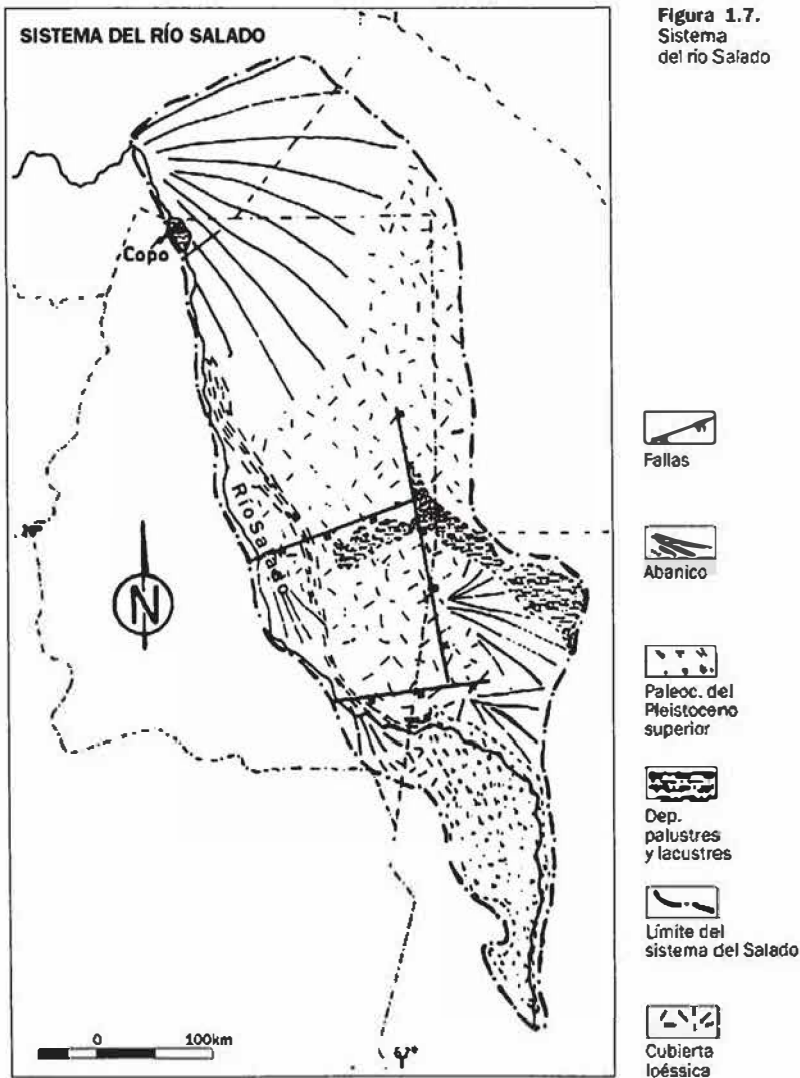
Figura 1.6.  
Mapa geológico  
de la región





### El río Salado

El Salado ha construido un sistema aluvial complejo de 650 km de largo y 150 km de ancho en su zona distal. Está compuesto por varios subsistemas menores: abanicos aluviales menores, fajas fluviales, depósitos palustres y lacustres. Los sedimentos clásticos más importantes son limo, arcillas illífticas y arena fina; entre las sales solubles dominan los cloruros. Los abanicos menores fueron desarrollados sobre bloques tectónicos hundidos durante períodos secos. El tamaño de dichos bloques es de varios miles de kilómetros cuadrados (Figura 1.7.).



El primer abanico está situado en las provincias de Salta y Chaco y se formó durante el Último Máximo Glacial; está compuesto por una serie de pequeños paleocauces bien preservados, intercalados en un loess. Cauces sucesivos de edad holocena lo cruzan en abanico. Actualmente el río cruza la región en régimen permanente, fluyendo en un cauce bien definido hasta alcanzar el Bañado de Copo en el límite Salta-Santiago del Estero. Este gran pantano, de 300 km de superficie, afecta el régimen del río en gran medida. Después de atravesar la provincia de Santiago del Estero, el Salado llega a la zona distal del abanico en Santa Fe. Esta área del abanico está caracterizada por varios paleocauces grandes, originalmente estables, formados durante una época húmeda del Pleistoceno. Los paleocauces están cubiertos por una carpeta de loess de 6 a 8 metros de espesor, aunque son todavía visibles en el campo y en fotografías aéreas. Son tortuosos, con un ancho de hasta 200 metros y transportaban arena bien seleccionada. Los paleocauces de diferentes edades y direcciones se superponen y cruzan en un patrón irregular. La arena que contienen es una reserva de agua subterránea de baja salinidad, lo que resulta un hecho significativo en esa zona con escasos recursos hídricos. El resto de la zona distal está formada por limos arcillosos de pantano que contienen un alto porcentaje de coloides. Esta región se inunda durante varios meses en los años húmedos.

### El abanico aluvial del Bermejo

El ápice del abanico aluvial del Bermejo está ubicado cerca de Embarcación, Bolivia, y se extiende hasta la faja Paraguay-Paraná, 650 kilómetros

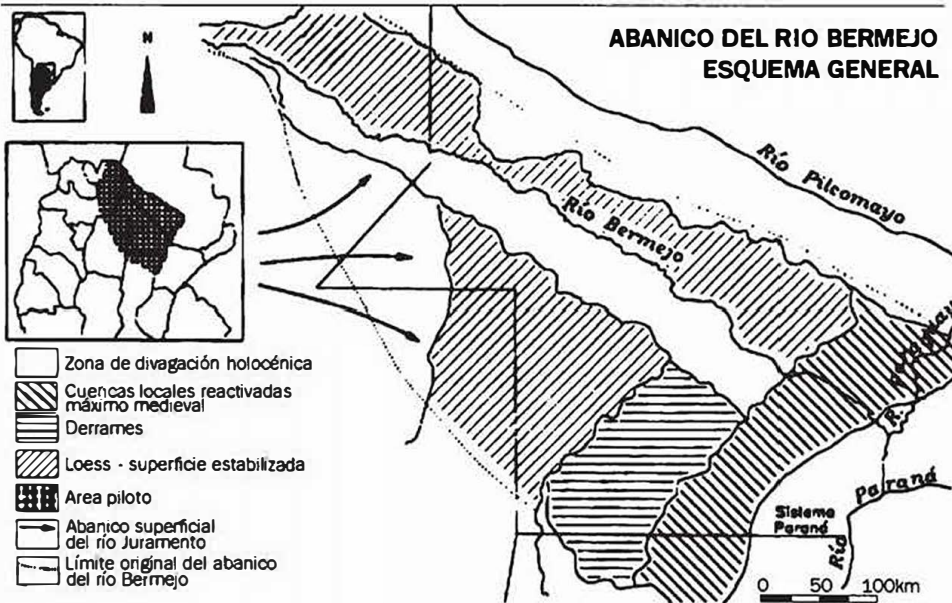


Figura 1.8. Abanico aluvial del río Bermejo

hacia el sureste. En el Chaco occidental y central se pueden observar numerosos paleocauces holocenos cruzando una planicie casi horizontal en sentido noroeste-sureste. En el sur, un gran lóbulo de derrame alcanza la provincia de Santa Fe. Más hacia el este, en la zona de Charaday, grandes pantanos (conocidos localmente como "esteros") cubren la región desde probablemente tiempos pleistocenos. Se trata de una gran depresión formada por un bloque hundido de unos 5.000 km<sup>2</sup>, donde se depositaron de 6 a 12 metros de espesor de limos arcillosos impermeables de color gris verdoso y marrón rojizo (Figura 1.8.).

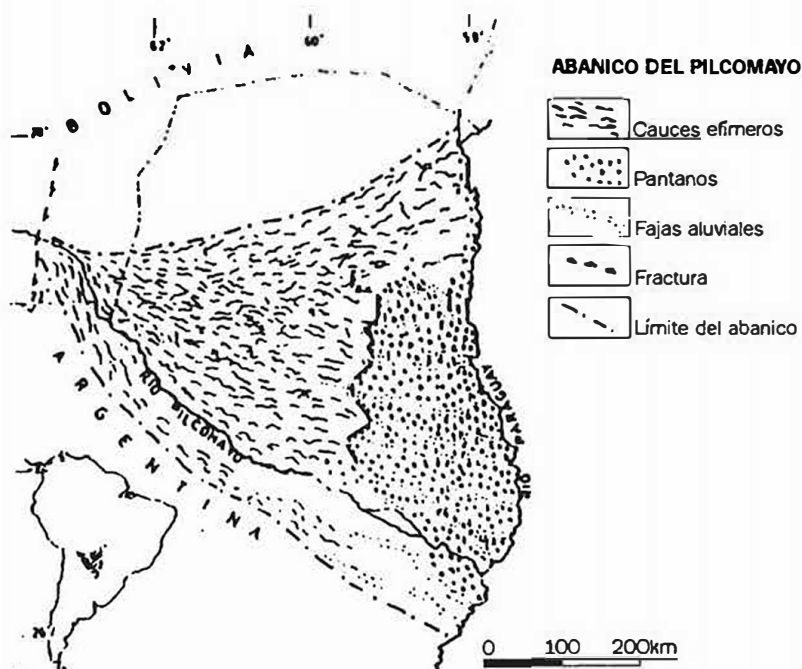
El Bermejo fluye actualmente en una faja de varios kilómetros de amplitud, que a la altura de Las Lomitas es discontinua y tiene 10 km de ancho. La faja está caracterizada por numerosos cauces abandonados pequeños con diferentes grados de preservación; los más viejos son escasamente visibles, obliterados por sedimentos que los cubren. Hoyas de deflación se alinean en la línea central de esos paleocauces. Los paleocauces más jóvenes están mejor preservados, tienen profundidades de 3 a 4 metros y transportan agua durante las crecientes.

En esa región el río está erodando activamente una barranca de 4 metros de altura, en la que está expuesta la columna estratigráfica local. La sección superior está compuesta por bancos de arena depositados durante crecientes, y por paleocauces rellenos por un limo arcilloso oscuro que contiene 15 a 20 % de arena muy fina laminada. Contiene abundante materia orgánica descompuesta, moldes de hojas y ramas. La sección inferior está formada por arena limosa rojiza compacta, con moteados grises (de hierro) y negros (de manganeso).

#### El abanico aluvial del Pilcomayo

El río Pilcomayo ha formado el abanico aluvial más importante del Chaco; además, es el único caso de un abanico aluvial activo de un gran río en Sudamérica (Figura 1.9.). Mide 210.000 km<sup>2</sup>; tiene una importante cuenca montañosa en Bolivia y alcanza la llanura en Villa Montes, donde forma el ápice del abanico. Los depósitos fluviales de esa área están preservados en dos terrazas, la más alta de ellas tiene entre 20 y 40 metros de altura sobre el cauce actual y está cubierta por un loess tropical de 3 metros de espesor; es de edad pleistocena. La terraza baja cubre una gran superficie en la región, es de granulometría gruesa y muy gruesa, con bloques en la base y rodados arenosos en la parte superior. Aguas abajo los sedimentos son más finos, están formados fundamentalmente por arena cuarzosa y grandes placas de illita. Es de edad probablemente holocena.

Figura 1.9.  
Abanico  
aluvial del  
río Pilcomayo



Al este de la longitud de 60°O aparece una unidad sedimentaria antigua, probablemente sincrónica con la terraza alta de Villa Montes. Está formada por 10 a 20 metros de espesor de arcillas limosas palustres, cubiertas actualmente por pantanos permanentes y semi-permanentes. Esta área está atravesada por antiguas fajas del Pilcomayo, que hoy transportan agua de cuencas locales de la llanura (Monte Lindo, Pilagá, Melo y otras). Se trata de la región distal del abanico.

La dinámica fluvial del abanico es muy interesante. El río transporta grandes cantidades de sedimento desde las montañas bolivianas, hasta 40.000 ppm. En 1980 completó el relleno del Estero Patiño (una depresión tectónica de 15.000 km<sup>2</sup>). Comenzó entonces un proceso de avulsión depositando arena fina y limo en el trecho inmediato al Patiño (aguas arriba). El agua de la creciente se derramó sobre la planicie que lo rodea. En los años sucesivos el trecho rellenado y la inundación migraron paulatinamente aguas arriba, dejando un sector cada vez mayor de cauce rellenado. La velocidad de retroceso fue de 10 a 35 kilómetros por año, con un total de 160 km en siete años. El agua derramada hacia la Argentina formó un pantano de 250 km de largo y 7 a 12 km de ancho, con geomorfología y dinámica palustres. Aproximadamente el mismo volumen de agua se derramó en Paraguay, generando un pantano similar.

### El sistema del Parapetí

El río Parapetí ha formado un abanico aluvial de varias decenas de miles de kilómetros cuadrados en Bolivia y Paraguay (Figura 1.10.). Se trata de un caso poco común, porque pertenece a la cuenca del Paraná y también a la cuenca amazónica: el cauce permanente actual se derrama en el Bañado del Izozog, que desagua en el río Mamoré (un tributario del Amazonas). Pero durante la temporada de lluvias se produce una importante transfluencia que forma el río Timané, que corre hacia el este y desemboca en el río Paraguay.

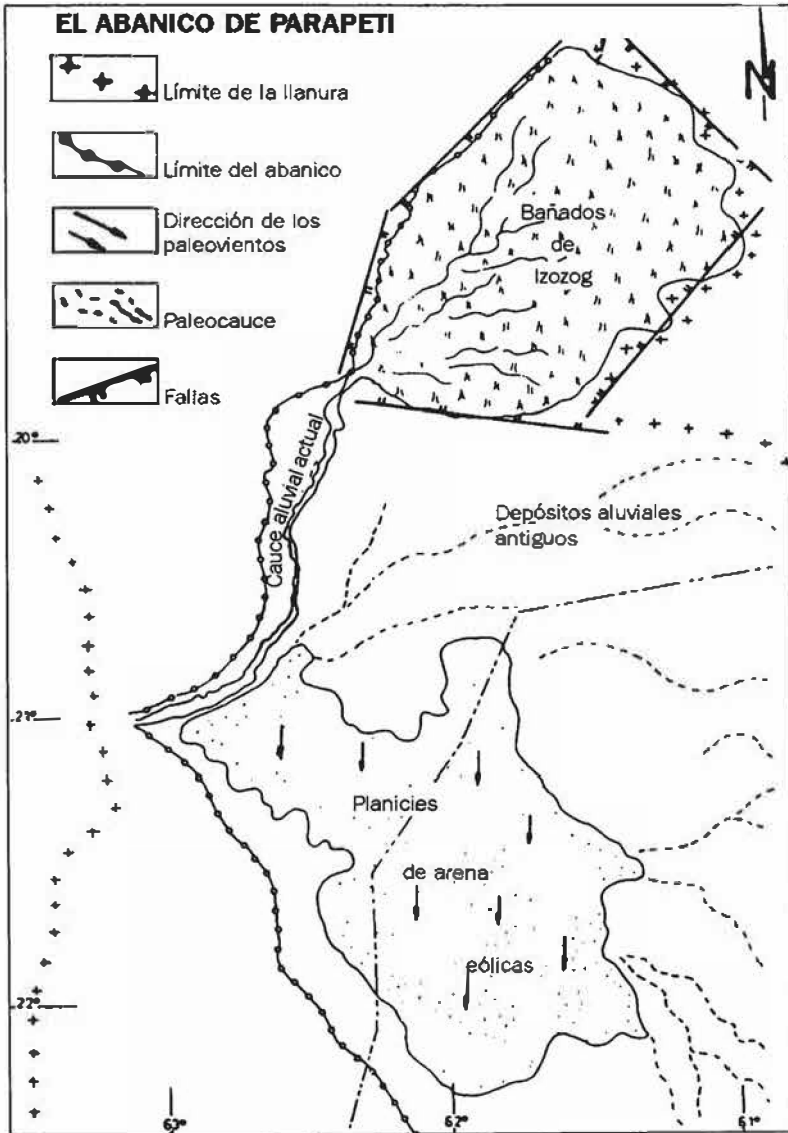


Figura 1.10. Abanico del río Parapetí

De acuerdo con Huamán et al. (1975) el abanico en Bolivia está formado por cuatro áreas geomorfológicas: a) Depósitos aluviales antiguos. b) Una llanura de dunas eólicas. c) La faja aluvial actual del río. d) El Bañado del Izozog. En el ápice del abanico aparecen dos terrazas, equivalentes a las del Pilcomayo en Villa Montes.

#### **El abanico aluvial del río Grande**

Forma el rincón noroeste del Chaco. Tiene una superficie de 65.000 km<sup>2</sup>, 30 % de la cual está en el Chaco; el resto forma parte de los Llanos amazónicos. Tiene dos terrazas en el ápice, localizado en Puerto Camacho. La más antigua tiene 50 metros de altura sobre el río, su superficie está modificada por una morfología tipo "media naranja" de ambiente tropical, y cubierta por el loess de la Formación Urundel (depositado entre 30.000 y 15.000 años antes del presente). Es equivalente a las terrazas altas del Parapetí y Pulcomayo.

La terraza baja, de 3 a 4 metros de altura, está compuesta en su sección inferior por arena de cauce y en su parte superior por limo de derrame. En la parte media se ha desarrollado un suelo durante el Holoceno medio. Por correlación regional se deduce provisoriamente que la sección inferior se ha formado entre 8.500 y 3.500 años antes del presente; la sección superior tiene probablemente una edad entre 3.500 y 1.400 años. Estas edades son válidas también para las terrazas de los demás ríos.

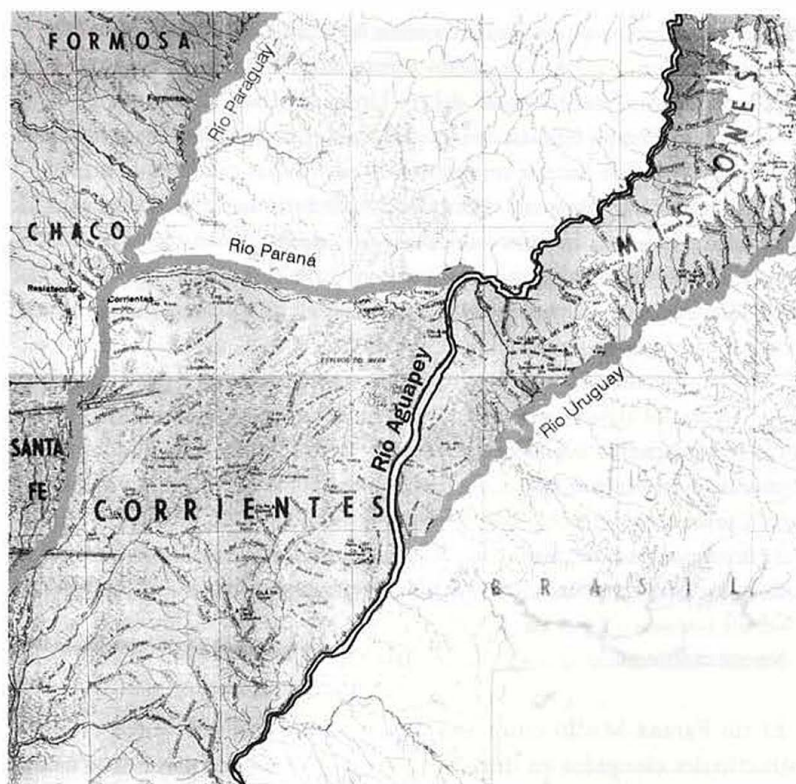
El cauce actual del Grande desemboca en el río Mamoré, aunque derrames de creciente llenan cauces antiguos, de 2 a 3 metros de profundidad y 80 metros de ancho, que se dirigen hacia el río Paraguay. Los sedimentos son fundamentalmente limosos, compuestos por limo cuarzoso e illita subordinada.

#### **Relación con el río Uruguay**

Existen sólidos indicadores geomorfológicos de que en algunas épocas del Pleistoceno, es decir en los últimos 2,6 millones de años, el Paraná estuvo conectado con el río Uruguay (Iriondo, 1996). Los ríos Aguapey y Miriñay corren por valles grandemente sobredimensionados con respecto a sus cauces y a sus cuencas (Figura 1.11.).

El Aguapey nace actualmente en el norte de Corrientes y recorre 60 kilómetros hacia el Paraná en dirección noroeste. Llega a 8 kilómetros de distancia del Paraná y dobla en un ángulo de 100 grados para desembocar en el Uruguay a más de 200 km de distancia. En todo su recorrido el valle de este pequeño afluente tiene un ancho 3 a 4 veces mayor que el del río Uruguay aguas arriba de su confluencia. Hay que destacar que el Uruguay tiene en ese lugar una cuenca 15 veces mayor que el Aguapey. Aguas aba-





**Figura 1.11.**  
Vinculación del  
río Aguapey con  
el río Paraná

jo, el río conserva el ancho del afluente. Un fenómeno análogo ocurre con el río Miriñay. Este río nace en la laguna Iberá y sirve de desagüe temporario a la misma, en épocas de aguas altas. El efluente permanente de la misma es el río Corriente, que desemboca en el Paraná. Desde el Iberá adelante, el valle del Miriñay tiene un ancho constante de 4 a 6 kilómetros, mayor que el del colector. Es interesante notar que el valle del Miriñay está labrado en la Formación Toropí/Yupoí (Pleistoceno medio, entre 780.000 y 130.000 años antes del presente) en la zona de la confluencia. De manera que la migración de cauce postulada aquí se produjo en el Pleistoceno medio o superior.

Aguas abajo, en el subsuelo de Entre Ríos, se encuentra un potente acuífero de gran importancia económica (la Formación Salto Chico) generada por el río Uruguay. Resultados parciales del Proyecto de Investigación CAI+D 96 que se está desarrollando actualmente en la FICH revelan paleocauces enterrados formando el acuífero. Hay dos grupos, uno de ellos tiene curvas meándricas menores y un ancho similar al del río actual; estas curvas tienen 5 a 6 kilómetros de radio de curvatura. Son meandros bien desarrollados, asimétricos, suaves. El otro grupo está formado por paleocauces mucho

mayores, con radios de curvatura de entre 10 y 20 kilómetros. Son también asimétricos, con 2 a 3 km de ancho típico, hasta 4 km.

Se trata de dos fases húmedas del río Uruguay o bien dos fases en que el Uruguay y el Paraná estaban conectados, con el tramo inferior en el actual río Uruguay. Puede hacerse un intento de estimar los caudales de esas épocas utilizando la Geometría Hidráulica. Aplicando los ábacos de Leopold et al. (1964) y considerando como base un caudal medio actual de 5.000 m<sup>3</sup>/s y 1000 metros de ancho, se obtiene para la fase mayor un caudal de 15.000 m<sup>3</sup>/s, o sea el triple. Nótese que esta es una estimación de mínima, pues los cauces fluviales disminuyen considerablemente su ancho visible al ser abandonados (Iriondo, 1975). Utilizando la relación longitud de onda/caudal (Iriondo, 1990) resulta en un caudal de 45.000 m<sup>3</sup>/s.

Ese valor aparece a primera vista como muy alto y se lo puede tomar como estimación de máxima. Sumando los caudales del Paraná y del Uruguay juntos se obtiene un valor de aproximadamente 20.000 m<sup>3</sup>/s, dentro del entorno obtenido por las fórmulas teóricas. Se trata de otro indicador indirecto, pero robusto, de conexión entre ambos ríos.

### Neotectónica

El río Paraná Medio cruza una región compuesta por varios bloques estructurales elongados en dirección norte-sur; la mayor parte de ellos están inclinados hacia el este. Estos bloques están sobrepuestos a un viejo sistema estructural caracterizado por alineamientos de dirección NE-SO y NO-SE. En la región pampeana al oeste del río, son frecuentes unos pequeños bloques hundidos de forma cuadrada o rectangular. Las dimensiones típicas de esas estructuras son 50 a 200 km<sup>2</sup> en área y 2 a 5 metros de profundidad.

El Paraná Medio fluye unos 600 kilómetros de norte a sur a lo largo de controles tectónicos. Esa línea es geológicamente compleja; debido a la pendiente general del continente, el agua cruza varios bloques pequeños que han sufrido movimientos verticales independientes. La mayoría de ellos están inclinados hacia el este; en consecuencia, el cauce principal tiende a recostarse a lo largo del borde oriental de la llanura aluvial. Cuando el cauce llega a un bloque inclinado en otro sentido, como en la zona de Rosario, cruza la llanura aluvial hacia la barranca opuesta.

La Neotectónica incluye también a los movimientos actuales de la corteza terrestre. Dichos movimientos son visibles en el Paraná Medio. La parte superior, entre Corrientes y Bella Vista, está en proceso de hundimiento. Por el contrario, el segmento Santa Fe-Rosario tiende a elevarse. El tramo intermedio está compuesto por varios bloques menores con comportamiento no uniforme. Uno de los resultados de este patrón tectónico



es que el gradiente hidráulico del río está compuesto por una sucesión de segmentos de pendientes diferentes.

### **Cambios climáticos**

El Cuaternario es un período de fuertes cambios climáticos en toda la Tierra. En las grandes llanuras de Sudamérica, localizadas en latitudes bajas, se alternaron climas húmedos y secos. Una sucesión de climas secos y húmedos se registró en la llanura santafesina en los últimos cien mil años (Iriondo y Kröhling, 1995). Los climas húmedos fueron cálidos y los climas secos, por el contrario, más fríos que el actual. El clima actual pertenece al tipo cálido-húmedo.

Durante los períodos húmedos la red fluvial de la cuenca se desarrolló de manera importante y se formaron amplias llanuras aluviales en los afluentes principales. En los intervalos semiáridos hubo formación y crecimiento de abanicos aluviales en los piedemontes y áreas pantanosas en las llanuras. Los climas definitivamente áridos fueron dominados por el viento, que produjo erosión de suelos y sedimentación de loess y campos de arena; como efecto secundario la arena eólica provocó la obliteración de cauces y desorganización de los sistemas hídricos.

### **La Formación Ituzaingó**

La Formación Ituzaingó es el producto más conspicuo de la acción del río Paraná durante toda su existencia. Es el depósito de arena que formó el Paraná Medio a lo largo de toda su existencia. Comenzó a sedimentarse al formarse este gran colector, en tiempos pliocenos, es decir entre 2 y 4 millones de años atrás. Y siguen depositándose hasta el día de hoy. Esta formación ha recibido varias denominaciones informales en este siglo, la más persistente de ellas es la de "Arenas Puelches". Está compuesta por arena cuarzosa fina y muy fina, de color ocre y blanco, interestratificada con limo gris y verdoso. El espesor máximo alcanza los 150 metros, aunque los valores típicos varían entre 10 y 20 metros. Está distribuida en la margen derecha del lineamiento Paraguay-Paraná desde Asunción hasta la depresión del Salado en la provincia de Buenos Aires, cubriendo una superficie de 120.000 km<sup>2</sup>.

La Formación Ituzaingó en el área del Paraná Medio ha crecido por yuxtaposición de fajas fluviales controladas por fracturas. El mecanismo de divagación del cauce ha sido sin dudas de tipo "avulsión", es decir que el cauce se traslada de una posición a otra mediante desplazamientos discontinuos (fenómeno que puede durar decenas de años) y no por un "barrido" lateral continuo. En el sur del Paraguay y norte de Corrientes, esta formación ha generado un gran abanico aluvial.

## El tramo Paraná Medio

El tramo medio del Paraná corre por una llanura aluvial, que es una faja inundable compleja, de gran tamaño (Iriondo, 1988). Sus características geomorfológicas principales son las siguientes:

### Geometría

La llanura aluvial del Paraná Medio tiene 600 km de longitud, desde la confluencia Paraná-Paraguay hasta el ápice del delta, localizado algo al sur de Rosario. La dirección general es norte-sur, y cruza en forma perpendicular o diagonal a varios bloques tectónicos. Estas condiciones estructurales han generado una sucesión de segmentos locales, cada uno con dirección y pendiente particular.

Aguas abajo de la confluencia con el río Paraguay hasta los 28° 10' el río fluye unos 75 kilómetros sobre un bloque hundido, ensanchándose la llanura aluvial de 13 a 45 km. El segmento siguiente tiene 150 km de longitud y mayor pendiente; el ancho de la planicie varía entre 25 y 35 km. Desde Goya hasta Esquina (30°S) la planicie cruza un bloque elevado. Aguas abajo, esta faja atraviesa varios bloques menores y se angosta de 40 km a 8 km en Santa Fe, una sección que debe sus características a una importante fractura de tamaño continental.

En la mayor parte del tramo Confluencia-Santa Fe, el cauce principal fluye a lo largo de la barranca izquierda de la llanura aluvial, lo que indica un basculamiento oeste-este de los bloques tectónicos. Por el contrario, desde Santa Fe hasta el ápice del delta el cauce cruza la llanura aluvial y fluye a lo largo de la margen derecha de ésta, que se ensancha hasta 40 kilómetros en el ápice del delta. La superficie total de la llanura aluvial del Paraná Medio es de 19.240 km<sup>2</sup>.

### El cauce principal

El cauce principal del Paraná es de tipo trezado, con lecho móvil. Está compuesto por una sucesión de anchos segmentos caracterizados por dos o más brazos. La migración lateral de los mismos eroda las orillas y forma islas y bancos de arena. Tienen entre 20 y 30 km de longitud y 4 a 8 km de ancho, incluyendo islas y bancos. El ancho acumulado de cauces (sin considerar las islas) es de 2 a 5 km. La profundidad típica del thalweg oscila entre 5 y 10 metros. Estos segmentos están limitados por estrangulamientos cortos y bien definidos, en los cuales el río corre por un cauce único. Los estrangulamientos están determinados por fracturas transversales; son secciones planimétricamente estables, que no han migrado en por lo menos los últimos 90 años. En los estrangulamientos el ancho del cauce único es menor, entre 0,5 y 1,5 km y tiene profundidades de entre

15 y 30 metros, o sea que el lecho aluvial queda por debajo del nivel del mar. La superficie total del cauce principal es de 1.803 km<sup>2</sup>.

#### La llanura de bancos y meandros modernos

Se trata de una faja de bancos elípticos, compuestos por arena fina, que acompaña al cauce principal a lo largo de todo su recorrido. Es permanentemente modificada por erosión y sedimentación. Tiene 2 a 7 km de ancho y su área total es de 4.150 km<sup>2</sup>. A lo largo de la margen derecha de la llanura aluvial, del lado opuesto al cauce principal, corren cauces secundarios activos de tipo meándrico, que han desarrollado llanuras de meandros en varias áreas. La mayor de ellas, ubicada al norte de la ciudad de Santa Fe, está generada por el río Colastiné. Tiene 60 km de longitud y 6 a 8 km de ancho (2.917 km<sup>2</sup> de superficie). Está compuesta por arena fina limosa en superficie y arena limpia en el subsuelo.

#### Los depósitos de meandros y bancos evolucionados

Esta unidad geomorfológica es muy reciente y fue probablemente formada durante el régimen hidrológico actual. Hoy aparece como fajas discontinuas alejadas de la influencia directa del cauce principal. La superficie de esta unidad presenta una incipiente morfología fluvial de brazos menores sobrepuesta al patrón heredado. Los bancos de arena originales son menos evidentes que los restos de cauces menores. Los sedimentos superficiales contienen limo intersticial, que contamina la arena limpia original de los bancos. Cauces pequeños activos cruzan la unidad, formando fajas de meandros finos, con radios de curvatura extremadamente grandes. El área total en el Paraná Medio es de 1.117 km<sup>2</sup>.

#### Depósitos de inundación

Están caracterizados por una morfología de áreas planas con numerosas lagunas poco profundas, pantanos y pequeños cauces adventicios. Estos cauces son activos solamente al comienzo y al final de las inundaciones. Los depósitos de inundación están situados en la margen derecha del cauce principal a lo largo de toda la llanura aluvial. Están compuestos principalmente por dos facies sedimentarias: a) Facies de albardón, caracterizada por arena muy fina con mezcla de limo y arcilla, color ocre y verde grisáceo, moteado, con abundantes poros, tubos y moldes de raíces. Posee plasticidad mediana y los procesos de gleyzación son evidentes. b) Facies de pantano, compuestas por limo grs oscuro con alto porcentaje de materia orgánica en diferentes grados de descomposición. Contiene pequeños porcentajes de arcilla y arena muy fina. Este sedimento es compacto, con baja porosidad, excepto en depósitos muy recientes.

Los depósitos de inundación cubren un área de 6.048 km<sup>2</sup>. El mapeo a escalas 1:100.000 y 1:20.000 permitió el reconocimiento de varias unidades menores; cada una de ellas representa un estado particular de la evolución desde la morfología de cauce original hacia una morfología de inundación bien definida. Dicha evolución presenta en el Paraná Medio dos líneas divergentes, una de ellas en áreas sujetas a hundimiento tectónico y la otra en bloques que se están elevando.

El primer estado de la evolución es el mismo en ambas líneas. Aparecen cauces menores cruzando la llanura de bancos, se aíslan de la circulación general del cauce principal y comienzan a ensancharse en algunos lugares, formando lagunas pequeñas.

Luego, en los bloques elevados los cauces desaparecen paulatinamente y las lagunas evolucionan de acuerdo a una dinámica lenfítica, resultando en la siguiente sucesión: áreas con cauces ensanchados/áreas con pantanos y lagunas/áreas elevadas con lagunas.

En los bloques hundidos la superficie cubierta por pantanos y lagunas crece gradualmente. La evolución morfológica es la siguiente: áreas con cauces ensanchados/áreas con lagunas y cauces asociados/áreas permanentemente sumergidas.

#### **Los depósitos antiguos**

Los depósitos antiguos están caracterizados principalmente por una superficie plana, con relieve extremadamente bajo, prácticamente invisible en el campo. Sólo se detectan en dichas áreas escasos pantanos de forma irregular, de 100 a 300 metros de diámetro. Los depósitos antiguos están compuestos por arena media verde grisácea con concreciones de carbonato de calcio; son comunes los poros pequeños y tubos atravesando la masa del sedimento. En los afloramientos se pueden observar intercalaciones de limo arenoso con eflorescencias salinas.

Los depósitos eólicos antiguos están cubiertos por una capa de limo eólico gris. En varios sectores cerca de Reconquista y Esquina se desarrollaron campos de dunas durante la sedimentación del limo gris (Formación San Guillermo), ocurrida entre 3.500 y 1.400 años antes del presente. Los arenales de Coronda y Rincón también se originaron en ese tiempo por acción del viento. Las dunas originales están ahora parcialmente disipadas.

Los depósitos antiguos aparecen desde Confluencia (unión de los ríos Paraná y Paraguay) hasta los 30° 40', formando dos fajas discontinuas a ambos lados de la llanura aluvial. En el sector norte (hasta los 28° 30') están hundidos, con la superficie original a menor altura que las unidades geomorfológicas modernas. En el sector sur los depósitos antiguos han sido elevados, de manera que forman una terraza. La diferencia en altura entre ambos sectores es de más de 4 metros.

Los depósitos antiguos fueron sedimentados durante una fase hidrológica más seca que la actual, durante la cual el Paraná tenía una descarga más reducida que en este siglo y salinidad más alta que la actual.

## **Características climatológicas de la Cuenca del Plata**

### **Caracterización general**

América del Sur representa el 14% de las tierras continentales (17.800.000 km<sup>2</sup>), y se encuentra ubicada casi completamente en el hemisferio sur. Los puntos extremos de Sudamérica son el Cabo Blanco a 35° 30' O y el Cabo Fariñas a 81° 20' O. En dirección norte-sur se extiende entre el Cabo Gallinas a 12° 30' N y el Cabo de Hornos a 56° 02' S. Este continente es el único que se extiende desde el ecuador a latitudes sur medias. En contraste con las masas continentales del hemisferio norte, la extensión máxima este-oeste se encuentra en la zona ecuatorial, con una notable disminución hacia el polo y terminando abruptamente en el Cabo de Hornos. Dentro del continente, en la región sudeste, se encuentra la Cuenca del Plata.

Durante el verano en el hemisferio sur, la costa oriental es más cálida que la costa occidental. No obstante, esta característica no prevalece durante todo el año, ya que en el invierno la fría Corriente de las Malvinas influencia las costas orientales, y las temperaturas mensuales son prácticamente las mismas en ambos litorales desde el extremo sur hasta 30° de latitud sur. Al norte de los 23° de latitud sur, una gran diferencia se presenta durante el invierno. Durante el verano (generalmente entre los meses de enero y abril) la presencia ocasional del fenómeno El Niño (que implica el movimiento de aguas tropicales hacia el sudeste a lo largo de las costas de Ecuador y Perú, que desvía la Corriente de Humboldt alejándola del continente en estas áreas) disminuye las diferencias térmicas entre las costas.

La alta cadena de montañas que se alinea en el borde occidental de América del Sur, desde el istmo de Panamá hasta el extremo sur, conocida como Cordillera de los Andes, establece una barrera meteorológica muy efectiva entre ambos lados de la misma. Este contraste en el relieve, junto con las condiciones oceánicas de los alrededores de América del Sur causa una gran diversidad climática y da a los procesos meteorológicos singulares características, en especial sobre la Cuenca del Plata.

La existencia de la Cordillera de los Andes, la ubicación de la Cuenca del Plata junto a la costa oriental y la topografía propia de la misma, le confieren a dicha cuenca características sinópticas y climáticas propias debido a las condiciones oceánicas circundantes a la costa oriental. Allí

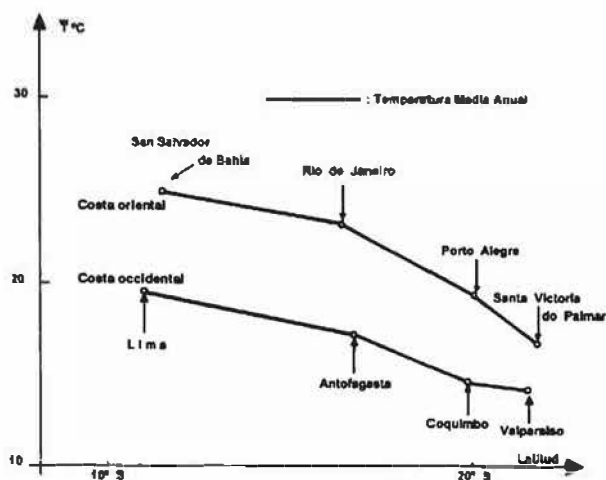
las aguas, al sur del Cabo Blanco en el extremo nordeste de América del Sur, tienen un comportamiento estacional que no es observado con la misma intensidad a igual latitud de la costa occidental.

En el Océano Atlántico, la corriente marina ecuatorial del sur encuentra el continente sudamericano cerca del Cabo Blanco donde se bifurca en dos corrientes calientes que pasan a lo largo de la costa, una hacia el noroeste y la otra hacia el sudoeste, en las proximidades del litoral marítimo brasileño. Las aguas que viajan hacia el sudoeste alcanzan las proximidades del Cabo Corrientes en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, y constituyen la Corriente de Brasil. Al final del verano, en las cercanías del Cabo Corrientes, la Corriente de Brasil converge con un desprendimiento de la Corriente Circumpolar Antártica que lleva agua fría hacia el norte, a lo largo del litoral Patagónico. Esta corriente fría hacia el norte es identificada con el nombre de Corriente de Malvinas.

Al final del invierno, la Corriente de Malvinas desplaza a la Corriente de Brasil de la proximidad de la costa, y se extiende a lo largo del litoral brasileño alcanzando el Cabo Frío, al norte de Rio de Janeiro.

En la costa occidental de Sudamérica, bañada por el Océano Pacífico, es muy importante el efecto térmico que produce la corriente fría de Humboldt a lo largo de todo el año. Los efectos de esta corriente, en promedio, son perceptibles y confieren a esa costa un carácter más frío que la costa próxima a la Cuenca del Plata (Figura 1.12.). Como se ha explicado precedentemente, la costa oriental tiene una marcada estacionalidad en las aguas que la bañan, y esto se hace sentir en los campos medios de temperatura como se verá en el párrafo correspondiente.

**Figura 1.12.**  
Diferencia de temperatura entre las costas oriental y occidental de Sudamérica



Obviamente, los modelos de temperatura, la topografía y la circulación general de la atmósfera están íntimamente ligados a la precipitación. Los modelos de precipitación en la Cuenca del Plata son complejos, debido a la posición geográfica, extensión de la región y su topografía variable. La estacionalidad mencionada, que también está presente en la precipitación, es indicativa de la variabilidad temporal de ésta. Entre el trópico de Capricornio y el ecuador, predomina un cinturón bien marcado de precipitación con máximos coincidiendo con el solsticio de diciembre (Hoffmann, 1975). En la vecindad del trópico de Capricornio, y al sur del mismo, la estacionalidad de la precipitación no es tan evidente.

La calidad de la cobertura vegetal es de suma importancia en el clima y los procesos atmosféricos de la región en estudio. En la parte austral de América del Sur (al sur del ecuador) existen dos zonas de elevada humedad y calor: la cuenca amazónica y la región cercana al litoral brasileño (< 1000 km de la costa). Con exuberante vegetación tropical y gran evapotranspiración la primera y vegetación de tipo tropical y subtropical muy abundante la segunda; prolongándose esta última, con modificaciones graduales, hasta la desembocadura del Río de la Plata, pero con un calor disponible más reducido.

Entre las dos zonas tropicales se encuentran regiones más abiertas de tipo sabana que se extienden hacia el oeste hasta el Gran Chaco, que tiene un marcado invierno seco. Al este de los Andes, en el Gran Chaco y en las planicies bajas cerca de la cordillera, hasta unos 40°S, se encuentran las áreas más calientes del continente, con temperaturas máximas medias en el verano de 30° a 35° C, combinadas con una considerable sequedad.

### **Campos medios de presión y vientos**

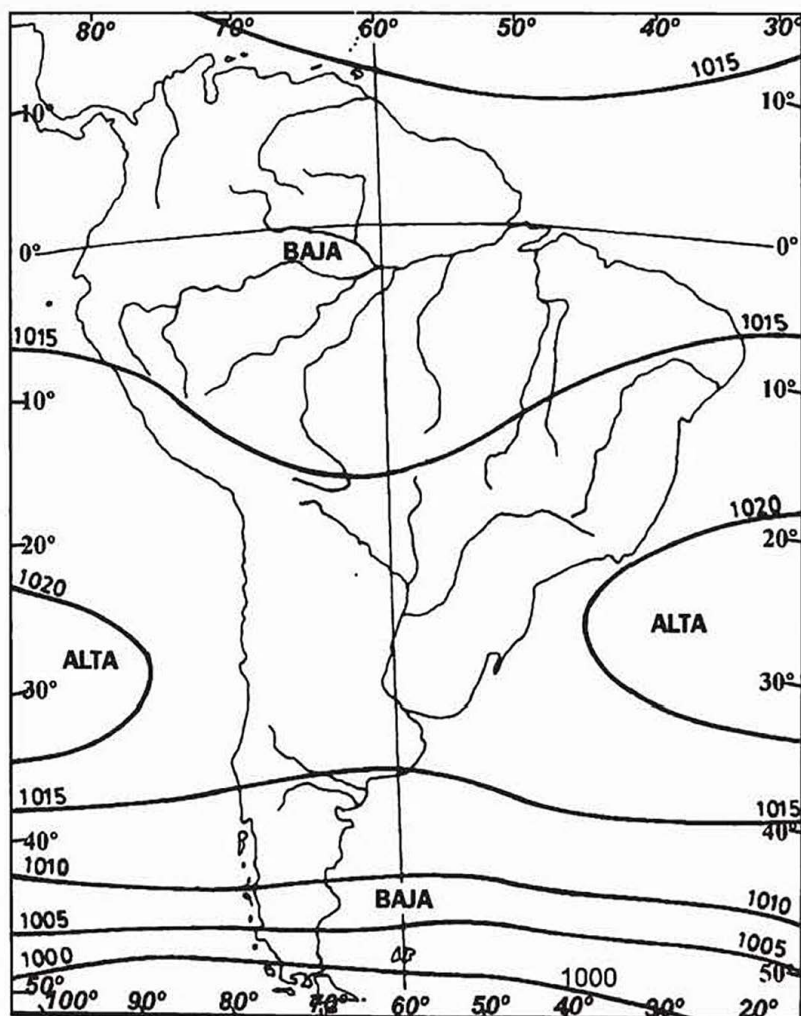
En el continente sudamericano, el campo de presión tiene una bien marcada vaguada en la zona de la Convergencia Inter Tropical (CIT); y la convergencia de los alisios del nordeste y el sudeste oscila del norte al sur siguiendo los cambios estacionales de la declinación solar.

#### **Presión media en invierno (julio)**

En abril, la declinación solar está en un mínimo sobre el plano ecuatorial terrestre, generando las presiones más bajas del año en la región ecuatorial. A partir de este mes, la declinación solar aumenta hacia el norte, la vaguada ecuatorial también se desplaza hacia el norte siguiendo al sol, y alcanza su máxima latitud norte durante el mes de julio, lo cual produce un modelo de campo de presión consistente a lo largo de todo el continente desde el Istmo de Panamá hasta el norte de la Patagonia (Figura 1.13.).

En julio, los centros de alta presión subtropicales están centrados aproximadamente en 30°S en el Océano Pacífico y en 27°S sobre el Atlántico. Simultáneamente, esas áreas tienen incorporado un cinturón de alta presión que cruza el continente que afecta casi la totalidad de la Cuenca del Plata, y muestra la dirección de desplazamiento de los anticiclones migratorios que se trasladan desde el Océano Pacífico hacia el Atlántico. El área entre los 5°S y los 25°S, que comprende la zona norte de la Cuenca del Plata, está influenciada por los vientos alisios, mientras que la región al sur de esta última latitud está afectada por vientos variables que gradualmente se van afirmando como vientos predominantes del oeste, lo que finalmente sucede al sur de los 35°S.

**Figura 1.13.**  
Presión media a nivel del mar en julio, en hPa.





### Presión media en verano (enero)

Cuando se acerca el mes de octubre, la declinación solar retorna a un mínimo, respecto del plano ecuatorial, durante su migración hacia el lado sur, causando que la vaguada ecuatorial retorne al ecuador. En el mes de enero, el sol se encuentra en su máxima declinación sur y la vaguada ecuatorial alcanza su máxima latitud austral sobre el continente, en la Amazonia central y sur.

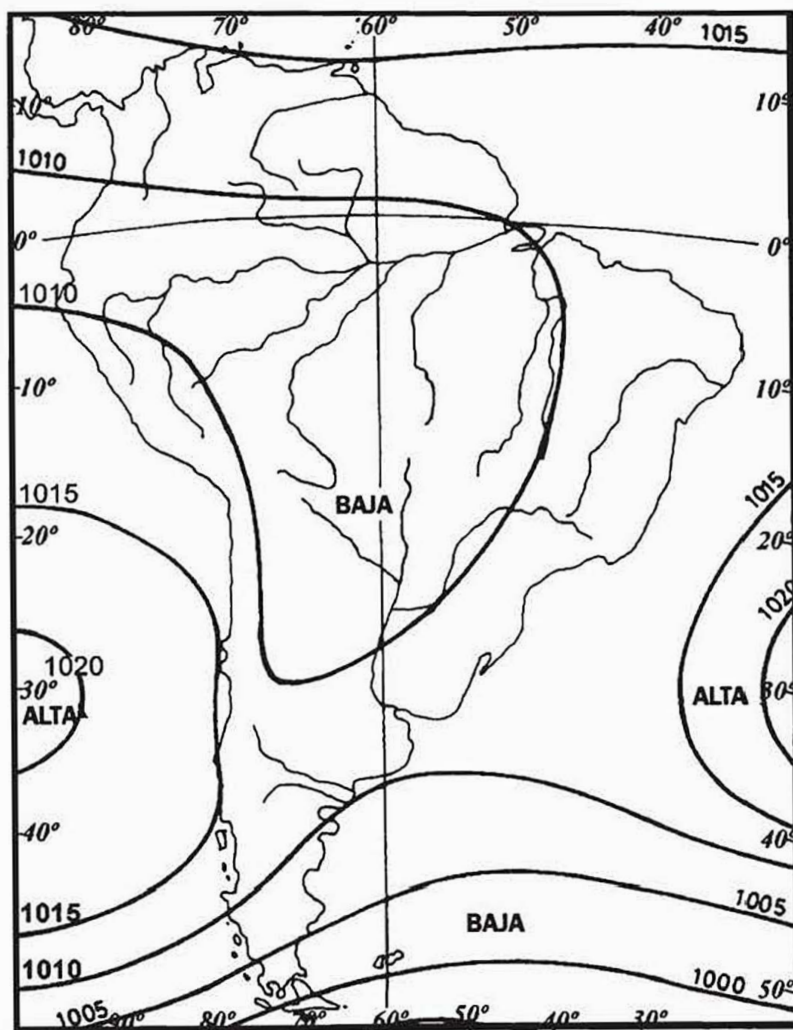


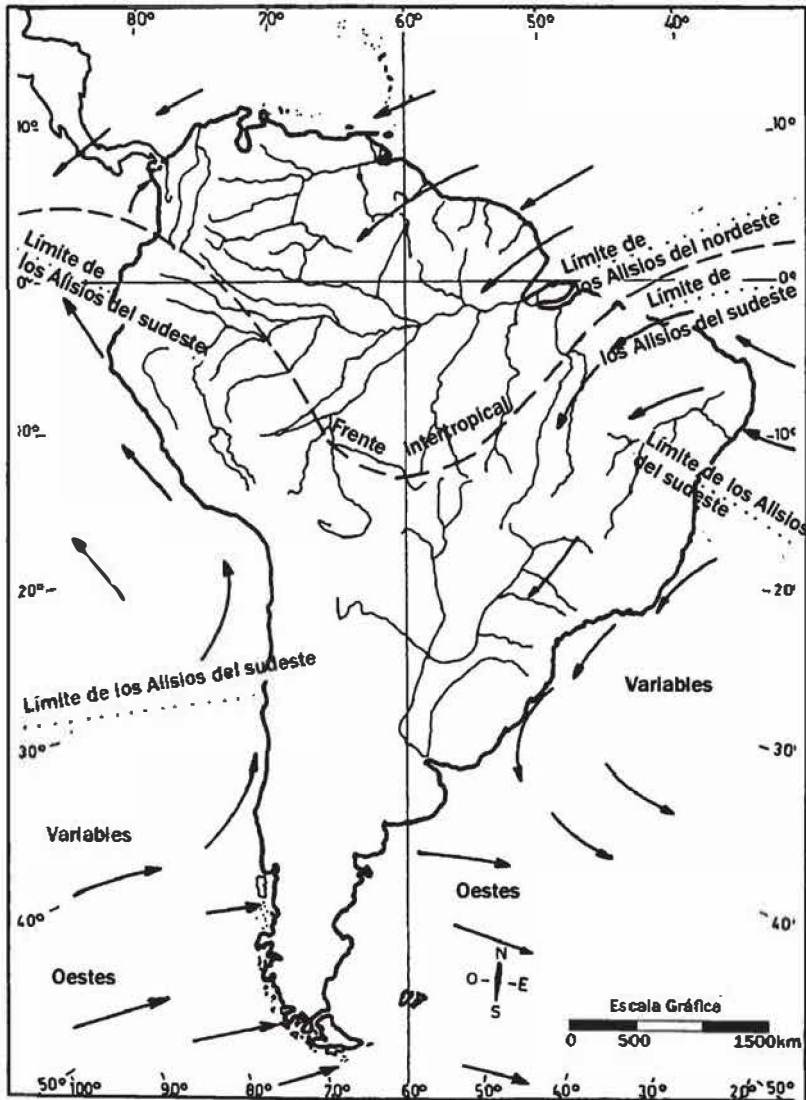
Figura 1.14. Presión media a nivel del mar en enero, en hPa.

Durante el verano, el cinturón de alta presión es interrumpido por el mayor calentamiento de las masas terrestres, que genera una extensa área de baja presión que se extiende hacia las latitudes medias que separa a los anticiclones subtropicales semipermanentes (Figura 1.14.). Las presiones son más bajas que en julio, y un notable gradiente hacia el lado polar existe en los vientos del oeste a 40°S.

### Campos medios de viento

La zona de la CIT es fácil de identificar gracias a su característica nubosidad convectiva. En verano (enero - Figura 1.15.) atraviesa la costa oeste de Colombia a aproximadamente  $5^{\circ}\text{N}$  y se curva hacia el centro de la Amazonía, al este de la Cordillera de los Andes, alcanzando la parte norte del Paraguay. Al este, regresa en dirección noreste, alcanzando la zona este de la Amazonía y extendiéndose hacia el Océano Atlántico aproximadamente a  $2^{\circ}$  de latitud norte.

**Figura 1.15.**  
Vientos  
prevalientes  
durante el  
verano del H.S..



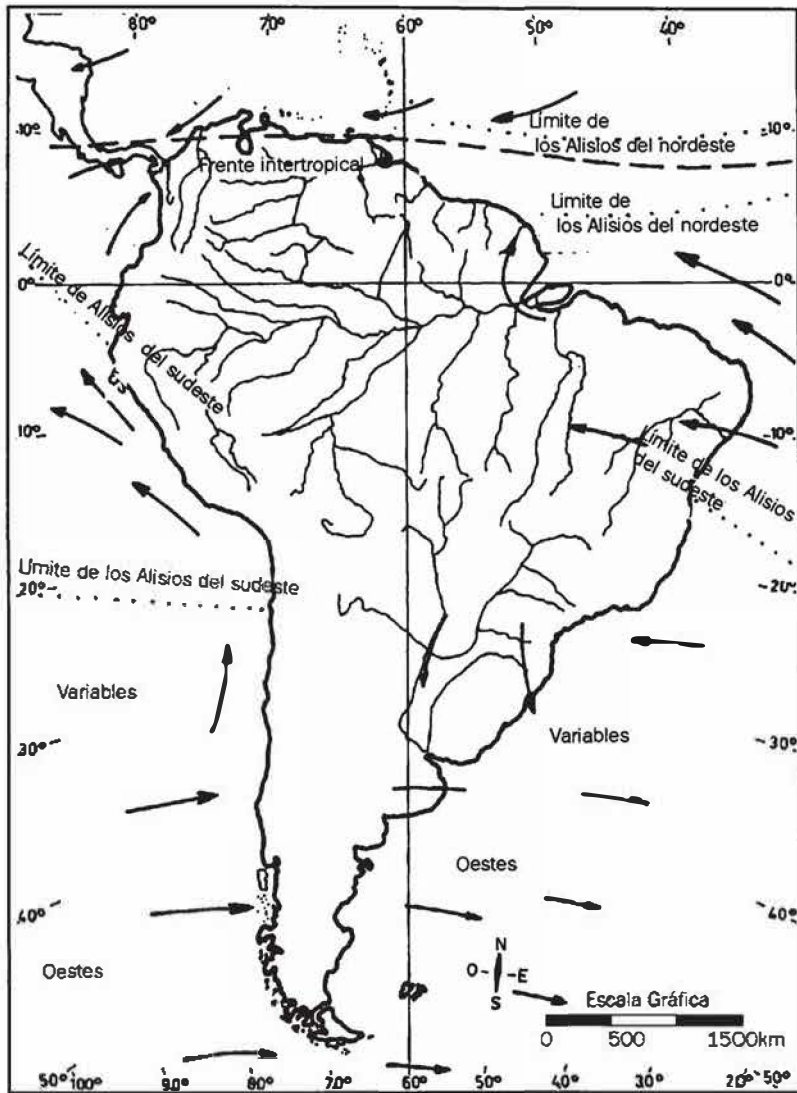


Figura 1.16.  
Vientos  
prevalecientes  
durante el  
invierno del H.S.

Los vientos alisios del noreste prevalecen al norte de la zona de la CIT, soplando con intensidad moderada sobre la costa norte del continente entre el Amazonas y Panamá. Al sur de la zona de la CIT, sobre la costa oriental entendiéndose hasta 15° de latitud sur, los vientos alisios soplan desde el suroeste en las áreas oceánicas, y gradualmente giran hacia el este y noreste al penetrar tierra adentro. Mientras tanto, sobre la costa occidental prevalecen los vientos del suroeste entre el ecuador y los 30° de latitud sur.

Al sur de la zona de los vientos alisios y hacia los 40°S, hay una franja de vientos variables que es más notable sobre la costa del Atlántico que en la del Pacífico. Más hacia el sur, hacia el Estrecho de Drake, los vientos del oeste muestran intensidades y persistencias singulares.

En julio (Figura 1.16.), la zona de la CIT coincide con la circulación de aguas ecuatoriales, alcanzando su posición extrema norte. Los vientos alisios del noreste se perciben solamente sobre las costas caribeñas de Venezuela y Colombia. Al sur de la CIT, sobre el Atlántico entre los 5°N y 15°S, soplan los vientos alisios del sudeste.

Es necesario mencionar que en la parte norte del área del trópico de Capricornio y hacia el interior del continente, no es posible obtener datos confiables en la actualidad de vientos de superficie. Los sistemas de vientos están sujetos a fuertes influencias locales, en parte debido a la vegetación y especialmente a la topografía de las regiones montañosas.

### **Campos medios de temperatura**

Sobre tierra, en la región de la Cuenca del Plata, los campos medios de temperatura muestran una característica estacional bien establecida (Hoffmann, 1975), y es razonable considerar cuatro estaciones bien individualizadas, particularmente al sur del trópico de Capricornio, donde este modelo está fuertemente manifestado. En otro orden de cosas, la respuesta del campo térmico sobre tierra responde claramente al movimiento aparente del Sol con respecto al plano ecuatorial. La temperatura máxima a cada lado del ecuador ocurre durante el solsticio apropiado (cuando el Sol culmina en cada hemisferio).

Los meses de enero, abril, julio y octubre pueden ser tomados como representativos de las estaciones verano, otoño, invierno y primavera respectivamente; pero por una cuestión de brevedad en el presente capítulo solamente se mostrarán los campos medios de temperatura de verano (enero) e invierno (julio), además de los campos medios anuales. Los meses de abril y octubre son típicamente de transición de una estación extrema a la otra y muy semejantes entre sí.

#### **Temperatura media anual**

En la distribución de temperaturas medias anuales de la Cuenca del Río de la Plata es determinante la latitud, pero fundamentalmente la componente geográfica del clima. En consecuencia, el máximo de temperatura (>25 °C) se encuentra en el norte del Gran Chaco y en el Planalto, en el límite norte con la Amazonia.

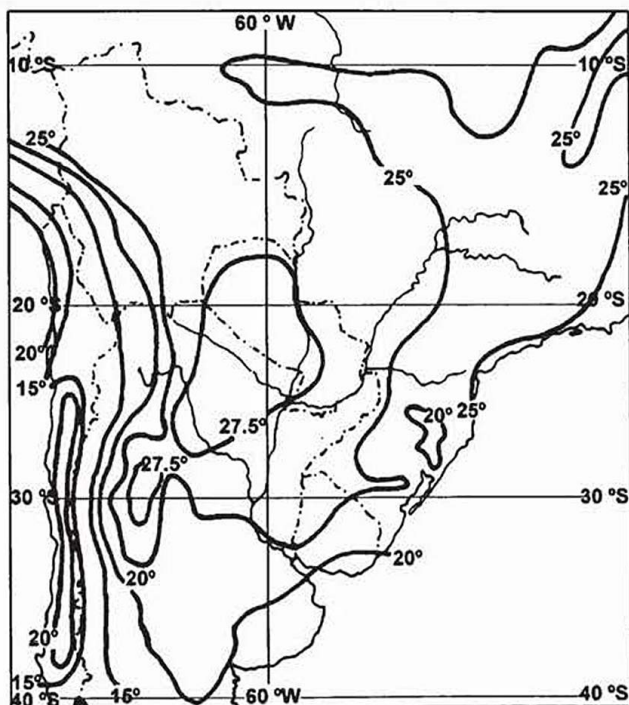
Los mínimos de temperatura (<20 °C) son observables en el sur de la cuenca, en las regiones cercanas al mar y en las altitudes de las cadenas

costeras de Brasil. Por altitud las temperaturas medias mensuales bajan, en algunos casos, por debajo de los 15 ° C.

El campo de isotermas guarda una gran similitud con los campos correspondientes a enero y julio; en consecuencia, sería redundante mostrar un mapa de las isotermas medias anuales.

#### Temperatura media de verano (enero)

En enero ( Figura 1.17.), el área más caliente del continente, y de la Cuenca del Plata, está situada en el centro sur de Brasil, Bolivia y norte de Argentina. Es evidente que en las zonas costeras el efecto de las corrientes marinas es notable. Sobre tierra, en contraste con los mares adyacentes, el calentamiento de verano alcanza su máximo durante este mes.



**Figura 1.17.** Campos medios de temperatura durante el mes de enero (Período 1961-90).

#### Temperatura media de invierno (julio)

Durante el mes de julio (Figura 1.18.), el máximo de temperatura se desplaza hacia el norte, aunque en la región del río Paraguay medio y superior las temperaturas medias superan los 20°C. En el resto de la Cuenca del Río de la Plata las temperaturas medias mensuales se hallan entre 10°C en el sur y 20°C en el norte de la cuenca.

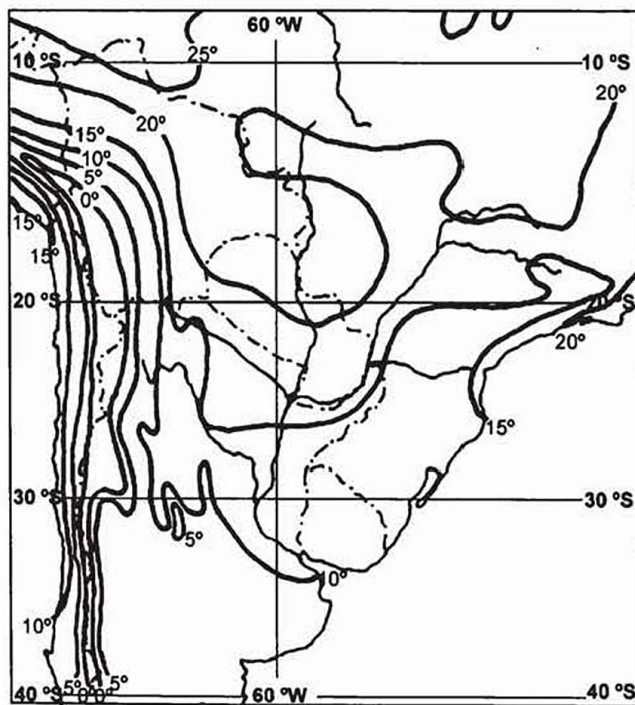


Es muy ilustrativo observar el desplazamiento estacional de las isotermas medias en las regiones planas continentales, esto es excluyendo la región andina y terrenos adyacentes. De esto se concluye que la amplitud térmica media anual es máxima en la región del Gran Chaco y norte y centro de Argentina, donde alcanza  $12,5^{\circ}\text{C}$  aproximadamente. En tanto, la amplitud térmica tiende a ser menor en las cercanías del litoral atlántico, muy especialmente al norte del Rfo de la Plata.

#### Temperaturas medias en las estaciones de transición

Abril y octubre representan los meses de las estaciones de transición y tienen similares condiciones térmicas. La distribución de temperaturas se parece a las de verano, aunque el efecto del calentamiento diferencial entre los mares y tierra es algo menos marcado. Los modelos de temperatura de abril y octubre son estructuralmente similares en el interior del continente. A lo largo del litoral atlántico, las diferencias entre los meses son debidas a la influencia de la Corriente de Malvinas en octubre, en contraste con la intensa influencia de la Corriente de Brasil en abril.

**Figura 1.18.** Campos medios de temperatura durante el mes de julio (Período 1961-90).



## Campos medios de precipitación

Es sabido que los patrones de temperatura, circulación atmosférica y topografía están íntimamente vinculados con las precipitaciones. Por coherencia, las precipitaciones serán analizadas de acuerdo a su presencia durante enero y julio, los dos meses marcados por las temperaturas extremas.

### Ciclo anual de la precipitación

Los patrones de precipitaciones en la Cuenca del Plata son complejos debido a la ubicación geográfica, extensión y topografía. Por esta razón, los regímenes pluviométricos pueden ser analizados de una manera muy práctica si los consideramos en un contexto climático regional, contemplando así las perturbaciones locales. En este contexto se pueden identificar diversos regímenes de precipitaciones dentro de la Cuenca y sus alrededores (Figura 1.19.). Las estaciones consideradas son indicativas de la variabilidad temporal de las precipitaciones.

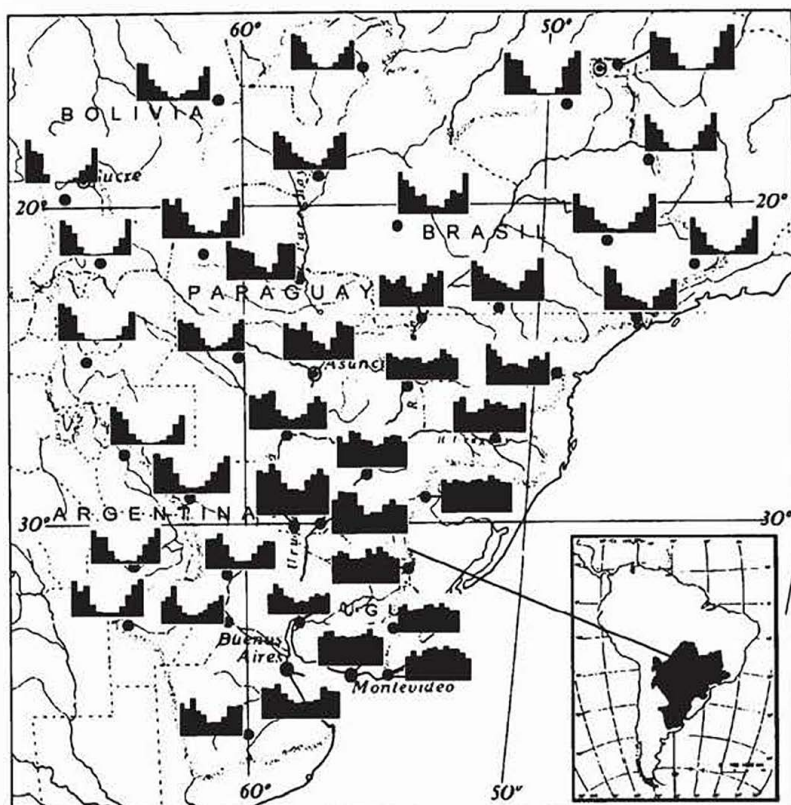
Al considerar la variación anual en los pluviogramas, se observa inmediatamente la escasez pluvial en el invierno (junio-agosto) en la mayor parte de la Cuenca, lo cual se debe a que durante dicha estación el anticiclón del Atlántico se extiende sobre el continente para unirse con el anticiclón del Pacífico. El resultado es la supresión de los procesos convectivos y, en consecuencia, de las lluvias.

Este tipo de carácter tropical con lluvias intensas en verano y sequía en invierno, predomina en las áreas de reducida producción de lluvia anual en el oeste de la Cuenca, y en las regiones situadas al norte del trópico de Capricornio hasta el Planalto del Brasil. Hacia el sur, este tipo es paulatinamente reemplazado por una notable persistencia de las lluvias durante todo el año, sobre todo en la cuenca del río Uruguay y también en la parte oriental de la provincia de Buenos Aires.

Las lluvias en el sur de la cuenca son de dos tipos: chubascos y lluvias menos intensas, pero persistentes y extensas, que ocurren con el desarrollo de frentes retrógrados y durante una sudestada. Entre estas dos regiones con lluvias de distintas características, existen además, dos zonas de transición: una con el máximo principal de precipitación en otoño (marzo, abril), que se encuentra a lo largo del bajo río Paraná-Paraguay. En la otra zona, más arriba, en las riberas del río Paraguay esta característica se modifica en una prolongación de la precipitación veraniega, abarcando todo el otoño. Son éstas, también, las áreas que atraviesan las líneas de inestabilidad.

En la región al norte del trópico de Capricornio, la concentración pluvial en los meses de verano es superior al 45% de la precipitación anual y en las zonas andinas llega hasta un 70%, mientras que la estación seca produce solamente un 5%, y aún menos, del total anual.

**Figura 1.19.**  
Pluviogramas  
típicos en la  
Cuenca del  
Plata (Periodo  
1961-90).



En la zona con lluvias durante todo el año, la pluviosidad de los meses húmedos es de alrededor del 30% del total y se aproxima considerablemente a la de los meses secos, que alcanzan de un 20% al 25%. Por ello, no se puede hablar ya, realmente, de meses lluviosos y secos.

Desde el punto de vista hidrológico, el suministro de agua de lluvia a la tierra y a los ríos tiene un notable máximo en verano en toda la Cuenca. El máximo en la curva tiene mayor duración para el río Paraguay y sus afluentes brasileños, porque la actividad pluvial continúa hasta el otoño. Los afluentes del Paraná, al sur del trópico de Capricornio, pertenecen al tipo precipitación anual donde ocurren lluvias durante todo el año.

Es difícil hablar de un ciclo hidrológico anual para estas áreas con lluvias todo el año, mientras en el resto de la Cuenca el año hidrológico dura de septiembre a agosto del año siguiente.

Respecto de la vegetación y agricultura, cabe señalar que en las zonas con una marcada estacionalidad de las precipitaciones, el factor mínimo para el desarro-



llo de las plantas es el agua; mientras en la zona de la cuenca del río Uruguay el factor biológico mínimo es el calor, que varía entre invierno y verano mucho más que el agua de lluvia que es suministrada uniformemente durante el año.

### Precipitación media anual

La precipitación media anual es, naturalmente, una información muy general pero, sin embargo, muy útil para caracterizar el régimen de lluvia en grandes regiones como la Cuenca del Plata.

La precipitación media anual (período 1961-1990) sobre la cuenca es mayor a 1.200 mm (Figura 1.20.) y está distribuida desigualmente. Hay un máximo absoluto de más de 2.250 mm anuales sobre la parte media de la cuenca del río Iguazú y la parte media de la alta cuenca del río Uruguay y un mínimo absoluto en las altas cuencas de los ríos Pilcomayo y Bermejo, donde la precipitación media anual es aproximadamente de 500 mm por año.

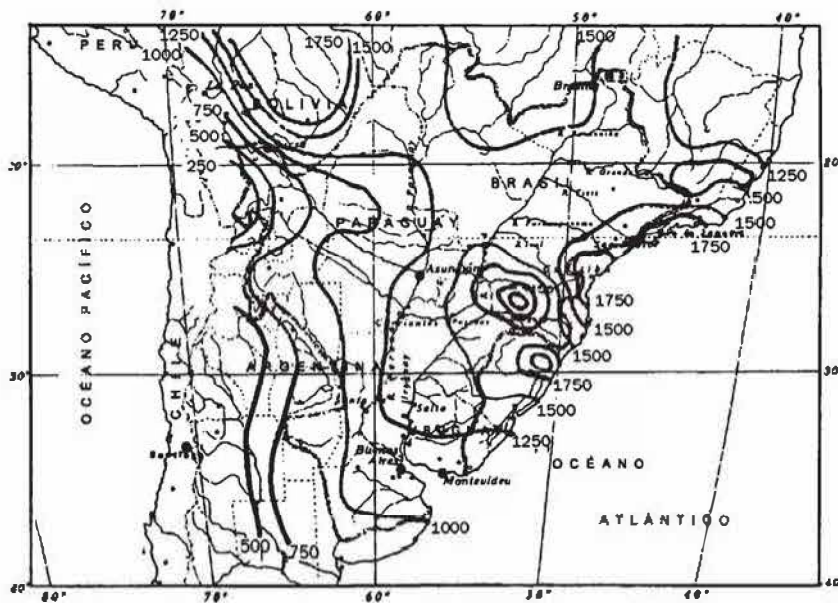
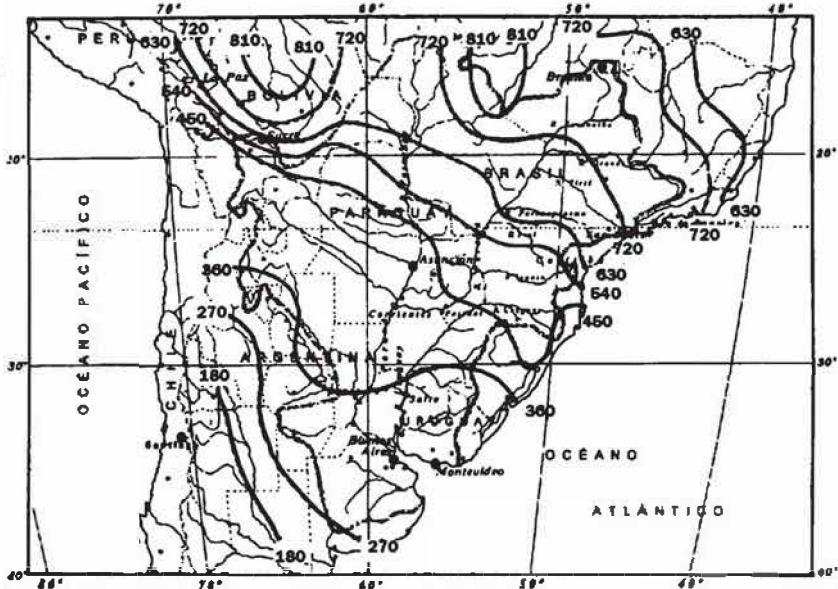


Figura 1.20. Precipitación media anual en mm (Período 1961-90).

### Precipitación media de verano (Dic-Ene-Feb)

En esta región el verano (Dic-Ene-Feb) es la estación más húmeda, con un promedio de más de 480 mm sobre toda la cuenca. Durante esta estación el máximo maximorum de precipitación sobre la cuenca se desplaza al nordeste y norte de ésta (Figura 1.21.).

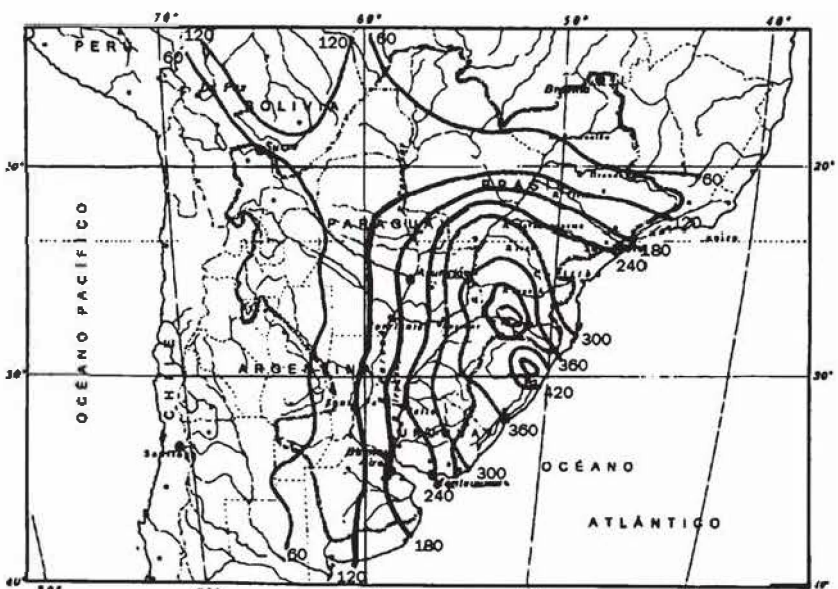
Figura 1.21. Precipitación media de verano en mm (Periodo 1961-90).



**Precipitación media de invierno (Jun-Jul-Ago)**

El invierno (Jun-Jul-Ago) es la estación más seca, con un promedio de precipitación sobre toda la cuenca de tan sólo 130 mm. Con un máximo absoluto de más de 480 mm en igual posición que en las precipitaciones medias anuales, las isoyetas se orientan en orden decreciente de este a oeste hacia el norte, y también decrecen hacia el oeste con una orientación norte-sur (Figura 1.22.). Los mínimos se encuentran, entonces, en el extremo norte y en la región cordillerana de la cuenca.

Figura 1.22. Precipitación media de invierno, en mm (Periodo 1961-90).



## Bibliografía

- Essenwanger, O.M.** (1985). *World Survey of Climatology. Vol 1: General Climatology*. Elsevier, Amsterdam.
- Flohn, H.** (1985). *World Survey of Climatology. Vol. 2: General Climatology*. Elsevier, Amsterdam.
- García, N.O.** (1994). *South America Climatology. Quaternary International*, Vol 21, pp. 7-27. Elsevier, Amsterdam.
- (1994). *Elementos de Climatología*. Colección Ciencia y Técnica, N° 6, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, 280 p.
- García, N.O. & Vargas, W. M.** (1996). *The Spatial Variability of the Runoff and Precipitation in the «Río de la Plata» Basin*. *Hydrol. Sci. J.*, 43, pp. 279-299.
- Hoffman, J. A. J.** (1975). *Atlas Climático de América del Sur, Vol. 1*. Organización Meteorológica Mundial. UNESCO, Geneva.
- Landsberg, H.E.** (1981). *World Survey of Climatology. Vol. 3: General Climatology*. Elsevier, Amsterdam.
- Kendrew, W. E.** (1948). *Climate of the Continents*. Oxford University Press, pp. 345, New York.
- Schott, G.** (1926). *Geographic des Atlantischen Oceans*. Boysen, Hamburg, 438 p.
- Schwerdtfeger, W.** (1976). *Climates of Central and Southern America. World Survey of Climatology, Vol. 12*. Elsevier, Amsterdam, 532 p.
- Iriondo, M.** (1975). *Geomorfología y Sedimentología del río Colastiné*. *Rev. Asoc. Geológica Argentina*, 30:145-155.
- (1984). *The Quaternary of Northeastern Argentina. Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*. J. Rabassa (Ed.). A.A. Balkema Publ., Vol. 2: 51-78. Rotterdam.
- (1988). *A comparison between the Amazon and Paraná river systems*, *Mitteilungen Geologische-Palaontologisches Institut, Universität Hamburg – SCOPE-UNEP Sonderband*, 66:77-92, Hamburgo.
- (1990). *«Relación longitud de onda/caudal en los ríos chaco-pampeanos»*, III Reunión Argentina de Sedimentología, Res. Exp.:145-150, San Juan.
- (1992). *«Geomorphological Map of the South American Plains – Wall Map»*, Escala 1:5.000.000 Grant 4127/88 National Geographic Society/ CONICET PID 95100/88.
- (1993). *«Geomorphology and Quaternary of the Chaco, South America»* *Geomorphology*, 7:289-303, Elsevier Sc. Pu.
- (1996). *«Estratigrafía del Cuaternario de la cuenca del Uruguay»*, XIII Congreso Geológico Argentino, Actas IV:15-25, Buenos Aires.
- (1999). *«The Neogene of the Llanos-Chaco-Pampa depression»*, *Episodes* 22 (3):226-231.
- Iriondo, M. y Krohling, D.** (1995). *«El Sistema Eólico Pampeano»*, *Com. Museo Prov. Ciencias Naturales Florentino Ameghino (NS)*, 5(1):1-68, Santa Fe.
- Krohling, D.** (1996). *Caracterización Geoquímica de las aguas de la cuenca del río Carcarañá, provincia de Santa Fe*. *Publ. Com. Museo Prov. Cs. Naturales «F. Ameghino»*. (NS), 5 (2):1-18, Santa Fe.

— (1998). *Geomorfología y Estratigrafía del Cuaternario de la cuenca del río Carcarañá, desde la confluencia de los ríos Tercero y Cuarto*. Tesis Doctoral. Fac. Cs. Ex. Fis. y Nat. Univ. Nac. de Córdoba, 225 pp. (inédita).

— (1999). "Upper Quaternary of the lower Carcarañá basin, North Pampa, Argentina" En : *Paleoclimates of the Southern Hemisphere* (T. Partridge, P. Kershaw & M. Iriondo, eds.) *Quaternary International*, 57/58:135-148, Pergamon Press.

**Leopold, L.; Wolman, M. y Miller, J.** (1964). "*Fluvial processes in Geomorphology*" Freeman & Co., 486 pp. San Francisco.

**OEA** (1969). *Cuenca del Río de la Plata. Estudio para su Planificación y Desarrollo*. Inventario de datos hidrológicos y climatológicos.

# 1.

## **CARACTERÍSTICAS DE LAS CUENCAS DE APORTE Actualización**

Aspectos climatológicos:

José Luis MACOR e Ignacio CRISTINA

Aspectos hidrogeológicos:

Ofelia TUJCHNEIDER

# 1.

## **Características climatológicas de la Cuenca del Plata**

Campos medios de temperatura

Temperatura media anual

Temperatura media de verano (enero)

Temperatura media de invierno (julio)

Campos medios de precipitación

Precipitación media anual

Precipitación media de verano

Precipitación media de otoño

Precipitación media de invierno

**Características hidrogeológicas de la cuenca sedimentaria del Paraná. El Sistema Acuífero Guaraní en el tramo medio de la cuenca del río Paraná**

**Bibliografía**

### **Características climatológicas de la Cuenca del Plata**

En esta edición se realiza una actualización de las características climáticas de la Cuenca del Río de la Plata para el período 1981–2010, mediante el análisis de los campos medios de temperatura y de precipitación, variables fuertemente vinculadas a los procesos hidrológicos de la cuenca.

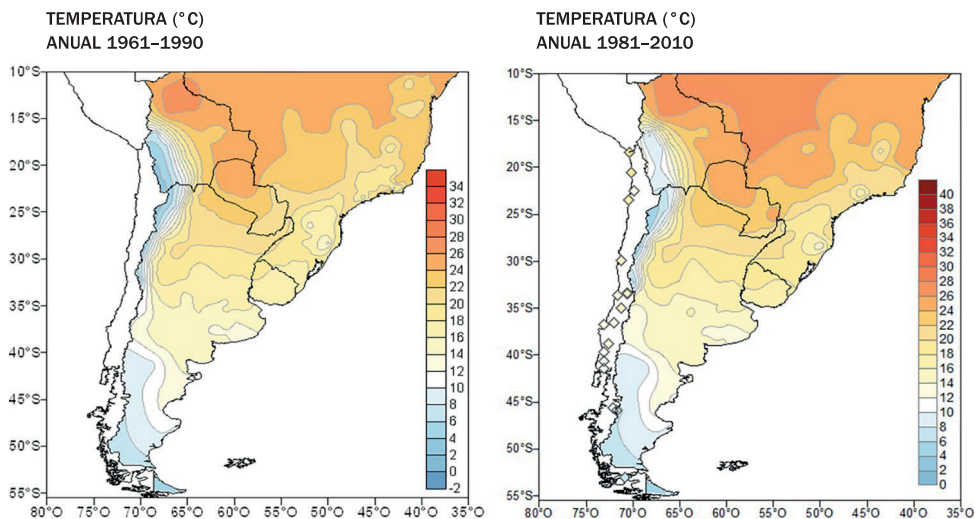
#### **Campos medios de temperatura**

##### **Temperatura media anual**

En la parte continental, los campos medios de temperatura de la Cuenca del Plata mantienen, para el período de análisis, las mismas características estacionales diferenciadas observadas en el período anterior (1961–1990).

Un análisis comparativo de las temperaturas medias anuales entre ambos períodos arroja como resultado la observación de un aumento generalizado de dichas temperaturas (mayores a 24 °C), en latitudes inferiores a los 25° de latitud sur, correspondiendo a la cuenca alta de los ríos Paraná y Paraguay (Planicie del Pantanal, Planalto Meridional y Planicie Costera brasileña).

En tanto, para latitudes mayores a los 25° de latitud sur, no se observan variaciones marcadas de los rangos de temperatura, manteniéndose similares al período 1961–1990. Las temperaturas medias anuales por debajo de los 20 °C pueden observarse en la región Chaco–Pampeana argentina y en el Rio Grande do Sul en Brasil (<Figura 1.23. Temperatura media anual, períodos 1961–1990 y 1981–2010>).

**Figura 1.23.** Temperatura media anual, períodos 1961–1990 y 1981–2010.Fuente: CRC–SAS (<https://www.crc-sas.org/es/>)

Un análisis similar se efectuó con las temperaturas mínimas y máximas anuales para ambos períodos. En dicho análisis se observa que las isotermas para ambas temperaturas, mínimas y máximas, se mantienen similares en ambos períodos para latitudes mayores a los 25° de latitud sur, mientras que para latitudes menores las isotermas abarcan mayores áreas de cobertura. Esto último indica un aumento de temperaturas en algunas áreas de la cuenca alta.

### Temperatura media de verano (enero)

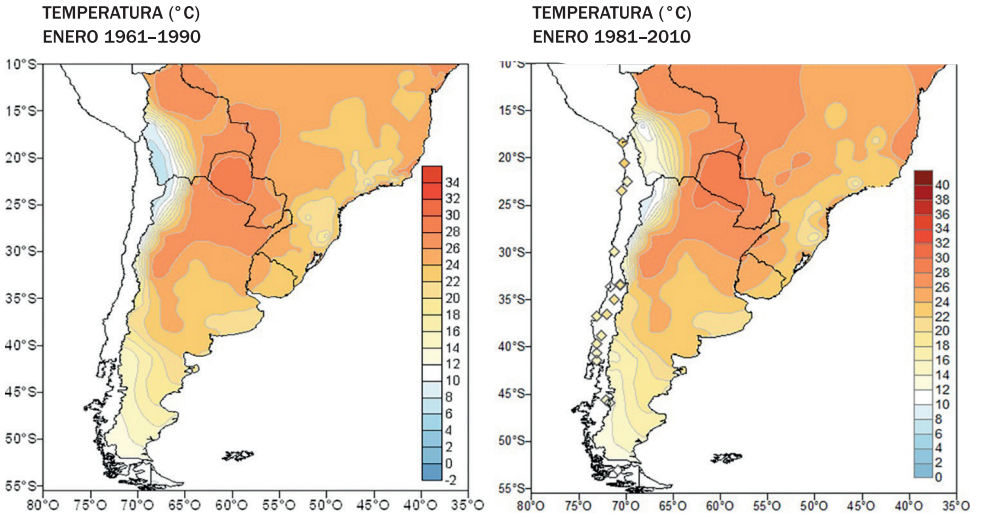
Se efectúa aquí un análisis de las temperaturas medias del mes de enero para el período de análisis y se compara con el período anterior. Se toma este mes como representativo de la estación de verano.

Las mayores temperaturas medias del mes (por encima de los 24 °C) se localizan en la zona continental de Sudamérica. Puede observarse (<Figura 1.24. Temperatura media de enero, períodos 1961–1990 y 1981–2010>) que la isoterma de 24 °C ha ampliado el área de cobertura, principalmente en latitudes inferiores a los 25° de latitud sur, respecto a la misma isoterma para el período anterior. En cambio, para latitudes mayores, el área cubierta por temperaturas inferiores a dicha isoterma se mantiene similar al período 1961–1990.

Esto indica que en las áreas fuentes del Sistema Paraná–Paraguay, las temperaturas medias de enero han incrementado las áreas de cobertura respecto del período anterior en la cuenca superior.



**Figura 1.24.** Temperatura media de enero, períodos 1961–1990 y 1981–2010.  
Fuente: CRC–SAS (<https://www.crc-sas.org/es/>)

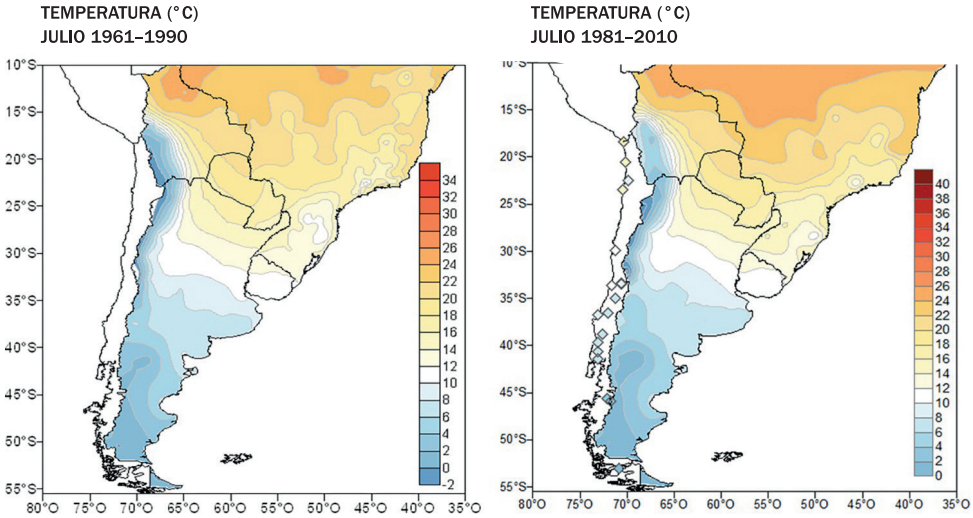


### Temperatura media de invierno (julio)

Al igual que en el caso de la estación de verano, se toma al mes de julio como mes representativo del invierno. Para esta estación del año hay un corrimiento de las isotermas hacia el norte.

En el análisis de las temperaturas medias del mes de julio del período 1981–2010 respecto del período 1961–1990, se observa que para las latitudes mayores a los 25° de latitud sur las isotermas de invierno se mantienen casi similares entre ambos períodos. Sin embargo, para latitudes inferiores, las isotermas mayores a 22 °C aumentaron su área de cobertura hacia el sur. Es decir, para este período de análisis hubo un aumento de las temperaturas en invierno en gran parte de la cuenca superior del Sistema Paraná–Paraguay y la Planicie Costera brasileña (<Figura 1.25. Temperatura media de julio, períodos 1961–1990 y 1981–2010>).

**Figura 1.25.** Temperatura media de julio, períodos 1961–1990 y 1981–2010.  
Fuente: CRC–SAS (<https://www.crc-sas.org/es/>)



Del análisis de las temperaturas medias anuales y mensuales para enero y julio se puede concluir que en la cuenca alta del Sistema Paraná–Paraguay se ha verificado un leve aumento de las áreas afectadas por mayores temperaturas, mientras que en la zona inferior de la cuenca, las temperaturas se mantienen similares en ambos períodos. Esa diferencia entre los dos períodos analizados puede no ser tan marcada, ya que ambos se solapan en el período de diez años, 1981–1990.

### Campos medios de precipitación

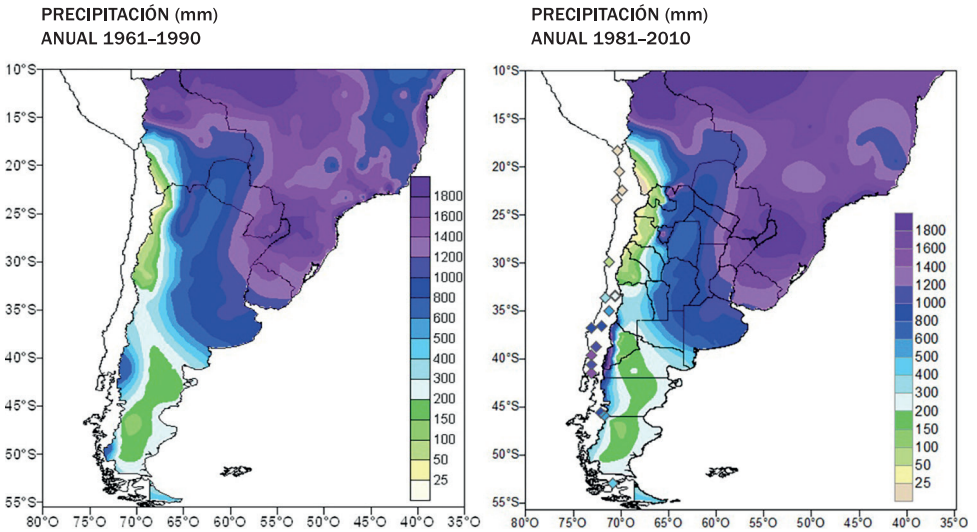
Desde el punto de vista de la variación pluviométrica anual, la mayor parte de la Cuenca del Río de la Plata presenta los mismos patrones de lluvia que en el período 1961–1990. Esto es, período de invierno con escasez de precipitaciones y lluvias intensas en verano, principalmente en las áreas ubicadas al oeste de la cuenca y en latitudes inferiores al trópico de Capricornio. En cambio, en el sureste de la cuenca, se observa una mayor persistencia de lluvias. Por otro lado, se verifica una prolongación de la precipitación estival sobre el otoño, pudiendo alcanzar valores de precipitación máximos para esa estación del año. Esto se observa en zonas de la cuenca media y baja del Sistema Paraná–Paraguay.

## Precipitación media anual

La precipitación media anual es un indicativo del régimen de lluvia de la cuenca. En general, la precipitación media anual se mantiene superior a los 1200 mm para los dos períodos analizados.

De la comparación de la distribución areal de las isohietas en ambos períodos se visualiza una distribución más homogénea de las lluvias para el período 1981–2020. También se observa un mayor desarrollo areal de precipitaciones por encima de los 1400 mm en la Planicie del Pantanal, Planalto Meridional brasileño y noreste argentino (<Figura 1.26. Precipitación media anual, períodos 1961–1990 y 1981–2010>).

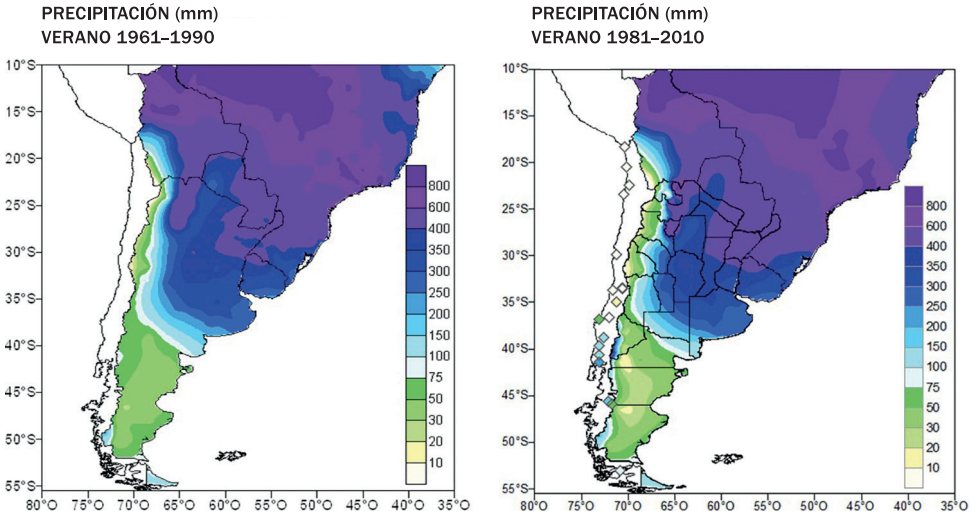
**Figura 1.26.** Precipitación media anual, períodos 1961–1990 y 1981–2010.  
Fuente: CRC–SAS (<https://www.crc-sas.org/es/>)



## Precipitación media de verano

La estación de verano se presenta como la más húmeda, con montos de lluvia por arriba de los 400 mm en la mayor parte de la cuenca. Del análisis comparativo entre los períodos 1961–1990 y 1981–2010 se observa una mayor homogeneidad de la distribución de las lluvias en el segundo período y un aumento de los montos de precipitación en el oeste paraguayo y en las nacientes de los ríos Bermejo y Pilcomayo (<Figura 1.27. Precipitación media de verano, períodos 1961–1990 y 1981–2010>).

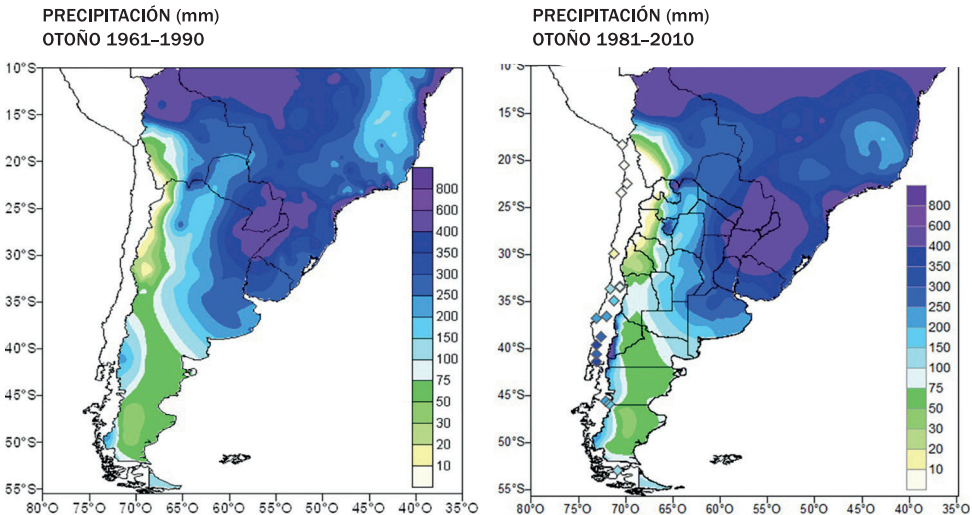
**Figura 1.27.** Precipitación media de verano, períodos 1961–1990 y 1981–2010.  
Fuente: CRC–SAS (<https://www.crc-sas.org/es/>)



### Precipitación media de otoño

Como se mencionó anteriormente, se observa un notable aumento de la precipitación media para la estación de otoño como prolongación de las precipitaciones de verano, particularmente en el noreste argentino, cuenca del río Iguazú, sur de Brasil y Uruguay. (<Figura 1.28. Precipitación media de otoño, períodos 1961–1990 y 1981–2010>).

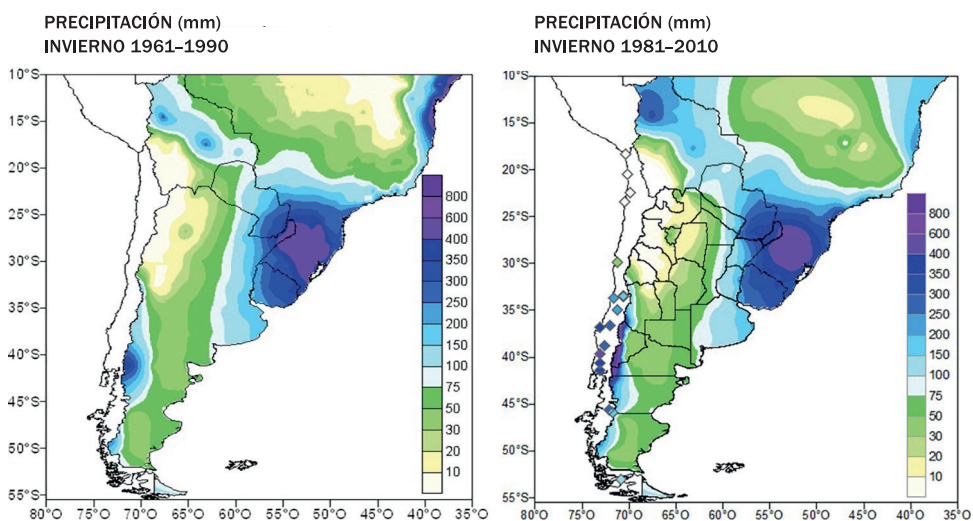
**Figura 1.28.** Precipitación media de otoño, períodos 1961–1990 y 1981–2010.  
Fuente: CRC–SAS (<https://www.crc-sas.org/es/>)



## Precipitación media de invierno

Siendo el invierno la estación del año más seca, en el análisis comparativo entre los dos períodos considerados se observa un incremento de la precipitación media para esta estación por encima de los 100 mm en el occidente paraguayo (región del Boquerón) y oriente boliviano, áreas aportantes al río Paraguay (<Figura 1.29. Precipitación media de invierno, períodos 1961–1990 y 1981–2010>).

**Figura 1.29.** Precipitación media de invierno, períodos 1961–1990 y 1981–2010.  
Fuente: CRC–SAS (<https://www.crc-sas.org/es/>)



## Características hidrogeológicas de la cuenca sedimentaria del Paraná. El Sistema Acuífero Guaraní en el tramo medio de la cuenca del río Paraná

Las cuencas sedimentarias del Paraná y la Chaco–Paranense son portadoras de un gran reservorio de aguas subterráneas denominado Sistema Acuífero Guaraní (SAG). Se trata de un acuífero transfronterizo, de una extensión aproximada estimada en 1 200 000 km<sup>2</sup>, que subyace los territorios de cuatro países: Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. Su nombre fue dado en honor a los habitantes originarios de la región (UNESCO–OEA, 2007) (<Figura 1.30. Área de ocurrencia aproximada del SAG. Fuente: Tujchneider et ál., 2008>).

**Figura 1.30.**  
Área de  
ocurrencia  
aproximada del  
SAG. Fuente:  
Tujchneider et  
ál., 2008.

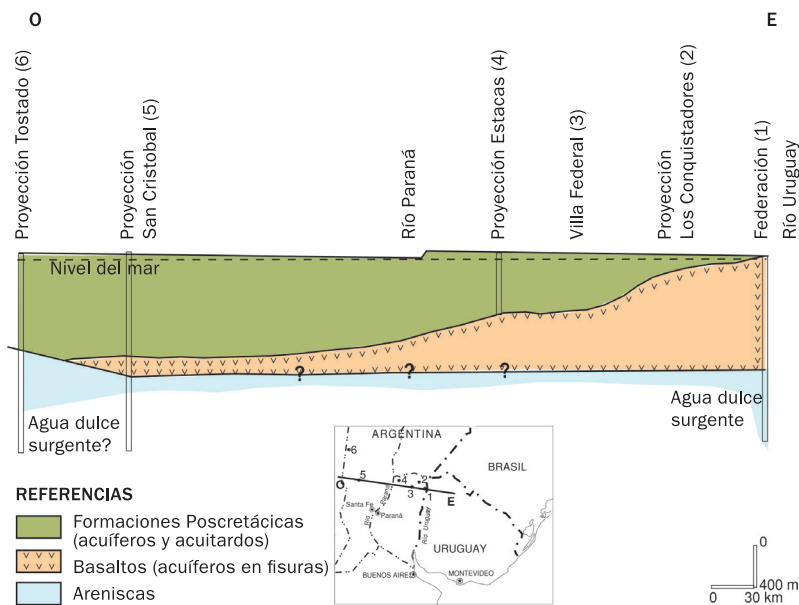


- REFERENCIAS**
- Áreas de afloramiento
  - Borde estimado del acuífero
  - Capitales nacionales
  - Límite provincial/estatal
  - Límite internacional

**Cuadro 1.2.**  
Secuencia  
estratigráfica  
regional.  
Fuente:  
Tujchneider et  
ál., 2007.

| Edad                                      | Formación  | Litología  |
|---|--|--|
| Holoceno                                  | Depósitos aluviales recientes y actuales indiferenciados | Arenas y limos arcillosos                                |
| Pleistoceno superior<br>Pleistoceno medio | “Grupo Pampa”  | Arcillas, limos y loess                                  |
| Pleistoceno inferior<br>Plioceno superior | Ituzaingó (“Puelches”)                                   | Arenas cuarzosas ocráceas fluviales                      |
| Mioceno superior                          | Paraná   | Arcillas verdes y arenas grises marinas                  |
| Mioceno inferior<br>Eoceno                | Olivos / Fray Bentos                                     | Arcillas rojizas, calcáreas y yesíferas                  |
| Paleoceno<br>Cretácico superior           | Mariano Boedo / Yeruá                                    | Areniscas calcáreas<br>Arcilitas                         |
| Cretácico inferior<br>Jurásico superior   | Serra Geral<br>Tacuarembó                                | Basaltos y areniscas cuarzosas                           |
| Triásico superior                         | Buena Vista  | Areniscas cuarzosas                                      |
| Pérmico inferior                          | Chacabuco  | Arcilitas y tufitas                                      |
| Carbónico superior                        | Charata<br>Sachayoj                                      | Limolitas y areniscas<br>Arcilitas lutíticas y areniscas |
| Precámbrico                               | “Basamento cristalino”                                   | Granitos-gabros y rocas metamórficas                     |





**Figura 1.31.** Perfil geológico–hidrogeológico esquemático este–oeste, elaborado por Filí y Tujchneider, 1997 (Montaño et ál., 1998).

Los acuíferos se denominan según el nombre de la formación geológica portadora del agua. En la definición de los sistemas acuíferos transfronterizos es habitual que los países acuerden un nombre representativo para la región, que se relacione con alguna característica histórica, geográfica o de otra índole.

El SAG está alojado en arenas de origen eólico y fluvial de los períodos Triásico y Jurásico de la Formación Misiones (conocida en Brasil como Botucatú y en Uruguay como Tacuarembó), que son generalmente cubiertas por rocas basálticas cretácicas de la Formación Curuzú Cuatiá (llamada Serra Geral en Brasil y Arapey en Uruguay). Estas últimas rocas volcánicas suministran un alto grado de confinamiento en casi el 90 % de la cuenca hidrogeológica. La figura 1.31 presenta un corte transversal en dirección este–oeste, que muestra la profundidad y espesor de las formaciones geológicas en el tramo medio del río Paraná (a la altura del paralelo 30° latitud sur).

El cuadro 1.2 muestra la secuencia estratigráfica esquemática regional para el tramo medio del río Paraná, desde las rocas que componen el basamento cristalino hasta los sedimentos más recientes, de acuerdo con Filí (2001) y Tujchneider y Tineo (2005). Los sondeos eléctricos verticales realizados en territorio de la provincia de Santa Fe indican una profundidad del techo de los basaltos de aproximadamente 690 m y un espesor de 685 m. Inferiormente y a una profundidad de 1300 m se identifican sedimentos que podrían estar saturados. La figura 1.32 presenta esta descripción estratigráfica en un corte transversal a la altura del paralelo 31° latitud sur.

<<

**Figura 1.32.**  
 Perfil  
 estratigráfico  
 en el tramo  
 medio del río  
 Paraná. Fuente:  
 Tujchneider et  
 ál., 2008.

The figure is a stratigraphic profile showing geological layers and elevations. The vertical axis represents elevation in meters, ranging from 0 to -1200. The horizontal axis shows the profile from West (O) to East (E). The profile is divided into two provinces: Provincia de SANTA FE on the left and Provincia de ENTRE RÍOS on the right. Key locations marked along the profile include VIDELA, LAG. PAIVA, NARE, A' SALADILLO, VALLE ALUVIAL DEL RÍO PARANÁ, SANTA ELENA, and ESTACAS. Geological formations are labeled as Fm. HERNANDARIAS, Fm. ITUZAINGO, Fm. PARANÁ, Fm. FRAY BENTOS, Fm. OLIVOS, Fm. PAY UBRE + Fm. YERUÁ, CAPAS DE PAIVA, Fm. SERRAGERAL, and Fm. TACUAREMBÓ ?. Elevations at various points are indicated: 38, -60, -90, -62, -76, -70, -46, -70, -31, 7, 40, -10, -12, -32, -290, -320, -450, -596, -1100, -970, and -1246. A scale bar at the bottom right indicates 0 to 50 km. Three inset maps are provided: the top one shows South America with Argentina highlighted; the middle one shows the province of Entre Ríos; the bottom one shows the location of the profile in the Department of Guaymas.

Provincia de SANTA FE

Provincia de ENTRE RÍOS

VIDELA

LAG. PAIVA

NARE

A' SALADILLO

VALLE ALUVIAL DEL RÍO PARANÁ

SANTA ELENA

ESTACAS

Fm. HERNANDARIAS 40

Fm. ITUZAINGO 10

Fm. PARANÁ

Fm. FRAY BENTOS

Fm. OLIVOS

Fm. PAY UBRE + Fm. YERUÁ

CAPAS DE PAIVA

Fm. SERRAGERAL

Fm. SERRAGERAL

Fm. TACUAREMBÓ ?

0

E

200

100

0

-100

-200

-300

-400

-500

-600

-700

-800

-900

-1000

-1100

-1200

38

-60

-90

-62

-76

-70

-46

-70

-31

7

40

-10

-12

-32

-290

-320

-450

-596

-1100

-970

-1246

0

10

20

30

40

50Km

Escala Horizontal: 1:1.250.000

Escala Vertical: 1:6.250

Exageración Vertical: 200x

75



Las áreas de afloramiento de las areniscas se presentan principalmente en los bordes oeste y este de la cuenca y representan el 10 % de la extensión total del acuífero. El espesor medio es de 250 m y alcanza profundidades mayores a los 1000 m. El volumen total de agua dulce almacenada se estima en aproximadamente 40 000 km<sup>3</sup> (Montaño et ál., 1998; Foster et ál., 2006).

En general, el agua almacenada es de buena calidad y alcalina, principalmente bicarbonatadas cálcicas y magnésicas en las áreas próximas al afloramiento, y sódicas en las áreas más profundas. En zonas profundas puede contener un exceso de fluoruros o de salinidad. La temperatura varía de 18 a 63 °C, dependiendo de la profundidad a la que se encuentra el acuífero, ya que está dada por el grado geotérmico.

La recarga del SAG se produce por infiltración del agua excedente de lluvia en las áreas de afloramiento de las areniscas —cuya extensión es de aproximadamente 150 000 km<sup>2</sup>— y en otra zona mucho más extensa donde la cubierta de basaltos fracturados es relativamente delgada (Tujchneider et ál., 2007). En territorio argentino, a pesar de la poca cantidad de datos, fue identificada la existencia de una pequeña área de recarga asociada al Alto de Mercedes, en la provincia de Corrientes. La existencia de zonas de descarga del SAG como flujo ascendente en los humedales Esteros del Iberá aún no fue confirmada (Foster et ál., 2006; OEA, 2009).

En Brasil, el SAG se ubica en el subsuelo de los ocho estados más desarrollados del país y se lo utiliza principalmente para consumo humano e industrial, riego, balneoterapia y agua mineral.

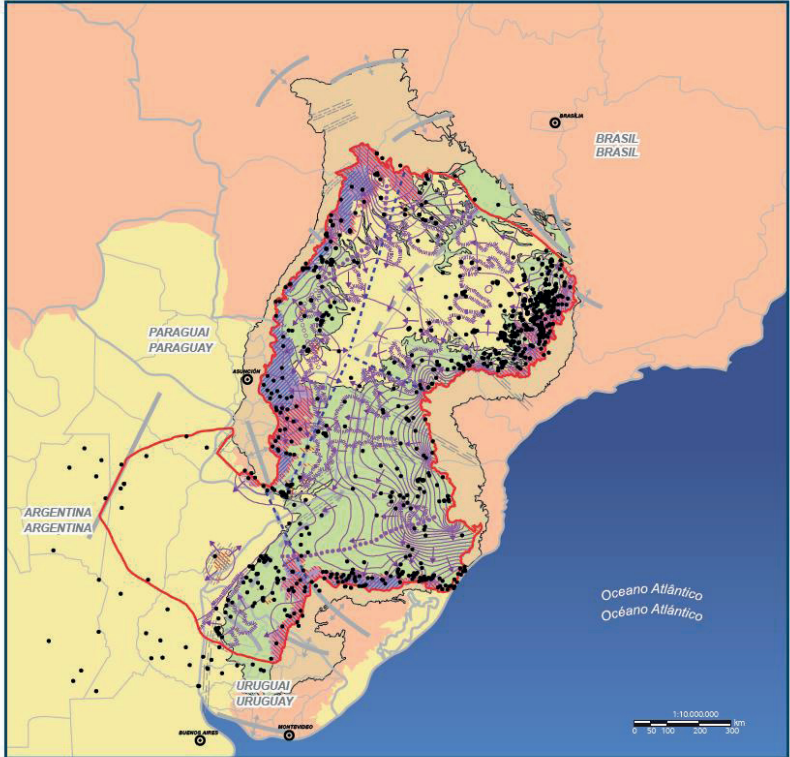
En Paraguay, el uso principal es para suministro de agua a villas rurales ubicadas en la región este del país. En Argentina y en Uruguay, el uso principal es la balneoterapia y la recreación, aunque en Uruguay también se lo utiliza para suministro de agua e irrigación. En Uruguay, de los pozos profundos existentes, siete fueron construidos en la década de los noventa. En Argentina, el primer pozo infrabasáltico del país se construyó en 1994 en la ciudad de Federación, provincia de Entre Ríos (Tujchneider et ál., 2007).

Teniendo en cuenta la vital importancia de este recurso y la necesidad de que su aprovechamiento sostenible se fundamente en bases científicas, en abril de 1996, el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo de Canadá acordó con la Universidad Nacional del Litoral, la Universidad de Buenos Aires (Argentina) y la Universidad de la República (Uruguay) la participación coordinada de sus grupos de investigaciones en el Programa Acuíferos Regionales de América Latina, financiado íntegramente por dicha institución, con la misión de elaborar un informe sobre el estado del conocimiento del Acuífero Guaraní para ese entonces (Montaño et ál., 1998).

Entre los años 2003 y 2008 se llevó adelante el Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Acuífero Guaraní, creado con el propósito de apoyar a Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay en la elaboración e implementación de un marco común constitucional, legal y técnico que maneje y preserve al acuífero transfronterizo para las generaciones actuales y futuras. El proyecto fue desarrollado gracias a la colaboración del Fondo Global para el Medio Ambiente (GEF), el Banco Mundial (BM), la Organización de los Estados Americanos (OEA), los gobiernos de Holanda y Alemania y la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA). Permitió lograr un mayor desarrollo del conocimiento hidrogeológico y delinear un plan de acción estratégico. La figura 1.33 muestra el mapa hidrogeológico esquemático donde se indican las curvas isopotenciométricas, áreas de recarga y descarga, que fuera logrado en estas investigaciones.

Hasta 2010 hubo un trabajo de colaboración positiva de los cuatro países que participaron activamente, que culminó con la adopción de un Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní (AAG). Posteriormente, entre 2010 y 2017, se produjo una desaceleración de la cooperación transfronteriza, limitada en este período a proyectos e iniciativas transfronterizos esporádicos, vinculados a proyectos internacionales pasados y existentes. En este período, Argentina, Uruguay y Brasil ratificaron el AAG (Manganelli et ál., 2018). Una tercera fase comenzó a motorizarse en 2017, debido a que finalmente Paraguay ratificó dicho acuerdo, aunque aún se deben cumplimentar ciertos procedimientos para que pueda entrar en vigor. Actualmente (julio de 2020), está por comenzar la ejecución de un nuevo Proyecto GEF: Implementation of the Guaraní Aquifer Strategic Action Programme: Enabling Regional Actions, donde el Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas integrará la Unidad de Coordinación del proyecto para dar el soporte técnico a la ejecución.

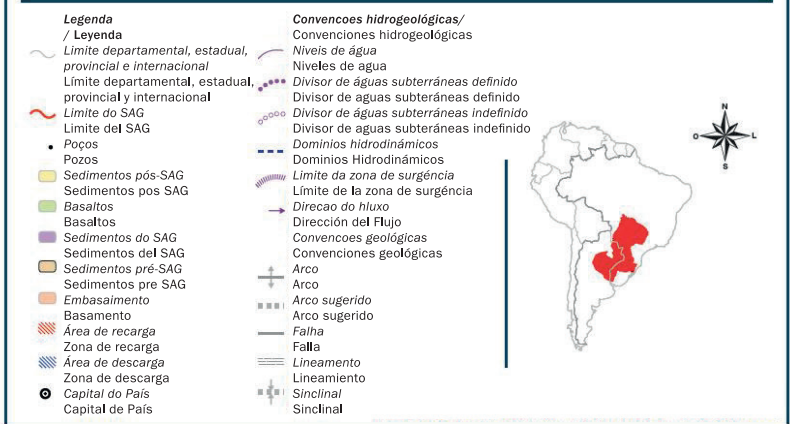
En el subsuelo de la provincia de Santa Fe, a profundidades mayores a los 1000 m, se estima la presencia de agua salobre / salada, a presión. No constituye un recurso útil para las necesidades humanas y sí una situación de riesgo si se realizan perforaciones profundas sin diseño adecuado, que podrían favorecer la migración del agua salada a niveles superiores y la contaminación de niveles acuíferos de agua dulce, suprayacentes.



**Figura 1.33.**  
Sistema  
Acuífero  
Guaraní.  
Fuente: OEA,  
2009.

**Figura 2.** Mapa Hidrogeológico Esquemático con potenciometría e identificação de áreas de recarga e descarga

**Figura 2.** Mapa Hidrogeológico Esquemático con las alturas de agua e identificación de áreas de recarga e descarga



Fonte: SG/SAG, Modificado do Informe Final de Hidrogeología, Consorcio Guaraní 2008.  
Fuente: SG/SAG, Modificado del Informe Final de Hidrología, Consorcio Guaraní 2008.

## Bibliografía

- Filí, M.F. (2001).** Síntesis Geológica e Hidrogeológica del noroeste de la Provincia de Entre Ríos – República Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 112, 25–3.
- Foster, S., Kemper, K., Garduño, H., Hirata, R. y Nanni, M. (2006).** La Iniciativa del Acuífero Guaraní para la Gestión Transfronteriza del Agua Subterránea. En *Gestión Sustentable del Agua Subterránea. Lecciones de la Práctica. Colección de Casos Esquemáticos. Caso 9* (pp. 20). GW–MATE Banco Mundial. <https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/case-studies/americas-and-caribbean/transboundary-groundwater-management-issues-for-guarani-aquifer-368-spanish.pdf>
- Foster, S., Hirata, R., Vidal, A., Schmidt, G. y Garduño, H. (2009).** The Guaraní Aquifer Initiative – Towards Realistic Groundwater Management in a Transboundary Context. En *Sustainable Groundwater Management: Concepts and Tools. Sustainable Groundwater Management. Lessons from Practice Case Profile Collection Number 9* (pp. 28). GW–MATE World Bank. <https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/case-studies/americas-and-caribbean/transboundary-groundwater-management-issues-for-guarani-aquifer-368-english.pdf>
- Montaño, J., Tujchneider, O., Auge, M., Filí, M., Pérez, M., Paris, M., D’Elía, M., Nagy, N., Collazo, P. y Decoud, P. (1998).** *Acuíferos Regionales en América Latina. Sistema Acuífero Guaraní. Capítulo Argentino–Uruguayo.* Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral.
- OEA. Organización de Estados Americanos (2009).** *Aquífero Guaraní: programa estratégico de ação. Acuífero Guaraní: programa estratégico de acción.* (Edição bilíngüe. Brasil; Argentina; Paraguai; Uruguai). [www.ceregas.org/publicaciones](http://www.ceregas.org/publicaciones)
- Sindico, F., Hirata, R. y Manganelli, A. (2018).** The Guaraní Aquifer System: From a Beacon of hope to a question mark in the governance of transboundary aquifers. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 0(20), 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.008>
- UNESCO–OEA (2007).** *Sistemas Acuíferos Transfronterizos de las Américas. Evaluación Preliminar.* Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y El Caribe. PHI–VI. Serie ISARM Américas nro. 1.
- Tujchneider, O., Tineo, A. (2005).** Geohydrogeology in plain areas: A conceptual model of a complex system, Los Saladillos, Santa Fe Province, Argentina. En Bocanegra, Hernández, Usunoff (Ed) *Groundwater and Human Development.*

*Selected Papers on Hydrogeology*. (pp. 145–158).  
Balkema Publishers.

**Tujchneider, O., Pérez, M., Paris, M. y D´Elía, M. (2007).** The Guaraní Aquifer System: state-of-the-art in Argentina. En Laurence Chery & Ghislain de Marsily (Ed.) *Aquifer System Management: Darcy´s Legacy in a World of Impending Water Shortage. IAH-SP series* (pp. 239–252). .Taylor and Francis / Balkema Publishers.

**Tujchneider, O., Pérez, M., Paris, M. y D´Elía, M. (2008).** El Corredor Termal del Río Uruguay. Acuífero Transfronterizo, un tesoro compartido. En *Sitios de Interés Geológico de la República Argentina. Anales 46, I. Cap. 32* (pp. 437–446). CSIGA (Ed.) Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. Premio Convenio Andrés Bello «Somos Patrimonio» del Convenio Científico-Técnico de países de Latinoamérica. Categoría Institución Gubernamental. VII Edición, Colombia.

# 2.

## **CONOCIMIENTO DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO**

Ricardo GIACOSA, Carlos PAOLI  
y Pablo CACIK

## 2.



### **Introducción**



### **Características hidrológicas del tramo medio en relación con los tramos superior e inferior**



### **Áreas de aporte del tramo medio**



### **Información hidrométrica existente**



### **Estadística descriptiva de caudales medios anuales y mensuales**



### **Conformación del escurrimiento en el cauce principal y afluentes**



### **Curso principal**



### **Tributarios laterales**



### **Análisis de tendencias**



### **Incidencias en los caudales medios anuales**



### **Incidencia en la distribución de caudales mensuales**



### **Análisis estadístico de caudales anuales**



### **Modificaciones en el régimen de escurrimiento del río Paraná**



### **Influencia del fenómeno de El Niño en el régimen de escurrimiento**



### **El fenómeno Niño/Niña en relación con la región**



### **Perspectiva de los pronósticos climáticos estacionales con relación a las variaciones del régimen de escurrimiento**



### **Bibliografía**

## Introducción

El régimen hidrológico del río Paraná ha sido largamente estudiado en numerosos trabajos que tratan sobre la distribución interanual, anual, areal y probabilística de los caudales que transporta este curso. Uno de los trabajos más amplios y conocidos es el realizado por la OEA en 1969, "Cuenca del río de la Plata, Estudio para su Planificación y Desarrollo".

El tramo medio del río Paraná al que se refiere específicamente el presente libro es sólo un tramo de este gran curso y lógicamente es imposible tratar su régimen hidrológico sin la consideración de toda la cuenca de aporte.

Un tratamiento exhaustivo del régimen hidrológico de toda la cuenca excede por lo tanto los objetivos y alcances del libro. Por dicha razón sólo se presentan los aspectos generales que hacen al origen y conformación del escurrimiento y se trata con mayor detalle el tramo de interés específico.

Se comienza por lo tanto por relacionar las características del tramo medio con los tramos superior e inferior y se describen las áreas de aporte propias del tramo medio, tanto de margen derecha como de margen izquierda, mostrando las marcadas diferencias de ambas.

Un aspecto que resulta relevante son las estaciones de medición de caudales disponibles, tanto por su ubicación como por las limitaciones que presenta la información. En base a esta información se presentan las estadísticas descriptivas de los caudales medios anuales y mensuales. Los valores extremos no son tratados en este capítulo, puesto que son materia de un análisis exhaustivo en los Capítulos 3, 6 y 11.

Otra cuestión importante que se presenta es el análisis de tendencia y la influencia que esto tiene en los caudales medios anuales y mensuales y en la distribución probabilística del módulo anual.

Finalmente se hace una breve referencia a aspectos que en los últimos años han generado un gran interés y que indudablemente requieren en la actualidad de mucha mayor información e investigación, como son las causas en la modificación del régimen de escurrimiento y la influencia del fenómeno de El Niño.



## Características hidrológicas del tramo medio en relación con los tramos superior e inferior

La cuenca del Plata, por su extensión es una de las más grandes del mundo (3.100.000 km<sup>2</sup>) incluyendo parte de cinco países, Argentina, Brasil, Bolivia Paraguay y Uruguay, según se observa en la Figura 1.1 del Capítulo 1.

En el ámbito de la cuenca del Plata, el régimen de los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay, difiere sustancialmente del de sus afluentes no sólo por su magnitud sino también por sus características propias.

Los derrames del río Paraná en territorio argentino están gobernados por los aportes que se producen aguas arriba, fuera del territorio nacional. Dentro del país, a partir de la confluencia de los ríos Paraná y Paraguay y luego de 750 km de recorrido en dirección norte-sur hasta la ciudad de Rosario el tramo es denominado Paraná Medio.

La génesis de sus aportes indica que las lluvias que se producen en las cuencas de aporte del Alto Paraná, río Iguazú y río Paraguay, son las causantes directas de los derrames en los tramos medio e inferior, presentando una baja incidencia los aportes propios de dichos tramos.

Los bajos aportes propios de esta zona se deben fundamentalmente al régimen de precipitaciones en los tramos medio e inferior, con menores montos que en el tramo superior y con fuerte decrecimiento de este a oeste. A esto se adicionan las características físicas de las áreas de aporte propias de los tramos medio e inferior, en su mayor proporción típicamente de llanura, con gran capacidad de almacenamiento superficial y baja escorrentía.

Las isohietas anuales en el área de aportes al Paraná – aguas abajo de la confluencia con el río Paraguay – se encuentran comprendidas entre 700-1.200 mm /anuales, en tanto en territorio brasileño alcanzan valores entre 1.400-1.800 mm y en parte de la cuenca del río Iguazú las precipitaciones superan los 2.400 mm/anuales.

Cuadro 2.1.

| Cuenca                   | estación      | áreas aporte (km <sup>2</sup> ) | q específicos (l/s/km <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Paraná                   | Posadas       | 933.360                         | 13                                   |
| Paraná                   | Corrientes    | 1.950.000                       | 9                                    |
| Iguazú                   | Capanema      | 64.430                          | 21                                   |
| Paraguay                 | P. Bermejo    | 1.100.000                       | 3.5                                  |
| Aportes margen derecha   | S Fe-Chaco    | 366.862                         | 1                                    |
| Aportes margen izquierda | Ctes- E. Ríos | 77887                           | 6                                    |

A título indicativo, el Cuadro 2.1. revela el contraste que presentan los caudales específicos del curso principal del río Paraná y los ríos Paraguay e Iguazú en relación con los aportes laterales entre Corrientes y Rosario. De dichas magnitudes se desprende que la conformación de los aportes que ingresan a territorio argentino está dada por los del propio río Paraná en territorio brasileño y los del río Iguazú.

Estas características se hacen aún más notorias en situaciones de grandes crecidas, donde la incidencia de los tributarios como aporte al caudal pico es aun menor.

No obstante, la concurrencia de crecidas propias de estos afluentes con la correspondiente al curso principal puede influir en la onda de crecida de este último, explicando variaciones de alturas adicionales a la propagación sin aportes laterales.

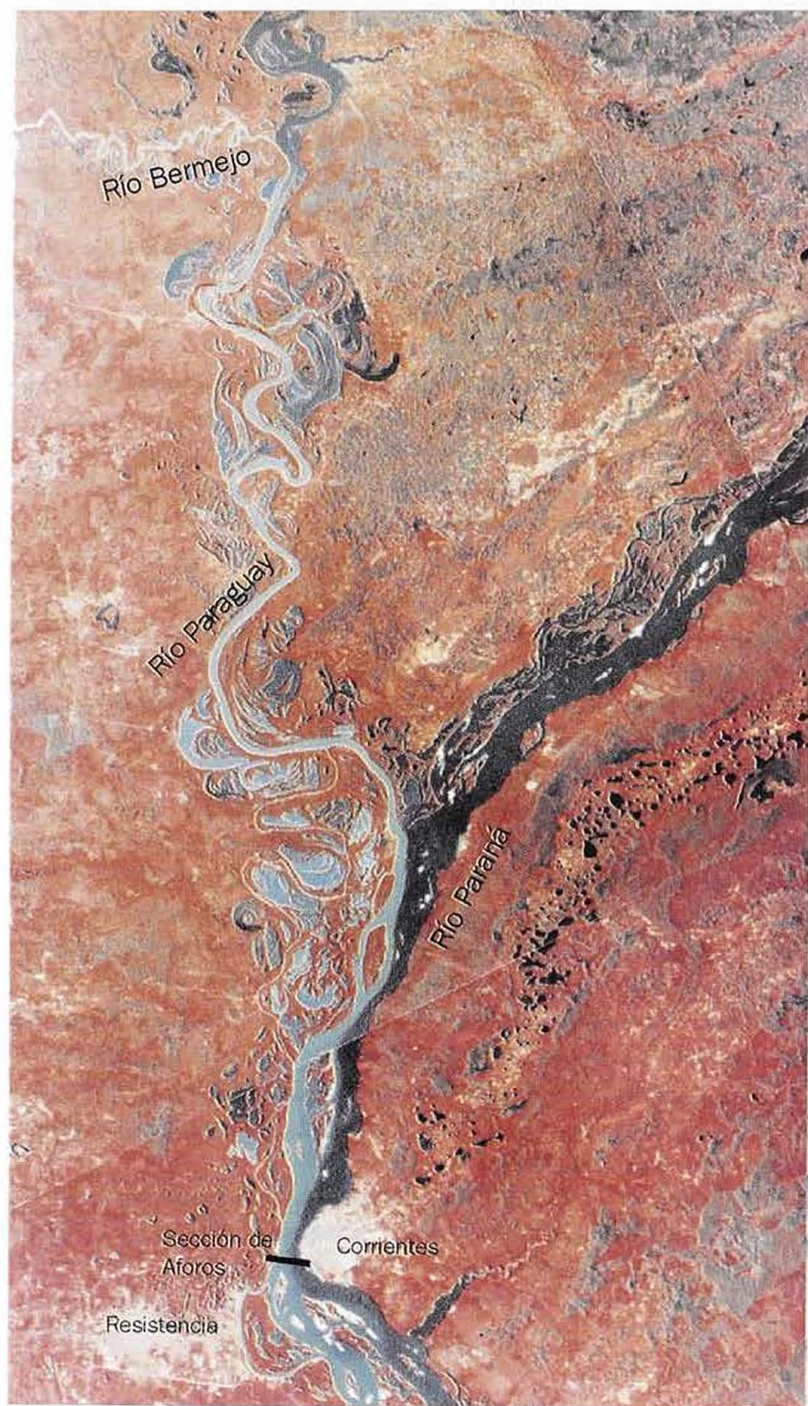
Por otra parte la superposición de situaciones extremas en el curso principal y afluente tiene sí una enorme influencia sobre este último, provocando una curva de remanso que según los casos puede tener una incidencia decisiva en las áreas inundables ribereñas.

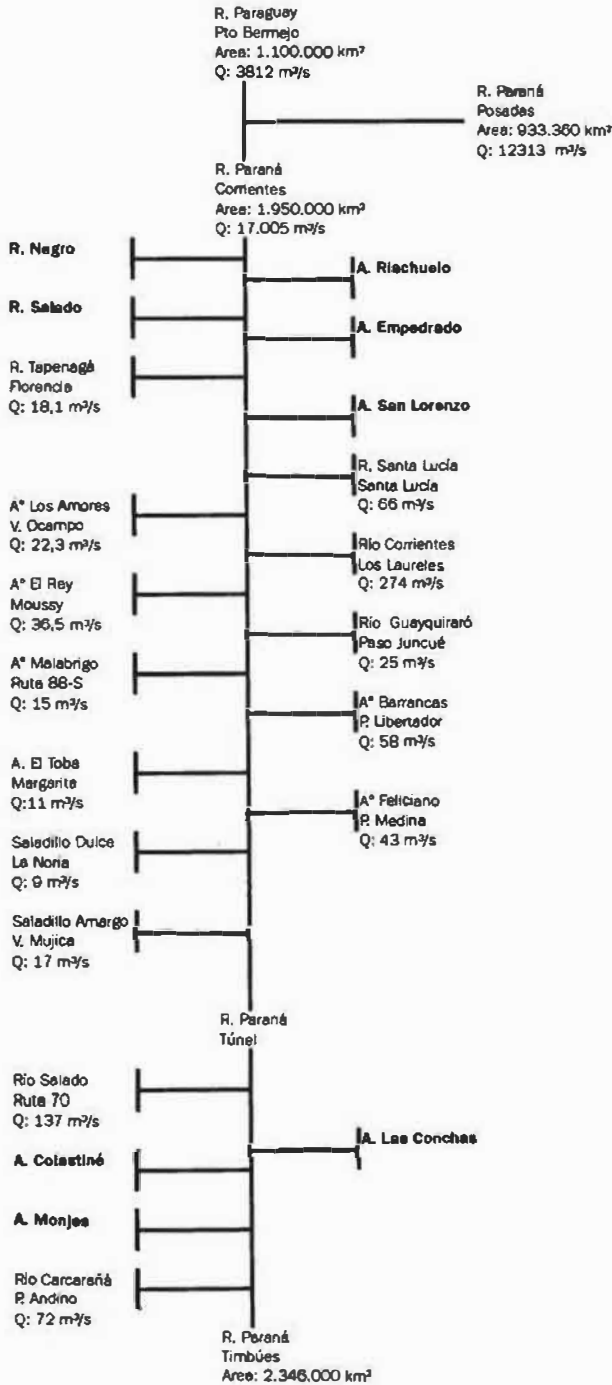
Como ya se expresara, el río Paraná ingresa al tramo denominado medio en la ciudad de Corrientes con un módulo de 17.000 m<sup>3</sup>/s (serie 1904-1997), resultante de la suma de los caudales del propio Paraná Superior (12.400 m<sup>3</sup>/s en Posadas) y Paraguay (3.800 m<sup>3</sup>/s en Puerto Bermejo), según se observa en la Figura 2.1., donde se aprecia claramente la diferencia de aportes de uno y otro curso. El ingreso del río Bermejo en la margen derecha del río Paraguay, con una apreciable carga de sedimentos le confiere características muy diferentes de las del Paraná superior, observándose claramente que el flujo de los dos grandes ríos, luego de la confluencia, escurre en forma casi paralela aún varios kilómetros aguas abajo de Corrientes.

En todo el tramo medio se ha estimado que en promedio incorpora de sus afluentes de ambas márgenes aportes del orden de 1.000 m<sup>3</sup>/s. En dicho tramo, no todos los tributarios presentan registros, en muchos casos la información no está actualizada y en otros es muy interrumpida o poco confiable.

En la Figura N° 2.2. se presenta un esquema simplificado de la conformación de los caudales medios anuales de ingreso y salida al tramo medio y los respectivos aportes laterales.

**Figura 2.1.**  
Confluencia del  
rio Paraguay y  
del tramo  
superior del rio  
Paraná.  
Comienzo del  
tramo medio en  
la sección de  
Corrientes.





**Figura 2.2.**  
Diagrama de  
aportes cuenca  
río Paraná -  
tramo medio

REFERENCIAS

**A. Colastiné**  
curso no medido

**R. Carcarañá**  
curso medido

### Áreas de aporte del tramo medio

Los aportes provenientes de la margen izquierda del Paraná en las provincias de Corrientes y Entre Ríos presentan divisorias bien definidas que permiten identificar y evaluar en forma separada los aportes hídricos superficiales. De norte a sur los aportes más importantes corresponden al A. Riachuelo, A. Empedrado, San Lorenzo, río Santa Lucía, río Corrientes, río Guayquiraró, y A. Feliciano, totalizando un área de aportes del orden de 80.000 km<sup>2</sup>.

Los aportes de margen derecha en las provincias de Chaco y Santa Fe presentan en muchos casos, divisorias indefinidas a nivel de subcuencas, con particularidades en la dinámica según el estado hídrico de las mismas. En estado de aguas bajas existe un escurrimiento con un grado de independencia bastante alto, con áreas de almacenamiento que colectan los excedentes de lluvia de su zona de influencia, actuando como subcuencas cerradas centríperas o de muy baja transfluencia. Por el contrario, en situación de aguas altas, se produce la interconexión de áreas de aporte dando lugar a escurrimientos mantiformes y encauzados que son gobernados por la pendiente regional, tendiendo a desaguar en el valle del río Paraná. Es por ello que sólo se identifican los cursos efluentes de grandes sistemas.

De norte a sur los principales aportes están dados por el río Negro, A. Tapenagá, A. El Rey, Los Amores, A. Malabrigo, Saladillos Dulce y Amargo, río Salado, A. Colastiné y río Carcarañá.

El área de drenaje es de 370.000 km<sup>2</sup> de los cuales la tercera parte corresponde a la zona denominada Bajos Submeridionales cuyos aportes superficiales drenan a través del río Salado.

En los Cuadros N° 2.2. y 2.3. se presentan las cuencas de aporte, y sus respectivas superficies según correspondan a margen izquierda o derecha.

**Cuadro 2.2.**  
Aportes margen izquierda al tramo medio río Paraná  
Fuente: mapa de cuencas hídricas. INCYTH-CHA 1986

| Cuenca         | Curso                             | Superficie (km <sup>2</sup> ) |
|----------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Santa Lucía    | Santa Lucía, Empedrado, Riachuelo | 16.545                        |
| Corrientes     | Corrientes                        | 26.951                        |
| Guayquiraró    | Guayquiraró                       | 9.701                         |
| Propia y media | Arroyos menores y aporte directo  | 16.387                        |
| Feliciano      | Feliciano                         | 8.303                         |
|                |                                   | Total: 77.887 km <sup>2</sup> |

| Cuenca  | Curso  | Superficie<br>(km <sup>2</sup> ) |
|---|--|----------------------------------|
| Bañado Chaco y<br>norte de Santa Fe                       | R. Negro, Tapenagá, El<br>Toba, Los Amores         | 37.950                           |
| Zona sin cursos<br>entre Bermejo y<br>Salado              |  | 130.140                          |
| Saladillo y A.<br>menores afluentes<br>del río San Javier | A. El Rey, Malabrigo,<br>Saladillos Dulce y Amargo | 15.215                           |
| Juramento –Salado   | Río Pasaje – Juramento<br>Salado                   | 108.994                          |
| Colastiné y Monjes  | Colastiné- Monje-Cda.<br>Carrizales.               | 14.051                           |
| Carcarañá   | Carcarañá  | 60.512                           |

Total: 366.862km<sup>2</sup>

**Cuadro 2.3.**  
Aportes margen  
derecha al  
tramo medio  
río Paraná  
Fuente: mapa de  
cuencas hídricas.  
INCYTH-CHA 1986

### Información hidrométrica existente

Sobre el curso principal del río Paraná existen extensos registros de niveles desde principios de siglo, de buena calidad y con una densidad de puntos de medición que supera los valores estándar. Ello es debido a que dichas estaciones no fueron implementadas para la evaluación de los recursos hídricos sino que están asociadas a fines específicos de navegación resultando en dicho tramo una densidad media de 1 estación/22 km.

Con relación a registros de caudales, se cuenta con series continuas en el ingreso al tramo, a su salida y puntos intermedios, desde principios de siglo, aunque la mayoría de las estaciones sólo miden parte del caudal total que escurre.

La situación no es mejor para el control de los aportes laterales, ya que no todos los afluentes son medidos, y en aquéllos en que se cuenta con registros, las series son más cortas, y con discontinuidades.

Las estaciones con mediciones de caudales en forma sistemática sobre el curso principal, sus afluentes de margen derecha e izquierda y sus períodos de registro e interrupciones son presentados en los Cuadros N° 2.4., 2.5., y 2.6. respectivamente.

**Cuadro 2.4.**  
Estaciones  
sobre ríos  
Paraguay y  
Paraná.

| Curso    | Estación       | Periodo de registro | Interrupciones |
|----------|----------------|---------------------|----------------|
| Paraguay | Puerto Bermejo | 1910-1994           | S/interr.      |
| Paraná   | Posadas        | 1901-1997           | "              |
| Paraná   | Corrientes     | 1904-1997           | "              |
| Paraná   | Túnel          | 1904-1997           | "              |
| Paraná   | Timbúes        | 1905-1997           | "              |

De estas estaciones solamente Corrientes presenta una sección que puede considerarse de "control", ya que prácticamente pasa por la misma todo el volumen escurrido sin importantes desbordes.

Las dos secciones de aforos ubicadas inmediatamente aguas arriba de Corrientes presentan dificultades como secciones de control y no permiten un buen cierre en términos de balance de aguas. Las diferencias correspondientes a los módulos de los ríos Paraná en Posadas y Paraguay en Pto. Bermejo con relación a la sección Corrientes son debidas a errores en el cómputo de caudales para aguas altas. La geometría de ambas secciones es asimétrica, con margen muy tendida en territorio paraguayo lo que hace dificultoso la cuantificación de caudales. Durante períodos de crecidas el agua cubre el valle de inundación y pequeños incrementos de agua representan significativos cambios de caudales.

En cuanto a las secciones de aforos ubicadas aguas abajo, las mismas controlan solamente el caudal escurrido por el cauce principal, que es desbordado frecuentemente en crecidas ordinarias y extraordinarias ocupando un valle de inundación de gran extensión y de muy difícil control de los caudales escurridos.

En el caso de la estación El Túnel, se afora el cauce principal recostado sobre la margen izquierda y se complementa con los aforos sobre el río Colastiné, en 11 puentes de la ruta nacional 168 que atraviesa transversalmente todo el valle de inundación y en la laguna Setúbal, para completar el cierre Paraná-Santa Fe. Como es lógico, una sección tan compleja en puntos de paso ha estado sufriendo modificaciones permanentemente y por lo tanto es casi imposible reconstruir una serie histórica consistente. Esta situación es tratada en particular en el Capítulo 11.

En el caso de la estación Timbúes, el río se recuesta sobre la margen derecha y sólo se afora el cauce principal.

Como dificultad adicional a las estaciones de aforos sobre el cauce principal y valle de inundación se debe mencionar el hecho de que las secciones transversales sufren modificaciones por erosión y sedimentación, lo que obliga a una revisión periódica de las curvas H-Q y a su ajuste si fuera necesario.



| Curso       | Estación          | Período de registro | Interrupciones |
|-------------|-------------------|---------------------|----------------|
| S. Lucía    | Santa Lucía       | 1975-1997           | 75-76          |
| Corrientes  | Los Laureles      | 1975-1997           | 76             |
| Guayquiraró | Paso Juncué       | 1975-1997           | 75,78, 81-84   |
| Barrancas   | Pueblo Libertador | 1975-1997           | S/interrup     |
| Feliciano   | Paso Medina       | 1975-1997           | *              |

**Cuadro 2.5.**  
Estaciones  
sobre afluentes  
margen  
izquierda

| Curso            | Estación  | Período de registro | Interrupciones                    |
|------------------|-----------|---------------------|-----------------------------------|
| Tapenagá         | Florencia | 1970-1997           | 72-82                             |
| Los Amores       | V. Ocampo | 1983-1997           | S/interrup                        |
| El Rey           | Moussy    | 1954-1997           | 66,71,75-77                       |
| Malabrigo        | Ruta 88-S | 1977-1994           | 77,78                             |
| Saladillo Amargo | V. Mujica | 1953-1997           | 76-77                             |
| Saladillo Dulce  | La Noria  | 1953-1997           | 55-56,61-68,72-<br>80,86-88,91-92 |
| Salado           | Ruta 70   | 1952-1997           | 87-92                             |
| Carcarañá        | P. Andino | 1980-1997           | 91-92                             |

**Cuadro 2.6.**  
Estaciones  
sobre afluentes  
margen derecha

Como se observa, salvo algunas estaciones con registros de niveles y aforos a partir de los años 50, el resto son posteriores a 1970 y presentan numerosas interrupciones.

### **Estadística descriptiva de caudales medios anuales y mensuales**

#### **Conformación del escurrimiento en el cauce principal y afluentes**

El promedio de los caudales medios diarios de cada mes define el caudal medio mensual y el promedio de los caudales medios diarios de cada año define el caudal medio anual de un curso de agua. A la vez, el promedio para toda la serie de años de registros disponibles de los caudales medios de cada mes y cada año define el caudal módulo de cada mes y el caudal módulo anual, que son los parámetros más importantes para caracterizar el régimen hidrológico de un río.

El río Paraná en Corrientes tiene un módulo anual de 17.000 m<sup>3</sup>/s, producto de los aportes del propio Paraná y el río Paraguay. A partir de la confluencia con este último y en todo el tramo medio incorpora un área de 445.000 km<sup>2</sup>, en tanto los aportes en términos de caudales anuales medidos y estimados son del orden de 1.000 m<sup>3</sup>/s.



De estos valores de caudales, 466 m<sup>3</sup>/s corresponden a los aportes medidos de margen izquierda cuya superficie es de 78.000 km<sup>2</sup> y 326 m<sup>3</sup>/s a los derrames medidos de margen derecha cuya superficie es de 367.000 km<sup>2</sup>.

Esta asimetría es producto de las características físicas diferenciadas que presentan las áreas de aporte de ambas márgenes. En términos de caudales específicos, por el Paraná en Posadas escurren 13 l/s - km<sup>2</sup>, en tanto en todo el tramo los aportes de margen derecha e izquierda son de 6 y 1 l/s - km<sup>2</sup> respectivamente.

Es evidente que el régimen del Paraná es gobernado por los aportes provenientes de aguas arriba ya que en todo el tramo los afluentes laterales incrementan sólo un 5 % el caudal total.

### Curso principal

Los caudales medios mensuales en el ingreso al tramo (Estación Corrientes) tienen su valor máximo en el período febrero-marzo (21.000 m<sup>3</sup>/s) y mínimos en agosto-setiembre (13.000 m<sup>3</sup>/s). En Timbúes, los máximos y mínimos presentan un desfase de un mes aproximadamente con relación a los valores en Corrientes.

Las magnitudes en la sección Túnel corresponden a la de cauce principal y no a la de la sección completa que incluye el río Colastiné - Sistema Serúbal y aliviaderos. Por tal razón los caudales son inferiores a los de la sección Corrientes y si bien no son comparables en términos de balance, sí permiten el análisis de sus valores característicos de distribución anual y tendencias. Idéntica situación se presenta en Timbúes, cuyos valores corresponden a los caudales que escurren en el cauce principal.

Los máximos absolutos registrados son del orden de 60.000 m<sup>3</sup>/s, es decir 3,5 veces el módulo.

**Cuadro 2.7.**  
Caudales en el  
cauce principal

| <b>Río Paraguay. Estación Pto Bermejo.</b> |       |       |       |       |       |   |       |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Serie: 1910/11- 1993/94                    |       |       |       |       |       |   |       |       |       |       |       |       |
|  | Set   | Oct   | Nov   | Dic   | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   |
| <b>Máx</b>                                 | 7.914 | 7.493 | 8.008 | 7.722 | 7.799 | 6.912   | 7.556 | 7.605 | 8.994 | 9.957 | 8.165 | 8.372 |
| <b>Med</b>                                 | 3.400 | 3.359 | 3.386 | 3.311 | 3.367 | 3.594   | 3.822 | 4.052 | 4.390 | 4.713 | 4.501 | 3.843 |
| <b>Mín</b>                                 | 793   | 743   | 584   | 757   | 1.113 | 1.638   | 1.882 | 1.514 | 1.895 | 1.733 | 1.542 | 1.041 |
| Módulo : 3.812 m <sup>3</sup> /s           |       |       |       |       |       | Fuente: Anuarios Subsecretaría de Recursos Hídricos |       |       |       |       |       |       |

**Cuadro 2.7.**  
Cont.

| <b>Río Paraná. Estación Posadas.</b> |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Serie: 1901/02- 1996/97              |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                                      | Set    | Oct    | Nov    | Dic    | Ene    | Feb    | Mar    | Abr    | May    | Jun    | Jul    | Ago    |
| Máx                                  | 21.740 | 26,382 | 22.872 | 28.958 | 29.120 | 32.735 | 34.986 | 25.300 | 33.766 | 39.009 | 37.737 | 20.095 |
| Med                                  | 9.450  | 11.076 | 11.176 | 12.054 | 14.889 | 16.887 | 15.905 | 13.604 | 11.097 | 12.069 | 10.514 | 9.178  |
| Mín                                  | 4.314  | 4.052  | 4.815  | 5.264  | 6.558  | 8.208  | 7.465  | 8.070  | 6.854  | 5.961  | 5.098  | 4.407  |

Módulo : 12.400 m<sup>3</sup>/s Fuente: Anuarios Subsecretaría de Recursos Hídricos

| <b>Río Paraná. Estación Corrientes.</b> |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Serie: 1904/06- 1996/97                 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|   | Set    | Oct    | Nov    | Dic    | Ene    | Feb    | Mar    | Abr    | May    | Jun    | Jul    | Ago    |
| Máx                                     | 28.379 | 33.901 | 29.621 | 40.956 | 38.794 | 40.782 | 45.117 | 36.939 | 47.790 | 54.468 | 51.307 | 34.098 |
| Med                                     | 12.915 | 14.910 | 15.350 | 15.888 | 18.544 | 21.425 | 21.335 | 19.349 | 18.544 | 17.942 | 16.103 | 13.388 |
| Mín                                     | 4.619  | 4.092  | 6.136  | 6.562  | 7.444  | 10.842 | 10.527 | 10.982 | 9.790  | 7.955  | 6.706  | 5.348  |

Módulo : 17.141 m<sup>3</sup>/s Fuente: Anuarios Subsecretaría de Recursos Hídricos

| <b>Río Paraná. Estación Túnel.</b> |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Serie: 1904/06- 1996/97            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                                    | Set    | Oct    | Nov    | Dic    | Ene    | Feb    | Mar    | Abr    | May    | Jun    | Jul    | Ago    |
| Máx                                | 19.786 | 23.404 | 23.236 | 22.396 | 26.079 | 27.397 | 30.938 | 27.184 | 25.415 | 33.173 | 32.465 | 24.610 |
| Med                                | 10.615 | 11.632 | 12.591 | 12.574 | 13.886 | 16.052 | 17.403 | 17.063 | 15.605 | 14.861 | 14.125 | 11.851 |
| Mín                                | 4.796  | 4.661  | 5.573  | 5.566  | 5.995  | 8.200  | 8.537  | 9.618  | 8.542  | 6.821  | 6.063  | 5.280  |

Módulo : 14.023 m<sup>3</sup>/s (Los valores de caudales corresponden sólo al cauce principal)  
Fuente: Anuarios Subsecretaría de Recursos Hídricos

| <b>Río Paraná. Estación Timbúes.</b> |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Serie: 1905/06- 1996/97              |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                                      | Set    | Oct    | Nov    | Dic    | Ene    | Feb    | Mar    | Abr    | May    | Jun    | Jul    | Ago    |
| Máx                                  | 22.636 | 22.853 | 23.262 | 23.180 | 28.240 | 27.564 | 29.078 | 27.238 | 26.499 | 28.458 | 28.246 | 25.801 |
| Med                                  | 12.183 | 12.889 | 13.815 | 13.766 | 14.814 | 16.694 | 18.030 | 18.113 | 17.023 | 16.001 | 15.440 | 13.422 |
| Mín                                  | 5.874  | 5.974  | 6.548  | 6.885  | 7.040  | 9.298  | 9.872  | 10.540 | 9.878  | 8.003  | 7.207  | 6.369  |

Módulo : 15.181 m<sup>3</sup>/s (Los valores de caudales corresponden sólo al cauce principal)  
Fuente: Anuarios Subsecretaría de Recursos Hídricos

### Tributarios laterales

De los aportes laterales medidos, los ríos Salado (137 m<sup>3</sup>/s) y Corrientes (274 m<sup>3</sup>/s) son los de mayor magnitud.

El régimen hídrico está asociado con las precipitaciones de la región y los máximos se presentan en los meses de abril – mayo extendiéndose al

mes de junio – julio en aquellos afluentes (ríos Corrientes, Santa Lucía, Salado) que son la salida de grandes sistemas hídricos y con una gran inercia al escurrimiento superficial.

Los valores de caudales mensuales correspondientes a los aportes de margen derecha e izquierda y de los cuales se cuenta con mediciones, se presentan en los Cuadros 2.8. y 2.9. respectivamente.

**Cuadro 2.8.**  
Caudales  
mensuales de  
afluentes de  
margen derecha

**Río Tapenagá. Estación Florencia**

Serie 1970/71-1996/97

|     | Set | Oct | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun | Jul  | Ago  |
|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| Máx | 22  | 24  | 43,7 | 56,4 | 39,4 | 44   | 74,5 | 194  | 137  | 132 | 75,3 | 26,4 |
| Med | 4,7 | 7,1 | 11,5 | 10,9 | 9,9  | 13,4 | 19,7 | 36,4 | 39,4 | 34  | 17,3 | 7,6  |
| Mín | 0,4 | 0,4 | 0,2  | 0,6  | 0,3  | 0,2  | 2,2  | 2,4  | 1    | 1,4 | 1,1  | 0,6  |

Módulo Serie: 18 m<sup>3</sup>/s

**A. Los Amores. Estación Villa Ocampo**

Serie 1983/84-1996/97

|     | Set  | Oct | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May | Jun  | Jul  | Ago |
|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|-----|
| Máx | 14,8 | 29  | 74   | 69,7 | 38   | 79,7 | 121  | 248  | 166 | 157  | 151  | 31  |
| Med | 3,1  | 9,3 | 21,1 | 15,4 | 11,4 | 15,9 | 24,8 | 70,5 | 61  | 49,5 | 30,8 | 8,9 |
| Mín | 0    |     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,1  | 1,6  | 0,7 | 0    |      | 0   |

Módulo Serie: 27m<sup>3</sup>/s

**A. El Rey. Estación Moussy**

Serie 1964/66-1996/97

|     | Set  | Oct  | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Máx | 41,7 | 79,1 | 369  | 269  | 124  | 165  | 219  | 193  | 180  | 241  | 204  | 87,1 |
| Med | 11   | 18,3 | 39,4 | 30,3 | 22,7 | 29,4 | 35,5 | 56,8 | 43,8 | 35,9 | 31,4 | 19,1 |
| Mín | 1,4  | 1,2  | 0,8  | 0,5  | 1,4  | 0,9  | 0,97 | 7    | 2,8  | 1,22 | 0,4  | 0,44 |

Módulo Serie: 31m<sup>3</sup>/s

**A. Malabrigo. Estación Ruta 88-S**

Serie 1977/78-1993-94

|     | Set  | Oct  | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| Máx | 13,4 | 29,6 | 67,7 | 68,2 | 89,9 | 83,5 | 70,5 | 192  | 117  | 32,1 | 60,6 | 11  |
| Med | 3,4  | 9,5  | 21,2 | 18,6 | 16   | 22   | 18,5 | 35,7 | 19,8 | 6,7  | 7,2  | 2,2 |
| Mín | 0,2  | 0,3  | 0,3  | 0    | 0,3  | 0,1  | 0,4  | 0,7  | 0,5  | 0,3  | 0,3  | 0,2 |

Módulo Serie: 15 m<sup>3</sup>/s

**A. Saladillo Dulce. Estación La Noria**

Serie 1953/54-1996/97

|     | Set | Oct | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago |
|-----|-----|-----|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|-----|
| Máx | 6,6 | 24  | 49,3 | 17,8 | 14,3 | 62   | 52  | 48   | 151  | 45   | 123  | 21  |
| Med | 1,7 | 4,8 | 7,3  | 4,2  | 3,8  | 10,1 | 8,5 | 12,6 | 25,2 | 13,8 | 12,4 | 4,5 |
| Mín | 0   | 0   | 0,1  | 0    | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   |

Módulo Serie: 9 m<sup>3</sup>/s**A. Saladillo Amargo. Estación Vera Mujica**

Serie 1953/54-1996/97

|     | Set  | Oct  | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Máx | 29,3 | 43,4 | 73,4 | 52   | 68,7 | 175  | 64,5 | 119  | 126  | 119  | 55,6 | 42,3 |
| Med | 7,2  | 8,6  | 13,6 | 14,7 | 15,1 | 21,4 | 16,7 | 28,4 | 33,4 | 21,4 | 11,6 | 8,5  |
| Mín | 0,8  | 0,9  | 0,5  | 0,5  | 0,6  | 0,5  | 0,6  | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,6  | 0,5  |

Módulo Serie: 16,9 m<sup>3</sup>/s**R. Salado. Estación Ruta 70**

Serie 1952/53-1996/97

|     | Set  | Oct  | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar  | Abr | May  | Jun  | Jul  | Ago  |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|
| Máx | 398  | 312  | 390  | 412  | 409  | 533  | 1078 | 491 | 1147 | 1315 | 548  | 463  |
| Med | 97,2 | 96,1 | 107  | 113  | 106  | 126  | 184  | 186 | 196  | 172  | 139  | 116  |
| Mín | 23,5 | 24,5 | 23,1 | 21,7 | 25,5 | 25,8 | 42,6 | 30  | 30,3 | 23,4 | 27,1 | 25,4 |

Módulo Serie: 137 m<sup>3</sup>/s**R. Carcarañá. Estación Pueblo Andino**

Serie 1980/81-1996/97

|     | Set  | Oct  | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Máx | 68,2 | 92,8 | 192  | 224  | 184  | 249  | 338  | 210  | 144  | 101  | 74,4 | 64,4 |
| Med | 46,4 | 53   | 68,8 | 68   | 84,1 | 108  | 111  | 99,8 | 68,8 | 59,3 | 50,1 | 46,1 |
| Mín | 29,5 | 30   | 22,3 | 30,6 | 32,1 | 29,4 | 24,3 | 17,7 | 18,7 | 24,6 | 23,1 | 22,1 |

Módulo Serie: 72 m<sup>3</sup>/s**Río Santa Lucía. Estación Santa Lucía**

Serie 1976/76-1996/97

|     | Set | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Máx | 139 | 155 | 253 | 265 | 182 | 159 | 157 | 330 | 343 | 285 | 345 | 193 |
| Med | 35  | 44  | 74  | 74  | 56  | 47  | 51  | 113 | 98  | 87  | 69  | 49  |
| Mín | 3,5 |     | 3,4 | 1,7 | 2,1 | 1,2 | 1,5 | 2,8 | 3,1 | 3,3 | 7,9 | 4,1 |

Módulo Serie: 68 m<sup>3</sup>/s**Cuadro 2.8.**  
Cont.**Cuadro 2.9.**  
Caudales mensuales de afluentes de margen izquierda

Cuadro 2.9.  
Cont.

| <b>Río Corrientes. Estación Los Laureles</b> |      |     |      |      |      |      |     |     |       |       |       |       |
|--|------|-----|------|------|------|------|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
| Serie 1976/76-1996/97                        |      |     |      |      |      |      |     |     |       |       |       |       |
|  | Set  | Oct | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar | Abr | May   | Jun   | Jul   | Ago   |
| Máx  | 553  | 549 | 743  | 1314 | 1131 | 636  | 576 | 931 | 1.827 | 1.517 | 1.725 | 1.109 |
| Med  | 179  | 189 | 247  | 295  | 238  | 203  | 203 | 367 | 441   | 345   | 315   | 261   |
| Mín  | 34,3 | 54  | 36,7 | 20,2 | 12,5 | 18,5 | 0,4 | 0,8 | 8,2   | 30,6  | 25,1  | 24,8  |

Módulo Serie: 274 m<sup>3</sup>/s

| <b>Río Guayquiraró. Estación Paso Juncué</b> |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|--|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| Serie 1976/76-1996/97                        |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|  | Set | Oct  | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago |
| Máx  | 44  | 63   | 148  | 78,4 | 118  | 155  | 89,9 | 142  | 194  | 79   | 64,6 | 31  |
| Med  | 8,5 | 22,9 | 26,3 | 17,3 | 16,7 | 25,2 | 27,6 | 56,9 | 50,4 | 20,4 | 14,4 | 7,8 |
| Mín  | 0   | 0,2  | 0,4  | 0    | 0,7  | 0,5  | 0,1  | 0,1  | 0    | 0    | 0    | 0   |

Módulo Serie: 25 m<sup>3</sup>/s

| <b>Río Barrancas. Estación Pueblo Libertador</b> |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |      |      |
|--|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Serie 1976/76-1996/97                            |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |      |      |
|  | Set  | Oct  | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar | Abr | May | Jun | Jul  | Ago  |
| Máx  | 75   | 197  | 209  | 164  | 100  | 328  | 275 | 499 | 695 | 258 | 191  | 85,9 |
| Med  | 20,1 | 40,9 | 56,3 | 43,3 | 35,7 | 48,3 | 60  | 126 | 134 | 64  | 43,2 | 25,4 |
| Mín  | 0,3  | 0,6  | 0,5  | 0,1  | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    |

Módulo Serie: 58 m<sup>3</sup>/s

| <b>Río Feliciano. Estación Pueblo Medina</b> |      |      |      |      |      |     |      |     |      |      |      |      |
|--|------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|
| Serie 1976/76-1996/97                        |      |      |      |      |      |     |      |     |      |      |      |      |
|  | Set  | Oct  | Nov  | Dic  | Ene  | Feb | Mar  | Abr | May  | Jun  | Jul  | Ago  |
| Máx  | 169  | 93   | 300  | 150  | 255  | 207 | 298  | 281 | 279  | 132  | 135  | 60   |
| Med  | 27,2 | 30,1 | 61,3 | 31,2 | 26,1 | 40  | 55,3 | 108 | 76,2 | 29,4 | 19,8 | 16,7 |
| Mín  | 0,4  | 1,1  | 1,5  | 1,2  | 0,6  | 0,7 | 1    | 0,5 | 0,4  | 0,4  | 0,5  | 0,4  |

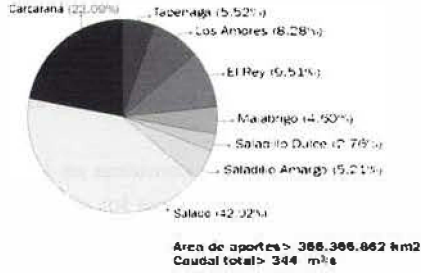
Módulo Serie: 43 m<sup>3</sup>/s

Los aportes laterales en el tramo medio comprendido entre Corrientes y Timbúes son del orden del 5% en relación con los caudales del curso principal. De ellos el 50 % corresponde a la suma de los ríos Salado y Corrientes. (Figura 2.3.).

**Afluentes de margen derecha**

| Curso            | Q(medio) (m <sup>3</sup> /s) |
|------------------|------------------------------|
| Tabernaça        | 18                           |
| Los Amores       | 27                           |
| El Rey           | 31                           |
| Marabigo         | 15                           |
| Saladillo Dulce  | 6                            |
| Saladillo Amargo | 17                           |
| Salado           | 137                          |
| Cacarana         | 72                           |
| <b>Total</b>     | <b>326</b>                   |

**Aportes río Paraná de margen derecha**

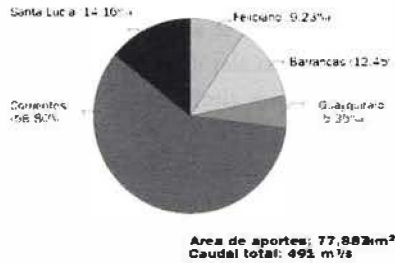


**Figura 2.3.** Aportes laterales en el tramo medio y su relación con el curso principal.

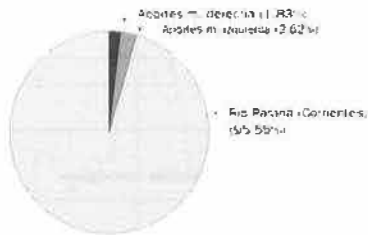
**Afluentes de margen izquierda**

| Curso        | Q(medio) (m <sup>3</sup> /s) |
|--------------|------------------------------|
| Santa Lucía  | 96                           |
| Corrientes   | 274                          |
| Gubycuraró   | 25                           |
| Barrancas    | 58                           |
| Feliciano    | 43                           |
| <b>Total</b> | <b>466</b>                   |

**Afluentes río Paraná margen izquierda**



|                         |       |
|-------------------------|-------|
| Aportes m. derecha      | 326   |
| Aportes m. izquierda    | 466   |
| Río Paraná (Corrientes) | 17000 |



**Análisis de tendencias**

**Incidencia en los caudales medios anuales**

Este tema ha sido tratado por los autores en diferentes trabajos como los de Cacik, (1993), Paoli (1997) y Giacosa (1998) entre otros. Considerando

las series de caudales anuales de las estaciones Corrientes, Túnel y Timbúes sobre el río Paraná y Bermejo en el Paraguay, se observa en las curvas cronológicas, Figuras N° 2.4., 2.5., 2.6. y 2.7., que aproximadamente:

- Hay un primer período desde comienzos del siglo hasta los años 30 en que los aportes anuales se mantienen alrededor del valor medio con una leve tendencia positiva.

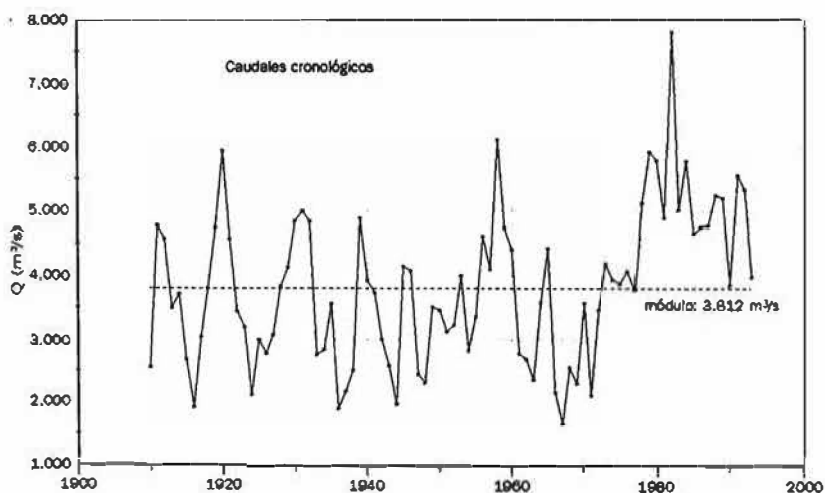
- Un segundo período comienza en los años 30 y va hasta la década del 60 al 70, donde se producen los caudales anuales más bajos de todo el siglo, dando lugar a una leve tendencia negativa.

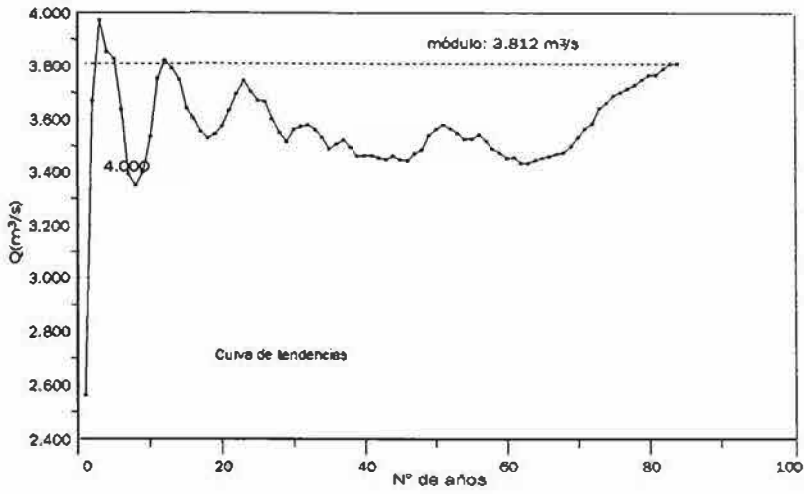
- A partir de la década del 60 al 70, comienzan a presentarse caudales anuales mayores que la media con mayor frecuencia, lo que da lugar a que se invierta la tendencia.

Estos cortes y cambios de períodos no son por supuesto absolutamente explícitos en términos temporales, se manifiestan con distinta intensidad según la estación que se analiza. Al analizar otras variables del escurrimiento como los picos anuales de crecidas o los estiajes mínimos anuales, se presentan condiciones similares aunque no una coincidencia absoluta (ver Capítulos 3 y 6).

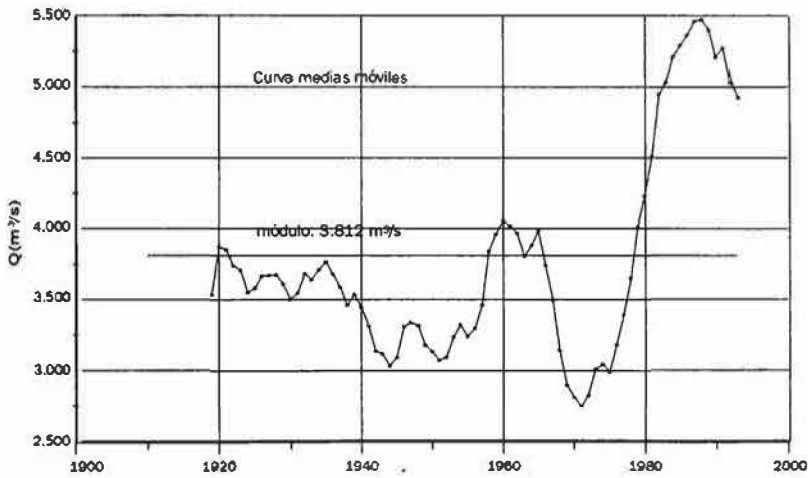
La influencia de estos períodos resulta visible al analizar las formas de las curvas de medias deslizantes cronológicas (Figuras 2.4., 2.5., 2.6. y 2.7.), que se ubican por debajo de la media total y son ascendentes en su último tramo, denotando la tendencia al aumento del módulo del río. También las curvas medias móviles para muestras de 10 años que se observan en las mismas figuras, muestran igual efecto.

**Figura 2.4.a**  
Curva de caudales cronológicos anuales en la Estación de Puerto Bermejo en el río Paraguay





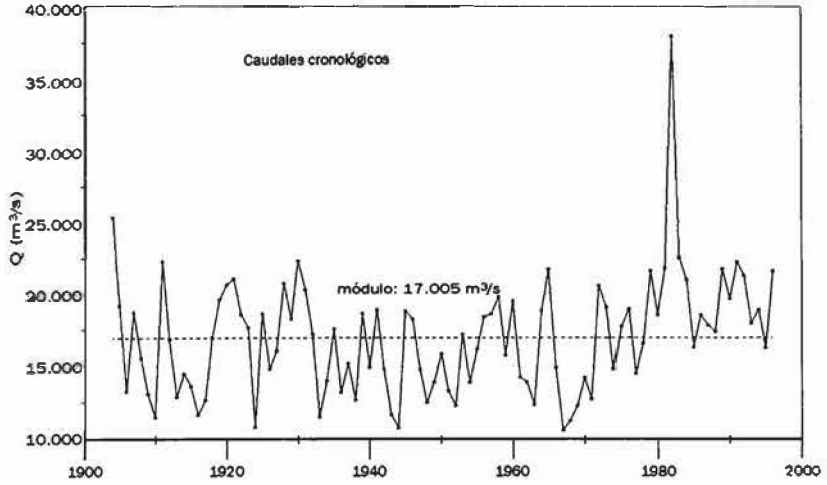
**Figura 2.4.b**  
Curva de  
tendencia en  
la Estación de  
Puerto Bermejo  
en el río  
Paraguay



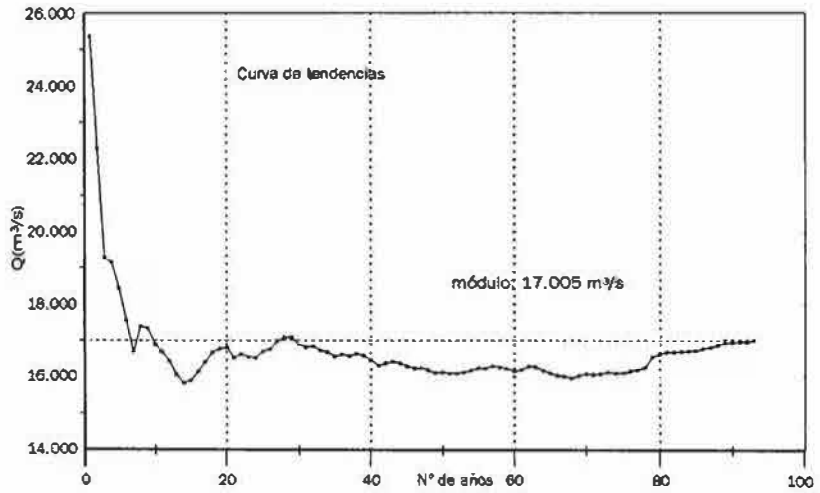
**Figura 2.4.c**  
Curva de  
medias móviles  
en la Estación de  
Puerto Bermejo  
en el río  
Paraguay

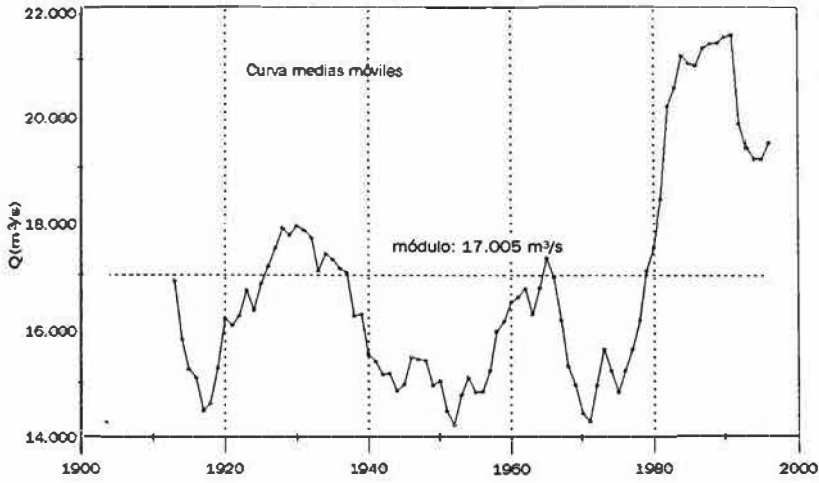


**Figura 2.5.a**  
Curva de caudales cronológicos en la estación Corrientes en el río Paraná



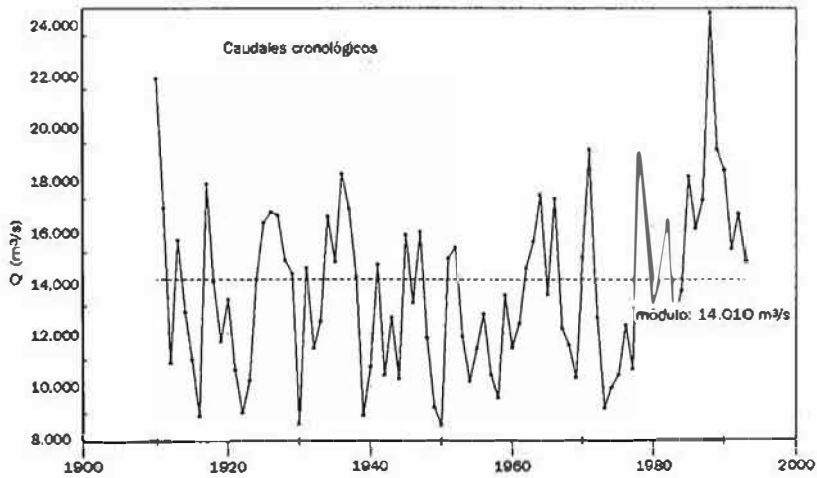
**Figura 2.5.b**  
Curva de tendencia en la estación Corrientes en el río Paraná





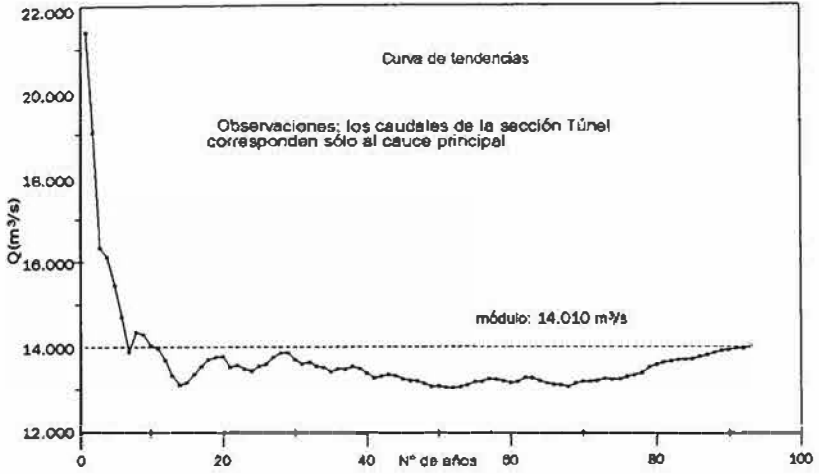
**Figura 2.5.c**  
Curva de medias móviles en la estación Corrientes en el río Paraná

**Observaciones:** los caudales de la sección Túnel corresponden sólo al cauce principal.

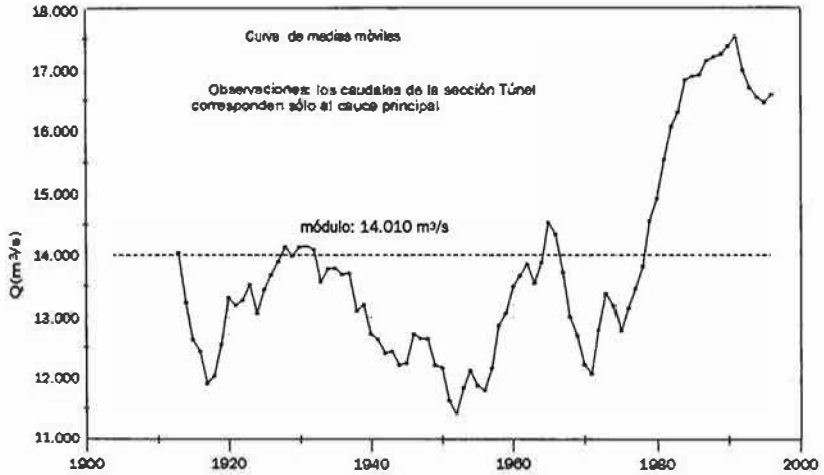


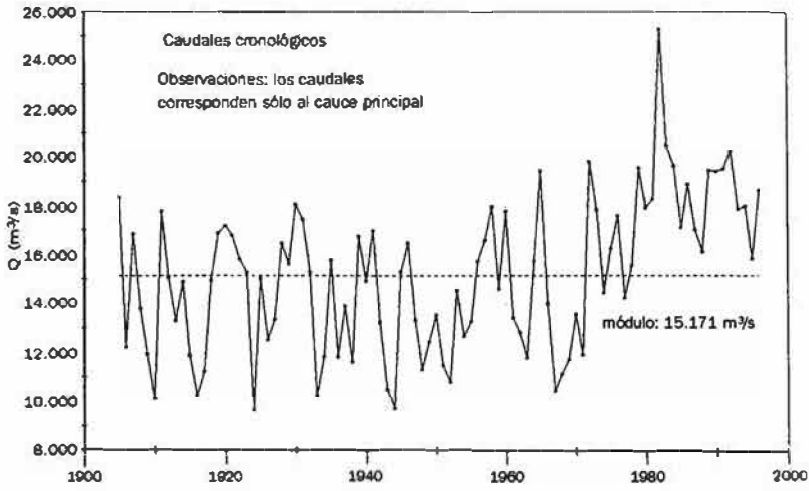
**Figura 2.6.a**  
Curva de caudales cronológicos anuales en la estación Túnel en el río Paraná

**Figura 2.6.b**  
Curva de  
tendencia en la  
estación Túnel  
en el río Paraná

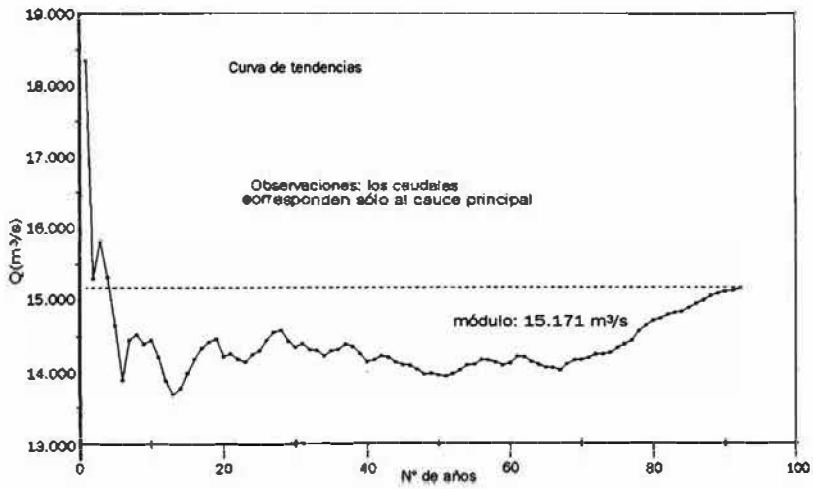


**Figura 2.6.c**  
Curva de  
medias móviles  
en la estación  
Túnel en el río  
Paraná





**Figura 2.7.a**  
Curva de caudales cronológicos anuales en la estación Timbúes en el río Paraná



**Figura 2.7.b**  
Curva de tendencia en la estación Timbúes en el río Paraná

**Figura 2.7.c**  
Curva de medias móviles en la estación Timbúes en el río Paraná



En dichos análisis se observa, además de la tendencia incremental positiva de la media, un apreciable salto en 1983, año en que se produjo una crecida extraordinaria, lo que es tratado en el Capítulo 3.

Ante la necesidad de realizar análisis cuantitativos de la incidencia sobre las características del régimen hidrológico, se adoptó como series modernas las que comienzan en 1961, donde la tendencia es apenas incipiente, o en el año 1971, donde claramente se inicia un período en que en la mayoría de los años se registran valores de caudales anuales con magnitudes superiores a la media de la serie total.

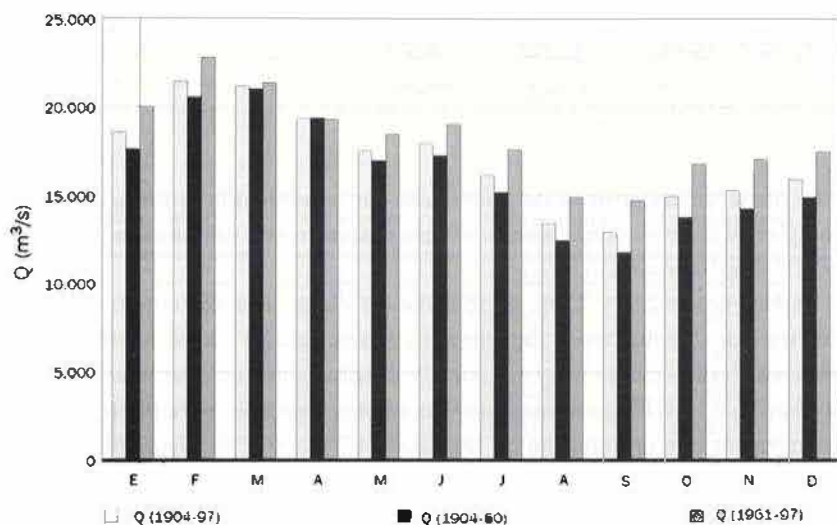
La magnitud de los cambios en el período 1971-97 con relación a la serie total da lugar a una diferencia positiva del caudal medio anual del río que es del orden del 15-24 % según la estación considerada (Cuadro N° 2.10.).

**Cuadro 2.10.**  
Caudales medios anuales de los ríos Paraguay y Paraná para distintos períodos de análisis

| Curso                              | Módulo<br>1905-1997 | Módulo<br>1971-1997 | Incremento<br>(%) |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| Paraguay - Pto. Bermejo            | 3.812               | 4.753               | 24,5              |
| Paraná - Posadas                   | 12.323              | 14.419              | 17                |
| Paraná - Corrientes                | 17.005              | 19.537              | 14,8              |
| Paraná - Túnel (cauce principal)   | 14.010              | 16.326              | 16,5              |
| Paraná - Timbúes (cauce principal) | 15.171              | 17.976              | 18,5              |

### Incidencia en la distribución de caudales mensuales

En la Figura 2.8. se comparan los caudales medios mensuales que se obtienen para la serie completa 1904-1997 con los que corresponden a los períodos 1904-1960 y 1961-1997. En los meses de enero y febrero, mayo, junio y julio, los caudales medios mensuales de la serie 1961-1997 son entre un 10 y un 15 % mayores que los de la serie 1904-1960. Estas diferencias aumentan a un 20-25 % en los meses de agosto a diciembre y son prácticamente despreciables para los meses de marzo y abril.



**Figura 2.8.** Caudales medios mensuales del río Paraná en Corrientes para distintos períodos

Estos resultados muestran que el aumento de caudales más significativo se produce sobre fines de invierno, primavera y principios de verano, resultando la primera parte del otoño la estación con menos alteración respecto de los caudales medios mensuales históricos.

Sin dudas la presentación de crecidas muy importantes en los últimos años con picos a finales del otoño y en invierno, lo que se trata detalladamente en el Capítulo 3, incide significativamente en los promedios mensuales.

### Análisis estadístico de caudales anuales

El análisis de frecuencia de los caudales anuales del río Paraná en Corrientes, permite realizar estimaciones de la probabilidad anual de que se presenten valores por debajo o por encima de determinados valores de interés. Utilizando el Programa AFMULTI (Cacik, 1998), se efectuó el ajuste de distribuciones teóricas a la serie de caudales anuales del período

completo 1904-1997 y teniendo en cuenta lo observado en las curvas de caudales anuales cronológicos y los análisis de tendencia del punto anterior, se efectuó el mismo análisis para la serie 1961-1997.

Las características estadísticas principales de ambas muestras se resumen en el Cuadro 2.11. siguiente

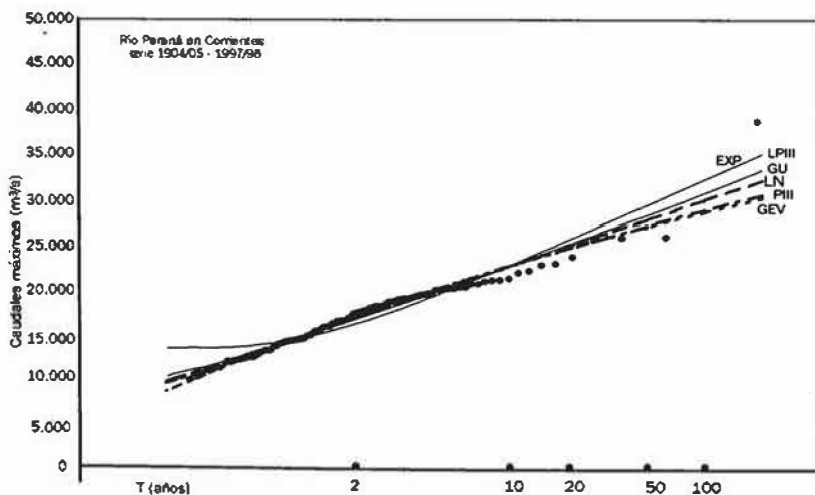
**Cuadro 2.11.**  
Principales características estadísticas de la serie completa y moderna de caudales anuales del río Paraná en Corrientes.

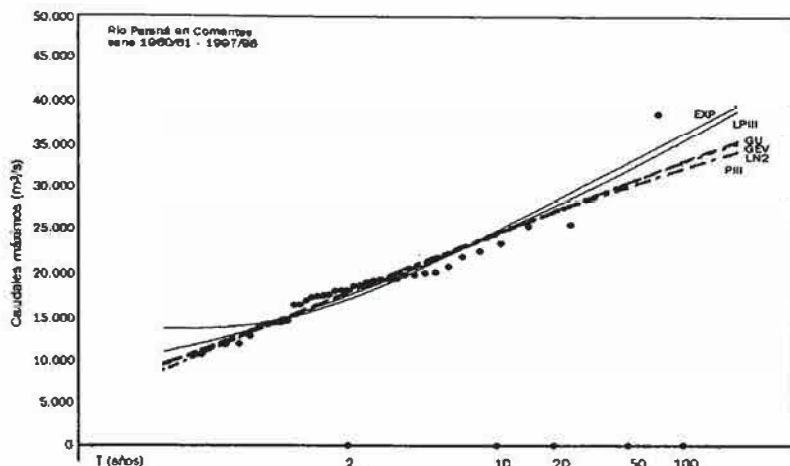
| Período   | Q anual medio (m <sup>3</sup> /s) | Q anual máximo (m <sup>3</sup> /s) | Q anual mínimo (m <sup>3</sup> /s) | Coef. de variación | Coef. de asimetría |
|-----------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|
| 1904-1997 | 17.202                            | 38.726<br>(1983)                   | 9.575<br>(1944)                    | 0,24               | 1,59               |
| 1961-1997 | 18.441                            | 38.726<br>(1983)                   | 10.558<br>(1968)                   | 0,27               | 1,85               |

Se observan claramente las diferencias que se presentan entre la serie completa y la denominada serie moderna, ya que en esta última el módulo es 1.200 m<sup>3</sup>/s mayor.

En las Figuras 2.9. y 2.10., se observan los ajustes a ambas muestras de una serie de distribuciones. En base a los ajustes visuales y a los valores de error cuadrático medio entre muestras y distribuciones teóricas se adopta la distribución GEV para comparar los valores esperados para diferentes recurrencias que se muestran en los Cuadros 2.12. y 2.13. siguientes.

**Figura 2.9.**  
Análisis de frecuencia de caudales anuales del río Paraná en Corrientes para el período 1904-97





**Figura 2.10.** Análisis de frecuencia de caudales anuales del río Paraná en Corrientes para el período 1961-97

| Probabilidad anual de ser superado (%) | Recurrencia asociada (años) | Serie completa 1904-1997 | Serie moderna 1961-1997 |
|--|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 50                                     | 2                           | 16.733                   | 17.728                  |
| 20                                     | 5                           | 20.324                   | 21.956                  |
| 10                                     | 10                          | 22.513                   | 24.685                  |
| 2                                      | 50                          | 26.853                   | 30.498                  |
| 1                                      | 100                         | 28.507                   | 32.879                  |

**Cuadro 2.12.** Caudales anuales esperados en el río Paraná en Corrientes, con diferentes valores de probabilidad de ser superados, según la serie considerada (m³/s)

| Probabilidad anual de no ser alcanzado (%) | Recurrencia asociada (años) | Serie completa 1904-1997 | Serie moderna 1961-1997 |
|--|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 50   | 2                           | 16.733                   | 17.728                  |
| 20   | 5                           | 13.825                   | 14.502                  |
| 10   | 10                          | 12.522                   | 13.107                  |
| 2  | 50                          | 10.517                   | 11.019                  |
| 1  | 100                         | 9.881                    | 10.370                  |

**Cuadro 2.13.** Caudales anuales esperados en el río Paraná en Corrientes, con diferentes valores de probabilidad de no ser alcanzados, según la serie considerada (m³/s)

También se observa del análisis de frecuencia que al considerar la serie moderna, aumentan notoriamente los caudales anuales esperados. Para 100 años de recurrencia el valor del caudal anual que se espera puede ser superado es un 15 % mayor si se considera la serie moderna que el valor que se obtiene al tomar la serie completa.



Esta diferencia es de sólo un 5 % para la misma recurrencia pero para el caudal anual que se espera no pueda ser alcanzado.

Desde el punto de vista estadístico, además de las evidencias presentadas de una tendencia a un aumento del módulo del río, tiene una gran incidencia el valor excepcional del caudal medio del año 1983, de 38.726 (m<sup>3</sup>/s). En el Capítulo 3 referido al conocimiento, régimen y estimación de crecidas se trata detalladamente el comportamiento de la crecida de este año, la mayor del siglo.

### **Modificaciones en el régimen de escurrimiento del río Paraná**

La explicación de las causas que producen las modificaciones en el régimen del río Paraná, han sido tratadas en forma general en un cierto número de informes y trabajos. Si bien las investigaciones que se realizan en la FICH sobre esta temática son apenas incipientes, no puede dejar de mencionarse en forma resumida algunas de las principales conclusiones a que llegan otros autores.

En el estudio del Banco Mundial (Anderson et al., 1993) se indica:

«a partir de la década del '60, ocurrieron por lo menos tres cambios importantes que podrían haber afectado la hidrometeorología de la cuenca:

- *cambios en el uso de la tierra, en especial la deforestación, que pudieron haber aumentado los niveles de escurrimiento.*
- *desarrollo hidroeléctrico, principalmente en el Alto Paraná en Brasil, que provocó una mayor regulación y un régimen de caudales bajos más alto.*
- *las precipitaciones durante la estación húmeda, que han sido más altas por lo menos desde 1960, y nos hacen suponer que los cambios climáticos pueden estar inducidos por el hombre».*

Como consecuencia de esto Anderson et al, (1993) concluye que el derrame anual total aumentó y la distribución estacional cambió, dando como principales causas las variaciones en el régimen pluvial, tanto en magnitud como en distribución.

En el trabajo de Halcrow (1994), tomando información de caudales mensuales en las subcuencas anteriores y posteriores a 1960, encuentran resultados significativos del cambio producido e indica: «*Tamaño consistente en distintos puntos dentro de semejante cuenca sólo puede justificarse por un cambio sistemático del régimen pluvial regional, tanto en cantidad total como en el patrón de estacionalidad*».

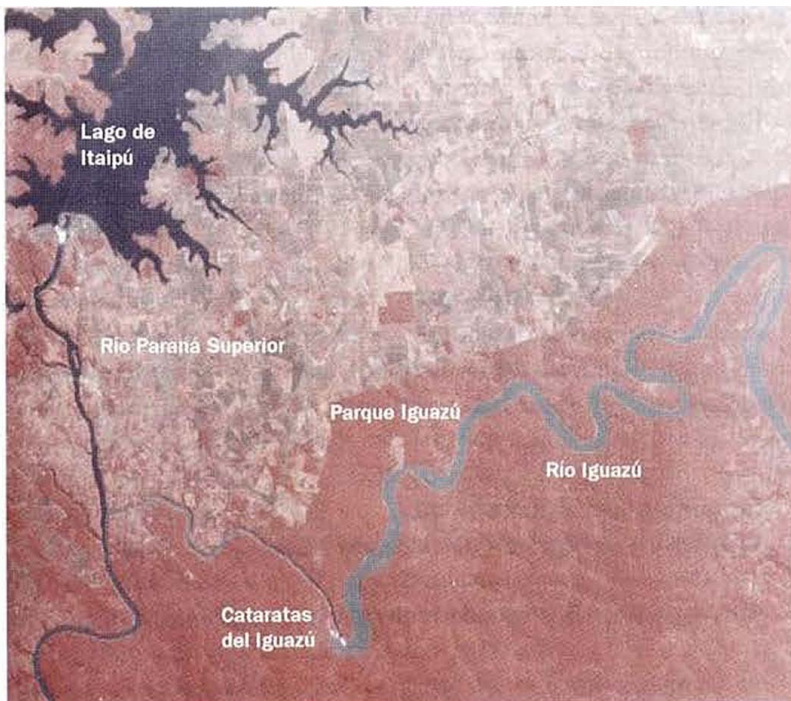
También dentro de este contexto resulta muy interesante el trabajo «*Environmental Issues in the Plata Basin*», de Tucci, C.(1997) , donde se

indica que los principales desarrollos e impactos ambientales en la cuenca del Plata han sido:

- \* desarrollo de reservorios con finalidades de producción energética en el Alto Paraná (entre 1960 - 1990).
- \* deforestación en las cuencas (desde 1950).
- \* introducción de prácticas de agricultura intensiva luego de 1970
- \* desarrollos urbanos
- \* navegación y conservación del Alto Paraguay.

Asimismo se destaca nuevamente que las series hidrológicas de precipitación y caudales han mostrado incrementos a partir de 1970.

Como ya se expresara, en una cuenca de este tamaño las características hidrológicas varían de subcuenca a subcuenca. En el Alto Paraná, aguas arriba de la llegada del río Iguazú, el principal hecho hidrológico es el cambio en el uso del suelo, de selva natural a suelos arables para producción de soja. Este hecho se ve claramente en el Parque Nacional Iguazú en la Argentina (en estado casi natural) y el límite del sector protegido brasilero, a partir del cual se observa una importante producción agrícola, como se observa en la imagen de satélite de la Figura 2.11.



**Figura 2.11.**  
Deforestación  
en la cuenca  
del río Iguazú  
y Paraná  
Superior

Como otro ejemplo de evolución de la deforestación, en el Estado de Paraná en Brasil indica una cobertura de vegetación autóctona del 83 % en 1890, llegándose luego de 100 años a valores de tan sólo 15%.

Las principales conclusiones del trabajo de Tucci son:

- \* hay un incremento en los caudales en las cuencas del Paraná y Alto Paraguay
- \* la precipitación y los cambios en el uso del suelo son las principales causas de este incremento
- \* no hay evaluación ni respuesta cuantitativa de la influencia de cada factor.

Respecto de las represas para generación hidroeléctrica, la capacidad total de la cuenca del Plata está estimada en 92.000 MW, estando el 53% actualmente explotado o en construcción, siendo las principales áreas de explotación el Alto Paraná y el río Uruguay.

En muchas ocasiones se intentó «culpar» a estas obras de las inundaciones registradas aguas abajo, a veces desconociendo su funcionamiento. Dada la primordial función que en la práctica tales obras tienen (generación hidroeléctrica), existe la tendencia a que los operadores de las mismas pretendan tenerlas permanentemente «llenas», evitando en lo posible el derrame por vertedero (lo cual suele verse como pérdida económica). De por sí, la capacidad de almacenamiento del vaso de las mismas es pequeño comparado con el volumen de una crecida, y teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, la capacidad de laminación de los picos de crecida ha sido muy baja.

Deben destacarse algunos avances recientes en el pronóstico hidrológico a tiempo real, lo cual en ciertos casos permite una operación de las presas que tienda a amortiguar la onda de crecida, produciendo beneficios hacia aguas abajo.

Un claro ejemplo respecto de la baja influencia de las presas en las crecidas resulta el hecho de que en los grandes eventos registrados recientemente no solamente se tienen registros importantes de los ríos Alto Paraná e Iguazú, sino también del río Paraguay, donde no existe ningún aprovechamiento de esta naturaleza.

## **Influencia del fenómeno de El Niño en el régimen de escurrimiento**

### **El fenómeno Niño/Niña con relación a la región**

El fenómeno «El Niño» (del cual se observaron sus primeras manifestaciones en la costa peruana del Pacífico, fundamentalmente en diciembre,

(y de allí su nombre), se refiere a la evolución de las temperaturas del océano Pacífico central-este, cuando estas son «anormalmente» mayores que las comúnmente observadas. Al fenómeno opuesto, o sea, la presencia de temperaturas menores a las normales en la misma región se lo denomina «La Niña», en contraposición al anterior.

El fenómeno denominado «oscilación del sur» consiste en una diferencia de presión este-oeste (en el océano Pacífico), que directamente afecta al clima tropical alrededor del mundo. El fenómeno Niño/Niña ocurre típicamente junto con la oscilación del sur. Se los denomina fenómeno ENSO (ó ENOS), y pueden durar de varios meses a más de un año.

Dado que el ENSO modifica la circulación atmosférica, se le atribuye al mismo el rol más importante en la variabilidad climática año a año, y su efecto inmediato se aprecia en la precipitación.

Actualmente, en medios técnicos y científicos se prefiere la utilización del término anomalía positiva, cuando las temperaturas de la superficie del mar se encuentran sobre un valor medio preestablecido y anomalías negativas en el caso contrario.

Es conocida la fuerte correlación del fenómeno con precipitaciones en la costa Pacífica ecuatorial sudamericana (fundamentalmente Colombia, Ecuador, Perú). No tardó mucho tiempo en reconocerse que las manifestaciones del fenómeno podrían tener características globales, ya que se trataba de la variación de temperaturas del océano Pacífico, la mayor masa líquida del planeta.

Con posterioridad comenzaron a realizarse una serie de estudios tendientes a encontrar vinculaciones entre las variaciones de las temperaturas del mar, en diferentes regiones tropicales (que se denominaron Niño 1, 2, 3 y 4, con algunas variantes) y situaciones anómalas que se daban dentro y fuera de las zonas tropicales. Así es que en la actualidad, y en casi todo el mundo, se ha tratado de vincular las variaciones del fenómeno con las variables climáticas y las principales variables hidrológicas.

Como ejemplo de ello, con base en eventos históricos registrados y en términos generales, se indica que condiciones más húmedas que lo normal se observan desde sur de Brasil hacia el centro de la Argentina, cuando se está en presencia de un fenómeno Niño (cálido). Durante un evento Niña (frío), en general se indican condiciones más secas que lo normal durante la estación invernal.

Con relación directa al río Paraná, en el trabajo **Estudio de Regulación del Valle Aluvial de los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay para el Control de las Inundaciones**, de Sir W. Halcrow and Partners - SUCCE. (1994), se indicaba un cuadro conteniendo años de eventos cálidos en la corriente de El Niño y años con crecidas registradas, que se transcribe a continuación.

| <b>Año de El Niño</b><br>(evento cálido) | <b>Año de la crecida</b><br>cuyo pico supera<br>al del intervalo de<br>retorno de 1:10 años |
|--|---|
|  | <b>Río Paraná</b>   |
| 1991                                     | 1992  |
| 1986                                     | 1987  |
| 1982                                     | 1982/3  |
| 1976                                     | 1977  |
| 1972                                     | 1974  |
| 1965                                     | 1965/6  |
| 1963                                     | 1963  |
| 1957                                     | 1957  |
| 1953                                     | 1954  |
| 1951                                     | 1951  |
| 1939                                     | 1939  |
| 1932                                     | 1932  |
| 1930                                     | 1931  |
| 1925                                     | 1926  |
| 1923                                     | 1923  |
| 1918                                     | 1919  |
| 1913                                     | 1913  |
| 1911                                     | 1912  |
| 1904                                     | 1905  |
| 1877                                     | 1878  |

Al que debe  
anexársele el  
fenómeno del  
año 1997/98.

Posteriormente en Cacik, P. (1995), se realizaron distintas comparaciones entre temperaturas del océano Pacífico (los mejores resultados se obtienen de la zona denominada Niño 3) y caudales trimestrales en las estaciones de Posadas (caudal medio anual 12.600 m<sup>3</sup>/s) y Corrientes (caudal medio anual 17.500 m<sup>3</sup>/s), sobre el río Paraná.

| Año(meses) | Caudales (m <sup>3</sup> /s) |            | Anomalías de temperaturas NIÑO 3 (C) |      |        |        |
|------------|------------------------------|------------|--------------------------------------|------|--------|--------|
|            | POSADAS                      | CORRIENTES | EFM                                  | AMJ  | JAS    | OND    |
| 1983(AMJ)  | 31.300                       | 46.399     | 3,45                                 | 0,92 |        |        |
| 1992(AMJ)  | 23.420                       | 33.451     | 1,83                                 | 1,78 |        | 1,11*  |
| 1966(EFM)  | 23.170                       | 34.439     | 0,84                                 |      | 1,49*  | 1,41*  |
| 1977(EFM)  | 20.222                       | 27.112     | 0,93                                 |      | 1,27*  | 0,97*  |
| 1951(EFM)  | 20.015                       | 24.108     | -0,05                                |      | -0,35* | -0,72* |
| 1961(EFM)  | 19.755                       | 23.966     | -0,10                                |      | -0,94* | -0,46* |
| 1980(EFM)  | 19.608                       | 26.468     | 0,23                                 |      | 0,47*  | 0,41*  |
| 1982(OND)  | 19.364                       | 28.082     |                                      | 2,78 | 1,44   | 2,73   |
| 1965(EFM)  | 19.296                       | 24.263     | -0,52                                |      | -1,07  | -1,02  |
| 1990(EFM)  | 19.133                       | 22.421     | 0,0                                  |      | -0,13* | -0,26* |

(\*) corresponde al año anterior

Mayores caudales trimestrales registrados y anomalías de temperaturas

Encontrándose coeficientes de correlación máximos del orden de  $r=0,64$ .

### Perspectiva de los pronósticos climáticos estacionales con relación a las variaciones del régimen de escurrimiento

La NOAA (Agencia de Administración del Océano y la Atmósfera - EEUU) ha computado en todo el mundo anomalías de precipitación para eventos de El Niño y la Niña (o fase cálida y fría del mismo fenómeno). La anomalía es determinada sencillamente como diferencias respecto del valor medio de un determinado período. A partir del conocimiento de un fenómeno cálido o frío, podría analizarse qué se esperaría en el mismo período de análisis o siguientes. De esta manera se puede tener una idea de qué podría ocurrir en el futuro mediano (máximo 6 meses a un año) conociendo el fenómeno que está transcurriendo, y conociendo los pronósticos de evolución de éste se podría intentar aun adelantar una perspectiva futura. A partir de un análisis de esta naturaleza surge la respuesta a la existencia de un gran número de modelos que intentan pronosticar las anomalías esperadas del fenómeno Niño.

En la actualidad, la mayoría de los pronósticos de temperaturas y precipitaciones a mediano (estacionales) y largo plazo se basan en análisis de efectos que el fenómeno ENSO posee sobre ciertas regiones, atribuyéndole el rol más importante en la variabilidad climática año a año.

Existe un importante número de modelos que permiten obtener estimaciones a mediano y largo plazo de la evolución del fenómeno Niño (fundamentalmente temperaturas de la superficie del mar). La importancia de es-

tos resultados está en la asociación que puede hacerse entre distintas etapas del Niño y eventos hidrometeorológicos en distintas regiones del planeta.

En los estudios mostrados en los puntos anteriores se desprende la existencia de una «significativa relación» entre el ENSO y la variabilidad del clima (o productos de la misma) en regiones importantes de la Argentina. Debe prestarse una delicada atención a los vocablos y los ámbitos donde es correcto afirmar una «significativa relación», atendiendo a que este término abarca en términos medios y globales amplias superficies (regiones) e intervalos amplios de tiempo (en general un nivel mínimo es el trimestral). Si bien los pasos que sigue la ciencia en este sentido se dirigirán a disminuir las superficies para las cuales se realiza el pronóstico y ajustar los intervalos de tiempo, estos (a nivel incluso mundial) son pasos que recién comienzan.

Así es que debe tenerse en claro que el fenómeno Niño no es el origen de las precipitaciones, ni el único fenómeno que actúa a nivel global para que estas se produzcan (o dejen de producirse), ni el que decide exactamente dónde, cuándo o cuánto precipitará. Esta última afirmación no debe dejar de lado el importantísimo avance que se ha tenido en los últimos 20 años ni los esfuerzos que todavía deben realizarse para relacionar las variaciones del fenómeno Niño con la circulación atmosférica global y con distintas variables hidrometeorológicas.

El International Research Institute for Climate Prediction (EEUU) aclara expresamente que el estado actual del pronóstico del clima estacional e interanual permite predicciones de promedios espaciales y temporales, y no tiene completamente en cuenta todos los factores que influyen la variabilidad climática regional. Por lo tanto los pronósticos a mediano y largo plazo sólo son válidos para escalas de tiempo estacionales y relativamente grandes áreas y deberán esperarse variaciones locales.

## Bibliografía

- Anderson R. J.; Dos Santos N. y Díaz H. F.** (1993). *An analysis of flooding in the Parana/Paraguay Basin*. LATEN Dissemination Note N° 5. The World Bank. Latin America and the Caribbean Region TD. Washington, USA
- Berri, J.** (1997). *Efectos de El Niño sobre la variabilidad climática, agricultura y recursos hídricos en el sudeste de Sudamérica*. Taller y Conferencia sobre El Niño. Montevideo, Uruguay, 10-12 dic. 1997.
- Cacik, P.; Paoli, C. y Bolzicco, J.** (1993). *Impacto de las últimas crecidas del río Paraná en la determinación de caudales de diseño*. En: I Simposio de Recursos Hídricos do Cone Sul. Gramado, Brasil, pp. 371 - 380.
- Cacik, P.** (1995). *Relaciones entre variabilidad climática en los océanos Pacífico y Atlántico y los caudales registrados en un sector de la Cuenca del río Paraná*. IRIP-CR\_SF96/1.
- García, N. y W. Vargas.** (1996). *Análisis de la variabilidad climática en la cuenca del Plata a través de sus caudales*. Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología.
- Giacosa, R. y N. García.** (1998). *Discharge analysis in the Rio de la Plata basin*. 78 AMS Annual Meeting. Phoenix, Arizona, USA.
- Halcrow & Ptners.** (1994). *Estudio de regulación del valle aluvial de los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay para el control de las inundaciones*. Informe Final. Anexo B: Hidrología.
- Motor Columbus y Asociados** (1979a). *Evaluación de daños atribuibles a las crecidas*. Volumen 4 del estudio de crecidas ríos Paraná y Paraguay. Buenos Aires. Argentina.
- Paoli, C.; Cacik, P. y Bolzicco, J.** (1997). *Management of Paraná riverfloods under increasing uncertainty*. 13<sup>th</sup> Conference on Hidrology and Seventh Conference on Climate Variations, Joint Sessions, pp 166-69. 77<sup>th</sup> AMS Annual Meeting. Long Beach, California, USA.
- República Argentina** (1997). *Estadística Hidrológica*. Subsecretaría de Recursos Hídricos. Editado por EVARSA.
- Tuccl, C.** (1997). *Environmental issues in the Plata River*. Federal University of Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brazil.
- World Bank** (1996). *Flood Protection Project*. Report No 15354-AR.



# 2.

## **CONOCIMIENTO DEL REGIMEN HIDROLÓGICO Actualización**

Ricardo GIACOSA, Carlos PAOLI  
y Pablo CACIK

## 2.

### **Introducción**

#### **Estadística descriptiva de caudales medios anuales y mensuales**

Conformación del escurrimiento en el cauce principal  
y afluentes

Curso principal

Tributarios laterales

#### **Análisis de tendencias**

Incidencia en los caudales medios anuales

Incidencia en la distribución de caudales mensuales

#### **Análisis estadístico de caudales anuales**

## **Introducción**

La presente actualización del capítulo se basa en la extensión del análisis del régimen hidrológico del río Paraná en su tramo medio al periodo 2004/05 – 2018/19.

Se disponen, además, de seis nuevas estaciones de medición de caudales de los afluentes: tres de margen derecha (río Salado–Ruta Nacional 11; A. Colastiné–autopista; A. Monje–autopista) y tres de margen izquierda (A. Riachuelo–Ruta Provincial 5; A. Empedrado–Ruta Provincial 6; A. San Lorenzo–Ruta Nacional 12). Si bien desde el punto de vista cuantitativo los caudales que se incorporan no son de gran magnitud con relación al curso principal, su medición constituye un aspecto relevante para el inventario y conocimiento hidrológico de las respectivas subcuencas de aportes.

En base a esta información se presentan las estadísticas descriptivas de los caudales medios anuales y mensuales.

Otra cuestión importante que se presenta es el análisis de tendencia y la influencia que esto tiene en los caudales medios anuales y mensuales.

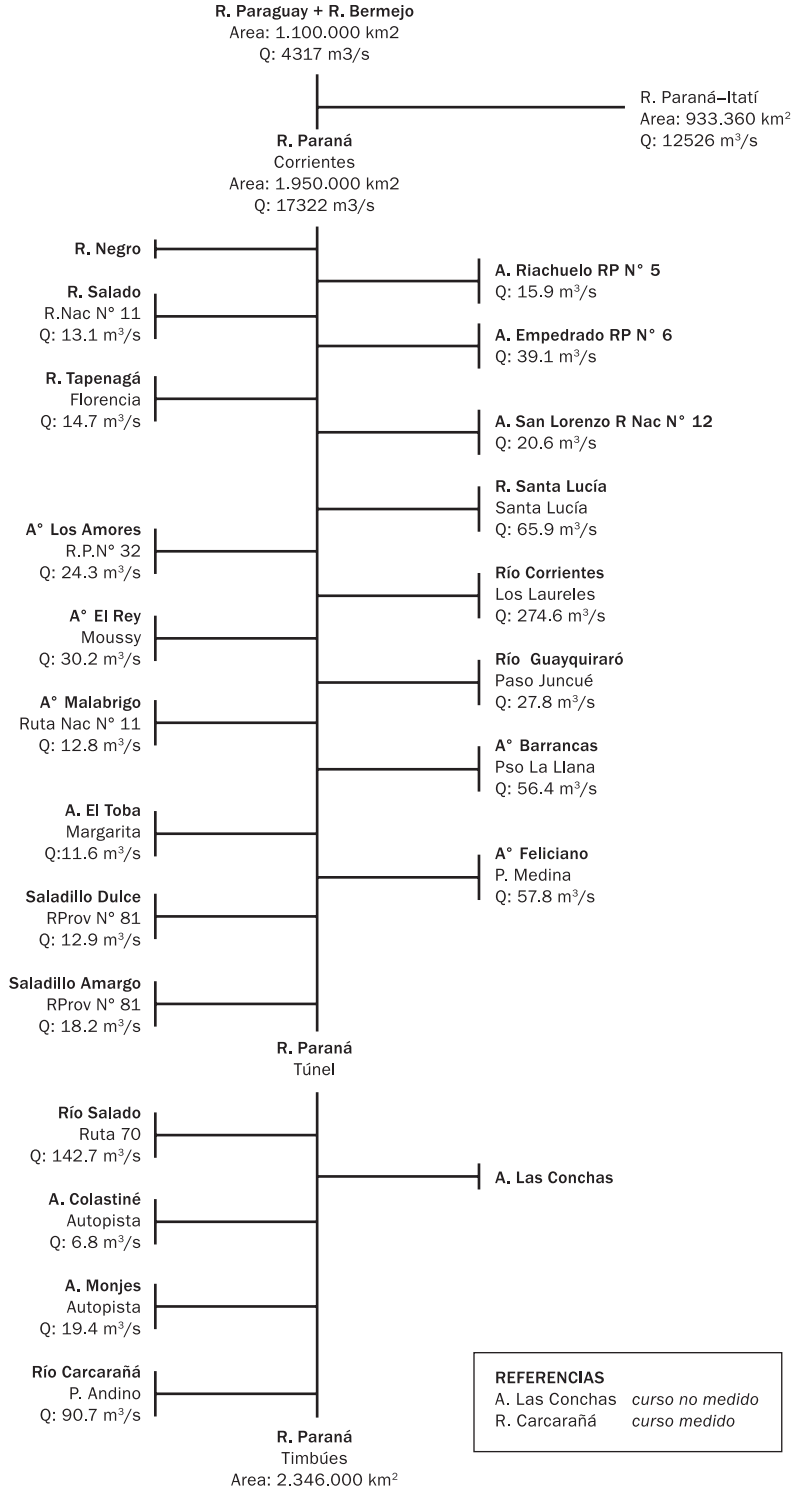
En la figura 2.12 se presenta el esquema simplificado con la conformación de los caudales medios anuales de ingreso y salida al tramo medio y los aportes laterales.

## **Estadística descriptiva de caudales medios anuales y mensuales**

### **Conformación del escurrimiento en el cauce principal y afluentes**

El río Paraná en Corrientes tiene un módulo anual de 17 300 m<sup>3</sup>/s (serie 1904–2019), producto de los aportes del propio Paraná y del río Paraguay. A partir de la confluencia con este último y en todo el tramo medio, incorpora un área de 445 000 km<sup>2</sup>, en tanto que los aportes en términos de caudales anuales medidos y estimados son del orden de 1000 m<sup>3</sup>/s.

**Figura 2.12.**  
Diagrama de aportes de la cuenca del río Paraná, tramo medio.



De estos valores de caudales, 558 m<sup>3</sup>/s corresponden a los aportes medidos de margen izquierda, cuya superficie es de 78 000 km<sup>2</sup>, y 397 m<sup>3</sup>/s a los derrames medidos de margen derecha, cuya superficie es de 367 000 km<sup>2</sup>.

Esta asimetría es producto de las características físicas diferenciadas que presentan las áreas de aportes de ambas márgenes. Las áreas de aportes de los afluentes de margen derecha superan en casi cinco veces a los de margen izquierda. No obstante, en términos de caudales específicos, en todo el tramo los aportes de márgenes derecha e izquierda son de 1 y 7 l/s–km<sup>2</sup>, respectivamente.

Es evidente que el régimen del Paraná es gobernado por los aportes provenientes de Paraguay y Brasil, ya que en todo el tramo medio los afluentes laterales incrementan solo un 5 % el caudal total.

### **Curso principal**

Los caudales medios mensuales en el ingreso al tramo (Estación Corrientes) tienen su valor máximo en el periodo febrero–marzo (21 000 m<sup>3</sup>/s) y mínimos en agosto–septiembre (14 000 m<sup>3</sup>/s). En Timbúes, los máximos y mínimos presentan un desfase de un mes, aproximadamente, en relación con los valores en Corrientes.

Las magnitudes en la sección Túnel corresponden a la del cauce principal y no a la de la sección completa que incluye el río Colastiné–sistema Setúbal y aliviaderos. Por tal razón, los caudales son inferiores a los de la sección Corrientes, y si bien no son comparables en términos de balance, permiten el análisis de sus valores característicos de distribución anual y tendencias. Idéntica situación se presenta en Timbúes, cuyos valores corresponden a los caudales que escurren en el cauce principal.

Los máximos absolutos registrados son del orden de 60 000 m<sup>3</sup>/s, es decir, tres veces y media el módulo.

**Cuadro 2.14.**

Caudales en el cauce principal. Fuente: Anuarios de la Subsecretaría de Recursos Hídricos.

**Río Paraguay. Estación Puerto Pilcomayo. Serie: 1910/11–2018/19**

|     | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May   | Jun   | Jul   | Ago   |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Max | 8550 | 8064 | 7682 | 8431 | 8683 | 7636 | 8125 | 9155 | 11341 | 12392 | 10256 | 10013 |
| Med | 3348 | 3129 | 2959 | 2878 | 2829 | 2947 | 3222 | 3606 | 4296  | 4734  | 4340  | 3823  |
| Min | 763  | 799  | 752  | 860  | 984  | 1190 | 1259 | 1497 | 1403  | 1513  | 1231  | 935   |

Módulo: 3512 m<sup>3</sup>/s.**Río Paraguay (Puerto Pilcomayo) + Río Bermejo (El Colorado). Serie: 1968/69–2018/19**

|     | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Med | 3881 | 3554 | 3358 | 3546 | 4001 | 4291 | 4650 | 4817 | 5008 | 5273 | 5002 | 4427 |

Módulo: 4317 m<sup>3</sup>/s.**Río Paraná. Estación Itatí. Serie: 1904/05–2018/19**

|     | Sep   | Oct   | Nov   | Dic   | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Max | 20484 | 25067 | 22030 | 28991 | 27285 | 29886 | 33960 | 28654 | 33584 | 36475 | 35562 | 22823 |
| Med | 9862  | 11599 | 11705 | 12244 | 13904 | 15768 | 15442 | 13797 | 12429 | 12416 | 11411 | 9972  |
| Min | 4821  | 4651  | 5323  | 5651  | 6436  | 7978  | 7012  | 8394  | 7419  | 6097  | 5483  | 5011  |

Módulo: 12526 m<sup>3</sup>/s.**Río Paraná. Estación Corrientes. Serie: 1904/05–2018/19**

|     | Sep   | Oct   | Nov   | Dic   | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Max | 28379 | 34456 | 29621 | 40956 | 38794 | 40782 | 45117 | 40025 | 47790 | 54468 | 51307 | 34098 |
| Med | 13507 | 15511 | 15933 | 16391 | 18705 | 21168 | 20949 | 19453 | 17890 | 18147 | 16508 | 14006 |
| Min | 4619  | 4092  | 6136  | 6562  | 7444  | 10842 | 10527 | 10982 | 9790  | 7955  | 6706  | 5348  |

Módulo: 17322 m<sup>3</sup>/s.**Río Paraná. Estación Túnel. Serie: 1910/11–2018/19**

|     | Sep   | Oct   | Nov   | Dic   | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Max | 19786 | 23404 | 23236 | 22396 | 26079 | 27397 | 30938 | 27164 | 29046 | 33173 | 32465 | 24610 |
| Med | 11143 | 12094 | 13074 | 13045 | 14184 | 16008 | 17129 | 16901 | 15699 | 14963 | 14296 | 12271 |
| Min | 4796  | 4661  | 5573  | 5566  | 5995  | 8200  | 8537  | 9618  | 8542  | 6821  | 6063  | 5260  |

Módulo: 14222 m<sup>3</sup>/s (Los valores de caudales corresponden solo al cauce principal).**Río Paraná. Estación Timbúes. Serie: 1905/06–2018–19**

|     | Sep   | Oct   | Nov   | Dic   | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Max | 22636 | 22903 | 23743 | 24409 | 28240 | 27564 | 29078 | 27238 | 30921 | 28458 | 28246 | 25801 |
| Med | 12688 | 13414 | 14405 | 14357 | 15267 | 16862 | 18008 | 18116 | 17250 | 16262 | 15701 | 13871 |
| Min | 5874  | 5974  | 6548  | 6885  | 7040  | 9298  | 9872  | 10540 | 9678  | 8003  | 7207  | 6369  |

Módulo: 15507 m<sup>3</sup>/s (Los valores de caudales corresponden solo al cauce principal).

## Tributarios laterales

Los valores de caudales mensuales correspondientes a los aportes de márgenes derecha e izquierda, de los cuales se cuenta con mediciones, se presentan en los cuadros 2.15 y 2.16, respectivamente.

Los aportes laterales en el tramo medio, comprendido entre Corrientes y Timbúes, son del orden del 5 % en relación con los caudales del curso principal. De ellos, el 50 % corresponde a la suma de los ríos Salado (143 m<sup>3</sup>/s) y Corrientes (275 m<sup>3</sup>/s).

### Cuadro 2.15.

Caudales medios (m<sup>3</sup>/s). Tributarios laterales, margen derecha.

Fuente: Anuarios de la Subsecretaría de Recursos Hídricos.

| Sep  | Oct  | Nov  | Dic   | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Mod   |
|--|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Río Salado. Estación Ruta Nacional 11 (Chaco). Serie: 2015/16–2018/19  |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 0.2  | 1.9  | 3.8  | 11.1  | 0.2   | 31.8  | 10.3  | 45.2  | 45.3  | 17.6  | 15.5  | 10.1  | 13.1  |
| Arroyo Tapenagá. Estación Florencia. Serie: 1970/71–2018/19            |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 2.6  | 5.5  | 9.9  | 12.4  | 13.9  | 13.1  | 18.8  | 30.6  | 31.5  | 24.0  | 12.8  | 5.5   | 14.7  |
| Arroyo Los Amores. Estación Ruta Provincial 32. Serie: 1983/84–2018/19 |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 2.5  | 8.5  | 18.1 | 21.0  | 25.4  | 21.7  | 25.1  | 54.2  | 49.7  | 34.1  | 19.8  | 6.9   | 24.3  |
| Arroyo El Rey. Estación Moussy. Serie: 1954/55–2018/19                 |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 8.1  | 14.6 | 32.9 | 32.7  | 30.7  | 31.7  | 38.6  | 56.7  | 51.0  | 33.2  | 26.3  | 16.2  | 30.2  |
| Arroyo Malabrigo. Estación Ruta Nacional 11. Serie: 1985/86–2018/19    |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 2.2  | 5.6  | 14.7 | 16.2  | 18.3  | 14.0  | 18.5  | 30.2  | 17.6  | 6.3   | 6.2   | 3.6   | 12.8  |
| Arroyo El Toba. Estación Margarita. Serie: 1976/77–2018/19             |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 2.9  | 7.1  | 12.8 | 19.8  | 19.3  | 17.8  | 20.2  | 25.7  | 16.5  | 3.9   | 3.2   | 2.3   | 12.6  |
| Arroyo Saladillo Dulce. Ruta Provincial 81. Serie: 1953/54–2018/19     |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 2.1  | 5.6  | 9.5  | 10.1  | 17.0  | 23.3  | 19.7  | 29.2  | 29.1  | 13.4  | 10.2  | 4.2   | 12.9  |
| Arroyo Saladillo Amargo. Ruta Provincial 81. Serie: 1953/54–2018/19    |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 6.2  | 8.4  | 13.1 | 16.2  | 20.3  | 25.6  | 22.9  | 32.2  | 33.2  | 20.9  | 11.9  | 7.8   | 18.2  |
| Río Salado. Ruta Provincial 70. Serie: 1953/54–2018/19                 |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 65.0   | 78.4 | 89.5 | 104.2 | 122.9 | 170.8 | 218.2 | 240.0 | 221.9 | 159.2 | 127.2 | 101.1 | 142.7 |
| Arroyo Colastiné. Autopista. Serie: 1984/85–1998/99                    |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 4.9  | 8.1  | 9.4  | 11.7  | 9.3   | 4.3   | 5.5   | 4.3   | 5.4   | 3.8   | 1.9   | 1.9   | 6.8   |
| Arroyo Monje. Autopista. Serie: 1984/85–1998/99                        |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 8.2  | 12.1 | 33.2 | 31.2  | 23.4  | 27.7  | 25.0  | 10.4  | 17.9  | 14.2  | 4.0   | 2.1   | 19.4  |
| Río Carcarañá. Puerto Andino. Serie: 1980/81–2018/19                   |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 52.1   | 71.8 | 85.6 | 93.7  | 108.4 | 116.8 | 141.8 | 131.8 | 94.5  | 71.9  | 62.2  | 59.7  | 90.7  |

**Cuadro 2.16.**Caudales medios (m<sup>3</sup>/s). Tributarios laterales, margen izquierda.

Fuente: Anuarios de la Subsecretaría de Recursos Hídricos.

| Sep   | Oct   | Nov   | Dic   | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Mod   |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Arroyo Riachuelo. Estación Ruta Provincial 5. Serie: 2015/16–2018/19  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 1.7   | 4.0   | 23.9  | 22.9  | 23.2  | 9.8   | 3.8   | 24.1  | 38.5  | 25.5  | 10.9  | 2.2   | 15.9  |
| Arroyo Empedrado. Estación Ruta Provincial 6. Serie: 2015/16–2018/19  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 9.8   | 9.0   | 34.1  | 35.4  | 59.3  | 26.1  | 18.4  | 59.3  | 101.4 | 69.9  | 35.1  | 11.1  | 39.1  |
| Arroyo San Lorenzo. Estación Ruta Nacional 12. Serie: 2015/16–2018/19 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 2.9   | 6.2   | 10.8  | 20.2  | 53.7  | 19.0  | 7.4   | 35.3  | 43.5  | 23.8  | 20.4  | 3.0   | 20.6  |
| Río Santa Lucía. Estación Santa Lucía. Serie: 1975/76-2018/19         |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 29.7  | 42.6  | 65.6  | 73.3  | 76.4  | 56.8  | 60.0  | 102.4 | 102.2 | 78.8  | 60.6  | 41.8  | 65.9  |
| Río Corrientes. Estación Los Laureles. Serie: 1975/76-2018/19         |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 172.8   | 190.1 | 255.5 | 295.9 | 292.8 | 246.0 | 236.3 | 354.3 | 403.4 | 320.6 | 288.3 | 237.1 | 274.6 |
| Arroyo Guayquiraró. Estación Paso Juncué. Serie: 1975/76–2011/12      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 8.9   | 23.7  | 31.3  | 27.0  | 26.9  | 33.2  | 31.7  | 55.4  | 43.6  | 27.4  | 18.6  | 6.5   | 27.8  |
| Arroyo Barrancas. Estación Paso La Llana. Serie: 1975/76–2018/19      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 18.4  | 38.2  | 51.7  | 52.6  | 61.3  | 65.4  | 65.0  | 101.3 | 106.3 | 56.6  | 38.6  | 22.0  | 56.4  |
| A Feliciano. Estación Paso Medina. Serie: 1975/76–2018/19             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 26.0  | 50.8  | 66.2  | 67.6  | 52.2  | 61.3  | 65.9  | 131.5 | 79.6  | 45.1  | 26.5  | 21.8  | 57.8  |

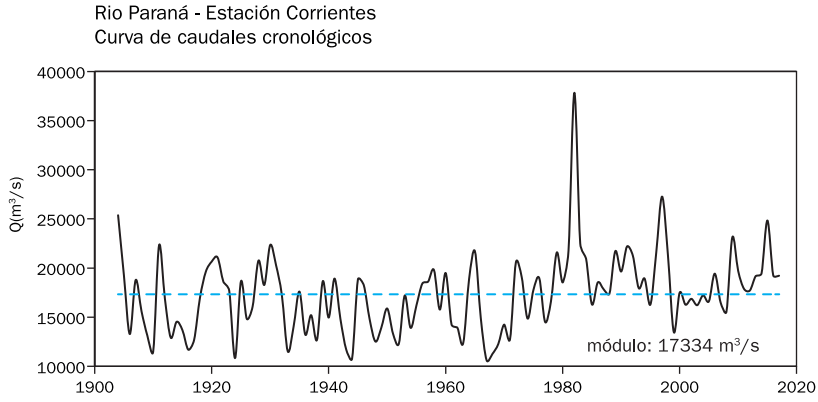
**Análisis de tendencias****Incidencia en los caudales medios anuales**

Se analizaron las series actualizadas de caudales anuales de las estaciones Corrientes, Túnel y Timbúes sobre el río, en las que se observa en las curvas cronológicas (Figuras 2.13, 2.14 y 2.15).

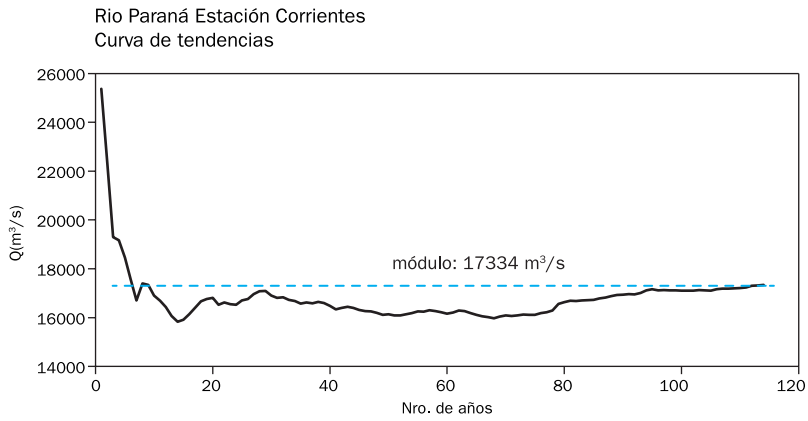
En las estaciones del río Paraná, a partir de la crecida extraordinaria registrada en 1998, los caudales anuales se mantienen alrededor del valor medio, con una leve tendencia positiva.

Las curvas de medias deslizantes cronológicas (Figuras 2.13, 2.14 y 2.15) se ubican por debajo de la media total y son ascendentes en su último tramo, denotando la tendencia al aumento del módulo del río. Las curvas medias móviles para muestras de 10 años, que se observan en dichas figuras, también muestran el mismo efecto.

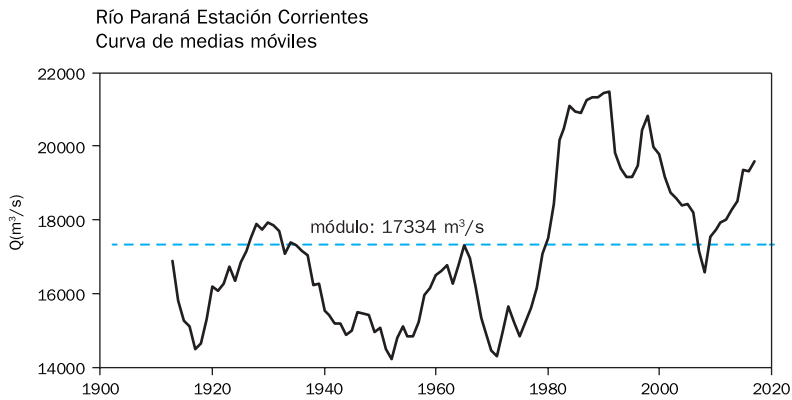




**Figura 2.13.a.**  
Curva de caudales cronológicos anuales en la Estación Corrientes en el río Paraná.

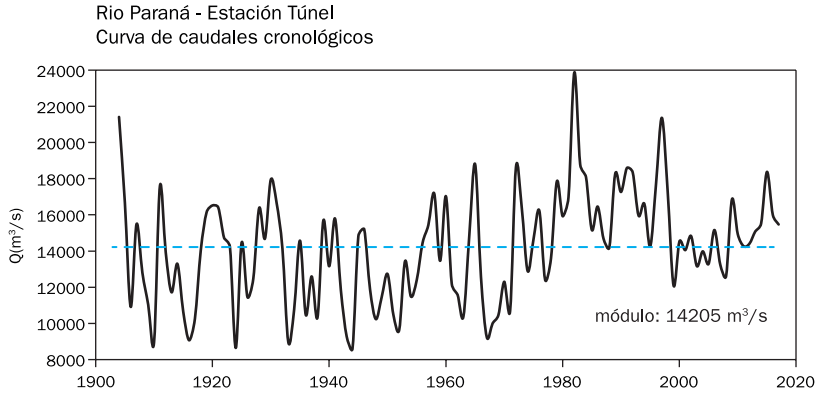


**Figura 2.13.b.**  
Curva de tendencia en la Estación Corrientes en el río Paraná.

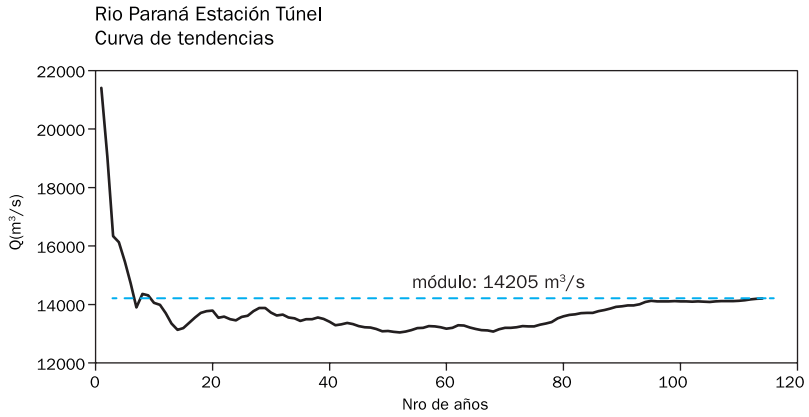


**Figura 2.13.c.**  
Curva de medias móviles en la Estación Corrientes en el río Paraná.

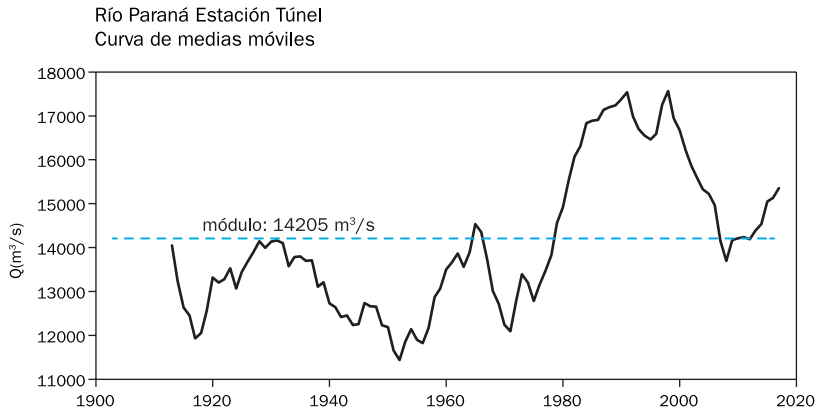
**Figura 2.14.a.**  
Curva de caudales cronológicos anuales en la Estación Túnel en el río Paraná.



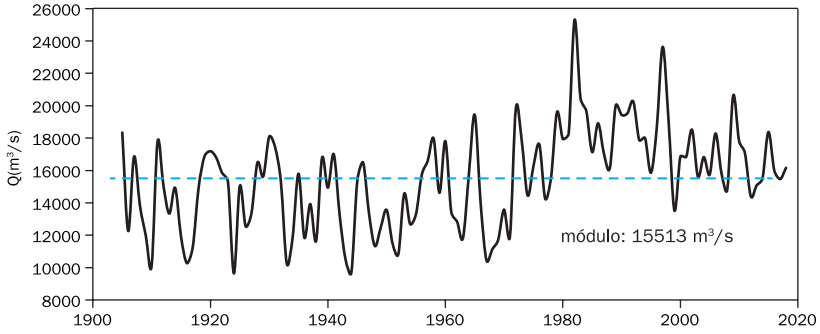
**Figura 2.14.b.**  
Curva de tendencia en la Estación Túnel en el río Paraná.



**Figura 2.14.c.**  
Curva de medias móviles en la Estación Túnel en el río Paraná.

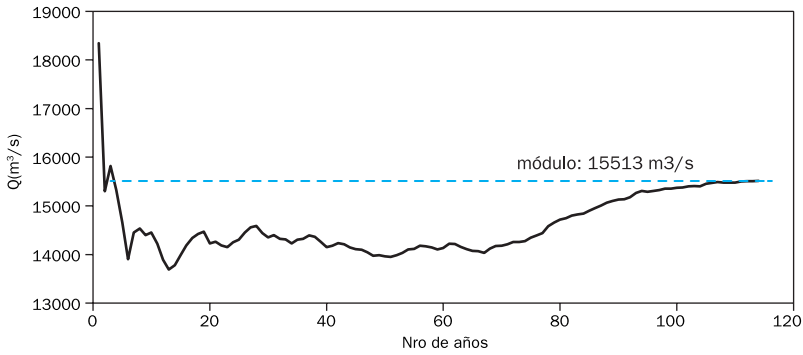


Río Paraná - Estación Timbúes  
Curva de caudales cronológicos



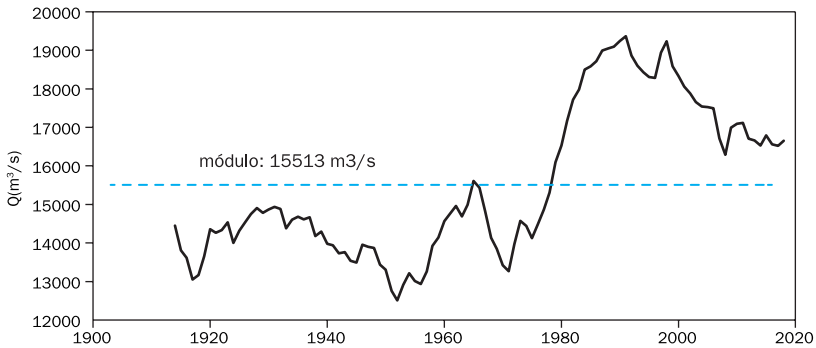
**Figura 2.15.a.**  
Curva de caudales cronológicos anuales en la Estación Timbúes en el río Paraná.

Río Paraná - Estación Timbúes  
Curva de tendencias



**Figura 2.15.b.**  
Curva de tendencia en la Estación Timbúes en el río Paraná.

Río Paraná - Estación Timbúes  
Curva de medias móviles



**Figura 2.15.c.**  
Curva de medias móviles en la Estación Timbúes en el río Paraná.

En dichos análisis se observa, además de la tendencia incremental positiva de la media, un apreciable salto en 1983, año en que se produjo una crecida extraordinaria.

Ante la necesidad de realizar análisis cuantitativos de la incidencia sobre las características del régimen hidrológico, se adoptaron como series modernas las que comienzan en el año 1971, donde claramente se inicia un periodo en que en la mayoría de los años se registran valores de caudales anuales con magnitudes superiores a la media de la serie total.

La magnitud de los cambios en el periodo 1971–2019, con relación a la serie total, da lugar a una diferencia positiva del caudal medio anual del río, que es del orden del 15–24 %, según la estación considerada (Cuadro 2.17).

En la sección Túnel se registran caudales solo en el cauce principal, por lo que la disminución de caudales (-2.8 %) se debe a una redistribución de caudales en toda la sección.

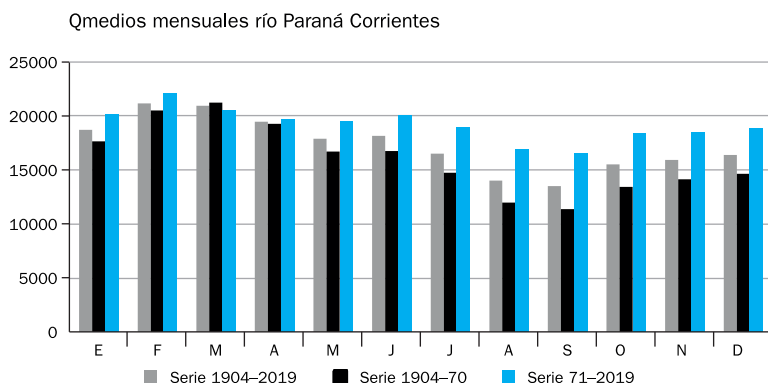
Esto es observable considerando la sección Santa Fe–Paraná, donde la suma: Túnel + Colastiné + Setúbal muestra una diferencia positiva de 24,3 %.

**Cuadro 2.17.**  
Caudales medios anuales de los ríos Paraguay y Paraná para distintos periodos de análisis.

| Curso                                | Módulo 1905–2019 | Módulo 1971–2019 | Incremento (%) |
|--------------------------------------|------------------|------------------|----------------|
| Paraguay – Puerto Pilcomayo          | 3415             | 3996             | 17             |
| Paraná – Itatí                       | 11 402           | 14 145           | 24             |
| Paraná – Corrientes                  | 17 334           | 19 203           | 10.8           |
| Paraná – Túnel (cauce principal)     | 14 205           | 13 808           | -2.8           |
| Paraná – Túnel + Colastiné + Setúbal | 15 743           | 19 575           | 24.3           |
| Paraná – Timbúes (cauce principal)   | 15 513           | 17 500           | 12.8           |

### Incidencia en la distribución de caudales mensuales

En la figura 2.16 se comparan los caudales medios mensuales, que se obtienen para la serie completa 1904–2019, con los que corresponden a los periodos 1904–1970 y 1971–2019. En los meses de enero, mayo y junio, los caudales medios mensuales de la serie 1971–2019 son entre un 15–20 % mayores que los de la serie 1904–1970. Estas diferencias aumentan a un 25–40 % en los meses de julio a diciembre y son prácticamente despreciables para los meses de febrero, marzo y abril.



**Figura 2.16.** Caudales medios mensuales del río Paraná en Corrientes para distintos períodos.

Estos resultados muestran que el aumento de caudales más significativos se produce sobre fines de invierno, primavera y principios de verano, resultando la primera parte del otoño la estación con menos alteración respecto a los caudales medios mensuales históricos.

### Análisis estadístico de caudales anuales

Se efectuó el ajuste de distribuciones teóricas a las series de caudales anuales del período completo 1904/1905–2018/2019, y teniendo en cuenta lo observado en las curvas de caudales anuales cronológicos y los análisis de tendencia del punto anterior, se realizó el mismo análisis para la serie 1970/1971–2018/2019. Las características estadísticas principales de ambas muestras se resumen en el siguiente cuadro.

| Período         | Q anual medio (m³/s) | Q anual máximo (m³/s) | Q anual mínimo (m³/s) | Coef. de variación | Coef. de asimetría |
|-----------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| 1904/05-2018/19 | 17.348               | 37.834 (1982/83)      | 10.615 (1967/68)      | 0,23               | 1,26               |
| 1970/71-2018/19 | 19.105               | 37.834 (1982/83)      | 12.755 (1970/71)      | 0,21               | 2,31               |

**Cuadro 2.18.** Principales características estadísticas de la serie completa y moderna de caudales anuales del río Paraná en Corrientes.

Se observan claramente las diferencias que se presentan entre la serie completa y la denominada serie moderna, ya que en esta última el módulo es 1700 m³/s mayor.

Se efectuó el análisis de frecuencia con la distribución GEV adoptada (Generalized Extreme Value, por sus siglas en inglés) y los valores esperados para diferentes recurrencias se muestran en los cuadros 2.19 y 2.20.

**Cuadro 2.19.**

Caudales anuales esperados en el río Paraná en Corrientes, con diferentes valores de probabilidad de ser superados, según la serie considerada ( $m^3/s$ ).

| Probabilidad anual de ser superado (%) | Recurrencia asociada (años) | Serie completa 1904/05-2018/19 | Serie moderna 1970/71-2018/19 |
|--|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 50                                     | 2                           | 17 055                         | 18 410                        |
| 20                                     | 5                           | 20 483                         | 21 716                        |
| 10                                     | 10                          | 22 436                         | 23 984                        |
| 2                                      | 50                          | 25 996                         | 29 207                        |
| 1                                      | 100                         | 27 242                         | 31 514                        |

**Cuadro 2.20.**

Caudales anuales esperados en el río Paraná en Corrientes, con diferentes valores de probabilidad de no ser alcanzados, según la serie considerada ( $m^3/s$ ).

| Probabilidad anual de no ser alcanzado (%) | Recurrencia asociada (años) | Serie completa 1904/05-2018/19 | Serie moderna 1970/71-2018/19 |
|--|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 50   | 2                           | 17 055                         | 18 410                        |
| 20   | 5                           | 14 076                         | 16 043                        |
| 10   | 10                          | 12 683                         | 15 059                        |
| 2  | 50                          | 10 471                         | 13 628                        |
| 1  | 100                         | 9752                           | 13 193                        |

Al considerar la serie moderna, aumentan notoriamente los caudales anuales esperados. Para 100 años de recurrencia, el valor del caudal anual calculado con la serie moderna es un 15 % mayor con respecto al valor que se obtiene al tomar la serie completa.

Desde el punto de vista estadístico, además de las evidencias presentadas de una tendencia a un aumento del módulo del río, tiene una gran incidencia el valor excepcional del caudal medio del año 1983, de 37 834 ( $m^3/s$ ). En el Capítulo 3, referido al conocimiento, régimen y estimación de crecidas, se trata detalladamente el comportamiento de la crecida del año 1983, la mayor del siglo.

# 3.

## **RÉGIMEN DE CRECIDAS Y ANÁLISIS DE CAUDALES MÁXIMOS**

Carlos PAOLI y Pablo CACIK

# 3.



## Introducción



### Antecedentes relevantes en el estudio de las crecidas



### Características de los picos e hidrogramas de crecidas del río Paraná en Corrientes



#### Estacionalidad de los picos



#### Características comparativas de los hidrogramas de las principales crecidas



### Análisis de homogeneidad y estadísticos muestrales de las series de caudales máximos



#### Serie de caudales máximos del río Paraná



#### Aplicación de test de homogeneidad



#### Análisis de propiedades estadísticas



### Aspectos conceptuales y generales del análisis de frecuencia de crecidas



#### Características de las crecidas y finalidad del análisis de frecuencia



#### Incertidumbre de las estimaciones



### Modelos probabilísticos utilizados y estimación de parámetros



#### Familias de modelos probabilísticos



#### Métodos de estimaciones de parámetros



#### Aplicación y cálculo de distribuciones seleccionadas al río Paraná



### Selección de distribuciones y análisis robusto



#### Criterios a utilizar



#### Inserción de las muestras y submuestras en los diagramas de momentos



#### Representaciones gráficas y ajuste visual



#### Pruebas de bondad de ajuste

#### Análisis robusto de selección





**Introducción de marcas históricas**

Información histórica y su uso en la estimación de crecidas



Métodos tradicionales que permiten Incorporar Información histórica



Introducción de las marcas históricas de niveles en Corrientes



**Bibliografía**

## Introducción

El alcance de este capítulo se refiere exclusivamente al régimen de crecidas que originan las grandes inundaciones en el territorio argentino y en particular en el denominado tramo medio del río Paraná; por lo tanto no se tratan todos los estudios hidrológicos realizados sobre el río ni se analizan exhaustivamente las crecidas registradas en estaciones aguas arriba o aguas abajo del tramo indicado.

Interesa historiar la evolución en los estudios y análisis de las crecidas, identificando sus limitaciones y alcances, para efectuar la comparación con los propios estudios realizados por la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), cuya finalidad es el conocimiento como base para el planteo y dimensionamiento de medidas estructurales y no estructurales tendientes a disminuir los daños por inundaciones.

En función de ello se han seleccionado y comentado los antecedentes juzgados como más importantes, teniendo en cuenta que se trata de trabajos específicos y que aportan cronológicamente a un mejor conocimiento de la magnitud, forma y frecuencia de las crecidas.

A partir de los trabajos realizados por la FICH y a los fines de este libro, se han actualizado las series de datos disponibles, dedicando un gran esfuerzo al análisis básico y de homogeneidad de los mismos. Se describen las características de estacionalidad de los picos de crecida y su variación en diferentes períodos.

Se evalúan las formas de las crecidas y se presentan los hidrogramas de las más significativas.

Posteriormente se presentan los aspectos conceptuales y metodológicos del estudio de crecidas en grandes ríos y se efectúa el desarrollo y aplicación de las metodologías que han sido seleccionadas para los distintos análisis realizados.

## Antecedentes relevantes en el estudio de las crecidas

Uno de los primeros análisis del proceso de crecida del río Paraná data de 1906 y se refiere a la Gran Creciente de 1905, siendo su autor el Ing. Oscar Wahlquist (1906). En el mismo se comparan las oscilaciones de nivel en Asunción, Posadas, Corrientes, La Paz, Paraná y Baradero, indicando además el área de afectación a lo largo de todo el valle en escala 1:200.000 y de las ciudades de Santa Fe y Goya.

Se indica que en el Alto Paraná superior, la crecida se desarrolló con gran rapidez, bajando de la misma forma y resultando más baja que la de 1878 y algo inferior a la de 1891. En el río Paraguay la creciente superó a las anteriores conocidas y la misma situación se produce desde Corrientes hacia aguas abajo.

El relevamiento efectuado indicó que 26.760 km<sup>2</sup> se habían inundado a lo largo del valle de los ríos Paraguay y Paraná. La tercera parte de la ciudad de Santa Fe estuvo varios días bajo agua al igual que casi la mitad de la ciudad de Goya, mientras que Resistencia se salvó por la acción de los habitantes que construyeron rápidamente terraplenes, lo que evitó el avance de las aguas (se estima que las partes más altas del pueblo se hubieran cubierto con 20 cm de agua).

Posteriormente a dicha fecha y hasta 1977 aproximadamente, se efectuaron numerosos estudios e informes en los que se trataba el régimen de crecidas de los ríos Paraná y Paraguay, principalmente por parte de organismos estatales, como la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables (DNCPVN), el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Agua y Energía Eléctrica (AyEE) (1960), la Comisión Nacional de la Cuenca del Plata (CONCAP) (1970 y 1972) y el Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas (INCYTH) (1975).

También se realizaron estudios con el apoyo de organismos internacionales como CEPAL-CFI (1964), OEA (1969) o UNESCO-UNDP (1973) y otros ejecutados por consultoras internacionales dirigidos a los aprovechamientos hidroeléctricos o de navegación como los de Harza y Asociados (1973), IECO/ELC (1974), Lahmeyer-Harza y Asociados (1977), etc.

En 1979 culmina un trabajo encargado por la Entidad Binacional Yacypretá a la firma Motor Columbus y Asociados denominado «Estudio de Crecidas Ríos Paraná y Paraguay» que se constituye en uno de los más extensos y completos análisis realizados hasta esa fecha, que comprende e integra a todos los informes y estudios anteriores. Constituye además un hito fundamental en la recopilación y manejo de información hasta el momento dispersa y en la introducción de modernas metodologías de análisis de frecuencia y simulación.

Luego de producirse la mayor crecida del siglo en 1982/83, se efectúan numerosos estudios y análisis por parte de organismos públicos y privados, mereciendo destacarse por ser de los primeros, el realizado por el Ing. E. Aisiks (1984) en su trabajo «La gran crecida del río Paraná de 1983» y posteriormente los de Ceirano, E. (1985) y Paoli, C. (1987).

A partir de 1990 la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad del Litoral comienza una serie de estudios sobre la hidrología y régimen de crecidas del río Paraná, que continúan en la actualidad.

Luego de la crecida de 1992, el Gobierno nacional a través del Ministerio del Interior implementa un programa de Emergencia por inundaciones en cuyo marco la empresa Sir William Halcrow and Partners Ltd., realiza el «Estudio del Valle aluvial de los Ríos Paraná, Paraguay y Uruguay para el control de las Inundaciones», que finaliza en 1994.

Resulta por lo tanto de interés resumir y resaltar las principales conclusiones a las que se arriba en los estudios más importantes indicados.

«Estudio de Crecidas Ríos Paraná y Paraguay» Motor Columbus y Asociados, 1979

Se consideró que la estación de Corrientes, ubicada después de la confluencia de los ríos Paraná y Paraguay, era la más representativa para describir en forma completa las características de las crecidas que ingresan al tramo medio. El resultado del análisis de los datos correspondientes a esta estación para el período 1904 a 1978 fue el siguiente:

- En dos de cada tres años ocurren crecidas que alcanzan proporciones tales que se producen daños.
- La ocurrencia de las crecidas que causan daños apreciables es en promedio de una cada diez años.

Por otra parte, en los 103 años de registros de observación en Rosario (hasta 1978), las tres crecidas mayores observadas, las de los años 1878, 1905 y 1966, fueron aproximadamente de la misma magnitud. Además se pudo reconstruir las alturas máximas de las crecidas de 1812, 1858 y 1878 en Corrientes. Durante estas crecidas se inundaron extensas áreas urbanas, como también unas 4.500.000 ha de tierras.

Se concluyó que en general las crecidas se deben en forma preponderante a los aportes del Alto Paraná, aguas arriba de Guaira. Sin embargo ocasionalmente los aportes de la cuenca baja del Alto Paraná entre Guaira y Confluencia son las principales causas de inundaciones a lo largo del Paraná Medio e Inferior, tal como lo fue en los años 1905 y 1936. Los altos valores para la desviación estándar para el caso de la cuenca entre Guaira y Confluencia reflejan el potencial de crecidas menos frecuente pero sin

embargo extremadamente peligroso de esta cuenca. Se estimó que los aportes de la cuenca del Paraná aguas abajo de Confluencia incrementan los volúmenes de crecidas registrados en Corrientes en un 10%.

No obstante, crecidas como las ocurridas en los años 1905 y 1966 se debieron a varios máximos ocurridos al mismo tiempo. La de 1905 resultó probablemente de la ocurrencia simultánea de grandes crecidas provenientes de la cuenca baja del Alto Paraná, superpuestas sobre otras tardías de la cuenca alta del Paraná y de la cuenca del río Paraguay.

La crecida de 1966 resultó de grandes caudales originados en la cuenca baja del río Paraguay y de la cuenca del Paraná Medio e Inferior, ocurriendo simultáneamente con el pico anual del Alto Paraná.

Con referencia al Paraná Medio se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Los caudales máximos en el Paraná Medio ocurren predominantemente en los meses de febrero y marzo. Estos máximos son causados principalmente por las crecidas originadas en las cuencas del Alto Paraná aguas arriba de Guaira.

- Los repuntes observados en los meses de octubre y junio se deben fundamentalmente a lo siguiente:

- octubre: las crecidas de la cuenca entre Guaira y Posadas.
- junio: las crecidas de la cuenca entre Guaira y Posadas sumadas a las de la cuenca del río Paraguay.

En el Paraná Inferior se concluyó que los máximos ocurren generalmente en los meses de marzo, abril y mayo con un repunte en julio.

Se determinaron los hidrogramas de dos crecidas máximas probables (CMP) en base a dos escenarios diferentes:

CMP-A. Una crecida máxima probable para el río Iguazú y los otros tributarios del río Paraná entre Guaira y Posadas ocurriendo al mismo tiempo que grandes crecidas provenientes del Alto Paraná aguas arriba de Guaira, del río Paraguay y de los tributarios del Paraná aguas abajo de Confluencia.

CMP-B. Una crecida máxima probable del Alto Paraná mismo aguas arriba de su confluencia con el río Iguazú ocurriendo al mismo tiempo que grandes crecidas provenientes del río Iguazú y del río Paraguay así como de los tributarios del Paraná aguas abajo de Confluencia.

Los caudales máximos calculados por el modelo hidrodinámico de Motor Columbus con la CMP-A, fueron de 90.000 m<sup>3</sup>/s para Corrientes y del orden de los 78.000 m<sup>3</sup>/s para el tramo medio, lo que indica una amortiguación muy grande del pico, que era aún más acentuada con la CMP-B.

«La gran crecida del río Paraná de 1983», Aisiks, E. (1984)

En este trabajo se calculó el volumen total precipitado sobre la cuenca entre los períodos de noviembre de 1982 a marzo de 1983 y noviembre 1982 a julio de 1983 y también el volumen escurrido en Posadas, calculándose la escorrentía durante esos dos períodos. Se presentaron los siguientes resultados:

| Período                          | Valores Medios (1901-82) | Valores de 1983         |
|----------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>1) Volúmenes precipitados</b> |                          |                         |
| Anual                            | 1337,3 km <sup>3</sup>   | n.d.                    |
| Noviembre/marzo                  | 869,8 km <sup>3</sup>    | 1.088,8 km <sup>3</sup> |
| Noviembre/julio                  | 1103,1 km <sup>3</sup>   | 1.572,1 km <sup>3</sup> |
| <b>2) Volúmenes escurridos</b>   |                          |                         |
| Anual                            | 358,0 km <sup>3</sup>    | 891,2 km <sup>3</sup>   |
| Noviembre/marzo                  | 170,7 km <sup>3</sup>    | 373,0 km <sup>3</sup>   |
| Noviembre/julio                  | 289,3 km <sup>3</sup>    | 730,5 km <sup>3</sup>   |
| <b>3) Escorrentías</b>           |                          |                         |
| Anual                            | 0,268                    | n.d.                    |
| Noviembre/marzo                  | 0,196                    | 0,343                   |
| Noviembre/julio                  | 0,262                    | 0,465                   |

Cuenca del río Paraná  
Volúmenes precipitados y escurridos hasta Posadas

n.d.: no disponible

Aisiks concluye "que la escorrentía durante esos dos períodos de 1983 fue sensiblemente superior a la escorrentía media durante todo el período de registros 1901-1982. En efecto, de noviembre a julio la escorrentía media es de 0,268 mientras que durante la crecida de 1983 alcanzó el valor de 0,465. Este valor confirma el hecho de que la cuenca se encontraba saturada debido a la abundancia de precipitaciones durante 1982 ya que el volumen precipitado es sólo 143% de la media 1901-82 mientras que el escurrido alcanzó a un 252% del volumen medio escurrido en igual período. Del análisis de estos valores del Cuadro se concluye que la escorrentía del período de noviembre-marzo resultó de 34,3%, lo que indicaría el efecto de saturación progresiva de la cuenca."

"En resumen, si bien la crecida de 1983 tuvo un volumen y por ende una duración excepcionales, los niveles y caudales registrados no pueden ser considerados realmente excepcionales ya que su recurrencia apenas supera los cien años, si bien fue la mayor crecida del siglo XX."

<<

“Evaluación de la crecida 1982-83 del río Paraná y su influencia sobre la estimación de parámetros estadísticos de caudales máximos”. Ceirano, E. y otros (1985)

Se demuestra en este trabajo que la crecida registrada en el río Paraná durante los años 1982 y 1983, con valores medidos del orden de los 60.000 m<sup>3</sup>/s en Corrientes y Santa Fe - Paraná, produjo una serie de modificaciones en los valores de los parámetros estadísticos y como consecuencia, también en los valores para distintas probabilidades de ocurrencia.

Estas modificaciones se produjeron no sólo por la aparición de un valor de esta magnitud sino también por los cambios que las mediciones producen sobre la extrapolación de las curvas de descarga.

Dado que entre el comienzo y el fin de la crecida la sección de escurrimiento en Corrientes se erosionó en 4.000 m<sup>2</sup>, lo que representa aproximadamente un 25% del área inicial, los caudales medios diarios entre el 1/7/82 y el 31/12/83 se interpolaron entre valores aforados y no se obtuvieron de las curvas H-Q.

Por otra parte, se realizaron aplicaciones de distintas distribuciones estadísticas utilizadas para valores máximos de las series 1904-1981 y 1904-1983, usando momentos para estimación de parámetros; las distribuciones utilizadas fueron Gumbel, Levediev, Pearson y Log-Pearson. Para las distribuciones de Gumbel y Pearson se utilizó además el método de máxima verosimilitud para la determinación de los parámetros.

Se concluyó que en general aumentan los valores estimados para recurrencias de 100, 1.000 y 10.000 años al incorporar la crecida de 1983 y que ello es más manifiesto en las distribuciones que usan la asimetría como parámetro y que las distribuciones son mucho más sensibles al valor excepcional si se utiliza el método de los momentos para estimar los parámetros.

“Análisis de Frecuencia de Crecidas del Río Paraná” y Estudios posteriores de la FICH. Paoli y otros (1991, 1995, 1997, 1998) y Cacik y otros (1992, 1993, 1997)

Luego de las conclusiones del trabajo de Ceirano E. (1985), la Empresa AyEE decidió en 1990 encomendar a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas un estudio completo sobre las crecidas del río Paraná, lo que dio lugar a la creación de una línea de investigación específica sobre el tema. El resultado de los sucesivos estudios y aplicaciones realizados es el objeto central del presente Capítulo y también del Capítulo 6.

“Estudio del Valle aluvial de los Ríos Paraná, Paraguay y Uruguay para el control de las Inundaciones” S. W. Halcrow & Ptners. (1994)

En el capítulo referido a hidrología y específicamente en el denominado «La no estacionariedad de la incidencia y la severidad de las crecidas en la

Cuenca del Plata», hace referencia al estudio del Banco Mundial (Anderson et al., 1993) donde se pone de manifiesto que la incidencia y la severidad de las crecidas están en aumento.

En el mismo se indica que: *a partir de la década del '60, ocurrieron por lo menos tres cambios importantes que podrían haber afectado la hidrometeorología de la cuenca:*

- *cambios en el uso de la tierra, en especial la deforestación, que pudieron haber aumentado los niveles de escurrimiento.*
- *desarrollo hidroeléctrico, principalmente en el Alto Paraná en Brasil, que provocó una mayor regulación y un régimen de caudales bajos más alto.*
- *las precipitaciones durante la estación húmeda, que han sido más altas por lo menos desde 1960.*

Anderson y otros llegaron a las siguientes conclusiones:

- *las inundaciones fueron más frecuentes y más severas en la segunda mitad de este siglo, y mucho más a partir de 1960 - 1970.*
- *en el mismo período, los caudales bajos extremos han sido menos frecuentes y menos agudos.*
- *el derrame anual total aumentó y la distribución estacional cambió.*
- *las variaciones pluviales son las mayores responsables de los cambios en los caudales y en las inundaciones.*
- *los cambios en la distribución estacional de los caudales también parecen estar relacionados con los cambios en el régimen pluvial, además del impacto del almacenamiento aguas arriba que afecta el régimen de caudales bajos.*
- *no se encontró ninguna evidencia, estadística o de otro tipo, de que los cambios en el uso de la tierra hayan influido significativamente en el aumento de la incidencia y la severidad de las crecidas.*

En el trabajo de Halcrow, tomando información de caudales mensuales en las subcuencas anteriores y posteriores a 1960, encuentra resultados significativos del cambio producido e indica: *«Tamaño consistencia en distintos puntos dentro de semejante cuenca sólo puede justificarse por un cambio sistemático del régimen pluvial regional, tanto en cantidad total como en el patrón de estacionariedad.»*

*«Desde el punto de vista de las crecidas y de su ocurrencia, una consecuencia fundamental es que, en promedio, los caudales extremos partirán de caudales iniciales más altos que antes. Por lo tanto, se espera que aumenten los picos de caudal y la duración de los eventos.»*

Con relación al análisis probabilístico, en este trabajo es destacable la utilización de una distribución bivariada de caudal pico y volumen de crecida. A partir de la misma se diferencia entre el período de retorno de cada even-



ro (caudal máximo-volumen) y el correspondiente al caudal pico. De este análisis, al evento 1982-83 se le asigna una recurrencia superior a los 200 años, mientras que al caudal pico se le asigna una recurrencia de 56 años.

## **Características de los picos e hidrogramas de crecidas del río Paraná en Corrientes**

### **Estacionalidad de los picos**

Para determinar si la aparición de crecidas durante el año presenta una estacionalidad marcada o no y si la misma ha sufrido modificaciones a través del tiempo, se contabiliza la frecuencia absoluta y relativa de aparición de picos de cada mes para la estación Corrientes.

Dadas las conocidas características del régimen hidrológico del río Paraná en que podrían presentarse en el año más de una onda de crecidas relativamente independientes, se toma en cuenta, además del pico anual, los máximos que cumplieran con esta condición.

Se establece para ello que el caudal diario entre pico y pico debe descender por debajo de 15.000 m<sup>3</sup>/s (valor inferior al módulo estimado). No se consideran asimismo los segundos máximos que fueran inferiores a los 20.000 m<sup>3</sup>/s.

Para tener en cuenta la aparición de crecidas importantes se computan separadamente aquellas cuyos picos superaron los 30.000 m<sup>3</sup>/s.

Para tener en cuenta las posibles variaciones en el tiempo de la distribución anual de crecidas, se computan separadamente los siguientes períodos:

-1904-05, 1935-36 = período con crecidas importantes.

-1936-37, 1973-74 = período donde se producen los estiajes más pronunciados y con menor cantidad de crecidas importantes.

-1974-75, 1997-98 = período donde nuevamente aumenta la cantidad y magnitud de las crecidas.

Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 3.1. en el cual se observa que:

**Período total 1904-05 a 1997-98:** el 45% de los picos se ha presentado en los meses de febrero y marzo, porcentaje que alcanza al 48% si sólo se consideran los primeros máximos como máximos anuales. Muy similar es también el porcentaje de crecidas que superan los 30.000 m<sup>3</sup>/s para este bimestre.

En el trimestre mayo-junio-julio se presenta un 22% de los picos, la mitad de ellos específicamente en junio.

**Cuadro 3.1** Distribución de los picos de crecida a lo largo del año. Río Paraná en Corrientes

| PERIODO MAXIMOS    |                 | SET      | OCT  | NOV  | DIC | ENE  | FEB | MAR  | ABR  | MAY | JUN  | JUL  | AGO  | TOTAL |      |
|--------------------|-----------------|----------|------|------|-----|------|-----|------|------|-----|------|------|------|-------|------|
| 1904/05<br>1935/36 | Totales         | Cantidad | 0.0  | 6.0  | 2.0 | 2.0  | 3.0 | 9.0  | 9.0  | 2.0 | 1.0  | 6.0  | 2.0  | 1.0   | 43   |
|                    |                 | %        | 0.0  | 14.0 | 4.7 | 4.7  | 7.0 | 20.9 | 20.9 | 4.7 | 2.3  | 14.0 | 4.7  | 2.3   |      |
|                    | 1os.<br>máximos | Cantidad | 0.0  | 3.0  | 1.0 | 1.0  | 2.0 | 8.0  | 7.0  | 2.0 | 1.0  | 5.0  | 2.0  | 0.0   | 32   |
|                    |                 | %        | 0.0  | 9.4  | 3.1 | 3.1  | 6.3 | 25.0 | 21.9 | 6.3 | 3.1  | 15.6 | 6.3  | 0.0   |      |
|                    | Q>30000         | Cantidad | 0.0  | 1.0  | 0.0 | 1.0  | 1.0 | 3.0  | 2.0  | 1.0 | 0.0  | 3.0  | 1.0  | 0.0   | 13   |
|                    |                 | %        | 0.0  | 7.7  | 0.0 | 7.7  | 7.7 | 23.1 | 15.4 | 7.7 | 0.0  | 23.1 | 7.7  | 0.0   | 40.6 |
| 1936/37<br>1972/73 | Totales         | Cantidad | 0.0  | 1.0  | 4.0 | 2.0  | 3.0 | 8.0  | 16.0 | 3.0 | 1.0  | 3.0  | 1.0  | 0.0   | 42   |
|                    |                 | %        | 0.0  | 2.4  | 9.5 | 4.8  | 7.1 | 19.0 | 38.1 | 7.1 | 2.4  | 7.1  | 2.4  | 0.0   |      |
|                    | 1os.<br>máximos | Cantidad | 0.0  | 1.0  | 2.0 | 2.0  | 3.0 | 6.0  | 15.0 | 3.0 | 1.0  | 3.0  | 1.0  | 0.0   | 37   |
|                    |                 | %        | 0.0  | 2.7  | 5.4 | 5.4  | 8.1 | 16.2 | 40.5 | 8.1 | 2.7  | 8.1  | 2.7  | 0.0   |      |
|                    | Q>30000         | Cantidad | 0.0  | 1.0  | 0.0 | 1.0  | 0.0 | 1.0  | 4.0  | 0.0 | 0.0  | 1.0  | 0.0  | 0.0   | 8    |
|                    |                 | %        | 0.0  | 12.5 | 0.0 | 12.5 | 0.0 | 12.5 | 50.0 | 0.0 | 0.0  | 12.5 | 0.0  | 0.0   | 21.6 |
| 1973/74<br>1997/98 | Totales         | Cantidad | 3.0  | 3.0  | 0.0 | 1.0  | 2.0 | 7.0  | 3.0  | 2.0 | 5.0  | 6.0  | 2.0  | 0.0   | 34   |
|                    |                 | %        | 8.8  | 8.8  | 0.0 | 2.9  | 5.9 | 20.6 | 8.8  | 5.9 | 14.7 | 17.6 | 5.9  | 0.0   |      |
|                    | 1os.<br>máximos | Cantidad | 1.0  | 2.0  | 0.0 | 1.0  | 2.0 | 7.0  | 2.0  | 1.0 | 4.0  | 3.0  | 2.0  | 0.0   | 25   |
|                    |                 | %        | 4.0  | 8.0  | 0.0 | 4.0  | 8.0 | 28.0 | 8.0  | 4.0 | 16.0 | 12.0 | 8.0  | 0.0   |      |
|                    | Q>30000         | Cantidad | 2.0  | 1.0  | 0.0 | 0.0  | 1.0 | 5.0  | 2.0  | 0.0 | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 0.0   | 17   |
|                    |                 | %        | 11.8 | 5.9  | 0.0 | 0.0  | 5.9 | 29.4 | 11.8 | 0.0 | 11.8 | 11.8 | 11.8 | 0.0   | 56   |
| 1904/05<br>1997/98 | Totales         | Cantidad | 3.0  | 10.0 | 6.0 | 5.0  | 8.0 | 26.0 | 28.0 | 7.0 | 7.0  | 15.0 | 5.0  | 1.0   | 121  |
|                    |                 | %        | 2.5  | 8.3  | 5.0 | 4.1  | 6.6 | 21.5 | 23.1 | 5.8 | 5.8  | 12.4 | 4.1  | 0.8   |      |
|                    | 1os.<br>máximos | Cantidad | 1.0  | 6.0  | 3.0 | 4.0  | 7.0 | 21.0 | 24.0 | 6.0 | 6.0  | 11.0 | 5.0  | 0.0   | 94   |
|                    |                 | %        | 1.1  | 6.4  | 3.2 | 4.3  | 7.4 | 22.3 | 25.5 | 6.4 | 6.4  | 11.7 | 5.3  | 0.0   |      |
|                    | Q>30000         | Cantidad | 2.0  | 3.0  | 0.0 | 2.0  | 2.0 | 9.0  | 8.0  | 1.0 | 2.0  | 6.0  | 3.0  | 0.0   | 38   |
|                    |                 | %        | 5.3  | 7.9  | 0.0 | 5.3  | 5.3 | 23.7 | 21.1 | 2.6 | 5.3  | 15.8 | 7.9  | 0.0   |      |

Estos resultados simplemente confirman lo conocido acerca del régimen hidrológico del río Paraná, con dos periodos de crecidas, uno correspondiente a aportes del Alto Paraná (febrero y marzo) y otro debido tanto a crecidas del río Paraguay desfasadas por el efecto de El Pantanal («repunte del pejerrey») como a crecidas violentas y cortas del río Iguazú.

Período 1904-05 a 1935-36: para este período de 32 años de principios de siglo se observa una mayor proporción de crecidas superiores a los 30.000 m<sup>3</sup>/s (13) en el período junio-julio alcanzando al 30% de los casos y disminución al 38% para el bimestre febrero-marzo.

Período 1936-37 a 1972-73: en este período intermedio de 37 años de baja actividad hidrológica (sólo 8 crecidas superiores a los 30.000 m<sup>3</sup>/s), se muestra una marcada concentración de las crecidas totales contabilizadas o de los

primeros máximos en el bimestre febrero-marzo con el 57% de los casos.

Más notoria aún es la situación para las crecidas superiores a los 30.000 m<sup>3</sup>/s, el 62% corresponden al bimestre febrero-marzo y sólo un 12,5% al trimestre mayo-julio (todas en junio).

**Período 1973-74 a 1997-98:** el período de los últimos 25 años se parece más al del primer tercio del siglo, con características aún más marcadas. Con 17 crecidas superiores a los 30.000 m<sup>3</sup>/s, el 35% se presentan en el trimestre mayo-junio-julio y el 41% en febrero-marzo.

Como cuestión singular de este período se observa la presencia de dos picos superiores a los 30.000 m<sup>3</sup>/s en el mes de setiembre donde nunca se habían presentado máximos anuales ó segundos picos independientes superiores a los 20.000 m<sup>3</sup>/s.

Del análisis general efectuado se infieren además las siguientes observaciones:

- Las crecidas superiores a los 30.000 m<sup>3</sup>/s constituyen un 41% de las presentadas en el período 1904-05/1935-36, disminuyen a un 22% en el período 1936-37/1972-73 y constituyen el 68% de los picos en los últimos 25 años.
- Las crecidas superiores a los 40.000 m<sup>3</sup>/s se presentaron 1 sola vez en cada uno de los dos primeros períodos indicados, de 32 y 37 años respectivamente, y 5 veces en los últimos 25 años.
- La menor actividad hidrológica, traducida en una disminución en la magnitud y frecuencia de crecidas en el período intermedio se debe fundamentalmente a la marcada disminución de las crecidas de la estación otoño-invierno (mayo-julio).

### **Características comparativas de los hidrogramas de las principales crecidas**

A partir del análisis del punto anterior se toman inicialmente todas las crecidas independientes, cuyos picos superaran los 30.000 m<sup>3</sup>/s y de cada una de ellas se determinó:

- Fecha y caudal de inicio de la crecida
- Fecha y caudal del fin de la crecida
- Fechas en que el caudal supera los 20.000 m<sup>3</sup>/s
- Segundos máximos

A partir de estas determinaciones se calculan para cada crecida:

- Tiempo total con  $Q > 20.000$  m<sup>3</sup>/s.
- Duración entre inicio y fin de crecida.
- Gradiente medio de subida y de descenso de cada crecida en m<sup>3</sup>/s/día.

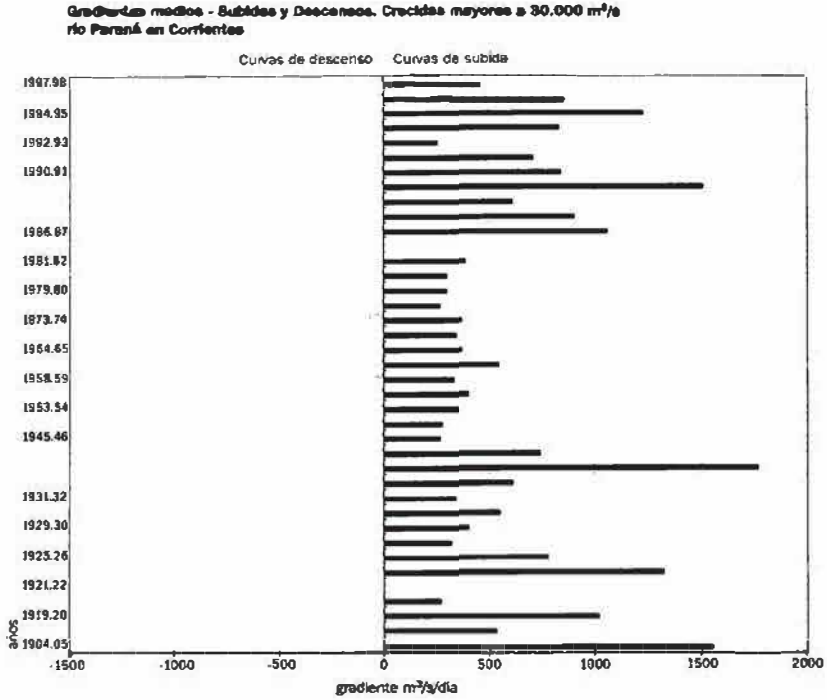
Los valores encontrados se muestran en el Cuadro 3.2. y en las Figuras 3.1., 3.2. y 3.3.

|    | Año  | 1er Máximo |          |        | Q > 20000 |        |        | Inicio Crecida |           |       |       | Final Crecida |         |           |        | DURACION |        |
|----|------|------------|----------|--------|-----------|--------|--------|----------------|-----------|-------|-------|---------------|---------|-----------|--------|----------|--------|
|    |      | Fecha 1    | OM(m³/s) |        | F. Inicio | F. Fin | Fi-Ff  | Fecha 2        | Qi (m³/s) | F1-F2 | QM-QI |               | Fecha 3 | QF (m³/s) | F1-F3  | QF-QM    | (días) |
| 1  | 1904 | 5-jun      | 50043    | 15-nov | 11-sep    | 300    | 22-may | 28266          | 14        | 21777 | 1556  | 28-ago        | 21531   | 84        | -28512 | -339     | 98     |
| 2  | 1911 | 8-ene      | 39036    | 21-nov | 6-may     | 167    | 24-dic | 31012          | 15        | 8024  | 535   | 6-feb         | 25507   | 29        | -13529 | -467     | 44     |
| 3  | 1919 | 6-dic      | 31088    | 4-nov  | 20-abr    | 168    | 26-nov | 20883          | 10        | 10205 | 1021  | 26-dic        | 23077   | 20        | -8011  | -401     | 30     |
| 4  | 1920 | 21-feb     | 36045    | 1-dic  | 4-may     | 155    | 31-dic | 21968          | 52        | 14077 | 271   | 26-mar        | 25978   | 34        | -10067 | -296     | 86     |
| 5  | 1921 | 6-jul      | 30480    | 3-feb  | 30-jul    | 178    | VARIOS | PICOS          |           |       |       |               |         |           |        |          |        |
| 6  | 1922 | 27-jun     | 38081    | 29-ene | 18-jul    | 171    | 12-jun | 18216          | 15        | 19865 | 1324  | 7-ago         | 14629   | 41        | -23452 | -572     | 56     |
| 7  | 1925 | 6-feb      | 33353    | 19-ene | 27-jun    | 160    | 17-ene | 17774          | 20        | 15579 | 779   | 29-mar        | 21444   | 52        | -11909 | -229     | 72     |
| 8  | 1928 | 10-mar     | 39123    | 7-ene  | 5-may     | 119    | 2-ene  | 17535          | 68        | 21588 | 317   | 15-may        | 16631   | 66        | -22492 | -341     | 134    |
| 9  | 1929 | 26-feb     | 30104    | 3-ene  | 25-mar    | 82     | 4-feb  | 21228          | 22        | 8876  | 403   | 12-abr        | 15635   | 46        | -14469 | -315     | 66     |
| 10 | 1930 | 10-mar     | 35962    | 27-dic | 24-jul    | 210    | 14-feb | 22188          | 25        | 13774 | 551   |               |         |           |        |          |        |
| 11 | 1931 | 29-abr     | 32091    | 6-ene  | 17-jul    | 193    | 29-mar | 21575          | 31        | 10516 | 339   | 23-may        | 19073   | 24        | -13018 | -542     | 55     |
| 12 | 1935 | 23-oct     | 33512    | 1-oct  | 20-nov    | 50     | 19-sep | 12707          | 34        | 20805 | 612   | 6-dic         | 16399   | 44        | -17113 | -389     | 78     |
| 13 |      | 17-jun     | 31858    | 10-jun | 25-jun    | 15     | 5-jun  | 10616          | 12        | 21242 | 1770  | 24-jul        | 11924   | 37        | -19934 | -539     | 49     |
| 14 | 1939 | 12-dic     | 31012    | 27-nov | 6-jun     | 192    | 22-nov | 16130          | 20        | 14882 | 744   | 3-ene         | 21184   | 22        | -9828  | -447     | 42     |
| 15 | 1945 | 12-mar     | 33672    | 15-ene | 28-abr    | 104    | 22-dic | 12126          | 81        | 21546 | 266   | 10-may        | 17164   | 59        | -16508 | -280     | 140    |
| 16 | 1951 | 27-mar     | 33193    | 29-ene | 27-abr    | 89     | 13-ene | 12672          | 74        | 20521 | 277   | 23-may        | 12984   | 57        | -20209 | -355     | 131    |
| 17 | 1954 | 24-jun     | 30632    | 18-may | 31-jul    | 74     | 5-may  | 12880          | 50        | 17752 | 355   | 20-ago        | 13229   | 57        | -17403 | -305     | 107    |
| 18 | 1958 | 4-oct      | 32404    | 5-jul  | 19-oct    | 106    | 7-sep  | 21531          | 27        | 10873 | 403   | 31-oct        | 16515   | 27        | -15889 | -588     | 54     |
| 19 | 1959 | 20-feb     | 33383    | 28-nov | 9-may     | 163    | 15-ene | 21401          | 36        | 11982 | 333   | 15-mar        | 20498   | 24        | -12885 | -537     | 60     |
| 20 | 1961 | 24-mar     | 34720    | 11-ene | 4-jun     | 145    | 28-feb | 21080          | 25        | 13640 | 546   | 10-may        | 25253   | 47        | -9467  | -201     | 72     |
| 21 | 1965 | 13-mar     | 33833    | 5-feb  | 26-abr    | 81     | 1-feb  | 18597          | 41        | 15236 | 372   | 1-may         | 18817   | 49        | -15016 | -306     | 90     |
| 22 | 1966 | 1-mar      | 43829    | 17-dic | 2-may     | 137    | 10-dic | 15902          | 82        | 27927 | 341   |               |         |           |        |          |        |
| 23 | 1974 | 3-feb      | 30405    | 12-ene | 5-mar     | 53     | 24-dic | 15286          | 41        | 15119 | 369   | 14-mar        | 17190   | 40        | -13215 | -330     | 81     |
| 24 | 1977 | 22-feb     | 36717    | 9-dic  | 9-mar     | 91     | 21-dic | 19948          | 63        | 16769 | 266   | 30-mar        | 14431   | 37        | -22286 | -602     | 100    |
| 25 | 1980 | 15-mar     | 34075    | 19-sep | 1-abr     | 195    | 26-ene | 19444          | 49        | 14831 | 299   | 10-abr        | 17107   | 26        | -16968 | -653     | 75     |
| 26 | 1981 | 6-feb      | 31012    | 26-dic | 29-feb    | 65     | 23-dic | 17607          | 45        | 13405 | 298   | 13-mar        | 18119   | 36        | -12893 | -358     | 81     |
| 27 | 1982 | 26-jul     | 38805    | 16-jun | 22-sep    | 98     | 28-may | 16020          | 59        | 22785 | 386   |               |         |           |        |          |        |
| 28 | 1983 | 18-jul     | 60215    | 6-nov  |           |        | VARIOS | PICOS          |           |       |       |               |         |           |        |          |        |
| 29 | 1987 | 30-may     | 38861    | 18-abr | 23-jul    | 96     | 12-may | 19718          | 18        | 19143 | 1064  | 28-jul        | 18205   | 59        | -20656 | -350     | 77     |
| 30 | 1990 | 2-feb      | 43829    | 12-ene | 18-feb    | 37     | 3-ene  | 16617          | 30        | 27212 | 907   | 27-feb        | 15708   | 25        | -28121 |          | 55     |
| 31 |      | 23-sep     | 35216    | 24-may | 13-jul    | 50     | 26-ago | 18076          | 28        | 17140 | 612   | 9-oct         | 23381   | 16        | -11835 | -740     | 44     |
| 32 |      | 13-jun     | 37055    |        |           |        | 2-jun  | 20414          | 11        | 16641 | 1513  | 20-jul        | 18422   | 37        | -18633 | -504     | 48     |
| 33 | 1991 | 16-sep     | 37703    | 25-ago | 30-nov    | 97     | 22-ago | 16617          | 25        | 21086 | 843   | 7-dic         | 16617   | 82        | -21086 | -257     | 107    |
| 34 | 1992 | 8-jun      | 54000    | 18-mar | 31-ago    | 166    | 24-abr | 22011          | 45        | 31989 | 711   | 31-jul        | 22061   | 53        | -31939 | -603     | 98     |
| 35 | 1993 | 14-mar     | 30254    | 1-sep  | 25-mar    | 206    | 15-feb | 23124          | 28        | 7130  | 255   | 4-abr         | 16903   | 21        | -13351 | -636     | 49     |
| 36 | 1994 | 10-oct     | 31548    | 3-oct  | 29-oct    | 26     | 18-set | 13198          | 22        | 18350 | 834   | 30-oct        | 14724   | 51        | -16824 | -330     | 73     |
| 37 | 1995 | 26-ene     | 34969    | 14-ene | 17-abr    | 93     | 14-ene | 20179          | 12        | 14790 | 1233  | 6-feb         | 25307   | 11        | -9662  | -878     | 23     |
| 38 | 1997 | 10-feb     | 41528    | 21-dic | 17-mar    | 86     | 16-ene | 20136          | 25        | 21392 | 856   | 13-abr        | 11139   | 62        | -30389 | -490     | 87     |
| 39 | 1998 | 5-may      | 50600    | 4-feb  | 19-jun    | 135    | 20-mar | 29508          | 46        | 21092 | 459   | 19-jun        | 20311   | 45        | -30289 | -673     | 91     |

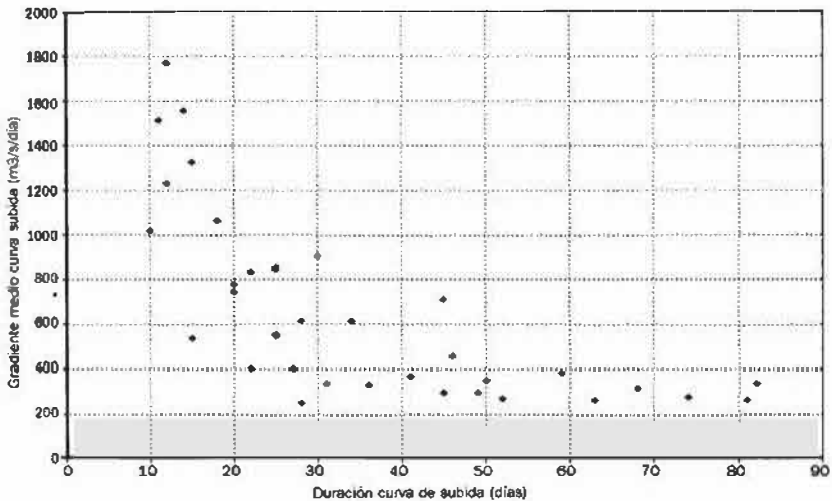
F1 = Fecha 1 = fecha del pico OM  
F2 = Fecha 2 = fecha inicio de crecida QI  
F3 = Fecha 3 = fecha final de crecida QF  
= gradiente de subida o bajada de crecidas

Cuadro 3.2.  
Características de las crecidas  
mayores a 30.000 m³/s  
no Paraná en Corrientes

**Figura 3.1.** Gradientes medios de las curvas de subida y descenso de crecidas mayores a 30.000 m<sup>3</sup>/s registradas en el río Paraná en Corrientes.

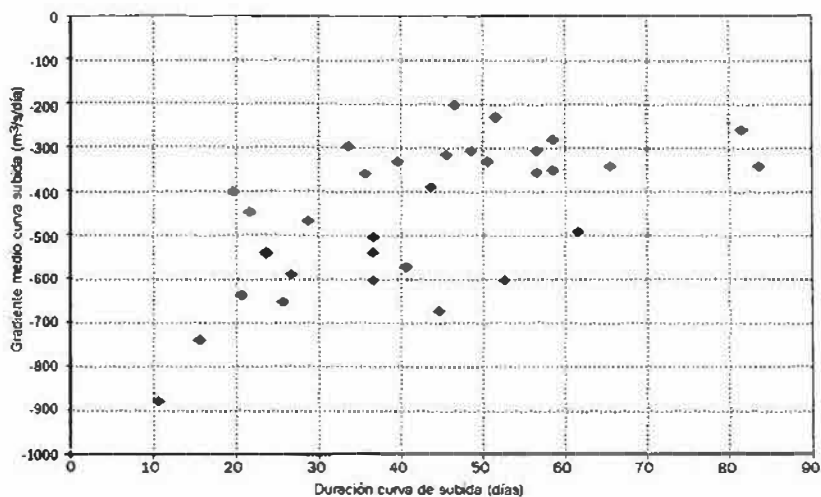


**Figura 3.2.** Relación gradiente medio-duración para las curvas de subida de crecidas mayores a 30.000 m<sup>3</sup>/s registradas en el río Paraná en Corrientes



Las subidas más violentas corresponden a gradientes superiores a los 1.000 m<sup>3</sup>/s/día, mientras que las más suaves presentan aumentos promedios de 250 a 300 m<sup>3</sup>/s/día.

Las bajantes, por su parte, muestran valores de entre 300 y 600 m<sup>3</sup>/s /día.

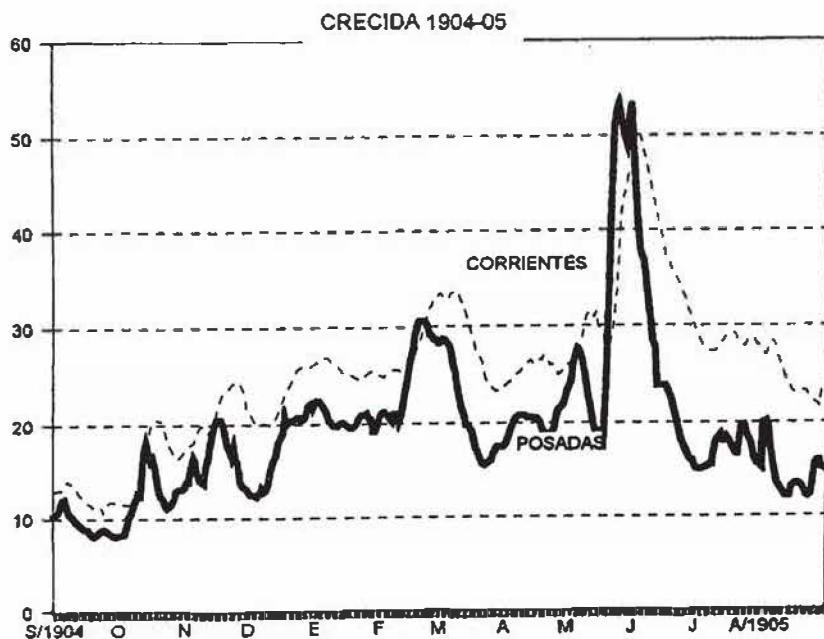


**Figura 3.3.** Relación gradiente medio-duración para las curvas de descenso de crecidas mayores a 30.000 m³/s registradas en el río Paraná en Corrientes

Con el fin de caracterizar las formas de los hidrogramas de crecidas se tomaron los mayores entre los que superaban los 30.000 m³/s y se compararon los hidrogramas de caudales de las estaciones Posadas y Corrientes en el río Paraná y de Asunción en el río Paraguay, que se observan en las Figuras 3.4 a 3.20.

En los casos en los que no se dispuso de los valores históricos de Asunción se representó los caudales de Puerto Bermejo.

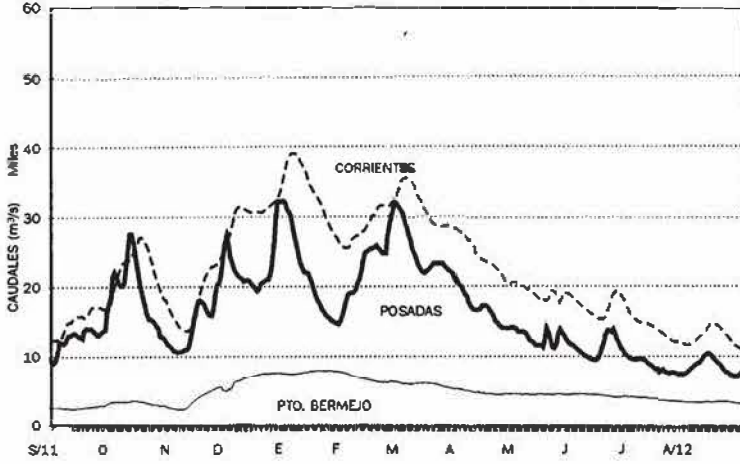
Cuando se disponía de la información en Escala Tipó en la desembocadura del río Iguazú, ó de Guaira, se las ha graficado también.



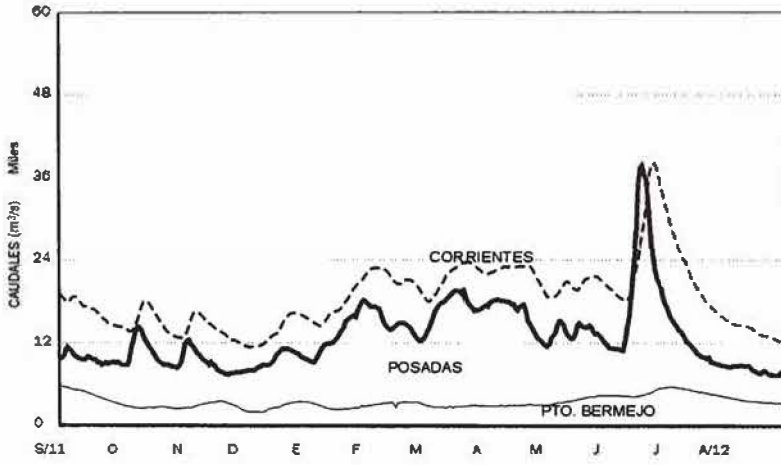
**Figura 3.4.** Hidrograma de la crecida del año 1904-05



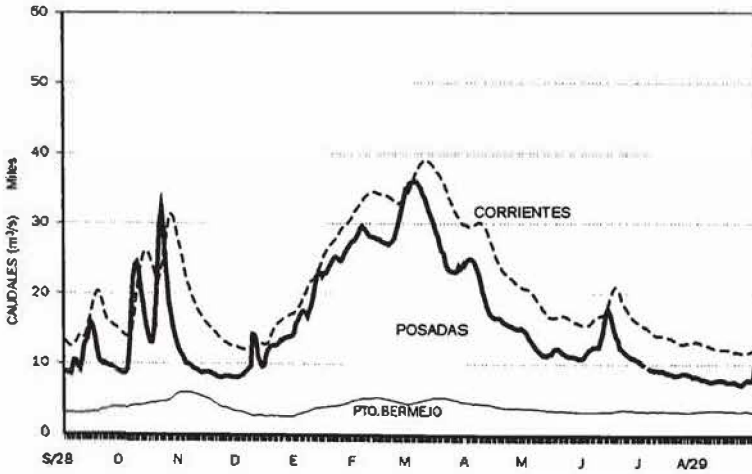
**Figura 3.5.**  
Hidrograma de  
la crecida del  
año 1911-12



**Figura 3.6.**  
Hidrograma de  
la crecida del  
año 1922-23



**Figura 3.7.**  
Hidrograma de  
la crecida del  
año 1928-29



<<

This hydrograph displays the discharge (CAUDALES) in  $m^3/s$  at three stations: PTO. BERMEJO (solid line), CORRIENTES (dashed line), and POSADAS (dotted line) for the year 1935-36. The y-axis ranges from 0 to 60  $m^3/s$ . The x-axis shows months from S/35 to A/36. A major peak at POSADAS is labeled 12/6/36, reaching approximately 40  $m^3/s$ . Another peak at CORRIENTES is labeled 23/10/35, reaching about 30  $m^3/s$ . PTO. BERMEJO shows a much lower, relatively stable discharge around 5  $m^3/s$ .

Figura 3.8.  
Hidrograma de  
la crecida del  
año 1935-36

This hydrograph shows the discharge (CAUDALES) in  $m^3/s$  at four stations: PTO. BERMEJO (solid line), GUAIRA (dotted line), POSADAS (dashed line), and CORRIENTES (dash-dot line) for the year 1945-46. The y-axis ranges from 0 to 60  $m^3/s$ . The x-axis shows months from S/45 to A/46. CORRIENTES shows the highest peak, reaching about 35  $m^3/s$  in March. POSADAS peaks at approximately 25  $m^3/s$  in June. GUAIRA peaks at about 20  $m^3/s$  in February. PTO. BERMEJO remains the lowest, around 5  $m^3/s$ .

Figura 3.9.  
Hidrograma de  
la crecida del  
año 1945-46

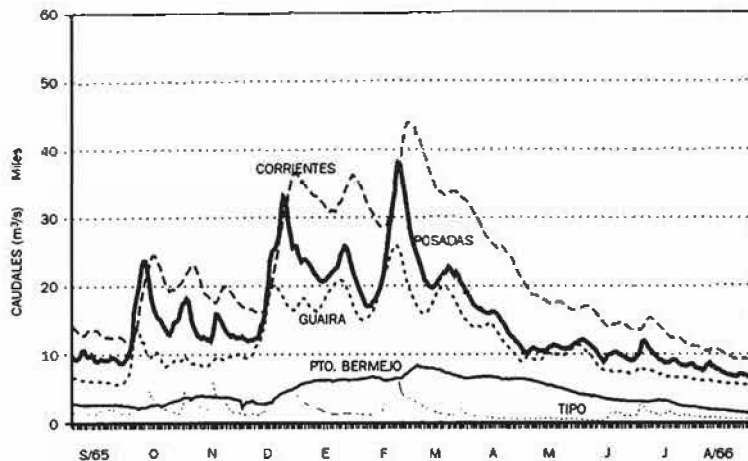
This hydrograph illustrates the discharge (CAUDALES) in  $m^3/s$  at three stations: PTO. BERMEJO (solid line), POSADAS (dashed line), and CORRIENTES (dotted line) for the year 1960-61. The y-axis ranges from 0 to 60  $m^3/s$ . The x-axis shows months from S to A. CORRIENTES has the highest peak, reaching about 35  $m^3/s$  in April. POSADAS peaks at approximately 25  $m^3/s$  in May. PTO. BERMEJO shows a discharge around 5  $m^3/s$ .

Figura 3.10.  
Hidrograma de  
la crecida del  
año 1960-61

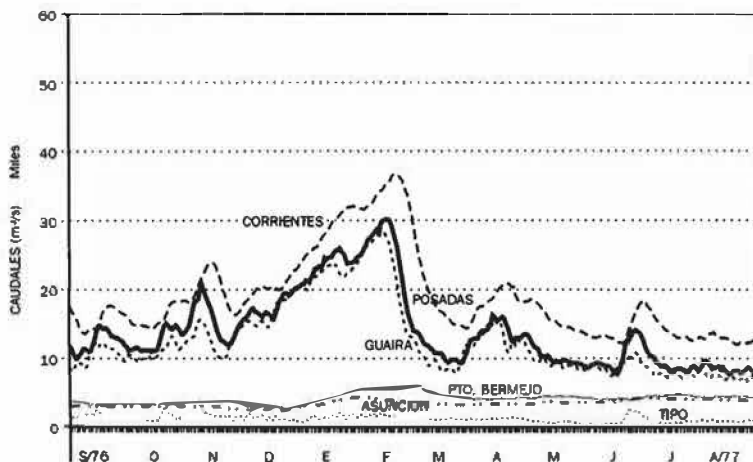
147



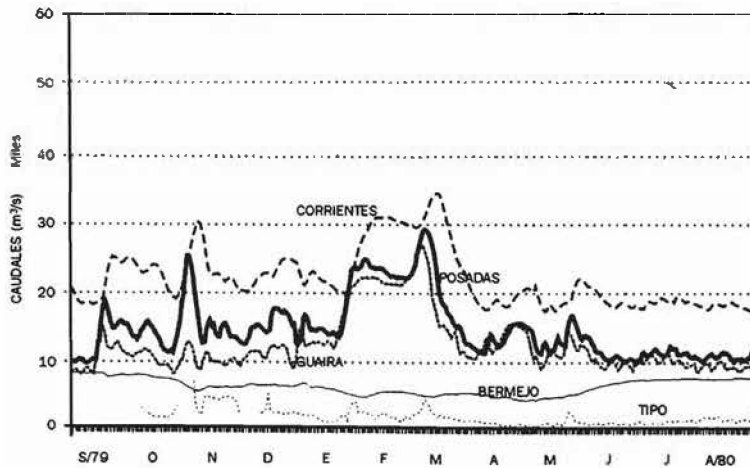
**Figura 3.11.**  
Hidrograma de  
la crecida del  
año 1965-66



**Figura 3.12.**  
Hidrograma de  
la crecida del  
año 1976-77



**Figura 3.13.**  
Hidrograma de  
la crecida del  
año 1979-80



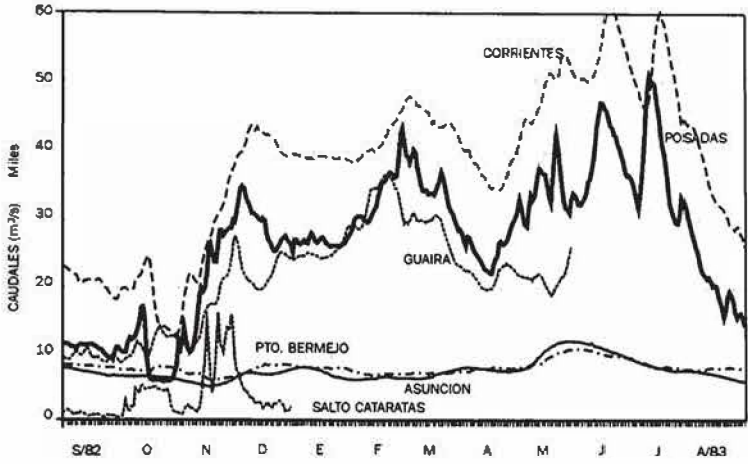


Figura 3.14. Hidrograma de la crecida del año 1982-83

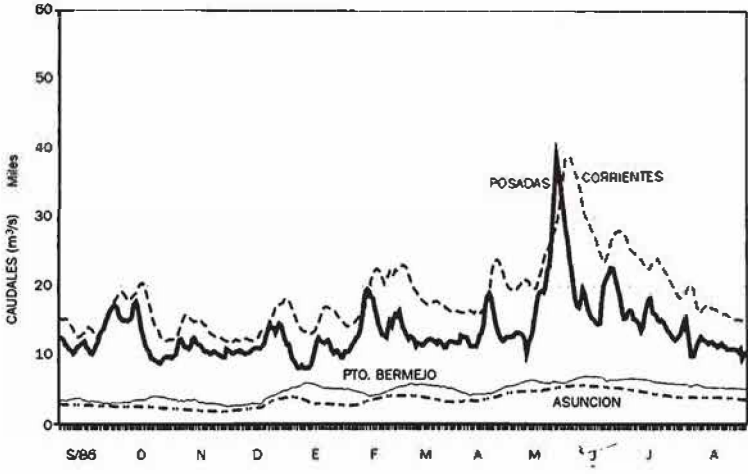


Figura 3.15. Hidrograma de la crecida del año 1986-87

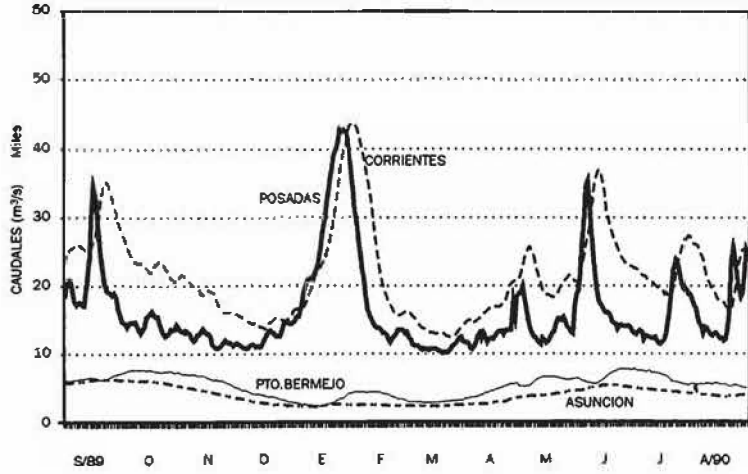


Figura 3.16. Hidrograma de la crecida del año 1989-90

Figura 3.17.  
Hidrograma de  
la crecida del  
año 1990-91

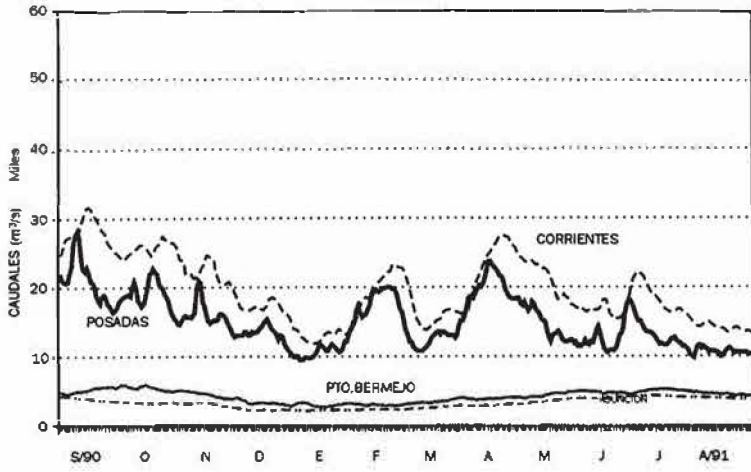
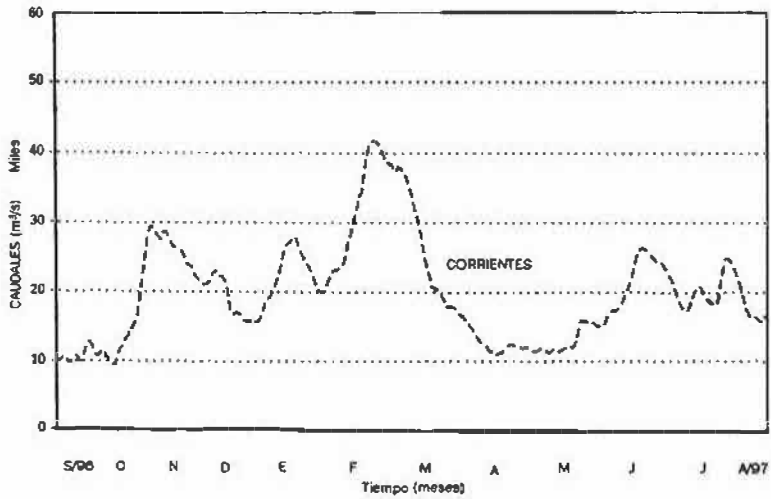


Figura 3.18.  
Hidrograma de  
la crecida del  
año 1991-92



Figura 3.19.  
Hidrograma de  
la crecida del  
año 1996-97



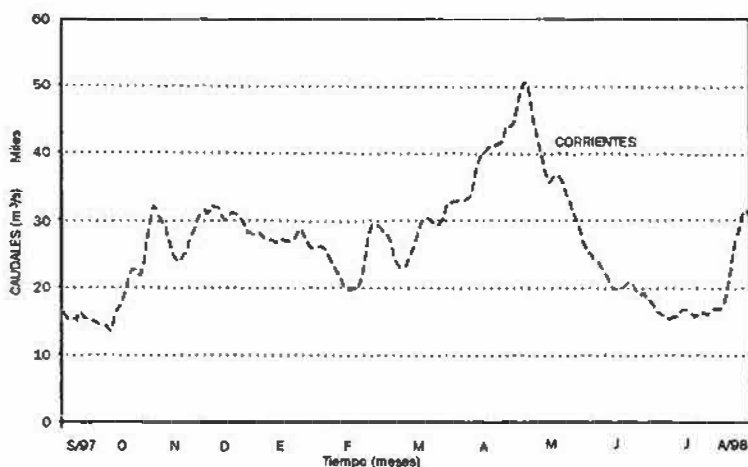


Figura 3.20. Hidrograma de la crecida del año 1997-98

En general podría decirse que en el río Paraná se producen dos tipos de crecidas que pueden diferenciarse:

A: Aquellas de subida relativamente rápida, empuntadas, generalmente con un pico importante y de corta duración aun cuando se hayan presentado picos precedentes.

B: Aquellas de mayor volumen y duración, con subidas más lentas, con uno o más picos importantes que se presentan sucesivamente.

Además, de acuerdo con lo analizado en el punto anterior, puede tratarse de crecidas con el pico máximo en febrero-marzo (1) o en el trimestre mayo-junio-julio (2).

Así se tiene:

Tipo A.1 = 1989/90; 1996/97

Tipo A.2 = 1904/05; 1922/23; 1935/36 (2do. máximo); 1986/87; 1989/90 (2do. máximo); 1991/92.

Tipo B.1 = 1928/29; 1945/46; 1961/62; 1965/66; 1976/77; 1979/80.

Tipo B.2 = 1982/83; 1997/98.

La crecida 1982/83 fue la mayor registrada en el siglo, siendo su característica distintiva la presencia entre diciembre de 1982 y julio de 1983 de 5 picos que superaron los 50.000 m<sup>3</sup>/s en Corrientes, manteniéndose durante todo este lapso un caudal superior a los 35.000 m<sup>3</sup>/s.

Un caso particular corresponde al año hidrológico 1989/90 donde se presentan tres picos de crecidas del tipo A con máximos en setiembre 89, febrero 90 y junio 90, que superan en todos los casos los 35.000 m<sup>3</sup>/s, habiéndose producido entre medio de ellos bajantes del orden de los 13.000 m<sup>3</sup>/s.

Otra particularidad de los picos de crecidas Tipo A, es que los máximos en Posadas pueden ser de igual o mayor magnitud que los de Corrientes como se observa en los casos de 1904/05, 1928/29 (2do. máximo), 1935/36 (2do. máximo) y 1986/87. Esto se debe al efecto de laminación de picos por propagación, que es importante en crecidas muy empuntadas y de bajo volumen.

### Análisis de homogeneidad y estadísticos muestrales de las series de caudales máximos

#### Serie de caudales máximos del río Paraná

Los análisis se efectúan sobre caudales diarios máximos anuales de las estaciones Posadas y Corrientes del río Paraná. Las series disponibles son de 1904/05 a 1992/93 para Posadas y de 1904/05 a 1997/98 para Corrientes y se indican en el Cuadro 3.3.

En las figuras 3.21.a y 3.22.a se observan en los últimos años una mayor frecuencia de valores cercanos o superiores a los 40.000 m<sup>3</sup>/s. Llama la atención la sucesión en 15 años (1983-1998) de tres eventos extraordinarios que alcanzaron o superaron los 50.000 m<sup>3</sup>/s.

Figura 3.21.a  
Río Paraná en Posadas.  
Caudales máximos anuales

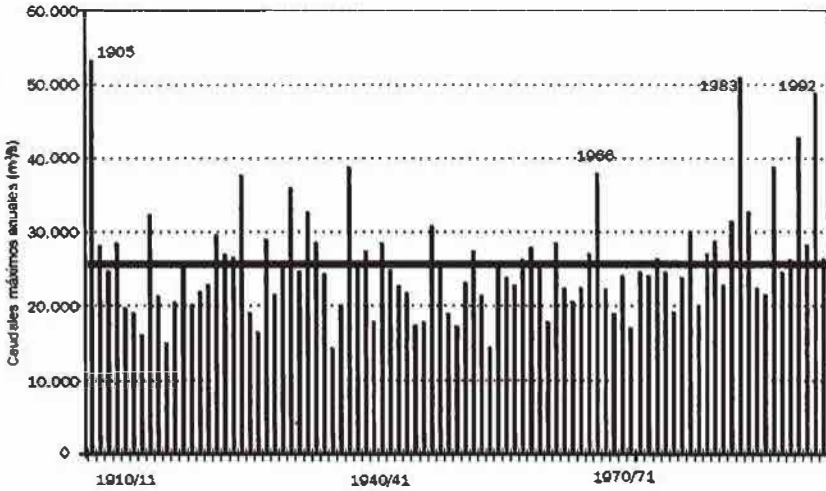
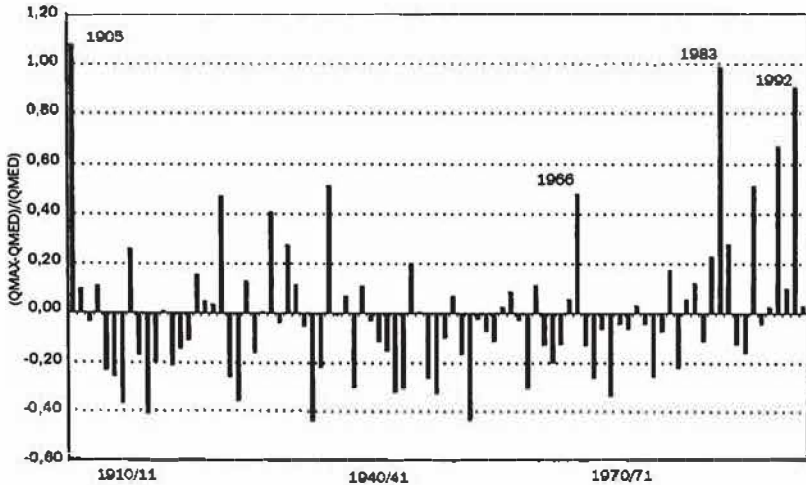


Figura 3.21b  
Río Paraná en Posadas.  
Desvío de los caudales máximos anuales respecto del caudal máximo promedio



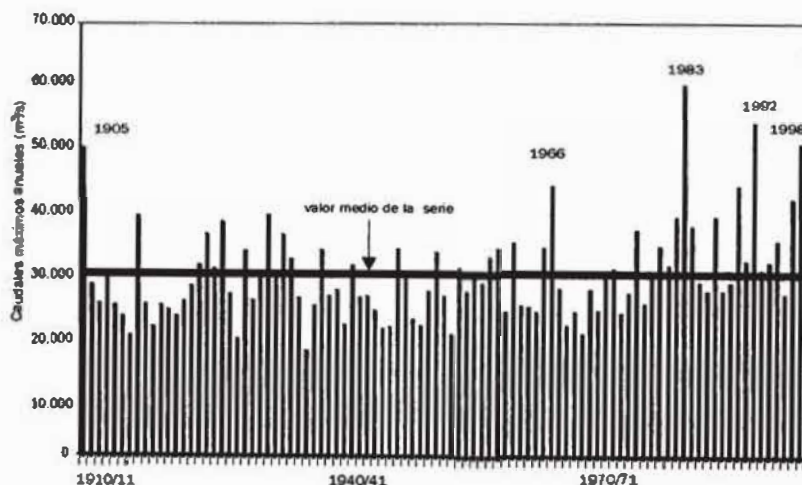
|         | POSADAS | CORRIENTES |         | POSADAS | CORRIENTES |
|---------|---------|------------|---------|---------|------------|
| 1904/05 | 53227   | 50043      | 1951/52 | 21420   | 26073      |
| 1905/06 | 28133   | 27849      | 1952/53 | 14459   | 20117      |
| 1906/07 | 24720   | 24855      | 1953/54 | 25064   | 30632      |
| 1907/08 | 28428   | 29380      | 1954/55 | 23837   | 26930      |
| 1908/09 | 10888   | 24624      | 1955/56 | 22774   | 29139      |
| 1909/10 | 19027   | 22853      | 1956/57 | 26254   | 28194      |
| 1910/11 | 16135   | 19864      | 1957/58 | 27839   | 32404      |
| 1911/12 | 32258   | 39036      | 1958/59 | 24926   | 33833      |
| 1912/13 | 21293   | 24800      | 1959/60 | 17803   | 23538      |
| 1913/14 | 15023   | 21098      | 1960/61 | 28502   | 34724      |
| 1914/15 | 20481   | 24670      | 1961/62 | 22383   | 24545      |
| 1915/16 | 25831   | 23890      | 1962/63 | 20543   | 24438      |
| 1916/17 | 20173   | 22898      | 1963/64 | 22448   | 23538      |
| 1917/18 | 21931   | 25227      | 1964/65 | 27040   | 33833      |
| 1918/19 | 22840   | 27752      | 1965/66 | 37885   | 43829      |
| 1919/20 | 29625   | 31088      | 1966/67 | 22318   | 27233      |
| 1920/21 | 26897   | 36045      | 1967/68 | 18967   | 21322      |
| 1921/22 | 26539   | 30480      | 1968/69 | 24039   | 23538      |
| 1922/23 | 37712   | 38081      | 1969/70 | 17013   | 20180      |
| 1923/24 | 18027   | 26452      | 1970/71 | 24515   | 27145      |
| 1924/25 | 16461   | 19353      | 1971/72 | 24039   | 23747      |
| 1925/26 | 28948   | 33353      | 1972/73 | 26396   | 29890      |
| 1926/27 | 21547   | 25387      | 1973/74 | 24515   | 30405      |
| 1927/28 | 25761   | 28919      | 1974/75 | 19085   | 23433      |
| 1928/29 | 36012   | 36123      | 1975/76 | 23770   | 26599      |
| 1929/30 | 24652   | 30104      | 1976/77 | 30081   | 36717      |
| 1930/31 | 32656   | 35962      | 1977/78 | 19989   | 24924      |
| 1931/32 | 28576   | 32091      | 1978/79 | 27040   | 29805      |
| 1932/33 | 24310   | 25789      | 1979/80 | 28725   | 34075      |
| 1933/34 | 14308   | 17455      | 1980/81 | 22774   | 31012      |
| 1934/35 | 20050   | 24670      | 1981/82 | 31471   | 38805      |
| 1935/36 | 38753   | 33512      | 1982/83 | 50882   | 60215      |
| 1936/37 | 25481   | 26167      | 1983/84 | 32735   | 37291      |
| 1937/38 | 27402   | 27026      | 1984/85 | 22448   | 28338      |
| 1938/39 | 17860   | 21488      | 1985/86 | 21547   | 26911      |
| 1939/40 | 28428   | 31012      | 1986/87 | 38753   | 38861      |
| 1940/41 | 24857   | 25931      | 1987/88 | 24515   | 26911      |
| 1941/42 | 22709   | 26073      | 1988/89 | 26254   | 28194      |
| 1942/43 | 21738   | 23754      | 1989/90 | 42788   | 43829      |
| 1943/44 | 17349   | 20969      | 1990/91 | 28206   | 31703      |
| 1944/45 | 17803   | 21141      | 1991/92 | 48790   | 54000      |
| 1945/46 | 30772   | 33672      | 1992/93 | 26396   | 30254      |
| 1946/47 | 25761   | 29582      | 1993/94 |         | 31549      |
| 1947/48 | 18967   | 22409      | 1994/95 |         | 34969      |
| 1948/49 | 17237   | 21357      | 1995/96 |         | 26428      |
| 1949/50 | 23104   | 26930      | 1996/97 |         | 41710      |
| 1950/51 | 27402   | 33193      | 1997/98 |         | 50900      |

**Cuadro 3.3.**  
Caudales  
máximos anuales (m<sup>3</sup>/s)  
Año hidrológico  
Set - Ago

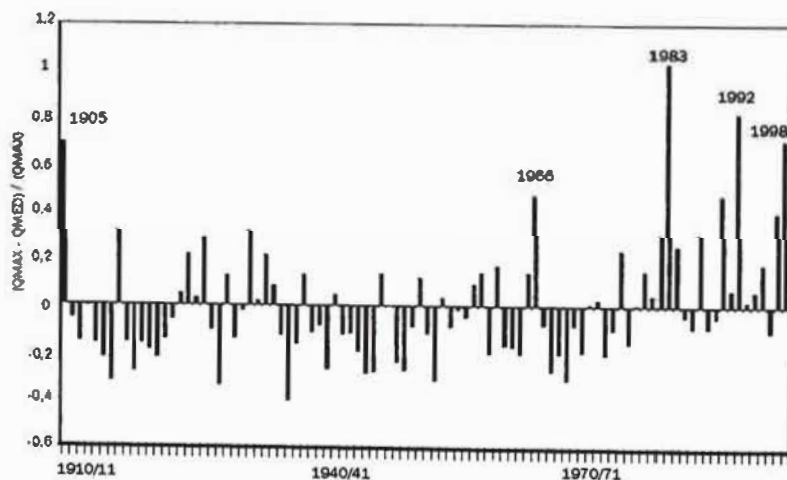


Para la estación Posadas resulta la crecida de 1905 mayor, siguiendo la de 1983 y en tercer lugar 1992, mientras que en Corrientes resulta 1983 la mayor, seguida de la de 1992 y luego las de 1998 y 1905 (de similar magnitud). Se han graficado también los desvíos relativos de los picos en las dos estaciones, los que se observan en los gráficos 3.21.b y 3.22.b. Posadas muestra en ciertos años desvíos positivos significativamente más importantes que Corrientes, siendo 1904/05 y 1935/36 los más notorios (desvíos 40 % mayores) y otros también importantes como 1986/87 y 1989/90 entre los más recientes. Esta cuestión alerta sobre la necesidad de profundizar el análisis sobre los hidrogramas de crecidas para conocer más sobre las formas de variación de las crecidas y la influencia de ello en la mayor o menor atenuación de los picos entre Posadas y Corrientes.

**Figura 3.22a**  
Río Paraná en  
Corrientes.  
Caudales máxi-  
mos anuales



**Figura 3.22b**  
Río Paraná en  
Corrientes.  
Desvío de los  
caudales máxi-  
mos anuales  
respecto del  
caudal máximo  
promedio



## Aplicación de test de homogeneidad

Un especial cuidado debe tenerse con los datos con que se va a realizar análisis de frecuencia. Deben ser datos consistentes, es decir libres de errores sistemáticos, para lo que deben ser cuidadosamente contrastados.

También deben ser series homogéneas, llamadas estacionarias, lo que significa que provienen de regímenes hidrológicos que no han sufrido alteraciones naturales o artificiales.

En realidad la naturaleza está en permanente evolución y por lo tanto no existirán series estrictamente homogéneas. No obstante lo son a los fines prácticos, los datos provenientes de cuencas con una baja intervención humana.

Las faltas de homogeneidad más comunes que se presentan provienen de la intervención del hombre: operación de reservorios, trasvases de cuencas y alteración del uso del suelo y vegetación, o de la variabilidad y cambio climático.

La identificación de estas alteraciones debe basarse en el conocimiento de las fechas y duración e intensidad de las principales interferencias que se producen. Se utilizan diversos tests de homogeneidad, dobles masas, análisis residual, análisis de homogeneidad espacial, relación de Fischer y tests «t» de Student entre otros.

En general los tests estadísticos para análisis de homogeneidad que pueden utilizarse se basan en suponer la hipótesis nula de que no existe interferencia (por lo tanto los datos son homogéneos) y rechazar o no esta hipótesis con un cierto nivel de confianza.

Varios tests estadísticos están disponibles en la bibliografía para testear la presencia de datos que provienen de distintas poblaciones. En general el procedimiento usado es, según Kite G. (1988):

- a. Establecer la hipótesis nula ( $H_0$ ) de que no hay diferencias entre las submuestras.
- b. Elegir un test estadístico.
- c. Seleccionar un nivel de significación ( $\alpha$ ).
- d. Asumir la distribución muestral del test estadístico bajo  $H_0$ .
- e. Definir la región de rechazo.
- f. Calcular el valor del test. Si el valor está en la región de rechazo, rechazar  $H_0$ .

Existen dos tipos de tests estadísticos, paramétricos y no paramétricos. Los tests paramétricos están asociados con ciertas suposiciones acerca de la muestra que está siendo testeada:

- 1) Las observaciones deben ser independientes.
- 2) Las observaciones deben ser obtenidas a partir de poblaciones normalmente distribuidas.
- 3) Estas poblaciones deben tener la misma varianza.



Dado que la población de crecidas no está normalmente distribuida y que los tests paramétricos utilizan los mismos estadísticos muestrales, este tipo de tests suelen ser poco potentes para análisis de homogeneidad.

Por esta razón se prefiere aplicar los tests no paramétricos, que generalmente necesitan sólo la suposición (1). Los tests que parten muestras deben trabajar con submuestras aproximadamente iguales (en tamaño).

Entre los tests no paramétricos utilizables en extremos (Electrobras (1987), Kite G. (1988), NERC (1975)) se han aplicado al presente caso los de Mann-Kendall y Smirnov con los siguientes resultados.

#### a. Test de Mann - Kendall

Los valores de V crítico son:(obtenidos de una distribución normal)

|          |      |      |      |
|----------|------|------|------|
| $\alpha$ | 0,01 | 0,05 | 0,1  |
| Vcri     | 2,33 | 1,64 | 1,28 |

| V calculado   | POSADAS | CORRIENTES |
|---------------|---------|------------|
| 1904/05 92/93 | 1,41    | 2,17       |
| 1960/61 92/93 | 2,34    | 2,46       |
| 1960/61 97/98 |         | 2,89       |

Para la serie (1904/05 – 92/93) la hipótesis de homogeneidad de la muestra es rechazada con un nivel de significancia del 5% en Posadas y Corrientes. Si se consideran muestras modernas, a partir de 1960, la presencia de los valores extremos a partir de 1982 tiene un peso aun mayor y se produce el rechazo de la hipótesis de homogeneidad.

#### b. Test de Smirnov

Es de interés cuando se sospecha a priori a partir de que año se presenten interferencias. Los valores de Z crítico son:

|          |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|
| $\alpha$ | 0,01  | 0,05  | 0,1   |
| Zcri.    | 1,628 | 1,358 | 1,224 |

|                | Serie 1904/05 92/93 |            | 1904/05 97/98 |
|----------------|---------------------|------------|---------------|
| Z calculado    | Posadas             | Corrientes | Corrientes    |
| Año sep.= 1948 | 1,03                | 1,33       | 1,41          |
| Año sep.= 1963 | 0,93                | 1,37       | 1,51          |
| Año sep.= 1969 | 1,15                | 1,59       | 1,74          |

Los resultados muestran que en Corrientes, considerando el año 1963 o 1969 de separación de muestras, el test rechaza la hipótesis de homogeneidad de dichas muestras con nivel de significación del 5% para el período total 1904/05 – 1992/93 y con nivel del 1% para el período mas largo disponible (1904/05 – 1997/98).

## Análisis de propiedades estadísticas

Otra forma de analizar la homogeneidad de las muestras es a través de la variación de sus propiedades estadísticas calculadas sobre diferentes períodos. Se han utilizado dos procedimientos que son:

a) Actualización de la serie muestral: para ello se toman todas las series a partir de 1904/05 - 1981/82 a las que se les va incorporando el año siguiente hasta 1997/98. Los resultados obtenidos se resumen en el Cuadro 3.4.

### ESTACION: RIO PARANA EN POSADAS

| Estadísticos: Serie | $\bar{Q}$ | S      | CS    | CV    | CS/CV | CK    |
|---------------------|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 1904/05 - 81/82     | 24561,1   | 6266,1 | 1,474 | 0,255 | 5,778 | 7,246 |
| 1904/05 - 82/83     | 24894,3   | 6894,2 | 1,675 | 0,277 | 6,049 | 7,246 |
| 1904/05 - 83/84     | 24992,3   | 6906,3 | 1,620 | 0,276 | 5,863 | 7,037 |
| 1904/05 - 84/85     | 24960,9   | 6868,8 | 1,639 | 0,275 | 5,957 | 7,132 |
| 1904/05 - 85/86     | 24919,3   | 6836,7 | 1,659 | 0,274 | 6,045 | 7,217 |
| 1904/05 - 86/87     | 25085,9   | 6962,5 | 1,575 | 0,278 | 5,675 | 6,668 |
| 1904/05 - 87/88     | 25079,1   | 6920,7 | 1,587 | 0,276 | 5,751 | 6,755 |
| 1904/05 - 88/89     | 25092,9   | 6880,5 | 1,589 | 0,274 | 5,795 | 6,821 |
| 1904/05 - 89/90     | 25298,7   | 7101,1 | 1,526 | 0,281 | 5,435 | 6,215 |
| 1904/05 - 90/91     | 25332,1   | 7066,5 | 1,516 | 0,279 | 5,434 | 6,237 |
| 1904/05 - 91/92     | 25598,7   | 7457,6 | 1,531 | 0,291 | 5,255 | 5,864 |
| 1904/05 - 92/93     | 25607,6   | 7415,5 | 1,535 | 0,290 | 5,301 | 5,924 |

**Cuadro 3.4.**  
Estudio estadístico de:  
caudales máximos anuales -  
actualización serie muestral

### ESTACION: RIO PARANA - ESTACION CORRIENTES

| Estadísticos: Serie | $\bar{Q}$ | S      | CS    | CV    | CS/CV | CK    |
|---------------------|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 1904/05 - 81/82     | 28102,2   | 5999,6 | 0,975 | 0,213 | 4,569 | 4,149 |
| 1904/05 - 82/83     | 28508,7   | 6970,4 | 1,720 | 0,245 | 7,036 | 7,544 |
| 1904/05 - 83/84     | 28618,5   | 6995,4 | 1,657 | 0,244 | 6,780 | 7,273 |
| 1904/05 - 84/85     | 28615,0   | 6951,7 | 1,669 | 0,243 | 6,869 | 7,370 |
| 1904/05 - 85/86     | 28594,2   | 6911,2 | 1,686 | 0,242 | 6,974 | 7,471 |
| 1904/05 - 86/87     | 28718,0   | 6960,7 | 1,615 | 0,242 | 6,662 | 7,118 |
| 1904/05 - 87/88     | 28696,4   | 6921,5 | 1,631 | 0,241 | 6,764 | 7,213 |
| 1904/05 - 88/90     | 28690,5   | 6880,4 | 1,643 | 0,240 | 6,852 | 7,306 |
| 1904/05 - 89/90     | 28866,6   | 7031,9 | 1,564 | 0,244 | 6,421 | 6,713 |
| 1904/05 - 90/91     | 28899,2   | 6997,5 | 1,555 | 0,242 | 6,422 | 6,740 |
| 1904/05 - 91/92     | 29184,4   | 7454,0 | 1,603 | 0,255 | 6,275 | 6,390 |
| 1904/05 - 92/93     | 29196,4   | 7412,4 | 1,606 | 0,254 | 6,326 | 6,452 |
| 1904/05 - 93/94     | 29222,5   | 7374,8 | 1,602 | 0,252 | 6,346 | 6,489 |
| 1904/05 - 94/95     | 29285,7   | 7358,4 | 1,573 | 0,251 | 6,260 | 6,426 |
| 1904/05 - 95/96     | 29254,6   | 7323,9 | 1,590 | 0,250 | 6,350 | 6,503 |
| 1904/05 - 96/97     | 29388,6   | 7397,6 | 1,523 | 0,252 | 6,051 | 6,159 |
| 1904/05 - 97/98     | 29614,2   | 7676,1 | 1,490 | 0,259 | 5,748 | 5,701 |

Referencias:

$\bar{Q}$ : media (m<sup>3</sup>/s)  
S: desvío estándar (m<sup>3</sup>/s)  
CV: coeficiente de variación  
CS: coeficiente de asimetría  
CK: coeficiente de kurtosis

b) Análisis series móviles de 50 años; se obtienen todas las submuestras posibles (cronológicas) de tamaño 50 años del período 1904/05 - 1997/98, sobre las que se calculan los estadísticos correspondientes. Los valores obtenidos se resumen en los Cuadros 3.5 y 3.6.

#### ESTADÍSTICOS

**Cuadro 3.5.**  
Medias móviles  
de 50 años de  
caudales máxi-  
mos anuales  
(serie 1904/05  
-1992-93)  
Río Paraná en  
Posadas

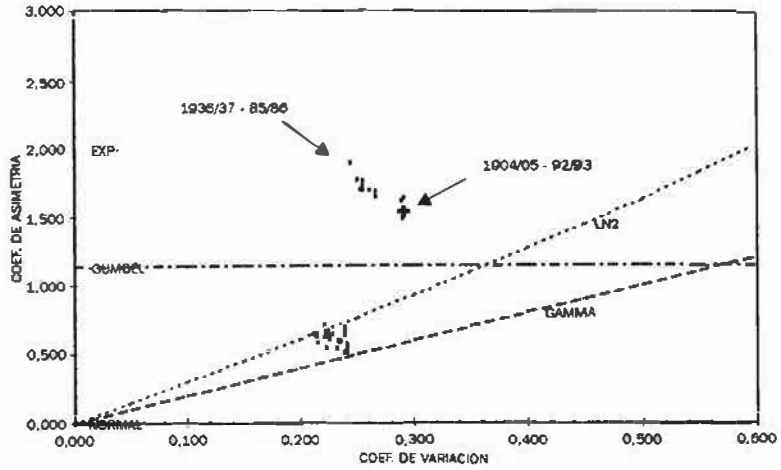
|                 | MEDIA  | DESVIO | COEF.<br>ASIMETRIA | COEF.<br>VARIACION | COEF.<br>ASIM/VARI | COEF.<br>KURTOSIS |
|-----------------|--------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 1904/05 - 53/54 | 24.576 | 7117,1 | 1,492              | 0,290              | 5,153              | 6,441             |
| 1905/06 - 54/55 | 23.988 | 5793,2 | 0,514              | 0,241              | 2,128              | 2,845             |
| 1906/07 - 55/56 | 23.881 | 5764,4 | 0,572              | 0,241              | 2,368              | 2,935             |
| 1907/08 - 56/57 | 23.912 | 5773,1 | 0,554              | 0,241              | 2,294              | 2,907             |
| 1908/09 - 57/58 | 23.900 | 5764,3 | 0,559              | 0,241              | 2,319              | 2,926             |
| 1909/10 - 58/59 | 24.005 | 5733,6 | 0,520              | 0,239              | 2,176              | 2,945             |
| 1910/11 - 59/60 | 23.981 | 5757,9 | 0,514              | 0,240              | 2,139              | 2,920             |
| 1911/12 - 60/61 | 24.228 | 5679,0 | 0,466              | 0,234              | 1,987              | 2,933             |
| 1912/13 - 61/62 | 24.030 | 5564,6 | 0,541              | 0,232              | 2,338              | 3,160             |
| 1913/14 - 62/63 | 24.015 | 5573,2 | 0,545              | 0,232              | 2,347              | 3,148             |
| 1914/15 - 63/64 | 24.164 | 5425,7 | 0,601              | 0,225              | 2,677              | 3,288             |
| 1915/16 - 64/65 | 24.295 | 5414,1 | 0,539              | 0,223              | 2,419              | 3,261             |
| 1916/17 - 65/66 | 24.536 | 5742,3 | 0,602              | 0,234              | 2,572              | 3,099             |
| 1917/18 - 66/67 | 24.579 | 5716,9 | 0,595              | 0,233              | 2,557              | 3,130             |
| 1918/19 - 67/68 | 24.520 | 5760,2 | 0,596              | 0,235              | 2,537              | 3,077             |
| 1919/20 - 68/69 | 24.544 | 5755,5 | 0,585              | 0,235              | 2,494              | 3,078             |
| 1920/21 - 69/70 | 24.291 | 5804,4 | 0,645              | 0,239              | 2,701              | 3,114             |
| 1921/22 - 70/71 | 24.244 | 5792,4 | 0,673              | 0,239              | 2,818              | 3,160             |
| 1922/23 - 71/72 | 24.194 | 5783,0 | 0,702              | 0,239              | 2,938              | 3,203             |
| 1923/24 - 72/73 | 23.968 | 5455,3 | 0,644              | 0,228              | 2,830              | 3,381             |
| 1924/25 - 73/74 | 24.077 | 5408,8 | 0,614              | 0,225              | 2,732              | 3,436             |
| 1925/26 - 74/75 | 24.130 | 5345,8 | 0,649              | 0,222              | 2,930              | 3,509             |
| 1926/27 - 75/76 | 24.026 | 5300,5 | 0,711              | 0,221              | 3,223              | 3,667             |
| 1927/28 - 76/77 | 24.197 | 5356,1 | 0,622              | 0,221              | 2,811              | 3,468             |
| 1928/29 - 77/78 | 24.081 | 5383,9 | 0,669              | 0,224              | 2,993              | 3,455             |
| 1929/30 - 78/79 | 23.902 | 5121,3 | 0,622              | 0,214              | 2,904              | 3,709             |
| 1930/31 - 79/80 | 23.983 | 5165,6 | 0,574              | 0,215              | 2,667              | 3,563             |
| 1931/32 - 80/81 | 23.786 | 5013,9 | 0,641              | 0,211              | 3,041              | 3,921             |
| 1932/33 - 81/82 | 23.844 | 5086,5 | 0,634              | 0,213              | 2,972              | 3,762             |
| 1933/34 - 82/83 | 24.375 | 6364,0 | 1,693              | 0,261              | 6,483              | 7,479             |
| 1934/35 - 83/84 | 24.744 | 6302,3 | 1,696              | 0,255              | 6,659              | 7,315             |
| 1935/36 - 84/85 | 24.792 | 6274,9 | 1,702              | 0,253              | 6,726              | 7,388             |
| 1936/37 - 85/86 | 24.448 | 5957,5 | 1,893              | 0,244              | 7,768              | 8,884             |
| 1937/38 - 86/87 | 24.713 | 6290,8 | 1,726              | 0,255              | 6,779              | 7,396             |
| 1938/39 - 87/88 | 24.655 | 6278,8 | 1,763              | 0,255              | 6,921              | 7,512             |
| 1939/40 - 88/89 | 24.823 | 6205,2 | 1,770              | 0,250              | 7,079              | 7,662             |
| 1940/41 - 89/90 | 25.110 | 6688,9 | 1,687              | 0,266              | 6,333              | 6,430             |
| 1941/42 - 90/91 | 25.177 | 6703,0 | 1,647              | 0,266              | 6,187              | 6,314             |
| 1942/43 - 91/92 | 25.699 | 7477,1 | 1,639              | 0,291              | 5,632              | 5,608             |
| 1943/44 - 92/93 | 25.792 | 7455,8 | 1,617              | 0,289              | 5,594              | 5,594             |

| Serie (años)    | MEDIA  | DESVIO | COEF ASIMETRIA | COEF VARIACION | COEF ASI/VARI | COEF KURTOSIS |
|-----------------|--------|--------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| 1904/05 - 53/54 | 27.684 | 6208,4 | 1,139          | 0,224          | 5,081         | 4,638         |
| 1905/06 - 54/55 | 27.222 | 5304,3 | 0,508          | 0,195          | 2,606         | 2,511         |
| 1906/07 - 55/56 | 27.248 | 5310,5 | 0,492          | 0,195          | 2,523         | 2,491         |
| 1907/08 - 56/57 | 27.315 | 5300,8 | 0,457          | 0,194          | 2,355         | 2,486         |
| 1908/09 - 57/58 | 27.375 | 5342,1 | 0,428          | 0,195          | 2,194         | 2,407         |
| 1909/10 - 58/59 | 27.560 | 5403,7 | 0,346          | 0,196          | 1,766         | 2,287         |
| 1910/11 - 59/60 | 27.573 | 5392,4 | 0,346          | 0,196          | 1,768         | 2,298         |
| 1911/12 - 60/61 | 27.870 | 5368,3 | 0,290          | 0,193          | 1,508         | 2,238         |
| 1912/13 - 61/62 | 27.581 | 5139,5 | 0,284          | 0,186          | 1,523         | 2,264         |
| 1913/14 - 62/63 | 27.573 | 5143,8 | 0,286          | 0,187          | 1,533         | 2,259         |
| 1914/15 - 63/64 | 27.622 | 5092,4 | 0,298          | 0,184          | 1,616         | 2,296         |
| 1915/16 - 64/65 | 27.805 | 5148,6 | 0,218          | 0,185          | 1,179         | 2,201         |
| 1916/17 - 65/66 | 28.204 | 5592,2 | 0,455          | 0,198          | 2,293         | 2,773         |
| 1917/18 - 66/67 | 28.291 | 5541,7 | 0,437          | 0,196          | 2,230         | 2,831         |
| 1918/19 - 67/68 | 28.213 | 5612,8 | 0,427          | 0,199          | 2,144         | 2,758         |
| 1919/20 - 68/69 | 28.128 | 5651,4 | 0,453          | 0,201          | 2,252         | 2,716         |
| 1920/21 - 69/70 | 27.910 | 5744,5 | 0,490          | 0,206          | 2,383         | 2,678         |
| 1921/22 - 70/71 | 27.732 | 5624,0 | 0,557          | 0,203          | 2,747         | 2,888         |
| 1922/23 - 71/72 | 27.598 | 5637,4 | 0,618          | 0,204          | 3,025         | 2,917         |
| 1923/24 - 72/73 | 27.434 | 5442,1 | 0,631          | 0,198          | 3,179         | 3,150         |
| 1924/25 - 73/74 | 27.513 | 5456,3 | 0,584          | 0,198          | 2,945         | 3,086         |
| 1925/26 - 74/75 | 27.594 | 5361,7 | 0,633          | 0,194          | 3,259         | 3,172         |
| 1926/27 - 75/76 | 27.459 | 5298,4 | 0,709          | 0,193          | 3,672         | 3,362         |
| 1927/28 - 76/77 | 27.686 | 5447,9 | 0,627          | 0,197          | 3,186         | 3,066         |
| 1928/29 - 77/78 | 27.606 | 5458,8 | 0,666          | 0,198          | 3,368         | 3,078         |
| 1929/30 - 78/79 | 27.420 | 5211,0 | 0,650          | 0,19           | 3,418         | 3,310         |
| 1930/31 - 79/80 | 27.499 | 5282,5 | 0,616          | 0,192          | 3,208         | 3,148         |
| 1931/32 - 80/81 | 27.400 | 5165,8 | 0,632          | 0,189          | 3,353         | 3,345         |
| 1932/33 - 81/82 | 27.534 | 5373,3 | 0,673          | 0,195          | 3,447         | 3,185         |
| 1933/34 - 82/83 | 28.223 | 7079,7 | 2,081          | 0,251          | 8,294         | 9,321         |
| 1934/35 - 83/84 | 28.620 | 7019,5 | 2,080          | 0,245          | 8,481         | 9,128         |
| 1935/36 - 84/85 | 28.693 | 6997,0 | 2,072          | 0,244          | 8,497         | 9,164         |
| 1936/37 - 85/86 | 28.561 | 6966,0 | 2,151          | 0,244          | 8,820         | 9,473         |
| 1937/38 - 86/88 | 28.815 | 7106,8 | 1,980          | 0,247          | 8,026         | 8,558         |
| 1938/39 - 87/88 | 28.813 | 7107,5 | 1,980          | 0,247          | 8,027         | 8,558         |
| 1939/40 - 88/89 | 28.947 | 7029,3 | 2,011          | 0,243          | 8,282         | 8,775         |
| 1940/41 - 89/90 | 29.203 | 7333,3 | 1,839          | 0,251          | 7,324         | 7,498         |
| 1941/42 - 90/91 | 29.318 | 7326,1 | 1,798          | 0,250          | 7,196         | 7,419         |
| 1942/43 - 91/92 | 29.877 | 8097,6 | 1,719          | 0,271          | 6,343         | 6,222         |
| 1943/44 - 92/93 | 30.007 | 8049,3 | 1,709          | 0,268          | 6,371         | 6,260         |
| 1944/45 - 93/94 | 30.219 | 7945,3 | 1,725          | 0,263          | 6,562         | 6,384         |
| 1945/46 - 94/95 | 30.495 | 7863,1 | 1,707          | 0,258          | 6,622         | 6,389         |
| 1946/47 - 95/96 | 30.350 | 7870,1 | 1,756          | 0,259          | 6,772         | 6,487         |
| 1947/48 - 96/97 | 30.593 | 8031,2 | 1,618          | 0,263          | 6,164         | 5,873         |
| 1948/49 - 97/98 | 31.157 | 8424,8 | 1,497          | 0,270          | 5,535         | 5,065         |

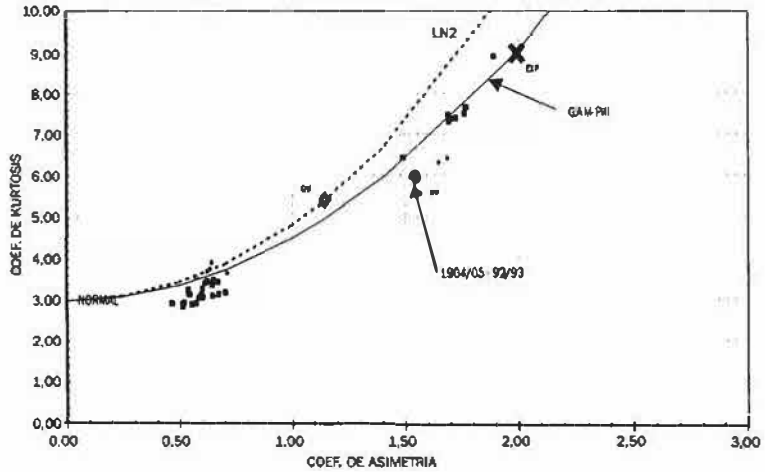
**Cuadro 3.6.**  
Medias móviles de 50 años de caudales máximos anuales (serie 1904/05 - 1997-98) Río Paraná en Corrientes

También se han volcado a los diagramas de momentos que se observan en las figuras 3.23. a 3.26.

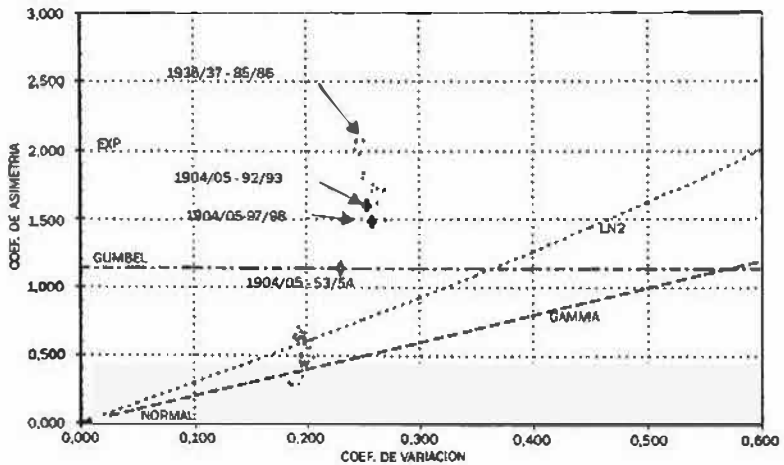
**Figura 3.23.** Diagrama de momentos, coeficientes de asimetría vs coeficientes de variación de diferentes series de caudales máximos del río Paraná en Posadas



**Figura 3.24.** Diagrama de momentos, coeficientes de asimetría vs coeficientes de kurtosis de diferentes series de caudales máximos del río Paraná en Posadas



**Figura 3.25.** Diagrama de momentos, coeficientes de asimetría vs coeficientes de variación de diferentes series de caudales máximos del río Paraná en Corrientes



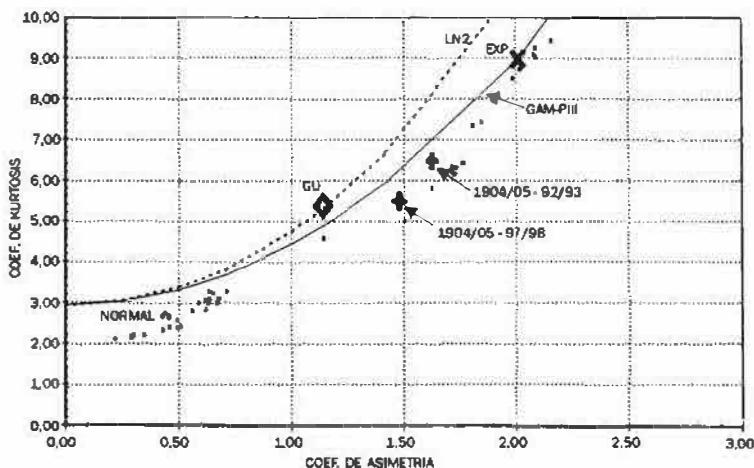


Figura 3.26. Diagrama de momentos, coeficientes de asimetría vs coeficientes de kurtosis de diferentes series de caudales máximos del río Paraná en Comentes

Para el caso de Posadas y Corrientes las consideraciones son similares: se encuentran dos grupos de muestras de 50 años, totalmente diferenciadas. Un grupo que va del período 1905-06 a 1981-82 presenta coeficientes de variación entre 19 y 24 % y coeficientes de asimetría entre 0,3 y 0,7, con lo cual estarían más acordes con muestras provenientes de familia de crecidas GAMMA o LN2.

El otro grupo corresponde a las muestras de 50 años posibles de definir a partir del período 1933/34 a la actualidad; y a la primera muestra 1904/05 - 1953/54, para las cuales los coeficientes de variación aumentaron a un 25 - 30 % y los coeficientes de asimetría se duplicaron o triplicaron con valores entre 1,5 y 2,1

c) Análisis de series modernas: dadas las evidencias de que en los últimos 25 o 35 años se están produciendo importantes cambios físicos en el sistema natural, como son las numerosas presas de embalses, la deforestación y la puesta en cultura de nuevas tierras, el drenaje de áreas pantanosas y otras intervenciones humanas, se comparan también las propiedades estadísticas de las series con inicio en 1960/61 y 1970/71, como se observa en el cuadro 3.7.

| Estación   | Período           | Q      | S       | CS   | CV    | CS/CV | CK   |
|------------|-------------------|--------|---------|------|-------|-------|------|
| POSADAS    | 1960/61 - 1992/93 | 27.479 | 8.120,7 | 1,53 | 0,298 | 5,19  | 4,34 |
| POSADAS    | 1970/71 - 1992/93 | 28.943 | 8.611,7 | 1,47 | 0,298 | 4,95  | 3,62 |
| CORRIENTES | 1960/61 - 1992/93 | 31.522 | 8.985,2 | 1,55 | 0,285 | 5,44  | 4,83 |
| CORRIENTES | 1970/71 - 1992/93 | 33.176 | 9.234,5 | 1,69 | 0,278 | 6,08  | 4,59 |
| CORRIENTES | 1960/61 - 1997/98 | 32.276 | 9.173,2 | 1,34 | 0,284 | 4,71  | 4,13 |
| CORRIENTES | 1970/71 - 1997/98 | 33.904 | 9.293,0 | 1,42 | 0,274 | 5,20  | 3,90 |

Cuadro 3.7. Parámetros estadísticos de caudales máximos anuales series modernas. (caudales en m<sup>3</sup>/s).

Es notorio el aumento de la crecida media tanto por comenzar la serie en la década del 60 o el 70, como por la extensión de los últimos 5 años de 1993 a 1998. Asimismo se observa una disminución en la asimetría muestral como resultado de la mayor presencia de valores altos en esos últimos años.

### **Aspectos conceptuales y generales del análisis de frecuencia de crecidas**

#### **Características de las crecidas y finalidad del análisis de frecuencia**

La crecida de un curso de agua en una determinada sección queda representada por su hidrograma, que muestra la evolución en el tiempo del nivel alcanzado o el caudal que pasa por dicha sección, desde el comienzo hasta el agotamiento del proceso de crecida.

En los estudios probabilísticos de crecidas, interesa la determinación de la relación: magnitudes esperadas de una determinada característica de la crecida - períodos de recurrencia. Las crecidas se pueden estudiar desde diferentes puntos de vista (caudales, alturas, volúmenes, duraciones), siendo los de mayor utilización los caudales máximos y las alturas máximas.

En grandes ríos como el Paraná, una crecida puede ser de distinta importancia según la variable que se analice y la manifestación de la misma puede ser diferente a lo largo de todo el tramo del río que recorre.

Si bien existen relaciones entre estas variables, cada una mide características distintas de un mismo fenómeno. Como resultado de todo esto, es realmente difícil, además de incorrecto (en muchos casos), asignar en forma unívoca una recurrencia fija a una determinada crecida, a lo largo de todo un tramo de curso.

Solamente se puede asignar recurrencia a los valores que asumen las variables analizadas para la crecida en cuestión en una sección determinada. De esta forma una crecida tendrá tantos valores de recurrencia más o menos parecidos, según la variable hidrológica analizada y la sección o tramo del río donde se analicen los datos de dicha variable.

La variable original en una sección determinada de un curso de agua es su caudal, considerando a éste como el resultado de todos los aportes provenientes de aguas arriba. Los niveles que alcanza el agua en la misma sección dependen de la configuración geométrica de la misma y de las características de pendiente y rugosidad del tramo aguas arriba y aguas abajo. Por esta razón se trata en este capítulo el análisis de frecuencia de los caudales máximos anuales como descriptores principales de la magnitud de la crecida, dejando para el Capítulo 6 el análisis de otras variables con la finalidad de obtener parámetros de diseño.

El análisis de frecuencia definido como el conjunto de procedimientos utilizados para inferir probabilidad y recurrencia de variables hidrológicas, utiliza como herramienta básica a la estadística inferencial, que busca a partir de los datos de la muestra, inferir propiedades de la población y posteriormente sobre la realización de muestras en el futuro que conserven las características de dicha población. La aproximación que más comúnmente se efectúa es que los estadísticos calculados de las muestras, medias, varianzas, asimetría, y otros, son estimadores de los estadísticos poblacionales con ciertos límites o intervalos de confianza.

Lamentablemente muchos hidrólogos olvidan en la aplicación práctica estos conceptos y no tienen en cuenta los intervalos de confianza de los estimadores, y el hecho de que tanto dichos intervalos como la consistencia de los mismos estadísticos varían fundamentalmente con la longitud de los registros disponibles.

En lo que hace a las realizaciones futuras, la estadística inferencial hecha mano de los modelos matemáticos, para este caso, leyes de distribuciones de variables al azar, para describir el comportamiento de la población y hacer predicciones sobre eventos posibles.

Para la resolución de problemas prácticos es común la aplicación en las siguientes etapas:

- Selección del modelo a utilizar.
- Estimación de sus parámetros.
- Verificación de la razonabilidad y ajuste del modelo.
- Conclusiones de la aplicación del modelo a la resolución del problema propuesto.

Por supuesto que estos pasos no son rígidos, y de hecho en la práctica el tercer paso sirve a menudo para revisar o modificar el primero.

El Geological Survey (USA), en la revisión de las "Guidelines for Determining Flood Flow Frequency", Bulletin N1 17B (1982), expresa que no hay un procedimiento que pueda ser adoptado para ser siempre rígidamente aplicado y que el análisis estadístico por sí solo no resuelve todos los problemas de frecuencia de crecidas. Entre otros conceptos, merecen destacarse los siguientes:

- *«El juicio de profesionales con experiencia en análisis hidrológico aumentará la utilidad del análisis de frecuencia de crecidas y promueve una apropiada aplicación».*
- *«A medida que se dispone de más años de registros en cada lugar, la estimación de la crecida potencial puede cambiar. Por lo tanto una estimación puede quedar desactualizada a los pocos años de efectuada. Datos adicionales de crecidas pueden ser suficiente razón para recalcular la crecida potencial. Cuando se hace un nuevo cálculo, el análisis debe incorporar una revisión de*



*las primeras estimaciones. Donde aparezcan diferencias, las mismas deben ser reconocidas y explicadas».*

Este es el caso típico del río Paraná, donde luego de haberse estudiado y determinado las crecidas máximas correspondientes a diversas probabilidades de ocurrencia se produjeron las crecidas de 1983, 1992 y 1998 que llevaron en cada caso a realizar los correspondientes estudios de actualización.

### **Incertidumbre de las estimaciones**

Es común referirse en la predicción hidrológica al riesgo e incertidumbre de la misma y por lo tanto se aclara el significado adoptado de estos términos, siguiendo a Yevjevich, V. (1973).

El riesgo básico es la propiedad inherente a las variables aleatorias expresado en términos de probabilidades que tiene un determinado valor en ser superado o en no ser alcanzado. Si se conociera la distribución de la población, se determinaría en forma exacta; como sólo se trabaja con muestras se aproxima a través de éstas.

La incertidumbre es la diferencia entre las propiedades y estadísticos de la población con respecto a los de la muestra debido a la ineficiencia e inexactitud de los datos con los cuales se calcula y a las limitaciones de los métodos y modelos de análisis.

Generalmente se entiende por riesgo total a la suma del riesgo básico y la incertidumbre.

Al realizar inferencia estadística a partir del ajuste de una ley de distribución, el valor suministrado tiene involucrado un riesgo total, donde no es posible separar qué parte corresponde al riesgo básico (que es el que nos interesa) y qué parte corresponde a incertidumbre (que nos interesaría eliminar o reducir). Si se puede establecer que la proporción de incertidumbre es cada vez mayor cuando mayor es el período de recurrencia para el cual se hace la inferencia.

Es difícil eliminar la incertidumbre, pero es posible identificar las fuentes posibles y procurar acotar o disminuir su influencia a través de la aplicación de los métodos y procedimientos más adecuados. Para obtener una idea de los orígenes y causas de incertidumbres se presenta a continuación un listado de ellas. (Paoli y otros, 1994):

- inconsistencia o falta de homogeneidad de las muestras
- longitud de las muestras
- posición de muestreo
- presencia de valores atípicos (outliers) e introducción de marcas históricas
- distribuciones de frecuencia teóricas
- métodos de estimación de parámetros
- métodos y procedimientos de selección de distribuciones

La incertidumbre que proviene de los propios datos muestrales puede identificarse a través de análisis de consistencia y homogeneidad de series, paramétricos y no paramétricos. Con los análisis de frecuencia regional se consigue una buena disminución de incertidumbre en comparación con los análisis puntuales (en un sitio). Por lo tanto siempre que sea posible se recomienda trabajar con estadísticos muestrales regionalizados.

Los modelos teóricos a utilizar deben ser aplicados utilizando el método de estimación de parámetros que resulte más eficiente en cada caso.

Siempre que sea posible es preferible utilizar distribuciones que basen su ajuste en la variable natural; cuando se utilizan variables transformadas (por ej. logarítmicamente) pueden enmascarse situaciones en las colas superior e inferior de la distribución.

Los métodos de selección de distribución basados en el ajuste muestral son apropiados cuando se pretende realizar inferencias para recurrencias del orden de una a dos veces el tamaño de la muestra. Para trabajar con recurrencias muy superiores, los métodos robustos de selección resultan de interés y es habitual que la distribución que resulte más eficiente sea de dos parámetros, según se muestra en las aplicaciones que se presentan más adelante.

La incertidumbre debida a la presencia de outliers y a la disposición de muestras muy cortas puede intentar mejorarse con la incorporación de marcas históricas. Su utilidad variará de acuerdo con el grado de confiabilidad que merezcan los datos a ser incorporados. Siempre resulta de interés realizar análisis de sensibilidad en relación con los límites de confianza que se establezcan. El USWRC (1982) recomienda:

- Las crecidas consideradas «alto outlier» deben ser contrastadas con datos de crecidas históricas e información de sitios vecinos.
- Si la información disponible indica que un «outlier alto» es el máximo en un período de tiempo, este/os son tratados como crecidas históricas.
- Si no existe información histórica para ajustar estos «outliers altos», entonces deben ser retenidos como parte del registro sistemático.
- Si existen valores del registro cercano a los límites calculados, es recomendable testear la sensibilidad de los resultados al considerar dichos valores como outliers.

Todos los procedimientos indicados han sido aplicados al estudio del río Paraná, según se presenta en los puntos siguientes, verificando su adaptación o no a las condiciones propias de grandes ríos de llanura.

## Modelos probabilísticos utilizados y estimación de parámetros

### Familias de modelos probabilísticos

El estudio de estos modelos puede realizarse subdividiendo los mismos en grupos o familias, según se presentan en el cuadro 3.8. Esta subdivisión no es estricta y puede realizarse de diferentes maneras. La distribución Normal (N) se incluye como referencia debido a que es ampliamente conocida y sirve para estudiar y comparar su comportamiento con el de otras distribuciones aun cuando no sea adecuada para Frecuencia de Crecidas.

**Cuadro 3.8.**  
Distribuciones  
de frecuencia  
utilizadas

| Familia  | Distribución                                    |
|--|---|
| NORMAL<br><br>$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-u^2/2} du$  | NORMAL (N)                                      |
|  | LOG-NORMAL - 2 parámetros (LN2)                 |
|  | LOG-NORMAL - 3 parámetros (LN3)                 |
| DE VALORES<br>EXTREMOS<br><br>$F(x) = e^{-\{(1-k(x-x_0)/\alpha)^{1/k}\}}$  | GENERAL DE VALORES EXTREMOS (GEV)               |
|  | GUMBEL (GU) (k=0)                               |
|  | FRECHET (F) (k<0)                               |
|  | LOG-GUMBEL (LGU) (caso especial de F)           |
|  | WEIBULL (WE) (k>0)                              |
| PEARSON<br><br>$F(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \int_{x_0}^x \left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp(-(x-x_0)/\alpha) dx$ | PEARSON III (PIII)                              |
|  | GAMMA (2 parámetros) (GAM2) (x <sub>0</sub> =0) |
|  | EXPONENCIAL (EXP) (β=1)                         |
|  | LOG-PEARSON III (LPIII)                         |
| WAKEBY<br>$x = m + a(1-(1-F)^b) - c(1-(1-F)^d)$<br>$x \geq m, F = F(x)$  | WAKEBY (WA)                                     |

### Métodos de estimaciones de parámetros

Además de los conocidos y difundidos métodos de momentos tradicionales (MoM) y de máxima verosimilitud (MV), se emplearon otros métodos que comenzaron a utilizarse en los últimos 15 años y que resultan más eficientes para la estimación de parámetros de ciertas distribuciones, como ser: Momentos ponderados por probabilidades (MPP) y Momentos Mixtos (MMX), Greenwood J. et. al. (1979), Cunnane C. (1989).

Los MPP caracterizan una distribución, pero no son útiles en sí mismos. Por ello como funciones de los MPP se obtienen los momentos-L ( $\lambda_k$ ), los cuales permiten obtener relaciones asimilables a los parámetros de ubicación, forma y escala de una distribución, por lo tanto tienen interpretaciones físicas más sencillas.

Designando  $\alpha_k = M_{1,0k} = E[X(1-F)^k]$ , (3.1)  $k=0,1,\dots$  (Hosking, J. (1989))

$$\lambda_1 = \alpha_0 \quad (3.2)$$

$$\lambda_2 = \alpha_0 - 2\alpha_1 \quad (3.3)$$

$$\lambda_3 = \alpha_0 - 6\alpha_1 + 6\alpha_2 \quad (3.4)$$

$$\lambda_4 = \alpha_0 - 12\alpha_1 + 30\alpha_2 - 20\alpha_3 \quad (3.5)$$

Los momentos L son otra manera de sintetizar las propiedades estadísticas de las muestras de datos hidrológicos.

En un amplio rango de aplicaciones hidrológicas, los momentos L dan estimadores simple y razonablemente eficientes de las características de los datos hidrológicos y de los parámetros de una distribución.

El momento L de primer orden es la media:  $\lambda_1 = E[X]$ , el momento-L de segundo orden  $\lambda_2$  es una medida de la escala o dispersión de la variable aleatoria. Otras relaciones de momentos L son:

$$L-CV = \tau_2 = \lambda_2/\lambda_1 \quad (3.6)$$

$$L-CS = \tau_3 = \lambda_3/\lambda_2 \quad (3.7)$$

$$L-CK = \tau_4 = \lambda_4/\lambda_2 \quad (3.8)$$

Los momentos-L tienen como ventaja que los estimadores muestrales son combinaciones lineales de las observaciones ordenadas, y por lo tanto no involucran elevaciones cuadráticas o cúbicas de las observaciones como hacen los estimadores de momentos tradicionales.

Como resultado de ello, estimadores de momentos-L de los coeficientes adimensionales de variación y asimetría son siempre insesgados y tienen muy cerca una distribución normal. Los estimadores de coeficientes de variación y asimetría a partir de los momentos tradicionales son altamente sesgados y muy variables en pequeñas muestras.

En aplicaciones hidrológicas es frecuente la presencia de valores atípicos o «outliers». Si se usan los momentos tradicionales tales valores pueden enmascarar la información provista por las otras observaciones.

Los momentos tradicionales de los logaritmos de los datos pueden sobre-enfatizar los valores más pequeños.

### Aplicación y cálculo de distribuciones seleccionadas al río Paraná

Con posterioridad a la crecida del río Paraná de 1982/83 en la cual se superó en Corrientes la altura máxima de 1905, aforándose un pico de  $60.215 \text{ m}^3/\text{s}$ , la empresa AyE decidió recalcular las crecidas adoptadas para diseño de diferentes obras en el tramo medio del río Paraná. En 1989, el Dr. J. Salas de la Universidad de Colorado (USA), en misión de asistencia técnica a AyE, recomendó la realización de una serie de estudios complementarios y adicionales, que posteriormente fueron encargados a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la UNL.

El análisis principal se efectuó primeramente sobre los caudales diarios máximos anuales ( $Q_{\text{max}}$ ) de la estación Corrientes. Los datos fueron seleccionados considerando un año hidrológico setiembre - agosto, en el período 1904/05 - 1989/90, con lo cual el tamaño de la muestra fue de 86 años. Como estación de apoyo se utilizó a Posadas, ubicada aproximadamente 330 km aguas arriba de Corrientes sobre el río Paraná.

Con estas series en primera instancia, se realizó la estimación de parámetros de diferentes distribuciones por diversos métodos, encontrándose los resultados que se muestran en los Cuadros 3.9. y 3.10. Se observa la gran dispersión de resultados obtenidos, lo que no es más que el reflejo de la gran incertidumbre que se presenta originada en la influencia de los diferentes modelos y métodos de estimación de parámetros utilizados.

**Cuadro 3.9** Caudales máximos anuales ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) para distintas distribuciones y recurrencias. Estación Posadas - serie 1904/05 - 1989/90

| Método de estimación de parámetros  | T      | (1-F)  | N     | LN2   | LN3   | GU    | LGU    | GEV   | PII   | LPII  | EXP   | WA     |
|-------------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Momentos                            | 10.000 | 0,0001 | 51692 | 63574 | 82401 | 76595 | 156822 |       | 76074 | 84119 | 83600 |        |
|                                     | 1.000  | 0,001  | 47236 | 54102 | 64678 | 62942 | 95537  |       | 62712 | 64965 | 67250 |        |
|                                     | 500    | 0,002  | 45736 | 51242 | 59752 | 58830 | 82321  |       | 57045 | 58007 | 62328 |        |
|                                     | 100    | 0,01   | 41818 | 44486 | 48889 | 49264 | 58224  |       | 49053 | 48710 | 50899 |        |
|                                     | 50     | 0,02   | 39882 | 41456 | 44437 | 45125 | 50121  |       | 44845 | 44251 | 45977 |        |
|                                     | 10     | 0,1    | 34399 | 33091 | 34424 | 35333 | 35161  |       | 34759 | 34353 | 34548 |        |
|                                     | 2      | 0,5    | 25299 | 24450 | 23857 | 24165 | 23467  |       | 23569 | 23940 | 23120 |        |
| Momentos pesados por probabilidades | 10.000 | 0,0001 |       |       |       | 71404 |        | 83508 |       |       |       | 128737 |
|                                     | 1.000  | 0,001  |       |       |       | 59108 |        | 65109 |       |       |       | 82232  |
|                                     | 500    | 0,002  |       |       |       | 55401 |        | 60009 |       |       |       | 74841  |
|                                     | 100    | 0,01   |       |       |       | 46784 |        | 48872 |       |       |       | 52482  |
|                                     | 50     | 0,02   |       |       |       | 43055 |        | 44351 |       |       |       | 45936  |
|                                     | 10     | 0,1    |       |       |       | 34235 |        | 34323 |       |       |       | 33452  |
|                                     | 2      | 0,5    |       |       |       | 24173 |        | 23944 |       |       |       | 24217  |
| Métodos especiales                  | 10.000 | 0,0001 |       |       |       |       |        |       |       | MMX   |       |        |
|                                     | 1.000  | 0,001  |       |       |       |       |        |       |       | 87261 |       |        |
|                                     | 500    | 0,002  |       |       |       |       |        |       |       | 66903 |       |        |
|                                     | 100    | 0,01   |       |       |       |       |        |       |       | 58934 |       |        |
|                                     | 50     | 0,02   |       |       |       |       |        |       |       | 49126 |       |        |
|                                     | 10     | 0,1    |       |       |       |       |        |       |       | 44469 |       |        |
|                                     | 2      | 0,5    |       |       |       |       |        |       |       | 34278 |       |        |
| Máxima verosimilitud                | 10.000 | 0,0001 |       | 67788 | 75825 | 70216 |        | 79400 | 65693 | 79038 |       |        |
|                                     | 1.000  | 0,001  |       | 57029 | 61015 | 58220 |        | 63039 | 56687 | 62263 |       |        |
|                                     | 500    | 0,002  |       | 53807 | 56839 | 54607 |        | 58405 | 52394 | 57660 |       |        |
|                                     | 100    | 0,01   |       | 46223 | 47449 | 46204 |        | 48098 | 46138 | 47005 |       |        |
|                                     | 50     | 0,02   |       | 42879 | 43501 | 42587 |        | 43843 | 42790 | 43495 |       |        |
|                                     | 10     | 0,1    |       | 34666 | 34337 | 33965 |        | 34236 | 34452 | 34193 |       |        |
|                                     | 2      | 0,5    |       | 24357 | 24055 | 24153 |        | 24027 | 24129 | 24045 |       |        |

**Cuadro 3.10** Caudales máximos anuales (m<sup>3</sup>/s) para distintas distribuciones y frecuencias  
Estación Corrientes - serie 1904/05 - 1989/90

| Método de estimación de parámetros  | T      | (1-F)  | N     | LN2   | LN3   | GU    | LGU    | GEV   | PIII  | LPIII        | EXP   | WA    |
|-------------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| Momentos                            | 10.000 | 0,0001 | 55003 | 64342 | 86283 | 79662 | 140435 | 83700 | 79757 | 88988        | 88600 |       |
|                                     | 1.000  | 0,001  | 50590 | 55954 | 88279 | 66143 | 91543  | 66424 | 66288 | 69095        | 70409 |       |
|                                     | 500    | 0,002  | 49105 | 53385 | 83300 | 62071 | 80473  | 61628 | 60580 | 61888        | 65535 |       |
|                                     | 100    | 0,01   | 45225 | 47216 | 52355 | 52599 | 59627  | 51135 | 52546 | 52393        | 54218 |       |
|                                     | 50     | 0,02   | 43308 | 44436 | 47887 | 48500 | 52372  | 46870 | 48322 | 47848        | 49344 |       |
|                                     | 10     | 0,1    | 37878 | 37240 | 37882 | 36804 | 38532  | 37396 | 38224 | 37845        | 38028 |       |
| 2                                   | 0,5    | 28867  | 28134 | 27416 | 27744 | 27152 |        | 27155 | 27401 | 26706        |       |       |
| Momentos pesados por probabilidades | 10.000 | 0,0001 |       |       |       | 74928 |        | 92342 |       |              |       | 90432 |
|                                     | 1.000  | 0,001  |       |       |       | 62641 |        | 71102 |       |              |       | 71417 |
|                                     | 500    | 0,002  |       |       |       | 58940 |        | 65391 |       |              |       | 66001 |
|                                     | 100    | 0,01   |       |       |       | 50331 |        | 53202 |       |              |       | 53945 |
|                                     | 50     | 0,02   |       |       |       | 46606 |        | 48369 |       |              |       | 48968 |
|                                     | 10     | 0,1    |       |       |       | 37794 |        | 37895 |       |              |       | 37890 |
| 2                                   | 0,5    |        |       |       | 27774 |       | 27431  |       |       |              | 27418 |       |
| Métodos especiales                  | 10.000 | 0,0001 |       |       |       |       |        |       |       | MMX<br>90865 |       | IMC   |
|                                     | 1.000  | 0,001  |       |       |       |       |        |       |       | 69914        |       | 81811 |
|                                     | 500    | 0,002  |       |       |       |       |        |       |       | 62397        |       | 72867 |
|                                     | 100    | 0,01   |       |       |       |       |        |       |       | 52597        |       | 55183 |
|                                     | 50     | 0,02   |       |       |       |       |        |       |       | 47936        |       | 49016 |
|                                     | 10     | 0,1    |       |       |       |       |        |       |       | 37761        |       | 37220 |
| 2                                   | 0,5    |        |       |       |       |       |        |       | 27407 |              | 27860 |       |
| Máxima verosimilitud                | 10.000 | 0,0001 | 68461 | 81334 | 72612 |       |        | 88261 | 69527 | 85138        |       |       |
|                                     | 1.000  | 0,001  | 58885 | 85637 | 60918 |       |        | 68927 | 59696 | 68961        |       |       |
|                                     | 500    | 0,002  | 55973 | 61202 | 57396 |       |        | 63651 | 55479 | 62055        |       |       |
|                                     | 100    | 0,01   | 49026 | 51329 | 49203 |       |        | 52269 | 49334 | 51474        |       |       |
|                                     | 50     | 0,02   | 45922 | 47225 | 45658 |       |        | 47894 | 46045 | 47206        |       |       |
|                                     | 10     | 0,1    | 38151 | 37826 | 37271 |       |        | 37682 | 37654 | 37683        |       |       |
| 2                                   | 0,5    | 28046  | 27558 | 27770 |       |       | 27504  | 27717 | 27553 |              |       |       |

Teniendo en cuenta diversos resultados e informes de varios autores: Salas J. (1989), Electrobras (1987), Kuczera G. (1982), Lettenmaier D.(1987), Wallis J. (1985), Yevjevich V. (1984), se seleccionaron las siguientes funciones de distribución, con los procedimientos más eficientes de estimación de parámetros:

- 1- LN2. Log - Normal de dos parámetros (MV)
- 2- GU. Gumbel (MPP)
- 3- GEV. General de extremos (MPP)
- 4- PIII. Pearson III (MV)
- 5- LPIII. Log - Pearson III (MMX)
- 6- EXP. Exponencial (2 parámetros) (MoM)
- 7- WA. Wakeby (MPP)
- 8- LGU. Log - Gumbel (MoM)

Siendo:

(MV): el método de estimación de parámetros por máxima verosimilitud

(MPP): momentos ponderados por probabilidades

(MMX): momentos mixtos

(MoM): momentos tradicionales

La aplicación y ajuste se lleva a cabo con el modelo de Análisis de Frecuencia AFMULTI, desarrollado en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la UNL (Paoli C. y otros (1991), Cacik y otros (1998)).

Dado que durante 1992 se presentó otra importante crecida cuyo valor pico en Corrientes (55.000 m<sup>3</sup>/s) resulta el segundo en importancia del siglo, superado solamente por el pico de la crecida de 1983 (60.215 m<sup>3</sup>/s), se procedió a actualizar el estudio de Análisis de Frecuencia, lo que volvió a hacerse luego de la crecida de 1998 que superó levemente los 50.000 m<sup>3</sup>/s. Los valores obtenidos sucesivamente son los indicados en el cuadro 3.11.

**Cuadro 3.11**  
Caudales (m<sup>3</sup>/s)  
inferidos según  
serie  
considerada

| Serie             | T= 1.000 años |        |         | T= 100 años |        |        |
|-------------------|---------------|--------|---------|-------------|--------|--------|
|                   | EXP           | LP III | GEV     | EXP         | LP III | GEV    |
| 1904/05 – 1989/90 | 70.409        | 69.914 | 71.102  | 54.218      | 52.597 | 53.202 |
| 1904/05 – 1991/92 | 73.462        | 74.389 | 77.773  | 56.209      | 54.860 | 55.995 |
| 1904/05 - 1997/98 | 74.963        | 74.609 | 79.402  | 57.288      | 55.548 | 57.191 |
| 1940/41 – 1989/90 | 72.526        | 76.044 | 78.932  | 55.641      | 55.010 | 56.093 |
| 1940/41 – 1991/92 | 77.207        | 81.971 | 90.245  | 58.709      | 58.193 | 60.571 |
| 1940/41 - 1997/98 |               |        |         |             |        |        |
| 1960/61 – 1989/90 | 80.618        | 84.906 | 96.560  | 61.204      | 60.481 | 64.366 |
| 1960/61 – 1991/92 | 85.985        | 90.138 | 108.877 | 64.785      | 63.828 | 69.483 |
| 1960/61 - 1997/98 | 86.469        | 87.230 | 103.158 | 65.347      | 63.552 | 68.800 |

Los valores indicados muestran que la dispersión es muy grande aun cuando las distribuciones se calculen con los métodos de estimación de parámetros más eficientes, debido a la incertidumbre de los estadísticos muestrales, que son fuertemente influenciados por el período de registros que se utilice.

También se ve claramente que estas diferencias se incrementan notablemente cuando se pretende hacer estimaciones para altas recurrencias.

Estas evidencias llevaron a la necesidad de realizar estudios especiales tendientes a seleccionar distribuciones, que se presentan en el punto siguiente

## Selección de distribuciones y análisis robusto

### Criterios a utilizar

La elección de uno o más modelos probabilísticos es un típico proceso de toma de decisión que ha generado y continúa generando controversias entre los especialistas. Lo que se pretende es estimar la magnitud esperada de la variable hidrológica en estudio correspondiente a una determinada probabilidad anual de ocurrencia utilizando la «mejor» función de distribución cuyos parámetros son a su vez estimados por el «mejor» procedimiento. Resumidamente, disponer del «mejor» método.

Numerosos autores han intentado dar respuesta a este interrogante y de sus trabajos se extraen las conclusiones más importantes:

Los criterios de bondad de ajuste, como  $\chi^2$  y Kolmogorov - Smirnov, pueden ser una condición necesaria pero no suficiente.

Algunas distribuciones presentan características distintivas, como ser:

- Las distribuciones LN2 y LN3 pueden ser satisfactorias solamente si los coeficientes de asimetría de los valores transformados son cercanos a 0.
- La distribución GU será preferible cuando el coeficiente de asimetría sea cercano a 1,14 y la EX cuando sea cercano a 2.
- La PIII es ilimitada en el extremo superior sólo para coeficientes de asimetría positivos.

Las posibilidades de análisis pueden ser resumidas en:

- a) Análisis gráficos
- b) Tests de bondad de ajuste
- c) Test indirectos basados sobre todas las muestras y submuestras
- d) Estudios de Robusticidad, en los cuales la distribución propuesta es testeada para ver qué tan bien estima las relaciones Q - T cuando la distribución de la población no es idéntica a la distribución que se propone.

### Inserción de las muestras y submuestras en los diagramas de momentos

Según Cunnane C. (1985) los CV, CS y CK podrían ser de gran valor al decidir la forma apropiada de la distribución de  $Q_{m\acute{a}x}$ , si son exactamente conocidos, es decir si se conocieran estas características de la población.

Lettenmaier D. (1987) dice que «aunque las estimaciones muestrales de momentos mayores al segundo orden son muy variables y sesgadas, aun en promedios regionalizados, es posible hacer algunas afirmaciones acerca de la forma general que la distribución fundamental podría asumir sobre la base de la relación teórica CS - CK».



Aun con las limitaciones indicadas cuando no se trabaja con parámetros regionales, siempre resulta de interés ubicar los coeficientes muestrales de series individuales en los diagramas de relación de momentos.

Para el caso del río Paraná, en Análisis de las propiedades estadísticas, se presentaron en las Figuras 3.23. a 3.26. los diagramas de momentos de Posadas y Corrientes, encontrando que las muestras denominadas modernas se ubican cercanas a la distribución exponencial.

Más recientemente, se recomienda la utilización de los diagramas de los momentos-L (Hosking J., 1989). En el Capítulo 6 se presenta una aplicación de los mismos a Corrientes.

Vogel R. et. al. (1996), en su reciente estudio de caudales máximos, medios y mínimos sobre 1.445 estaciones en USA refieren la utilidad de los diagramas de relación de momentos-L y encuentran que en general los modelos LN3, LP3 y GEV son aceptables en todo el territorio.

### **Representaciones gráficas y ajuste visual**

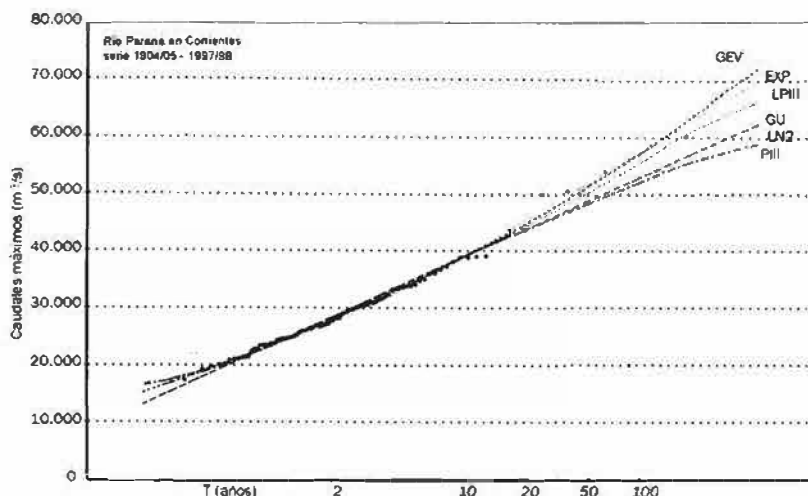
Las clásicas representaciones gráficas de cada distribución teórica con respecto al ploteo de los valores muestrales son una herramienta práctica de interés.

Una cuestión a tener en cuenta es que según la expresión de frecuencia experimental que se utilice se produce un corrimiento de la posición de ploteo que es más notorio en los mayores valores muestrales. Esta variación en la ubicación de los valores muestrales puede cambiar la «tendencia» de la curva experimental y por lo tanto inducir a un ajuste visual diferente según la expresión de frecuencia experimental que se use.

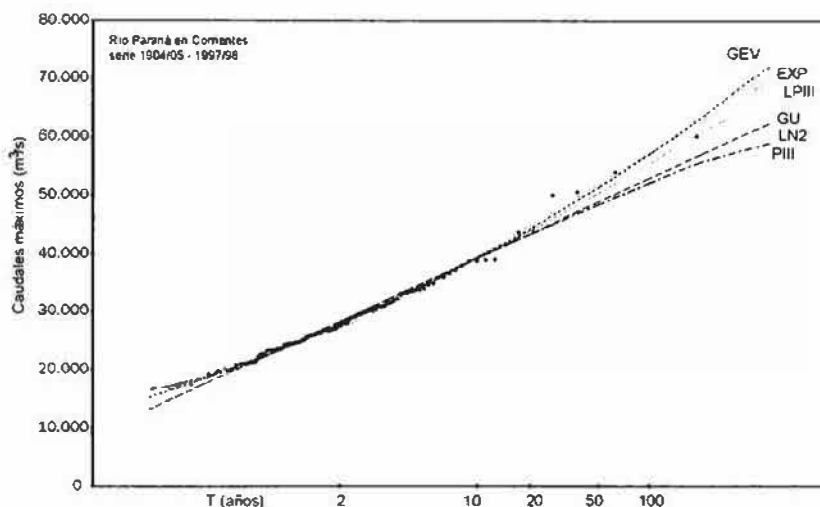
Los ajustes gráficos para los caudales máximos de Corrientes de la serie completa 1904/05-1997/98 y de la serie moderna 1960/61-1997/98, utilizando la frecuencia experimental de Hazen,  $(i-0,5)/n$ , se observan en las Figuras 3.27. y 3.28.

Para ambas series resulta claro que cualquiera de las distribuciones candidatas representan correctamente la muestra hasta recurrencias del orden de los 10 años, valor a partir del cual los diferentes modelos se abren en abanico.

Para recurrencias superiores a los 20 años, las diferencias entre distribuciones comienzan a manifestarse en forma creciente.



**Figura 3.27.** Análisis de frecuencia de caudales máximos del río Paraná en Corrientes para la serie completa 1904/05-1997/98



**Figura 3.28.** Análisis de frecuencia de caudales máximos del río Paraná en Corrientes para la serie moderna 1960/61-1997/98

### Pruebas de bondad de ajuste

Los clásicos tests de  $\chi^2$  (chi-cuadrado) de Pearson y de Kolmogorov - Smirnov se continúan utilizando como un primer filtro para las distribuciones teóricas candidatas.

El test del  $\chi^2$  hace una comparación entre el número actual de observaciones y el número esperado de observaciones (de acuerdo con la distribución bajo testeo) que caen en los intervalos de clase.

Este test es sensible en las colas de la distribución asumida. Cuando las muestras son de corta longitud (<50 años) y con asimetrías elevadas suele presentar problemas para cumplir con los requisitos de cálculo del test

(número mínimo de intervalos de clase y número mínimo de efectivos en cada intervalo), con lo cual pierde potencia.

El test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) consiste en determinar la máxima desviación entre la función de distribución teórica que se está testeando y la frecuencia empírica de la muestra que se está ajustando. No depende del número de parámetros estimados.

En este test se debe tener cuidado por el hecho que basa su decisión en una medida de la máxima distancia entre la curva de frecuencia experimental y la curva de frecuencia teórica, que puede presentarse en la cola inferior de las distribuciones, donde en realidad no interesa tanto el ajuste si se está analizando máximos, pero es esencial en el estudio de mínimos. Esto suele suceder por ejemplo con la distribución exponencial, cuya función tiene límite inferior.

Debe quedar claro que tanto los tests de  $\chi^2$  como el (K-S) se utilizan para determinar si existen suficientes evidencias para rechazar la hipótesis de que las distribuciones candidatas pueden representar a la muestra, pero nada dicen respecto de cuál de ellas se puede considerar mejor.

Ninguno de estos tests son muy potentes en el sentido que la probabilidad de aceptar la hipótesis, cuando esta es en realidad falsa, es muy alta cuando estos tests son usados. Esto es particularmente cierto para muestras pequeñas (Haan C., 1977).

Para el caso de las series de caudales máximos de Corrientes ambos test no rechazan la hipótesis de que cualquiera de las distribuciones candidatas pueden representar las series muestrales testeadas.

Los errores cuadráticos medios, tanto en frecuencia (ECMF), como en valores (ECMV), obtenidos de confrontar cada distribución teórica con la muestra, son de utilidad para determinar cuál de ellas ajusta mejor, pero sólo a la muestra y no necesariamente significa que será la mejor para realizar inferencia. Están influenciados también por la expresión que se utilice para calcular la frecuencia experimental.

Para los caudales máximos de Corrientes, los menores valores corresponden a las distribuciones de 3 o más parámetros GEV, WA y LPIII debido a la mayor versatilidad que poseen de acomodar su forma a la muestra.

### **Análisis robusto de selección**

Como se expresó anteriormente la aptitud de los modelos en la predicción es cuestionable tanto por la estructura del modelo como por el procedimiento de estimación de parámetros.

Kuczera G. (1982), introduce el concepto de modelos robustos en análisis de frecuencia de crecidas indicando que un modelo robusto debe ser capaz de estimar eventos extremos prescindiendo de cuál distri-

bución de  $Q_{max}$  candidata represente mejor el mundo real, sin desastrosa pérdida de performance.

El procedimiento general de aplicación consiste en:

- 1) Seleccionar una o varias distribuciones «de la población de crecidas» con parámetros representativos del mundo real.
- 2) Se generan series sintéticas de crecidas de diferente longitud con cada distribución de la población adoptada.
- 3) Se ajustan a las series generadas las distribuciones candidatas.
- 4) Se calculan para diferentes longitudes de muestra e inferencias para diversas recurrencias, estimadores de performance, generalmente error cuadrático medio y sesgo promedios para cada distribución candidata.

#### **Definición de escenarios y experimentos realizados**

El estudio llevado a cabo consistió en definir escenarios alternativos de población de crecidas, con los cuales se generan datos sintéticos que fueron ajustados por diferentes distribuciones candidatas. Para cada escenario y conjunto de distribuciones candidatas se calculan estimadores de eficiencia y sesgo, para las inferencias correspondientes a valores de recurrencia  $T$  establecidos, hechas con el conjunto de submuestras generadas.

Los escenarios a definir deben contemplar un rango aceptable de las características estadísticas de la población, indicado por el conocimiento de antecedentes y por el régimen del curso, por lo tanto cada escenario se definió por las características de una población de  $Q_{max}$  que se adoptó a través de una función de distribución y de sus parámetros estadísticos:

- La población de  $Q_{max}$  tiene una distribución: WA, GEV, LPIII, EXP, LGU, GU.
- La población de  $Q_{max}$  tiene media y desvío similar o muy cercano a la serie histórica 1904/05 - 1989/90 en Corrientes.
- La población de  $Q_{max}$  asume valores de asimetría cercanos a los de la serie histórica indicada, valores inferiores y mayores, según la experiencia de submuestras de otros períodos.

A partir de estos elementos los escenarios definidos y el valor de  $Q_{max}$  correspondiente a cada uno de ellos para recurrencia  $T = 10.000, 1.000$  y 100 años son los observados en el Cuadro 3.12.

**Cuadro 3.12**  
Características  
de los esce-  
narios utilizados

| POBLACION | WA1   | WA2   | GEV1  | GEV2  | LPIII | EXP   | GU    | LGU    |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Q         | 28866 | 28750 | 28866 | 28866 | 10245 | 28866 | 28866 | 10245  |
| S         | 7253  | 6863  | 7198  | 7032  | 0.22  | 7032  | 6843  | 0.22   |
| CS        | 1.70  | 1.41  | 1.68  | 0.91  | 0.71  | 2.00  | 1.14  |        |
| CK        | 8,7   | 6.7   |       |       |       | 9.0   | 5.4   |        |
| Q10000    | 90432 | 79684 | 92342 | 68736 | 90865 | 85600 | 74928 | 140436 |
| Q1000     | 71417 | 65599 | 71102 | 59773 | 69914 | 70409 | 62641 | 91543  |
| Q100      | 53945 | 51534 | 53202 | 49698 | 52597 | 54627 | 50331 | 59627  |

### Experimentos realizados

1) En cada escenario seleccionado se generaron 200 muestras aleatorias de 150 valores cada una, en el intervalo [0,1], a partir de una distribución Uniforme. Se descartaron los primeros 50 valores en cada muestra, evitando así un posible problema de dependencia del valor inicial en el mecanismo generador; quedando luego 200 muestras de 100 valores cada una.

2) Para cada escenario y para cada una de las 200 muestras generadas se ajustaron las distribuciones candidatas: LN2(MV), GU(MPP), GEV(MPP), PIII(MV), LPIII(MMX), EXP(MoM), WA(PMP) y LGU(MoM).

3) Para la bondad de ajuste muestral se calcularon el ECMF (promedio) y ECMV (promedio):

$$ECMFP_j = \frac{\sum_{i=1}^{200} ECMF_{ji}}{200} \quad (3.9)$$

ECMFP: error cuadrático medio de frecuencias promedio

ECMF<sub>ji</sub> : error cuadrático medio de frecuencias, distribución j, muestra i

$$ECMVP_j = \frac{\sum_{i=1}^{200} ECMV_{ji}}{200} \quad (3.10)$$

ECMVP: error cuadrático medio de valores promedio

ECMV<sub>ji</sub> : error cuadrático medio de valores, distribución j, muestra i

4) Con los valores inferidos en cada caso se calcularon los siguientes estimadores (para cada escenario):

## a) Error Absoluto Relativo Promedio

$$\text{EARP}(T)_j : 1/200 \sum_{i=1}^{200} |x_i(T)_j - x(T)| / x(T) \quad (3.11)$$

donde:

$x_i(T)_j$  : valor estimado con cada distribución candidata  $j$  para recurrencia  $T$  con la muestra  $i$ -ésima

$x(T)$  : valor correspondiente a recurrencia  $T$  para la población (o sea de la distribución y parámetros correspondientes con que se definió cada escenario).

## b) Sesgo

$$(T)_j : 1/200 \sum_{i=1}^{200} x_i(T)_j - x(T) \quad (3.12)$$

c) Eficiencia: Se define como la relación entre el  $\text{EARP}(T)$  mínimo para una población y el  $\text{EARP}(T)$  de cada distribución  $j$ , de la población que se está analizando.

$$\text{EF}(T)_j = \text{EARP}(T)_j \text{ min} / \text{EARP}(T)_j \quad (3.13)$$

Resultados obtenidos: se han seleccionado para presentar los resultados del  $\text{EARP}$ , calculados según (3.11) y expresados en % para  $T= 10.000, 1.000$  y  $100$  años.

| POBLACION CORRESPONDIENTE A ESCENARIOS ASUMIDOS |      |      |      |       |       |      |      |      |
|---|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| DISTRIB.  | WA1  | WA2  | GEV1 | GEV2  | LP111 | EXP  | GU   | LGU  |
| CAND. J   |      |      |      |       |       |      |      |      |
| LN2   | 24.3 | 17.7 | 25.9 | 6.10  | 27.0  | 23.1 | 12.5 | 45.9 |
| GU  | 17.5 | 8.70 | 18.8 | 11.0  | 19.3  | 17.5 | 5.00 | 44.5 |
| GEV   | 23.6 | 19.8 | 20.2 | 14.4  | 22.4  | 81.7 | 17.3 | 29.1 |
| P111  | 21.3 | 12.3 | 22.2 | 7.80  | 21.4  | *    | 11.1 | *    |
| LP111   | 18.4 | 15.2 | 15.3 | 12.0  | 17.5  | 20.1 | 13.6 | 26.9 |
| EXP   | 8.40 | 7.60 | 8.10 | 24.0  | 9.50  | 8.10 | 12.0 | 33.3 |
| WA  | 30.6 | 28.1 | 25.7 | 18.9  | 26.0  | **   | 19.0 | 39.4 |
| LGU   | 55.4 | 67.8 | 51.7 | 118.4 | 46.1  | 44.4 | 84.1 | 16.3 |

Cuadro 3.13.  
Resultados del  
 $\text{EARP}$  (%) para  
 $T = 10.000$   
años

**Cuadro 3.14.**  
Resultados del  
EARP(%) para T  
= 1.000 años

| POBLACION CORRESPONDIENTE A ESCENARIOS ASUMIDOS |             |             |             |             |             |             |             |             |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| DISTRIB.  | WA1         | WA2         | GEV1        | GEV2        | LPIII       | EXP         | GU          | LGU         |
| CAND. J   |             |             |             |             |             |             |             |             |
| LN2   | 17.7        | 13.6        | 17.3        | <b>5.50</b> | 18.2        | 18.4        | 9.50        | 30.1        |
| GU  | 12.7        | 7.30        | 11.8        | 7.00        | 12.3        | 14.7        | <b>4.50</b> | 29.0        |
| GEV   | 14.8        | 12.5        | 12.9        | 9.80        | 13.9        | 32.6        | 11.2        | 18.2        |
| PIII  | 15.0        | 9.50        | 14.1        | 6.60        | 13.3        | *           | 8.40        | *           |
| LPIII   | 13.1        | 10.6        | 10.9        | 8.10        | 12.3        | 11.7        | 9.40        | 17.8        |
| EXP   | <b>7.00</b> | <b>6.70</b> | <b>6.20</b> | 16.2        | <b>6.50</b> | <b>7.40</b> | 9.60        | 17.8        |
| WA  | 16.4        | 14.5        | 13.0        | 11.1        | 14.2        | **          | 11.5        | 20.1        |
| LGU   | 28.0        | 34.1        | 28.4        | 60.2        | 25.4        | 20.0        | 43.9        | <b>12.1</b> |

**Cuadro 3.15.**  
Resultados del  
EARP(%) para T  
= 100 años

| POBLACION CORRESPONDIENTE A ESCENARIOS ASUMIDOS |             |             |             |             |             |             |             |             |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| DISTRIB.  | WA1         | WA2         | GEV1        | GEV2        | LPIII       | EXP         | GU          | LGU         |
| CAND. J   |             |             |             |             |             |             |             |             |
| LN2   | 10.0        | 8.30        | 8.40        | 4.40        | 9.90        | 11.5        | 6.10        | 13.3        |
| GU  | 7.50        | 5.40        | 6.20        | <b>4.10</b> | 7.00        | 10.6        | <b>3.90</b> | 13.0        |
| GEV   | 8.20        | 7.00        | 7.10        | 5.60        | 7.80        | 9.20        | 6.20        | 9.40        |
| PIII  | 8.40        | 6.30        | 7.20        | 4.90        | 7.40        | *           | 5.50        | *           |
| LPIII   | 8.20        | 6.80        | 6.60        | 5.10        | 7.80        | 7.40        | 5.90        | 9.60        |
| EXP   | <b>5.90</b> | <b>5.30</b> | <b>5.50</b> | 8.10        | <b>5.90</b> | <b>6.20</b> | 6.20        | <b>7.80</b> |
| WA  | 7.90        | 6.90        | 6.70        | 5.70        | 7.70        | **          | 6.30        | 9.20        |
| LGU   | 11.0        | 13.0        | 12.3        | 23.1        | 11.1        | 7.60        | 17.1        | 8.10        |

(\*)En la estimación de parámetros por el método de (MV) en la distribución PIII existen casos donde con el método utilizado (Kite G.(1977)), no se llega a una solución apropiada. Ver también Cheng, R. et al (1983).

(\*\*) En la estimación de parámetros por el método (MPP) en la distribución WA, Landwher J. (et al (1979)) indica que existen casos en los que no se llega a una solución apropiada al concluir el procedimiento completo de estimación.

Se observa a la distribución EXP como la más robusta, para T=10.000 y 1.000 años, en los escenarios WA1, WA2, GEV1, LPIII y EXP. Para el escenario LGU y dejando de lado la propia LGU, los mejores resultados corresponden a LPIII para T=10.000 años y son muy parejas la EXP, LPIII y GEV para T=1.000 años. Para los escenarios GEV2 y GU los menores valores corresponden a las distribuciones LN2 y GU respectivamente. En general para T=100 años y para cualquier escenario, las performance de las diferentes distribuciones es pareja.

Las distribuciones de 2 parámetros, al ser más rígidas, presentan un mayor sesgo, según los cálculos efectuados con la expresión (3.12), (a excepción de los escenarios donde la población se asume de dos parámetros) aunque éste es compensado con un menor EARP(T) sobretodo en la EXP para los escenarios WA1, WA2, GEV1, LPIII.

Los valores de eficiencia calculados con la expresión (3.13), no hacen más que confirmar lo indicado por los EARP(T): la distribución EXP se manifiesta netamente como la más eficiente para todas las recurrencias en la mayoría de las poblaciones testeadas. Para T= 100 años, la eficiencia del resto de las distribuciones candidatas, excepto la LN2 y LGU es también superior al 70 % en todas las poblaciones.

## **Introducción de marcas históricas**

### **Información histórica y su uso en la estimación de crecidas**

Se conoce como información histórica de crecidas a aquella producida con anterioridad al período sistemático de mediciones. En general rastros de crecidas históricas pueden obtenerse a través de evidencias físicas (marcas en puentes, defensas, paredes de edificios antiguos, etc.), observaciones de pobladores del lugar, crónicas históricas o anotaciones en documentos de diversa índole (municipios, iglesias, estaciones ferroviarias, etc.).

Se han efectuado distintas propuestas para incorporar las marcas históricas o en forma más general la llamada información "no medida", con el objetivo de mejorar la estimación de caudales máximos de crecidas a través del Análisis de Frecuencia.

El Natural Environmental Research Council (NERC (1975)) reconoce la existencia de al menos 2 tipos de datos no estándares relacionados con series de caudales máximos:

a) Caudales pico faltantes que pueden aparecer cuando el nivel de la crecida es tan alto que superan el tope de la escala hidrométrica. En este caso, se asume solamente que el caudal que ha excedido un límite tiene un valor mayor al correspondiente a ese límite.

b) Marcas de crecidas históricas que indican que los niveles de crecida han ascendido por sobre un umbral de referencia durante algún período histórico. Se asume que estas crecidas históricas son conocidas y que en los años intermedios los caudales máximos existentes no han alcanzado el umbral.

En este trabajo se propone al método de Máxima Verosimilitud (MV) para estimar los parámetros de una distribución incorporando cualesquiera de estos tipos de datos.



El US Water Resource Council (USWRC) (Geological Survey (1982)) indica que la información de crecidas ocurridas fuera del registro sistemático puede ser usada para extender el mismo, pero antes debe evaluarse tanto la fiabilidad de los datos como los cambios en las condiciones de la cuenca sobre el período de tiempo extendido y los resultados obtenidos con y sin incorporación de información histórica.

Se propone un método de momentos corregidos o ponderados por valores históricos para ajustar la distribución LOG-PEARSON III, así como se indica una corrección a incorporar en la Frecuencia Experimental para el ploteo de los valores históricos incorporados y los valores del período sistemático corregido.

En la misma temática, el estudio de Electrobras (1987) dice: *«Es muy frecuente que en una investigación sobre una región aparezcan informaciones acerca de niveles máximos provocados por el agua durante un período más extenso que el cubierto por los registros de las estaciones hidrométricas. Evidentemente la estimación de los parámetros de una distribución de  $Q_{max}$  anuales debe incluir este tipo de información»*, y clasifica el tipo de información disponible en 4 categorías:

- Clase A: se incluyen todos los años donde los valores de  $Q_{max}$  son conocidos.
- Clase B: se incluyen todos los años en los que la escala de la estación fue sobrepasada sin que se conozca un límite superior para la crecida.
- Clase C: se incluyen todos los años cuyos  $Q_{max}$  son desconocidos, pero se sabe que no superarán un valor conocido (por ejemplo: el récord del siglo).
- Clase D: se incluyen todos los años en los que la escala fue superada y se sabe el límite superior para la crecida ocurrida (por ejemplo: el récord del siglo) (caso mixto).

### **Métodos tradicionales que permiten incorporar información histórica**

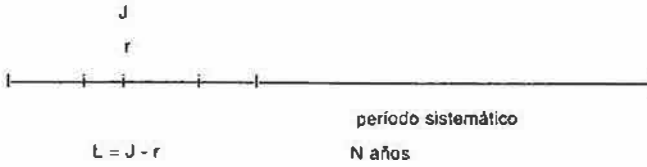
#### **Método de Máxima Verosimilitud (MV)**

NERC (1975) propone este método, el cual puede presentarse de la siguiente manera para el caso de marcas históricas (valores desconocidos debajo de un límite).

Si durante un período de  $J$  años,  $r$  caudales máximos anuales ascendieron sobre un límite  $x_h$  y fueron marcados, dejando entonces  $L=J-r$  caudales que se asumen menores a  $x_h$ . Si además existen  $N$  años de un registro sistemático continuo resultan  $N+r$  valores completamente especificados, siendo la función de verosimilitud:

$$Lh = \pi \prod_{i=1}^{N+r} f(x_i) * \left\{ \int_{-\infty}^{xh} f(x) dx \right\}^L \quad (3.14)$$

En forma simplificada:



Utilizando la distribución Gumbel:

$$F(x) = \exp(-\exp(-(x-\mu)/\alpha)) \quad F(x) = P(X \leq x) \quad (3.15)$$

$$f(x) = 1/\alpha \exp(-y - \exp(-y)) \quad \text{con } y = (x-\mu)/\alpha \quad (3.16)$$

La función de verosimilitud y las ecuaciones correspondientes para obtener sus parámetros son:

$$Lh = \pi \prod_{i=1}^{N+r} 1/\alpha \exp(-y_i - \exp(-y_i)) * w^L \quad (3.17)$$

$$-(1/\alpha) [(N+r) - \sum_{i=1}^{N+r} y_i + \sum_{i=1}^{N+r} y_i * e^{-y_i} + L * e^{-y_h} * y_h] = 0 \quad (3.18)$$

$$-(1/\alpha) [-(N+r) + \sum_{i=1}^{N+r} e^{-y_i} + \sum_{i=1}^{N+r} L * e^{-y_h}] = 0 \quad (3.19)$$

donde:  $y_i = (x_i - \mu)/\alpha$ ;  $y_h = (x_h - \mu)/\alpha$ ;  $w = \exp(-\exp(-y_h))$

J: años anteriores al registro sistemático con información

r: Q<sub>max</sub> conocidos (del período anterior al sistemático)

N: período sistemático de mediciones

#### Método de Momentos

El USWRC (1982) propone el siguiente método para calcular la distribución de frecuencias Log-Pearson III ajustada por valores históricos.

Con el conocimiento de valores históricos se define la longitud del período H. Al número «z» de eventos mayores en el período H se le da un coeficiente de ponderación igual a 1. A los restantes eventos del registro sistemático se les aplica un coeficiente de peso W:

$$W = \frac{H - z}{N + L} \quad (3.20)$$

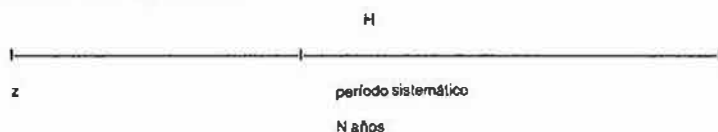
H: número de años en el período total (incluye el período sistemático de mediciones)

N: número de valores x (valores no históricos)

z: número de picos históricos incluyendo valores atípicos altos (outliers altos).

L: número de bajos valores a ser excluidos, tales como: valores cero, valores debajo del nivel medible o bajos outliers previamente identificados.

En forma simplificada:



Se aplica el coeficiente W a los datos y se obtienen los estadísticos (logaritmos) corregidos con información histórica de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

Media ajustada con información histórica:

$$X_{mc} = \frac{W \sum_{i=1}^H X_i + \sum_{i=1}^z X_z}{H - WL} \quad (3.21)$$

X<sub>i</sub>: magnitud logarítmica de los picos sistemáticos excluyendo eventos con valores cero y los valores atípicos altos y bajos.

X<sub>z</sub>: magnitud logarítmica de los picos históricos incluyendo valores atípicos altos (high outlier) que tengan información histórica.

Desvío corregido con información histórica:

$$Sc = \left( \frac{W \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - X_{mc})^2 + \sum_{i=1}^Z (xz - X_{mc})^2}{(H - W \cdot L - 1)} \right)^{0.5} \quad (3.22)$$

Coefficiente de asimetría corregido con información histórica:

$$CSc = \frac{H - W \cdot L}{(H - W \cdot L - 1) \cdot (H - W \cdot L - 2)} \cdot \left( \frac{W \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - X_{mc})^3 + \sum_{i=1}^Z (xz - X_{mc})^3}{Sc^3} \right) \quad (3.23)$$

Luego:

$$\log X(T) = X_{mc} + K_{(F, CSc)} \cdot Sc \quad (3.24)$$

K: factor de frecuencia de Harter

Con respecto a la frecuencia experimental utilizada para el ploteo, esta puede corregirse por valores históricos teniendo en cuenta lo siguiente, para valores ordenados de mayor a menor:

- número de orden i: se corrigen exclusivamente los valores x, o sea;

$$ic = i \text{ cuando } 1 \leq i \leq z \quad (3.25)$$

$$ic = W \cdot i - (W - 1) \cdot (z + 0.5) \text{ cuando } (z+1) \leq i \leq (z+N+L) \quad (3.26)$$

ic: número de orden históricamente corregido

- tamaño de la muestra: es el valor H
- finalmente se aplica la expresión de frecuencia empírica seleccionada

### Introducción de las marcas históricas de niveles en Corrientes

En el estudio realizado por Aisiks E. (1984) se indica: *“Para períodos anteriores a fines del siglo XIX, se tiene noticia de las crecidas del río Paraná y su magnitud por distintas referencias como ser viejas marcas de edificaciones, transmisión oral de pobladores de la zona, crónicas o periódicos de la época, etc.”*

*«Los niveles del río Paraná se comienzan a medir en 1901. Sin embargo existe información sobre el período 1875 – 1901 que incluye la crecida extraordinaria de 1878, hecho que fue publicado por los diarios “La Nación”, “La Prensa” y “La Tribuna” de aquel año, estimándose que la altura de la crecida en Corrientes había alcanzado los 8,65 m de su escala. De igual manera se tiene referencia de crecidas ocurridas en 1858 superiores en 30 cm a la de 1878. La crecida de 1812 alcanzó niveles extraordinarios, que según las estimaciones de los especialistas superó inclusive a la de 1905, con un nivel máximo fijado de 9,53 m en Corrientes. Se puede mencionar también dos crecidas que se suponen superiores a todas las anteriores, producidas en 1612 y 1748 que habrían superado el nivel de 10,50 m frente a Corrientes.»*

Ceirano E. y otros (1985) en su estudio sobre la influencia de la crecida de 1982/83 sobre las estadísticas de la serie de caudales máximos anuales en Corrientes (1904/05 – 1983/84), tomando como referencia a Motor Columbus y Asociados (1979), indican las mismas crecidas determinadas en base a rastros históricos y dicen: *«La determinación de los caudales que corresponden a dichas crecidas presenta una gran incertidumbre que proviene de varios factores, pudiéndose mencionar entre otros: la modificación del sistema físico por acción natural y/o antrópica, el posible efecto de lluvias locales que pueden provocar inundaciones por sí mismas dejando rastros que pueden confundir las provocadas por el río; la gran incidencia que la permanencia de la inundación ha demostrado tener en los niveles alcanzados por la disminución de rugosidad del valle de inundación.»*

Teniendo en cuenta estos antecedentes, se efectuó un estudio, Cacik P. y otros (1992), a efectos de analizar la incidencia de estas crecidas sobre la serie disponible en ese momento en Corrientes (1904/05 – 1989/90). Se hizo la suposición de que con las alturas históricas indicadas se pueden obtener los valores de caudales de 60.230 m<sup>3</sup>/s (1812), 53.740 m<sup>3</sup>/s (1858) y 50.850 m<sup>3</sup>/s (1878) a partir de la curva de descarga (h – Q) calibrada luego de la crecida de 1982/83.

No se consideraron las crecidas de 1612 y 1748 debido a que en ese rango de alturas la curva h-Q sería muy poco confiable y a la escasa especificación que se tiene de las mismas; asimismo en este análisis se puso mayor énfasis en la crecida de 1878 por ser la que posee mayores referencias.

Se utilizó la distribución LPIII ajustada mediante el método de momentos que permitirá emplear el método para incorporación de valores históricos, tal cual lo propone el USWRC (1982) asimismo se empleó la distribución EXP ajustada por momentos para tener en cuenta un método con el mismo espíritu. Adicionalmente se utilizó la distribución Gumbel (GU) ajustada por máxima verosimilitud, que si bien no es de las de mejor ajuste a la muestra que se analiza, permitió desarrollar el método propuesto en NERC (1975).

Los estadísticos obtenidos de la serie sistemática (1904/05 – 1989/90) son:

$$\begin{aligned} X: 28.867 \text{ m}^3/\text{s} & & XL = 4,44922 \\ S: 7.032 \text{ m}^3/\text{s} & & SL = 0,09666 \\ CS: 1,56 & & CSL = 0,656 \end{aligned}$$

Los valores inferidos son (en  $\text{m}^3/\text{s}$ ):

| T (años) | LPiII (MoM) | EXP (MoM) | GU(MV) |
|----------|-------------|-----------|--------|
| 100      | 52.390      | 54.220    | 49.200 |
| 1.000    | 69.100      | 70.410    | 60.920 |
| 10.000   | 89.000      | 86.600    | 72.610 |

**Cuadro 3.16.**  
Caudales máximos estimados con distintas distribuciones ajustadas con la serie sistemática

(\*) el subíndice L indica valores logarítmicos  
(MoM) : estimación de parámetros por método de momentos  
(MV): estimación de parámetros por método de máxima verosimilitud

### Método de momentos

Distribución Log-Pearson III

Siguiendo el procedimiento indicado por el Bullerin 17B del USWRC (1982), incorporando los tres valores históricos.

H: 178 años (período 1812 – 1989/90)

Z: 4 (3 valores históricos más un valor considerado "outlier", 1982/83 con  $60.215 \text{ m}^3/\text{s}$ )

W: 2,047 (factor de ponderación)

Aplicando las fórmulas se obtienen los siguientes valores para los estadísticos:

$$XmLc = 4,45216 \quad SLc = 0,09984 \quad CSLc = 0,7047$$

y los siguientes valores de Q(T):

| T (años) | LPiII  |
|----------|--------|
| 100      | 54.249 |
| 1.000    | 72.816 |
| 10.000   | 95.460 |

**Cuadro 3.17.**  
Caudales máximos estimados con la distribución LPiII introduciendo las crecidas históricas por método de momentos

### Distribución Exponencial

Se utilizan las mismas fórmulas que las propuestas por el USWRC (1982), pero en lugar de los logaritmos de los valores se toma la variable natural. De esta forma, al igual que en el caso anterior:

H : 178 años  
 Z : 4  
 W : 2,047

Resultando los siguientes estadísticos corregidos por información histórica:

$X_{mc} = 29.122$        $S_c = 7.383$        $CSc = 1,56$

Y los siguientes valores estimados:

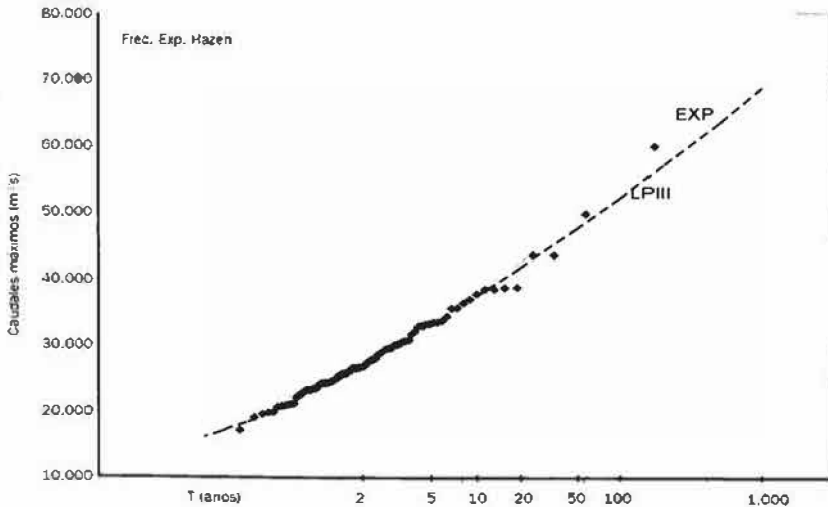
**Cuadro 3.18.**  
 Caudales máximos estimados con la distribución exponencial introduciendo las crecidas históricas por método de momentos

| T (años) | EX     |
|----------|--------|
| 100      | 55.740 |
| 1.000    | 72.741 |
| 10.000   | 89.742 |

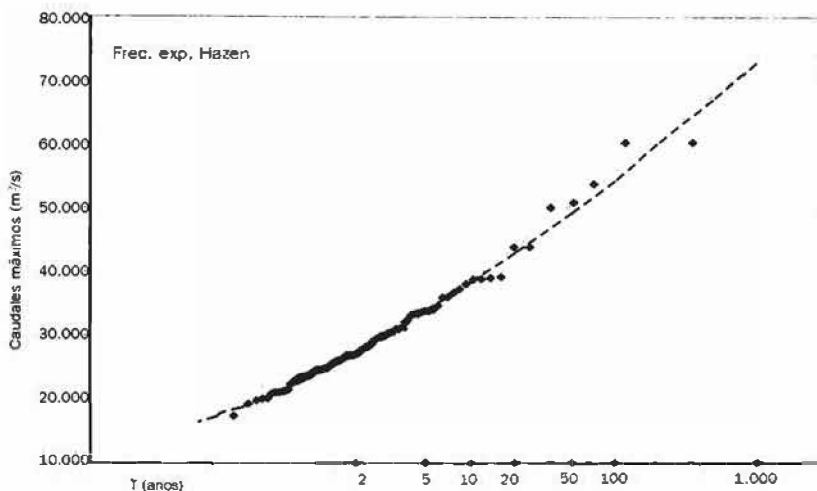
**Análisis gráfico**

En la Figura 3.29., se observa el ploteo de los valores de caudales máximos anuales de la estación Corrientes según la fórmula de Hazen ( $P_i = (2i-1)/2N$ ), para la serie sistemática. Además aparecen las distribuciones Exponencial y Log-Pearson III ajustadas a la misma serie.

**Figura 3.29.**  
 Ajuste de la muestra sistemática (registrada) de caudales máximos anuales del río Paraná en Corrientes del período 1904/05-1989/90, con frecuencia experimental con la expresión de Hazen

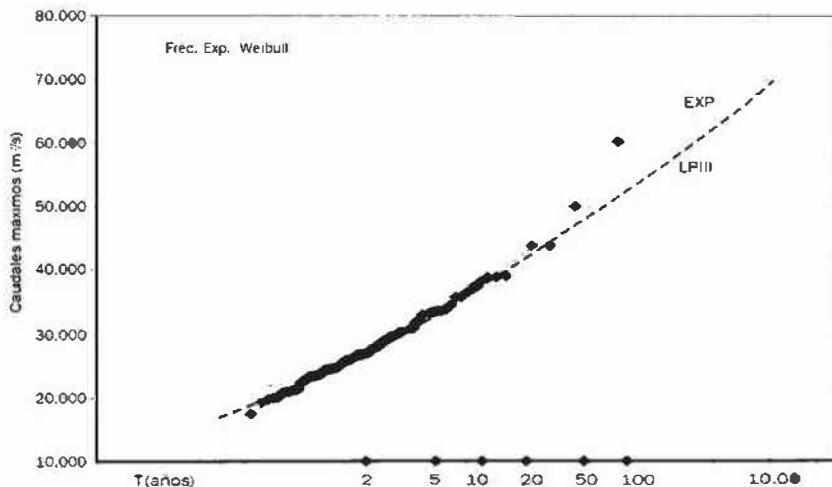


En la Figura 3.30. se observa el ploteo de los caudales máximos de acuerdo a la fórmula de Hazen corregida por valores históricos y también las distribuciones corregidas.



**Figura 3.30.** Ajuste de la muestra de caudales máximos anuales del río Paraná en Corrientes del período 1904/05-1989/90, con incorporación de crecidas históricas y con frecuencia experimental con la expresión de Hazen

En la Figura 3.31., el ploteo de los valores de caudales máximos según la fórmula de Weibull ( $P_i = (1) / (N+1)$ ), para la serie sistemática. Además aparecen las distribuciones Exponencial y Log Pearson III ajustadas a la misma serie.

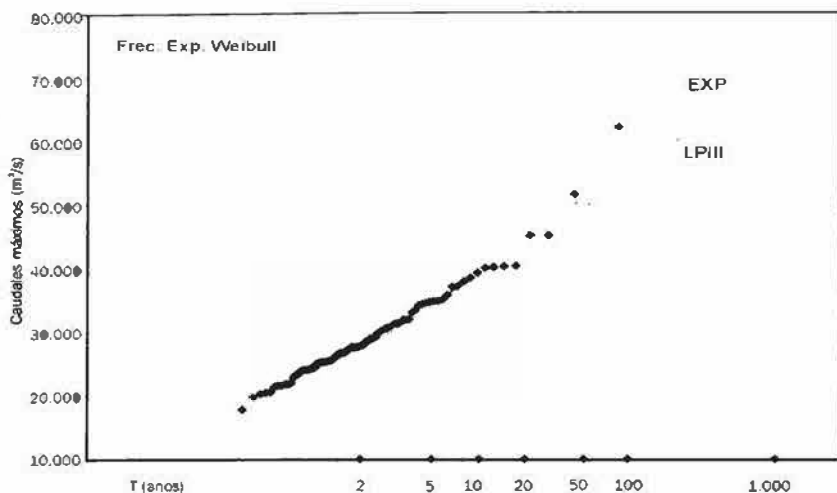


**Figura 3.31.** Ajuste de la muestra sistemática (registrada) de caudales máximos anuales del río Paraná en Corrientes del período 1904/05-1989/90, con frecuencia experimental con la expresión de Weibull

En la Figura 3.32. se observa el ploteo de los caudales máximos de acuerdo a la fórmula de Weibull corregida por valores históricos, así como las distribuciones corregidas.



**Figura 3.32.** Ajuste de la muestra de caudales máximos anuales del río Paraná en Corrientes del período 1904/05-1989/90, con incorporación de crecidas históricas y con frecuencia experimental con la expresión de Weibull



En las Figuras anteriores puede observarse la influencia de la frecuencia experimental adoptada y en el cuadro siguiente se indican las recurrencias correspondientes a los mayores caudales:

**Cuadro 3.19.** Recurrencias asignadas a las crecidas históricas introducidas según la expresión de frecuencia experimental utilizada

| años | Caudal (m³/s) | T s/Mazen (años) | T s/Weibull (años) |
|------|---------------|------------------|--------------------|
| 1812 | 60.230        | 356              | 179                |
| 1982 | 60.215        | 119              | 90                 |
| 1858 | 53.740        | 71               | 60                 |
| 1878 | 50.850        | 51               | 45                 |

#### Análisis de sensibilidad

En la incorporación de valores históricos, tanto como en el análisis de outliers, dada la influencia que estos pueden tener sobre los  $Q(T)$  estimados es conveniente plantear diversas hipótesis acerca de la ocurrencia y veracidad de la información disponible.

A tal efecto puede considerarse el cálculo tomando como período histórico únicamente hasta 1878 (inclusive) y adoptar como correcto el valor estimado para la crecida de ese año, hipótesis que puede ser considerada muy probable. En este caso, el valor H es igual a 112 años, Z = 2 años (el valor de 1982/83 es outlier) y W = 1,294. Los caudales inferidos bajo esta hipótesis son:

| T(años) | LP III | EXP    |
|---------|--------|--------|
| 100     | 52.839 | 54.661 |
| 1.000   | 69.752 | 71.062 |
| 10.000  | 89.898 | 87.464 |

**Cuadro 3.20.** Caudales máximos estimados introduciendo una sola crecida histórica y considerando la crecida 1982/83 como outlier

Analizando este período surge como posibilidad considerar el valor de 1904/05 (50.043 m<sup>3</sup>/s) como outlier, además del valor de 1982/83. En este caso los caudales estimados son:

| T(años) | LP III | EXP    |
|---------|--------|--------|
| 100     | 52.839 | 54.325 |
| 1.000   | 69.626 | 70.549 |
| 10.000  | 89.564 | 86.773 |

**Cuadro 3.21.** Caudales máximos estimados introduciendo una sola crecida histórica y considerando las crecidas 1982/83 y 1904/05 como outlier

Se plantearon otras hipótesis, similares algunas a las propuestas anteriormente por Ceirano, E. y otros (1985), obteniéndose en todas ellas resultados comparables con los presentados.

Si se analiza la posibilidad de que estos valores históricos presentaran errores de «10% respecto de los asumidos de la curva h-Q disponible, para el caso que esa subestime valores los caudales verdaderos serían los que se muestran en el Cuadro 3.22. columna 1. Para el caso contrario, que la curva h-Q sobreestime, los valores serían los que muestran en la columna 2. En el Cuadro 3.23. se presentan los valores inferidos con estas suposiciones de caudales históricos:

| años | (1)                | (2)                |
|------|--------------------|--------------------|
|      | $\epsilon = -10\%$ | $\epsilon = +10\%$ |
| 1812 | 66.256             | 54.208             |
| 1858 | 59.115             | 48.367             |
| 1878 | 55.936             | 45.766             |

**Cuadro 3.22.** Caudales máximos estimados para las crecidas históricas considerando errores en la curva h-Q

| T<br>(años) | $\epsilon = -10\%$ |        | $\epsilon = +10\%$ |        |
|-------------|--------------------|--------|--------------------|--------|
|             | LP III             | EXP    | LP III             | EXP    |
| 100         | 56.194             | 57.112 | 52.570             | 54.562 |
| 1.000       | 77.635             | 74.930 | 68.883             | 70.870 |
| 10.000      | 104.904            | 92.748 | 88.068             | 87.177 |

**Cuadro 3.23.** Caudales máximos inferidos de acuerdo a suposición de error del 10% en los caudales históricos

### Método de Máxima Verosimilitud

Se utilizó el método iterativo descrito en NERC (1975) para resolver las ecuaciones planteadas para la distribución Gumbel. Los valores de los parámetros de esta distribución ajustada a la serie sistemática 1904/05 – 1989/90 por el método de máxima verosimilitud (sin tener en cuenta información histórica), así como los caudales máximos estimados, se pueden ver en la columna 1 del Cuadro 3.24.

Se fijaron diferentes hipótesis para la introducción de las marcas históricas, presentándose los caudales estimados en cada caso en comparación con los correspondientes a la serie medida.

**Cuadro 3.24.**  
Caudales máximos estimados por la distribución Gumbel ante diferentes hipótesis de valores históricos

|          | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Xh       | 0        | 50.000   | 40.000   | 60.000   | 60.000   | 50.000   | 40.000   |
| L        | 0        | 89       | 89       | 89       | 90       | 25       | 25       |
| R        | 0        | 3        | 3        | 1        | 0        | 1        | 1        |
| (N+r)    | 86       | 89       | 89       | 89       | 88       | 87       | 87       |
| $\alpha$ | 5.077,7  | 5.431,5  | 5.032,9  | 5.584,0  | 5.371,4  | 5.189,8  | 5.058,1  |
| u        | 25.844,5 | 26.098,8 | 25.695,7 | 26.212,5 | 26.071,1 | 25.934,2 | 25.806,0 |
| Q100     | 49.203   | 51.085   | 48.848   | 51.900   | 50.780   | 49.808   | 49.074   |
| Q1.000   | 60.918   | 63.616   | 60.459   | 64.783   | 63.172   | 61.782   | 60.744   |
| Q10.000  | 72.612   | 76.125   | 72.050   | 77.643   | 75.543   | 73.734   | 72.393   |

En este análisis debe tomarse un límite, el cual se considera que no es superado en los L años donde no existe información registrada. En primer lugar se adoptó  $x_h = 50.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Teniendo en cuenta que la serie sistemática disponible era de 86 años, y que los caudales históricos que superan el umbral son 3, entonces se dispone de 89 (N+ r) valores conocidos. Los años sin valores resultan en 89, y resolviendo las ecuaciones planteadas para los parámetros de la distribución:

$$\alpha = 5.431,5 \quad u = 2.6098,8$$

Los Q (T) estimados pueden observarse en la columna 2.

Repetiendo el procedimiento anterior, pero considerando un umbral  $x_h = 40.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , se obtienen los resultados que pueden observarse en la columna 3.

Considerando el umbral  $x_h = 60.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , en este caso  $r = 1$  y los valores conocidos  $N + r = 89$  (existen 2 valores conocidos menores a  $x_h$ ), los parámetros y los Q(T) estimados pueden observarse en la columna 4.

Si no se incorpora el valor de 1812 por considerarlo "inseguro", pero se considera que a partir de esa fecha no se superó el valor de  $60.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , entonces  $L = 90$  años,  $r = 0$ ,  $N+r = 88$ . Los parámetros y los Q (T) estimados pueden observarse en la columna 5.

Considerando únicamente el valor histórico de 1878 y que el valor del umbral de referencia que no fue superado en los años restantes es de 50.000 m<sup>3</sup>/s. Años sin información L = 25, r = 1, N+r = 87. Los parámetros y los Q (T) estimados pueden observarse en la columna 6.

Considerando únicamente el valor histórico de 1878 y que el valor del umbral de referencia que no fue superado en los años restantes es de 40.000 m<sup>3</sup>/s. Años sin información L = 25, r = 1, N+r = 87. Los parámetros y los Q (T) estimados pueden observarse en la columna 7.

Finalmente, respecto de la inclusión de valores históricos merecen destacarse las conclusiones obtenidas por diferentes autores ( Hosking, J. (1986), Jim, M. (1989)) a través de experimentos de simulación que indican que sólo es importante la inclusión de información histórica cuando ésta puede establecerse con cierta certeza, ya que de otra forma se estaría introduciendo mayor incertidumbre en el análisis.

Asimismo Cunnane, C. (1985) dice que "la inclusión de crecidas históricas de gran magnitud y la exclusión de las menores crecidas históricas no observadas puede introducir sesgo en la forma de la distribución obtenida".

También debe tenerse en cuenta que la forma de considerar los valores históricos dependerá de la información disponible en el sitio, y de la confiabilidad que merezcan los datos; de todas maneras un análisis de sensibilidad permitirá evaluar la influencia de la incorporación de dichos valores.

Ceirano, E. y otros (1985) en las conclusiones de su estudio sobre el río Paraná indican: *«Si bien la seguridad en la curva de descarga aumentó como consecuencia de las mediciones de la crecida de 1982/83 y su inclusión en los cálculos, factores como las variaciones en las secciones y las variaciones en la rugosidad del valle de inundación debido a la duración de la crecida crean incertidumbre en la generalización de la curva para el periodo de más de 80 años de registro»*. Para el presente análisis se consideró válida esta observación.

Los resultados encontrados en el caso tratado con la inclusión de valores históricos por método de momentos muestran aumentos de hasta 7.3 % para la distribución LPIII para T = 10.000 años y hasta 3,6 % para la EXP en la misma recurrencia. Las menores variaciones en los valores encontrados en la EXP pueden explicarse debido a la mayor robustez de la misma.

En el Cuadro 3.25. se han resumido los valores inferidos con la serie sistemática utilizada y los límites de los intervalos de confianza, comparándolos con diferentes hipótesis de introducción de valores históricos.

**Cuadro 3.25.** Comparación de estimaciones realizadas con la serie sistemática y con diferentes hipótesis de introducción de valores históricos

| T<br>(años) | Distr. | Ajuste Serie Sistemática |                |           | Incorporación Valores Históricos |         |          |          |
|-------------|--------|--------------------------|----------------|-----------|----------------------------------|---------|----------|----------|
|             |        | Valor<br>Central         | Int. Conf. 90% |           | 3 V. H.                          | 1 V. H. | e = -10% | e = +10% |
|             |        |                          | Lim. Sup.      | Lim. Inf. | 1 out.                           | 1 out.  |          |          |
| 100         | LP III | 52393                    | 58100          | 48588     | 54249                            | 52839   | 56194    | 52570    |
|             | EXP    | 54218                    | 61512          | 46923     | 55740                            | 54661   | 57112    | 54562    |
| 1000        | LP III | 69095                    | 80252          | 62727     | 72816                            | 69752   | 77635    | 68883    |
|             | EXP    | 70409                    | 81746          | 59072     | 72741                            | 71062   | 74930    | 70870    |
| 10000       | LP III | 89000                    | 108176         | 79278     | 95460                            | 89898   | 104904   | 88068    |
|             | EXP    | 86600                    | 101990         | 71211     | 89742                            | 87464   | 92748    | 87177    |

Se observa que las diferentes estimaciones realizadas se encuentran dentro de los respectivos intervalos de confianza.

Al incorporar errores positivos y negativos en la estimación de los valores históricos se observa que los valores inferidos para diversas recurrencias son mayores o iguales a los esperados a partir de la serie sistemática, lo que podría estar reflejando la advertencia formulada por Cunnane C. (1985).

Los resultados encontrados con la inclusión de valores históricos por método de máxima verosimilitud en la distribución GU indican que no existe diferencia significativa entre las alternativas planteadas. Si bien la incorporación de un umbral de referencia agrega un elemento más en el análisis, en este caso carece de relevancia sobre todo para las recurrencias menores a 1.000 años.

Para recurrencias del orden del tamaño de la muestra (T= 100 años) la incorporación de valores históricos, con los diferentes métodos, no modifica sensiblemente los resultados.

Por último, es fundamental tener en cuenta la exigencia del análisis probabilístico de extremos en lo que respecta al tratamiento de datos homogéneos, provenientes de series que puedan considerarse estacionarias. Sin esta consideración, los resultados que se obtengan perderán consistencia.

## Bibliografía

- Aisiks, E.** (1984). *La gran crecida del río Paraná de 1983*. TECHINT. Boletín Informativo Nro 232. Buenos Aires.
- Cacik, P. y C. Paoli** (1992). «*Información Histórica y outliers en Análisis de Frecuencia de Crecidas. Aplicación al Río Paraná*». Publicación FICH-UNL (I+D) Nro. 05/92. Santa Fe.
- Cacik, P.; C. Paoli y J. Bolzicco** (1993). «*Impacto de las últimas Crecidas del Río Paraná en la Determinación de Caudales de Diseño*». Anales del I Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. X Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos. Tomo III, pp. 371 - 380. Gramado. Brasil.
- (1997). «*Management of Paraná riverfloods under increasing uncertainty*». Preprints. 13th Conference on Hidrology and Seventh Conference on Climate Variations, Joint Sessions, pp. J66-69. 77th AMS Annual Meeting. Long Beach, California, USA. February, 2-7.
- (1998). «*Modelo AFM. Versión actualizada modelo AFMULTI bajo entorno windows*». Anales del XVII Congreso Nacional del Agua y II Simposio de Recursos Hídricos del Conosur. Santa Fe.
- Ceirano, E. y otros** (1985). *Evaluación de la crecida 1982-83 del río Paraná y su influencia sobre la estimación estadística de caudales máximos*. AyEE.
- CFI-CEPAL** (1965). *Los Recursos Hidráulicos de Argentina*. Santiago de Chile.
- CONCAP** (1970). *Modelo Matemático de la Cuenca del Plata - Informe Preliminar de la Fase 1 - Factibilidad Técnica de las Fases 2 y 3 - MOySR*.
- CONCAP** (1972). *Energía Hidroeléctrica en la Cuenca del Plata*. MOySR.
- Cunnane, C.** (1985). *Factors Affecting Choice of Distribution for Flood Series*. Journal Hydrological Sciences. Vol. 30,1 3/1985.
- (1989). *Statistical Distributions for Flood Frequency Analysis*. World Meteorological Organization. Operational Hydrology Report Nro 33.
- ELECTROBRAS** (1987). *Guia para cálculo de cheia de proyecto de vertedores*. Ministerio das Minas e Energia. Rio de Janeiro. Brasil.
- Greenwood J.; Landwehr J.; Matalas N.; Wallis J.** (1979). *Probability weighed moments: definition and relation to parameters of several distributions expressable in inverse form*. Water Resources Research. Vol. 15, Nro 5, pp. 1049 - 1054.
- HARZA y Asociados** (1973). *Estudio de Factibilidad Técnica, Económica y Financiera para el Desarrollo del Río Paraná en el área Yacuyretá-Apipé*.
- Hosking, J. y Wallis, J.** (1986). *The value of historical data in flood frequency analysis*. Water Resources Research. Vol. 22, Nro. 11, pp. 1606-1612.
- Hosking, J.** (1989). *The Theory of Probability Weighted Moments*. Research Report. IBM Research Division NY.
- INCYTH** (1975). *Cuenca Superior del Río Paraná - Estudio de la Crecida Máxima Probable*.
- Jin, M. y Stedinger, J.** (1989). *Flood frequency analysis with regional and historical information*. Water

- Resources Research. Vol. 25, Nro. 5, pp. 925 - 936.
- Kite, G.** (1995). *Frequency and risk analyses in hydrology*. Water Resources Publications. Colorado. U.S.A.
- Kuczera, G.** (1982). *Robust flood frequency models*. Water Resources Research. Vol. 18, Nro 2, pp. 315 - 324.
- Landwehr, J.; Matalas, N.; Wallis, J.** (1979). *Probability weighed moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel parameters and quantiles*. Water Resources Research Vol. 15, Nro 5, pp. 1055 - 1063.
- IECO/ELC** (1974). *Estudio del río Paraná, Proyecto Itaipú, Apéndice A: Hidrología y Meteorología*,
- LAHMEYER\_HARZA y Asociados** (1977). *Aprovechamiento del río Paraná en el Tramo Limítrofe comprendido entre la Desembocadura del río Iguazú y la Sección Encarnación-Posadas, con particular atención a la zona de Corpus*. Fase I. COMIP.
- Lettenmaier, D.; Wallis, J.; Wood, E.** (1987). *Effect of regional heterogeneity on flood frequency estimations*. Water Resources Research. Vol. 23, Nro 2, pp. 313 - 323.
- Motor Columbus y Asociados** (1979). *Estudios de crecidas ríos Paraná y Paraguay*. Entidad Binacional Yaciretá (Argentina-Paraguay).
- Natural Environment Research Council (NERC)** (1975). *Flood Studies Report. Hydrological studies*. Vol. I. Reino Unido.
- OEA** (1969). *Cuenca del Plata. Estudio para su Planificación y Desarrollo*.
- Paoli, C.** (1987). *Control y protección de crecidas - análisis probabilístico y perfiles de niveles máximos*. INCYTH. MOSP.
- Paoli, C.; J. Bolzicco y P. Caclik** (1991). «Análisis de Frecuencia de Crecidas del Río Paraná». Convenio Agua y Energía Eléctrica - Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (PNUD - ARG 85/003). Publicación FICH - UNL (serie SAT 02/91). Santa Fe.
- (1995a). «Aplicación de Métodos Robustos para la determinación de máximas crecidas del Río Paraná» *Revista Internacional Información Tecnológica*. ISSN 0716-8756 Vol. 6-Nro. 6 - pp. 169 -178. Chile,
- (1995b). «La incertidumbre en el Análisis de Frecuencia de Picos de Crecidas» *En Recursos Hídricos*, pp. 29-40. Centro de Publicaciones UNL. Santa Fe, Argentina.
- (1997). «Incertidumbre en el análisis de extremos de grandes ríos, caso del Río Paraná, Argentina». III Congreso Internacional sobre Ingeniería Hidráulica, Holguín, Cuba, 20 al 24 de abril de 1997.
- (1998). «Análisis de Riesgo Conjunto en la determinación de crecidas de proyecto de Regímenes Complejos». *Revista Ingeniería del Agua*. Vol. 5 No 2 junio 1998, pp. 13-22. ISSN 1134-2196.
- Salas, J.** (1989). *Estudio del sistema Paraná Medio en situaciones extremas*. Primer informe. Colorado

State University. Fort Collins, Colorado. U.S.A.

**Sir W. HALCROW and Partners** (1994). *Estudio de Regulación del Valle Aluvial de los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay para el Control de las Inundaciones*. Anexo B: Hidrología - Convenio S.W.Halcrow - FICH (UNL), para la Subunidad Central de Coordinación para la Emergencia (SUCCE).

**U.S.GEOLOGICAL SURVEY** (1982). *Guidelines for determining flood flow frequency*. Bulletin 17B of the Hydrology Subcommittee. U.S.A.

**Vogel, R.; Wilson, I.** (1996). *Probability Distribution of Annual Maximum, Mean and Minimum Streamflows in the United States*. Journal of Hydrologic Engineering. Vol 1. Nro2, pp. 69-76.

**Wallis, J.R.** (1985). *Relative Accuracy of the Log Pearson III*. Procedures. Journal of Hydraulic Engineering. Vol.III, Nro 7, pp. 1043.

**Walquist, O.** (1906). *La Gran Creciente de 1905 del río Paraná y sus afluentes*. Oficina Meteorológica Argentina. Buenos Aires.

**Yevjevich, V.** (1973). *Analysis of risks and uncertainties in flood content in Floods and Droughts*. Water Resources Publications. Fort Collins. Colorado. USA.

— (1984). *Estimation of Skewness of Hydrological variables*. Water Resources Research. Vol. 20, Nro 7, pp. 935.



# 3.

## **RÉGIMEN DE CRECIDAS Y ANÁLISIS DE CAUDALES MÁXIMOS** **Actualización**

Carlos PAOLI, Rosana HÄMMERLY  
y Pablo CACIK

# 3.

## **Introducción**

### **Características de los picos e hidrogramas de crecidas del río Paraná en Corrientes**

Estacionalidad de los picos

Características comparativas de los hidrogramas de las principales crecidas

### **Análisis de homogeneidad y estadísticos muestrales de las series de caudales máximos**

Serie de caudales máximos del río Paraná

Aplicación de test de homogeneidad

Análisis de propiedades estadísticas

### **Aplicación y cálculo de distribuciones seleccionadas al río Paraná**

## **Bibliografía**

## Introducción

La presente actualización del capítulo se basa en la extensión del análisis del régimen de crecidas y de picos máximos anuales de caudales en la estación Corrientes del río Paraná en su tramo medio, al periodo 1998/1999–2019/2020. Toda la fundamentación teórica y metodológica expresada en el capítulo original se mantiene y por ello no se repite.

Con posterioridad a una de las últimas crecidas extraordinarias, la de 1998, se realizaron diversos estudios en los que se actualizó el análisis de frecuencia de los caudales máximos anuales en la estación Corrientes. Entre los estudios realizados se puede mencionar:

- Estudios de prefactibilidad y anteproyecto definitivo de la interconexión vial entre las provincias de Corrientes y Santa Fe, realizado por Huerta&Asociados en el año 2002 para el Consejo Federal de Inversiones (CFI).

- Estudio integral del río Paraná en su tramo medio y su influencia en el área de la ciudad de Santa Fe, realizado por el consorcio de las empresas Halcrow, EVARSA e INCOCIV en los años 2006–2007 para la Dirección Provincial de Vialidad.

- Estudio de delimitación de áreas de riesgo hídrico en Santa Fe, realizado por el Centro Regional Litoral del Instituto Nacional del Agua en 2007 para el CFI.

Asimismo, otros análisis de frecuencia de crecidas del río Paraná para distintas series fueron realizados en el marco del proyecto CAI+D de la FICH–UNL «Identificación de cambios en los regímenes hidrológicos y su influencia en parámetros de diseño, entre los años 2010 y 2015».

## Características de los picos e hidrogramas de crecidas del río Paraná en Corrientes

### Estacionalidad de los picos

Para determinar si la estacionalidad ha sufrido modificaciones en el período 1998/99–2019/20, se contabiliza la frecuencia absoluta y relativa de aparición de picos de cada mes para la estación Corrientes.

Dadas las conocidas características del régimen hidrológico del río Paraná, en que podrían presentarse en el año más de una onda de crecidas relativamente independientes, se toma en cuenta—además del pico anual— los máximos que cumplen con esta condición.

Se establece para ello que el caudal diario entre pico y pico debe descender por debajo de 18000 m<sup>3</sup>/s (valor similar al módulo estimado). No se consideran asimismo los segundos máximos que fueran inferiores a los 20000 m<sup>3</sup>/s.

Para tener en cuenta la aparición de crecidas importantes, se computan separadamente aquellas cuyos picos superaron los 30000 m<sup>3</sup>/s.

Se presentan el período 1998/99–2019/20 y el período completo actualizado 1904/05–2019/20.

Los resultados obtenidos se muestran en el cuadro 3.26, en el cual se observa que en el período total 1904/05–2019/20, el 40% de los picos se ha presentado en los meses de febrero y marzo, porcentaje que alcanza al 44% si se consideran los primeros máximos como máximos anuales. Muy similar es también el porcentaje de crecidas que superan los 30000 m<sup>3</sup>/s para este bimestre. Si agregamos el mes de enero, el porcentaje ronda el 50%.

En el trimestre mayo–junio–julio se presenta entre un 25 y 31% de los picos, la mitad de ellos específicamente en junio.

Estos resultados confirman lo conocido acerca del régimen hidrológico del río Paraná con dos períodos de crecidas, uno correspondiente a aportes del Alto Paraná (febrero y marzo) y otro debido tanto a crecidas del río Paraguay, desfasadas por el efecto de El Pantanal («repunte del pejerrey»), como a crecidas violentas y cortas del río Iguazú.

En el período 1998/99–2019/20 no se presentaron crecidas iguales o mayores a 40000 m<sup>3</sup>/s, ya que presenta muchas ondas de crecidas, pero no muy importantes.

Las mayores a 30000 m<sup>3</sup>/s ocurren en igual porcentaje de 43% en enero, que en junio y julio.

En este período moderno (1998/99–2019/20) se registra una disminución en la magnitud y frecuencia de crecidas mayores a 30000 m<sup>3</sup>/s, mientras que para picos menores la distribución en el año ocurre bastante uniformemente desde octubre a agosto.

**Cuadro 3.26.** Distribución de los picos de crecidas a lo largo del año. Río Paraná en Corrientes.

Serie 1998/99 - 2019/20

|             |          | SET | OCT  | NOV  | DIC | ENE  | FEB | MAR  | ABR | MAY | JUN  | JUL  | AGO | TOTAL |
|-------------|----------|-----|------|------|-----|------|-----|------|-----|-----|------|------|-----|-------|
| Totales     | cantidad | 0   | 3    | 4    | 3   | 4    | 3   | 5    | 1   | 2   | 6    | 3    | 2   | 36    |
|             | %        | 0   | 8,3  | 11,1 | 8,3 | 11,1 | 8,3 | 13,9 | 2,8 | 5,6 | 16,7 | 8,3  | 5,6 |       |
| 1os Máximos | cantidad | 0   | 1    | 3    | 1   | 3    | 2   | 4    | 1   | 1   | 2    | 4    | 0   | 22    |
|             | %        | 0   | 4,5  | 13,6 | 4,5 | 13,6 | 9,1 | 18,2 | 4,5 | 4,5 | 9,1  | 18,2 | 0   |       |
| Q>30000     | cantidad | 0   | 1    | 0    | 0   | 3    | 0   | 0    | 0   | 0   | 1    | 2    | 0   | 7     |
|             | %        | 0   | 14,3 | 0    | 0   | 42,9 | 0   | 0    | 0   | 0   | 14,3 | 28,6 | 0   |       |

Serie 1904/05 - 2019/20

|             |          | SET | OCT | NOV | DIC | ENE  | FEB  | MAR  | ABR | MAY | JUN  | JUL  | AGO | TOTAL |
|-------------|----------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|------|------|-----|-------|
| Totales     | cantidad | 3   | 13  | 10  | 8   | 12   | 29   | 33   | 8   | 9   | 21   | 8    | 3   | 157   |
|             | %        | 1,9 | 8,3 | 6,4 | 5,1 | 7,6  | 18,5 | 21   | 5,1 | 5,7 | 13,4 | 5,1  | 1,9 |       |
| 1os Máximos | cantidad | 1   | 7   | 6   | 5   | 10   | 23   | 28   | 7   | 7   | 13   | 9    | 0   | 116   |
|             | %        | 0,9 | 6   | 5,2 | 4,3 | 8,6  | 19,8 | 24,1 | 6   | 6   | 11,2 | 7,8  | 0   |       |
| Q>30000     | cantidad | 2   | 4   | 0   | 2   | 5    | 9    | 8    | 1   | 2   | 7    | 5    | 0   | 45    |
|             | %        | 4,4 | 8,9 | 0   | 4,4 | 11,1 | 20   | 17,8 | 2,2 | 4,4 | 15,6 | 11,1 | 0   |       |

### Características comparativas de los hidrogramas de las principales crecidas

A partir del análisis del punto anterior se tomaron inicialmente todas las crecidas independientes, cuyos picos superaban los 30000 m<sup>3</sup>/s, y de cada una de ellas se determinó:

- Fecha y caudal de inicio de la crecida.
- Fecha y caudal del fin de la crecida.
- Fechas en que el caudal supera los 20000 m<sup>3</sup>/s.

A partir de estas determinaciones se calcularon para cada crecida:

- Tiempo total con Q > 20000 m<sup>3</sup>/s.
- Duración entre inicio y fin de la crecida.

Los valores encontrados se muestran en el cuadro 3.27.

**Cuadro 3.27.** Características de las crecidas mayores a 30000 m<sup>3</sup>/s en el río Paraná en Corrientes. Período 1998/99–2019/20.

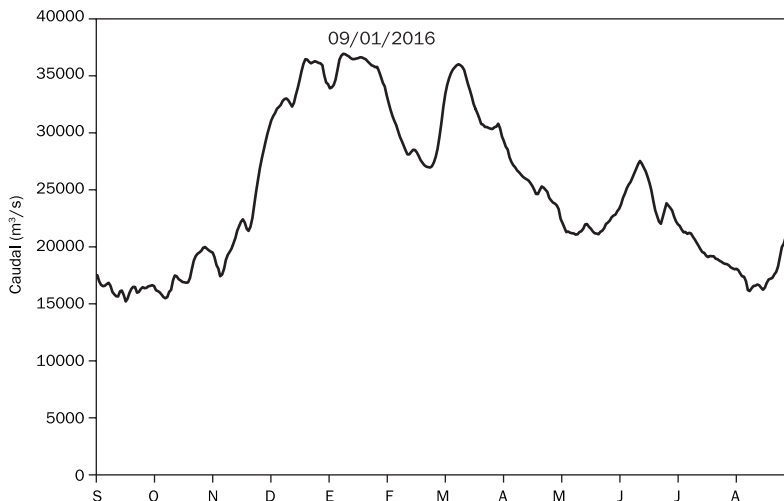
| Año  | 1er Máximo |       | Q > 20000 m <sup>3</sup> /s |            |      | Inicio Crecida |       | Final Crecida |       | Durac. |
|------|------------|-------|-----------------------------|------------|------|----------------|-------|---------------|-------|--------|
|      | Fecha      | Qmax  | Inicio                      | Fin        | Días | Fecha          | Q ini | Fecha         | Q fin | Días   |
| 1998 | 18/10/1998 | 38149 | 18/8/1998                   | 13/11/1998 | 85   | 10/9/1998      | 24070 | 17/11/1998    | 17017 | 67     |
| 2010 | 25/1/2010  | 31167 | 16/10/2009                  | 5/6/2010   | 229  | 8/10/2009      | 19844 | 18/7/2010     | 15896 | 280    |
| 2013 | 3/7/2013   | 33624 | 25/6/2013                   | 7/8/2013   | 42   | 24/6/2013      | 19910 | 29/8/2013     | 15022 | 65     |
| 2014 | 18/6/2014  | 33219 | 24/5/2014                   | 20/8/2014  | 86   | 9/6/2014       | 21473 | 19/7/2014     | 23564 | 40     |
| 2015 | 22/7/2015  | 30139 | 3/7/2015                    | 22/8/2015  | 49   | 1/7/2015       | 19724 | 26/8/2015     | 18419 | 55     |
| 2016 | 9/1/2016   | 36927 | 12/11/2015                  | 15/7/2016  | 243  | 6/11/2015      | 17565 | 11/5/2016     | 21067 | 185    |
| 2018 | 26/1/2018  | 31909 | 4/1/2018                    | 20/4/2018  | 106  | 31/12/2017     | 18709 | 20/2/2018     | 21565 | 50     |

Entre las crecidas más importantes, que superaban los 35000 m<sup>3</sup>/s, se encuentran la de octubre de 1998 y la de julio de 2015, que se muestran en las figuras 3.33 y 3.34, respectivamente.

**Figura 3.33.**  
Hidrograma de la crecida del año 1998/99 en el río Paraná en Corrientes.



**Figura 3.34.**  
Hidrograma de la crecida del año 2015/16 en el río Paraná en Corrientes.



Con el fin de caracterizar las formas de los hidrogramas de crecidas, se tomaron los mayores entre los que superaban los 30000 m<sup>3</sup>/s.

Anteriormente se han caracterizado dos tipos de crecidas:

**A:** aquellas de subida relativamente rápida, empuntadas, generalmente con un pico importante y de corta duración, aun cuando se hayan presentado picos precedentes.

**B:** aquellas de mayor volumen y duración, con subidas más lentas, con uno omás picos importantes que se presentan sucesivamente.

Además, de acuerdo a lo analizado en el punto anterior, puede tratarse de crecidas con el pico máximo en febrero–marzo (1) o en el trimestre mayo–junio–julio (2).

Así, para el periodo de análisis extendido 1998/99–2019/20, se presentan:

**Tipo A.1** = 1998/99; 2017/18

**Tipo A.2** = 2012/13; 2013/14; 2014/15

**Tipo B.1** = 2009/10; 2015/16

**Tipo B.2** = no se presenta ninguna de este tipo.

Asimismo se observa que en los últimos 22 años se presentan años como 1999/00, 2007/08, 2008/09 y 2019/20, donde los caudales oscilan sin tener una crecida importante. Esto indicaría que, además del déficit del régimen de lluvias de dichos años, estarían incidiendo efectos de regulación por operación de embalses.

### **Análisis de homogeneidad y estadísticos muestrales de las series de caudales máximos**

#### **Serie de caudales máximos del río Paraná**

Los análisis se efectúan sobre caudales diarios máximos anuales de la estación Corrientes del río Paraná, con la nueva serie corta de 1998/99 a 2019/20, que se indican en el cuadro 3.28 y con la serie completa extendida desde 1904/05a 2019/20.

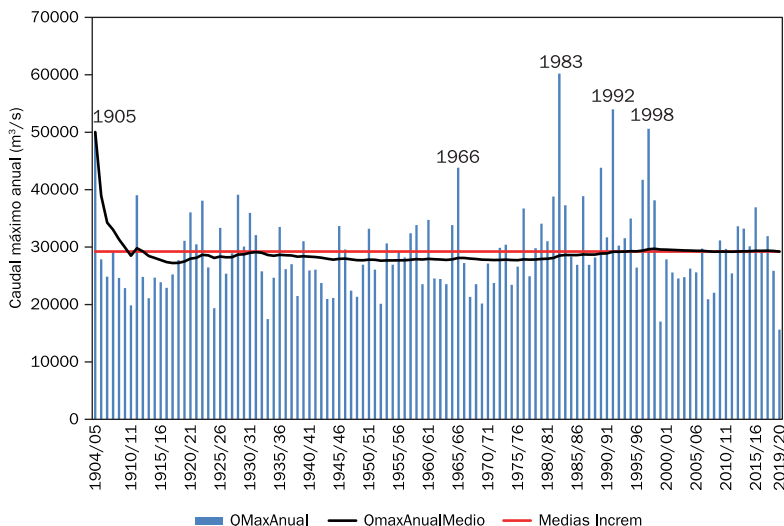
| Año     | Q máximo (m3/s) | Año     | Q máximo (m3/s) | Año     | Q máximo (m3/s) |
|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|
| 1998/99 | 38149           | 2006/07 | 29728           | 2013/14 | 33219           |
| 1999/00 | 17018           | 2007/08 | 20912           | 2014/15 | 30139           |
| 2000/01 | 27854           | 2008/09 | 22038           | 2015/16 | 36927           |
| 2001/02 | 25571           | 2009/10 | 31167           | 2016/17 | 29392           |
| 2002/03 | 24532           | 2010/11 | 29688           | 2017/18 | 31909           |
| 2003/04 | 24769           | 2011/12 | 25421           | 2018/19 | 25869           |
| 2004/05 | 26253           | 2012/13 | 33624           | 2019/20 | 15624           |
| 2005/06 | 25601           |         |                 |         |                 |

**Cuadro 3.28.**  
Caudales máximos anuales (m<sup>3</sup>/s). Año hidrológico septiembre–agosto. Serie 1998/99–2019/20.

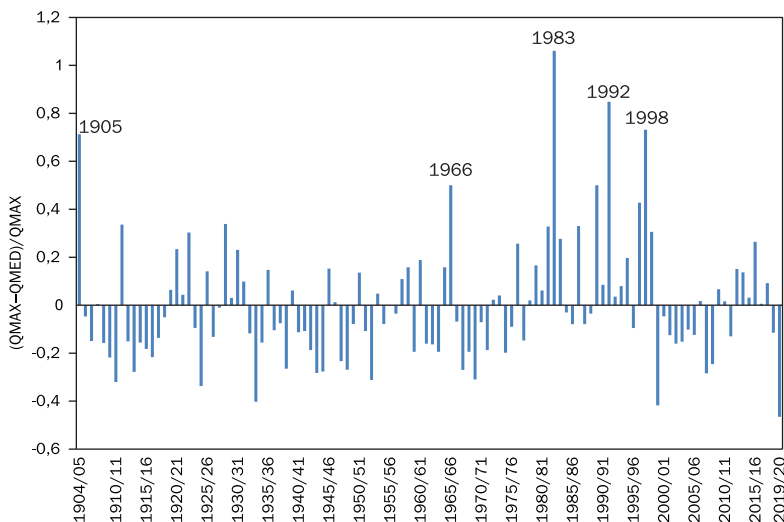
En la figura 3.35.a se observa una marcada disminución de los caudales máximos anuales en los últimos años, resultando para el período 1998/99–2019/20 el mayor de 38149 m<sup>3</sup>/s y el menor de 15624 m<sup>3</sup>/s, con un valor promedio de 27518 m<sup>3</sup>/s.

Es posible que además de tratarse de un período con lluvias menores a los períodos anteriores, se esté manifestando el efecto regulador de los embalses que tiene incidencia sobre las crecidas y bajantes ordinarias, bajando los picos y subiendo los mínimos.

**Figura 3.35a.**  
Río Paraná en Corrientes.  
Caudales máximos anuales. Serie 1904/05–2019/20.



**Figura 3.35b.**  
Río Paraná en Corrientes.  
Desvío de los caudales máximos anuales respecto del caudal máximo promedio. Serie 1904/05–2019/20.





La media deslizando cronológica de la figura 3.35a muestra las tendencias de la misma, donde se aprecia un aumento inicial hasta los años 30; luego una disminución hasta mediados de los 50, en que se estabiliza hasta los 70, a partir de los cuales comienza un marcado incremento hasta fin del siglo XX y se manifiesta, en lo que va del siglo XXI, una tendencia descendente. Esto se observa también en los desvíos de la crecida máxima de cada año con respecto al promedio de todas las crecidas anuales del período de 116 años de registros, que se muestran en la figura 3.35b.

### Aplicación de test de homogeneidad

a. Test de Mann–Kendall

b. Los valores de  $V_{\text{crítico}}$  (obtenidos de una distribución normal) son:

|                  |      |      |      |
|------------------|------|------|------|
| $\alpha$         | 0.01 | 0.05 | 0.1  |
| $V_{\text{cri}}$ | 2.33 | 1.64 | 1.28 |

| V calculado     | Corrientes |
|-----------------|------------|
| 1904/05–2019/20 | 1.673      |
| 1970/71–2019/20 | 0.887      |
| 1997/98–2019/20 | 1.015      |

Para la serie 1904/05–2019/20, la hipótesis de homogeneidad de la muestra es rechazada con un nivel de significancia del 5% en Corrientes.

b. Test de Smirnov

Es de interés cuando se sospecha a priori a partir de qué año se presentan interferencias. Los valores de  $Z$  crítico son:

|                  |       |       |       |
|------------------|-------|-------|-------|
| $\alpha$         | 0.01  | 0.05  | 0.1   |
| $Z_{\text{cri}}$ | 1.628 | 1.358 | 1.224 |

|                    | Serie 1904/05 – 2019/20 |
|--------------------|-------------------------|
| <b>Z calculado</b> | <b>Corrientes</b>       |
| Año sep.= 1948     | 0.699                   |
| Año sep.= 1971     | 0.972                   |
| Año sep.= 1999     | 2.877                   |

Los resultados muestran que considerando el año 1948 o 1971 de separación de muestras, el test no rechaza la hipótesis de homogeneidad de dichas muestras para ningún nivel de confianza, mientras que si se considera el año 1999 de separación de muestras, el test es rechazado para los tres niveles de confianza considerados.

## Análisis de propiedades estadísticas

Otra forma de estudiar la homogeneidad de las muestras es a través de la variación de sus propiedades estadísticas calculadas sobre diferentes períodos. Por ello se han utilizado diversos análisis seriales:

Análisis de series móviles de 50 años se obtienen todas las submuestras posibles (cronológicas) de tamaño de 50 años del período 1904/05–2019/20, sobre las que se calculan los estadísticos correspondientes. En el capítulo original se presentan los valores de las submuestras hasta la de 1948/49–1997/98, por lo que al incorporar los 22 años de datos desde 1998/99 a 2019/20, se presentan las medias móviles de 50 años desde 1949/50–1998/99 en adelante, según se muestra en el cuadro 3.29.

**Cuadro 3.29.**

Medias móviles de 50 años de caudales máximos anuales (serie 1949/50–2019/20). Río Paraná en Corrientes (caudales en m<sup>3</sup>/s).

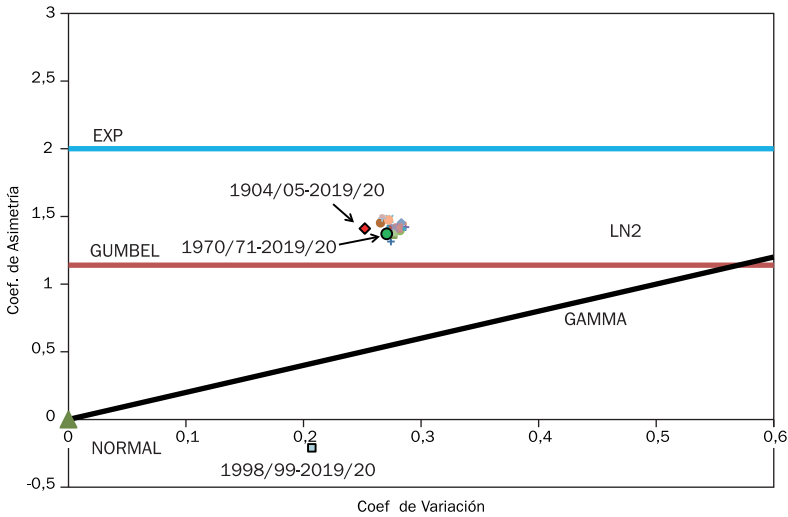
| Serie             | Media | Desvío | Coef. Asimetría | Coef. Variación | Coef. As/C.Varia | Coef. Kurtosis |
|-------------------|-------|--------|-----------------|-----------------|------------------|----------------|
| 1949/50 - 1998/99 | 31492 | 8360,7 | 1,452           | 0,265           | 5,471            | 5,534          |
| 1950/51 - 1999/00 | 31294 | 8585,5 | 1,315           | 0,274           | 4,792            | 5,27           |
| 1951/52 - 2000/01 | 31187 | 8594,6 | 1,348           | 0,276           | 4,891            | 5,319          |
| 1952/53 - 2001/02 | 31177 | 8601   | 1,347           | 0,276           | 4,883            | 5,311          |
| 1953/54 - 2002/03 | 31266 | 8507,3 | 1,396           | 0,272           | 5,131            | 5,436          |
| 1954/55 - 2003/04 | 31148 | 8556,5 | 1,406           | 0,275           | 5,117            | 5,398          |
| 1955/56 - 2004/05 | 31135 | 8563,8 | 1,406           | 0,275           | 5,11             | 5,389          |
| 1956/57 - 2005/06 | 31064 | 8595,2 | 1,411           | 0,277           | 5,098            | 5,362          |
| 1957/58 - 2006/07 | 31095 | 8587,5 | 1,404           | 0,276           | 5,084            | 5,36           |
| 1958/59 - 2007/08 | 30865 | 8704,7 | 1,396           | 0,282           | 4,951            | 5,265          |
| 1959/60 - 2008/09 | 30629 | 8782,1 | 1,421           | 0,287           | 4,957            | 5,26           |
| 1960/61 - 2009/10 | 30782 | 8722,5 | 1,407           | 0,283           | 4,967            | 5,291          |
| 1961/62 - 2010/11 | 30681 | 8705,1 | 1,45            | 0,284           | 5,111            | 5,406          |
| 1962/63 - 2011/12 | 30698 | 8693,4 | 1,452           | 0,283           | 5,129            | 5,421          |
| 1963/64 - 2012/13 | 30882 | 8655,3 | 1,414           | 0,28            | 5,046            | 5,381          |
| 1964/65 - 2013/14 | 31076 | 8595,8 | 1,387           | 0,277           | 5,015            | 5,386          |
| 1965/66 - 2014/15 | 31002 | 8587,5 | 1,417           | 0,277           | 5,116            | 5,46           |
| 1966/67 - 2015/16 | 30864 | 8431,1 | 1,481           | 0,273           | 5,422            | 5,876          |
| 1967/68 - 2016/17 | 30907 | 8417,7 | 1,474           | 0,272           | 5,412            | 5,881          |
| 1968/69 - 2017/18 | 31119 | 8304   | 1,488           | 0,267           | 5,577            | 6,011          |
| 1969/70 - 2018/19 | 31165 | 8267,1 | 1,502           | 0,265           | 5,661            | 6,073          |
| 1970/71 - 2019/20 | 31074 | 8414,4 | 1,371           | 0,271           | 5,064            | 5,91           |

Análisis de series modernas: dadas las evidencias de que en los últimos 25 o 35 años se están produciendo importantes cambios físicos en el sistema natural, como son las numerosas presas de embalses, la deforestación y la puesta en cultura de nuevas tierras, el drenaje de áreas pantanosas y otras intervenciones humanas, se comparan también las propiedades estadísticas de las series con inicio en 1970/71 y 1998/99, como se observa en el cuadro 3.30.

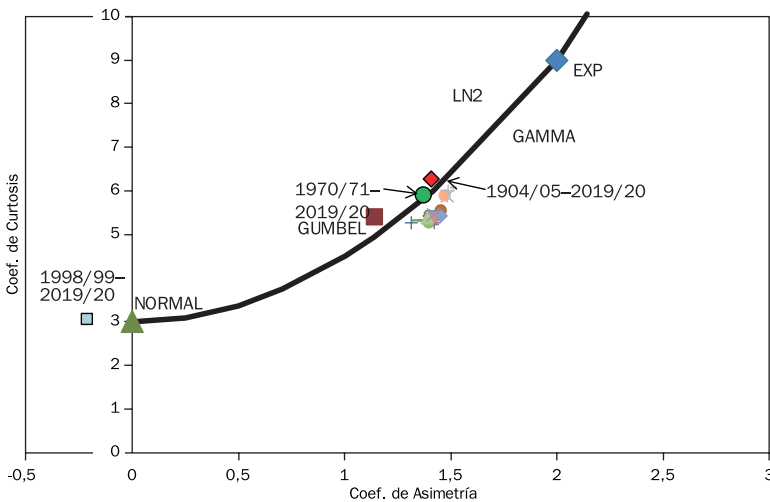
| Periodo           | Media | Desvío | Coef. Asimetría | Coef. Variación | Coef. As/C.Varia | Coef. Kurtosis |
|-------------------|-------|--------|-----------------|-----------------|------------------|----------------|
| 1904/05 - 2019/20 | 29217 | 7366,3 | 1,41            | 0,252           | 5,58             | 6,27           |
| 1970/71 - 2019/20 | 31074 | 8414,4 | 1,37            | 0,271           | 5,06             | 5,91           |
| 1998/99 - 2019/20 | 27518 | 5699   | -0,21           | 0,207           | -1,02            | 3,06           |

**Cuadro 3.30.** Parámetros estadísticos de caudales máximos anuales. Series modernas (caudales en m<sup>3</sup>/s).

Las submuestras de 50 años se han volcado a los diagramas de momentos que se observan en las figuras 3.36 y 3.37, en comparación con la serie completa 1904/05–2019/20 y la serie corta de los últimos 22 años 1998/99–2019/20.



**Figura 3.36.** Diagrama de momentos, coeficientes de asimetría vs. coeficientes de variación de diferentes series de caudales máximos del río Paraná en Corrientes.



**Figura 3.37.** Diagrama de momentos, coeficientes de asimetría vs. coeficientes de kurtosis de diferentes series de caudales máximos del río Paraná en Corrientes.

En ambos diagramas se aprecia que todas las submuestras de 50 años se encuentran cercanas, no presentando dispersiones, lo que indicaría la pertenencia a una misma familia de distribución estadística.

Los coeficientes de asimetrías varían entre 1,31 y 1,50, los de variación entre 25 y 28,7%, y los de kurtosis entre 4,56 y 5,97, resultado las submuestras de 50 años cercanas a las familias de distribuciones Gamma y Gumbel. También la serie completa de 116 años presenta estadísticos muestrales muy cercanos a las series de 50 años.

La serie corta 1998/99–2019/20 presenta características estadísticas completamente diferentes, con asimetría cercana a cero y kurtosis menor de tres, poco representativa de los fenómenos extremos.

Esto se debe a una marcada disminución de la crecida media en este período de 22 años, en el cual se registran las dos crecidas más bajas de los 116 años de registro.

### Aplicación y cálculo de distribuciones seleccionadas al río Paraná

La aplicación y el ajuste se lleva cabo con el modelo de análisis de frecuencia  $W_xAFM_{Multi}$  (Cacik et ál., 2019), una actualización del reconocido AFMULTI, desarrollado en la FICH–UNL (Paoli et ál., 1991) (Cacik et ál., 1998).

Después de 1998 no se presentó ninguna crecida que superase los 40000 m<sup>3</sup>/s. Se procedió a actualizar el estudio de análisis de frecuencia y los valores obtenidos sucesivamente son los indicados en el cuadro 3.31.

**Cuadro 3.31.**  
Caudales (m<sup>3</sup>/s) inferidos según serie considerada.

| Serie             | T= 1000 años |       |       |       | T= 500 años |       |       |       |
|-------------------|--------------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|
|                   | EXP          | LPIII | GEV   | GU    | EXP         | LPIII | GEV   | GU    |
| 1904/05 – 2019/20 | 72735        | 69902 | 70219 | 64657 | 67629       | 62848 | 65049 | 60773 |
| 1970/71 – 2019/20 | 80785        | 77800 | 82586 | 71205 | 74952       | 69660 | 75495 | 66808 |
| 1998/99 – 2019/20 | 61187        | 45408 | 44471 | 57279 | 57237       | 43904 | 43745 | 54018 |
| Serie             | T= 100 años  |       |       |       | T= 50 años  |       |       |       |
|                   | EXP          | LPIII | GEV   | GU    | EXP         | LPIII | GEV   | GU    |
| 1904/05 – 2019/20 | 55774        | 53397 | 53686 | 51740 | 50668       | 48836 | 49041 | 47831 |
| 1970/71 – 2019/20 | 61410        | 58757 | 60477 | 56579 | 55577       | 53512 | 54568 | 52152 |
| 1998/99 – 2019/20 | 48064        | 41146 | 41425 | 46432 | 44114       | 39566 | 40064 | 43149 |
| Serie             | T= 20 años   |       |       |       | T= 10 años  |       |       |       |
|                   | EXP          | LPIII | GEV   | GU    | EXP         | LPIII | GEV   | GU    |
| 1904/05 – 2019/20 | 43918        | 42996 | 43086 | 42614 | 38812       | 38647 | 38669 | 38584 |
| 1970/71 – 2019/20 | 47867        | 46810 | 47191 | 46245 | 42035       | 41829 | 41865 | 41682 |
| 1998/99 – 2019/20 | 38892        | 37157 | 37800 | 38769 | 34942       | 34990 | 35619 | 35385 |
| Serie             | T= 5 años    |       |       |       | T= 2 años   |       |       |       |
|                   | EXP          | LPIII | GEV   | GU    | EXP         | LPIII | GEV   | GU    |
| 1904/05 – 2019/20 | 33706        | 34240 | 34227 | 34383 | 26956       | 27814 | 27822 | 28037 |
| 1970/71 – 2019/20 | 36202        | 36792 | 36637 | 36924 | 28492       | 29465 | 29325 | 29739 |
| 1998/99 – 2019/20 | 30992        | 32356 | 32846 | 31857 | 25770       | 27371 | 27441 | 26528 |

Los valores indicados muestran que la dispersión es muy grande, aun cuando las distribuciones se calculen con los métodos de estimación de parámetros más eficientes, debido a la incertidumbre de los estadísticos muestrales, que son fuertemente influenciados por el período de registros que se utilice. Estas diferencias se incrementan notablemente cuando se pretende hacer estimaciones para altas recurrencias.

La otra advertencia importante es que ante la evidencia de la incidencia que tienen los cambios globales en la hidrología de la cuenca y particularmente en los extremos, los análisis estadísticos deben tomarse con sumo cuidado y deberían hacerse sobre períodos de al menos 50 años.

El desafío para hacer inferencias sobre la probabilidad y recurrencia esperada de las crecidas es interpretar cuál es el escenario futuro en términos de clima y modificaciones de la cuenca.

## **Bibliografía**

**Cacik, P., Paoli, C., Hämmerly, R. y Novara, P (2019).** *Manual de usuario del programa wxAF-Multi.* FICH-UNL.

# 4.

## **GEOMORFOLOGÍA DEL CAUCE PRINCIPAL**

Carlos G. RAMONELL, Mario L. AMSLER  
y Horacio TONIOLO

# <<

# 4.

## **Introducción**

### **Fuentes de información básica sobre el cauce principal**

Registros previos al siglo XX

La diversificación cartográfica del siglo XX

Aforos líquidos y muestreo de los sedimentos del lecho

Datos del subálveo

### **Características geomorfológicas elementales del cauce principal**

Propiedades morfométricas y morfológicas

El cauce principal en el contexto del valle aluvial

### **Variables de control morfológico del cauce**

Material del lecho. Propiedades del sedimento aluvial en el entorno del cauce

El caudal dominante (o formativo del cauce) en el río Paraná

Áreas con controles geomorfológicos singulares

### **Dinámica geomorfológica histórica del río Paraná**

La jerarquía del thalweg en la conformación y cambios morfológicos del cauce

Otros cambios morfológicos progresivos vinculados con las variaciones del caudal dominante

Cambios morfológicos temporarios asociados al paso de crecientes

## **Conclusiones**

Agradecimientos

Reconocimiento

## **Bibliografía**



## Introducción

La geomorfología del río Paraná de que se trata en este Capítulo está referida a las características morfológicas y dinámicas del cauce principal, analizadas a través de su evolución histórica durante los últimos cien años, en el tramo de unos 370 km de longitud que se presenta en la Figura 4.1.

Las restricciones geográficas y temporales indicadas, siguieron el propósito de minimizar los espacios ocupados por interpretaciones o hipótesis de trabajo poco exploradas, reemplazándolos por aquellos en los que las evidencias y datos mejor conocidos son, a la vez, más enriquecedores y menos discutibles. Esa selección espacio-temporal permitió, además, un tratamiento sistemático/cuantitativo de los parámetros evaluados, que parece quedar a tono, simultáneamente, con el espíritu propio de la Parte Segunda del texto.

Algunos de los aspectos que se desarrollan en las páginas siguientes son novedosos en lo que hace al conocimiento temático de este gran río aluvial. Ellos fueron abordados en los últimos tres años, en el marco de proyectos de investigación auspiciados por la Universidad Nacional del Litoral y la Secretaría de Estado de Ciencia y Técnica, y durante la ejecución de servicios de transferencia a terceros llevados a cabo en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, entre los que se destacan aquellos de FICH (1997a y 1998). En este contexto, las observaciones y descripciones previas de Repossini (1912), Cabral (1973), Parody y Estruco (1975), Drago (1977) y FICH (1989) significaron, en conjunto, un valioso punto de partida estimulando hacia los hallazgos más recientes.

De todos modos, cabe la aclaración de que los resultados de cualquier investigación acerca de la evolución histórica del Paraná se hubieran visto marcadamente disminuidos, si no se contara con la diversidad y continuidad en el tiempo de registros elementales del río, tales como batimetrías de detalle, aforos líquidos, muestreos sedimentológicos, etc. Es así que esta contribución se inicia con un ítem dedicado a la cita general de estos datos fundamentales, que servirá, a la vez, para mostrar el origen y la naturaleza de la información evaluada en este capítulo.

**Figuras 4.1. a-d**  
 Mosaico satelital del tramo analizado, entre los kilómetros 853 y 480 de la ruta de navegación. Las líneas de trazos rojos señalan las posiciones extremas alcanzadas por el cauce principal entre 1901 y 1994, a la derecha e izquierda de su traza actual. El estado hidrométrico del río en la figura es de aguas medias-altas (cauce lleno, en el tramo entre los km 640 - 594; desborde, en el resto del sistema).



**Figura 4.1. a**

**Fuentes de información básica sobre el cauce principal**

Las figuras incluidas a continuación fueron seleccionadas para ejemplificar sobre las propiedades de los datos usados, y sus lecturas cuidadosas, junto con



Figura 4.1. b

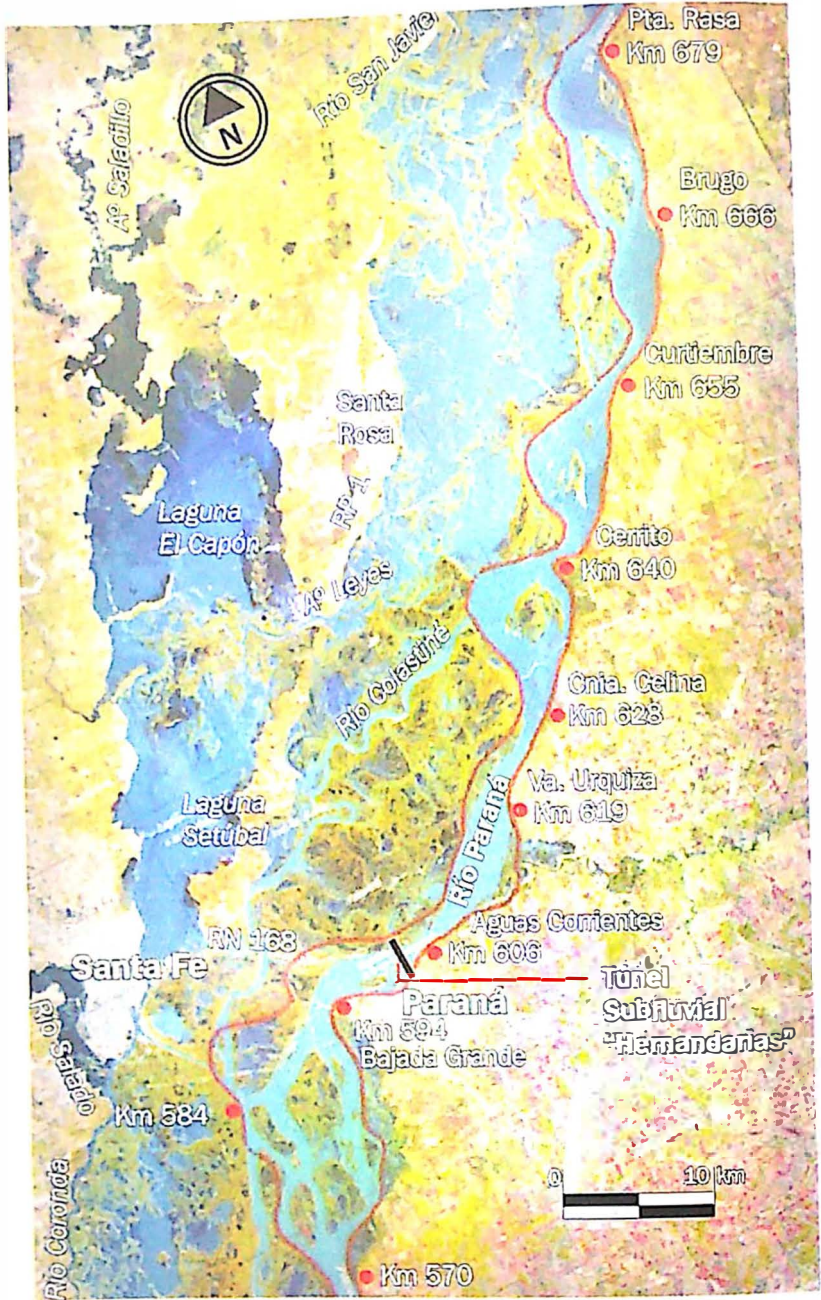
los elementos conocidos de los capítulos previos, permitirán al lector ir construyendo el “escenario” geomorfológico general del río, que se completará luego en “Características geomorfológicas elementales del cauce principal”.

### Registros previos al siglo XX

Las referencias más antiguas sobre algunos rasgos morfológicos del Paraná datan de la travesía fluvial de conquista iniciada desde la recién fundada Buenos Aires, que alcanzó la confluencia del río Paraguay en el año 1539. La crónica de este viaje, escrita en 1554 por el soldado de fortuna Ulrico Schmidl y “ratificada” en 1612 por Ruy Díaz de Guzmán, permite reconstruir una derrota fluvial de unos 1.600 km hasta esa confluencia, diferente en un 30 % de los 1.240 km que separan tal sitio del Puerto de Buenos



Figura 4.1. c



Aires, según el kilometraje de la ruta de navegación establecido a principios del siglo XX (Figura 4.1). Al mismo tiempo, es notoria la precisión con que Schmidl ubica a la actual ciudad de Rosario (km 420) a “84 leguas” de Buenos Aires siguiendo el curso del río, o a la laguna Setúbal, a “34 leguas” aguas arriba.

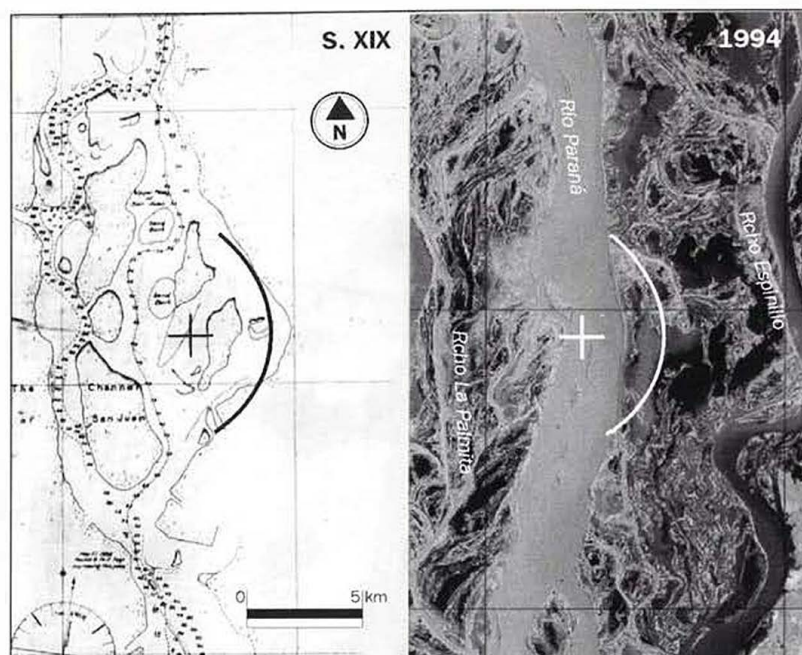


Figura 4.1. d

En ese sentido, los variados documentos históricos producidos en las treinta y cinco décadas anteriores al siglo XX coinciden en mostrar que algunas características generales del río, tales como el patrón morfológico de islas y bancos de cauce, o, más importante aún, sus ubicaciones extremas en el contexto del valle aluvial como se ilustraron en la Figura 4.1, no difirieron en mucho de las que se sucedieron en los últimos cien años.

Entre los diversos mapas realizados en esa “primera época” se destaca, sin dudas, el que contiene los dos primeros relevamientos batimétricos parciales del cauce principal, realizados en 1847 y 1881 desde los buques ingleses “Philomel” y “Dwarf”, respectivamente, y en el que se registraron las profundidades y ubicaciones del thalweg del río entre Corrientes (km 1.208) y la desembocadura del brazo deltaico Paraná Guazú en el Río de la Plata. Precisamente, la Figura 4.2. a-b reproduce dos fragmentos selectos de tal mapa, acompañados de registros cartográficos posteriores de cada área, presentados a la misma escala.



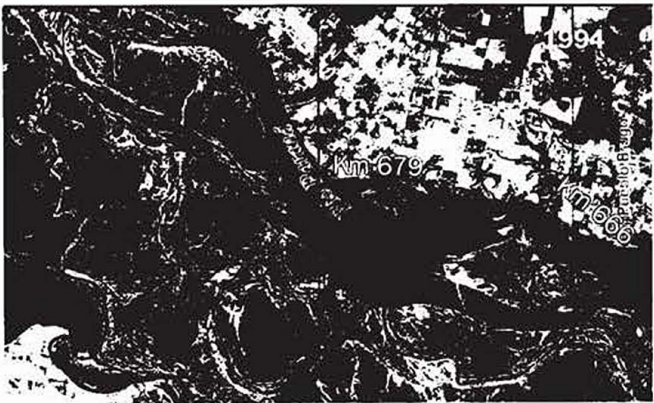
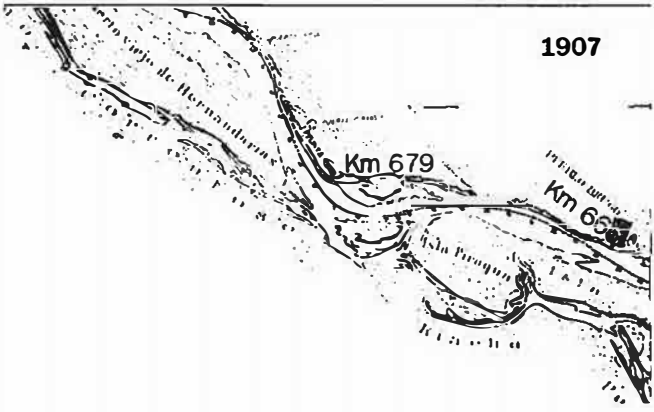
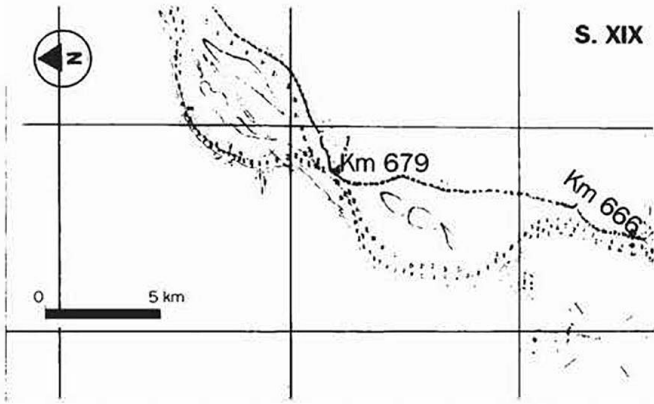


**Figura 4.2. a**  
 Fragmento del mapa que contiene los dos primeros relevamientos batimétricos del cauce principal (años 1847 y 1881), acompañado de una imagen aérea reciente de la zona. La posición de los márgenes en el siglo XIX corresponde al levantamiento de 1847, dirigido por el Cap. Sullivan desde el H.M.S. "Philomel". Las ubicaciones del thalweg en los años referidos corresponden a las series continuas de profundidades graficadas en el cauce. La cruz y el semicírculo sobrepuestos identifican los mismos sitios del río en 1847 y 1994 (aprox. km 785).

## La diversificación cartográfica del siglo XX

El perfeccionamiento y desarrollo de nuevas tecnologías de levantamiento topo-cartográfico iniciados con el siglo acompañaron la evolución natural del río, con sucesivos registros obtenidos desde las tres perspectivas, o bases, posibles: desde el agua, con los relevamientos de la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables (DNCPyVN); desde tierra, mediante los acotamientos del Instituto Geográfico Militar (IGM) en el ámbito isleño; y desde el aire, con medio siglo de sensoramiento remoto del cauce y áreas aledañas afectadas por sus desbordes, documentados tanto en fotografías aéreas convencionales como en imágenes satelitales de diversas características.

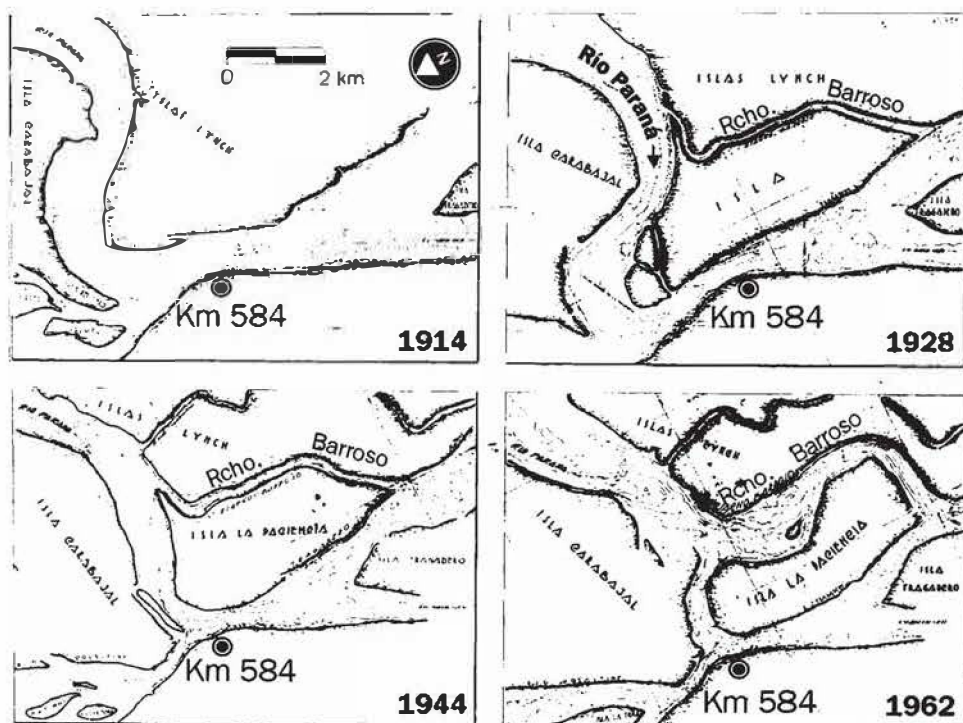
Así, entre los años 1900 y 1994 el Dpto. Paraná Medio de la DNCPyVN produjo cerca de dos mil planos con batimetrías del río entre sus km 850 y 480, la mayor parte de los cuales fue elaborada a escala 1:5.000 a partir de perfiles de profundidad espaciados entre 100 y 200 m en el cauce, lo



**Figura 4.2. b**  
Arriba: parte del mapa con los relevamientos del cauce del siglo XIX (años 1847 y 1881). Centro y abajo: la misma zona, según una carta de navegación de 1907 y una imagen aérea de 1994.

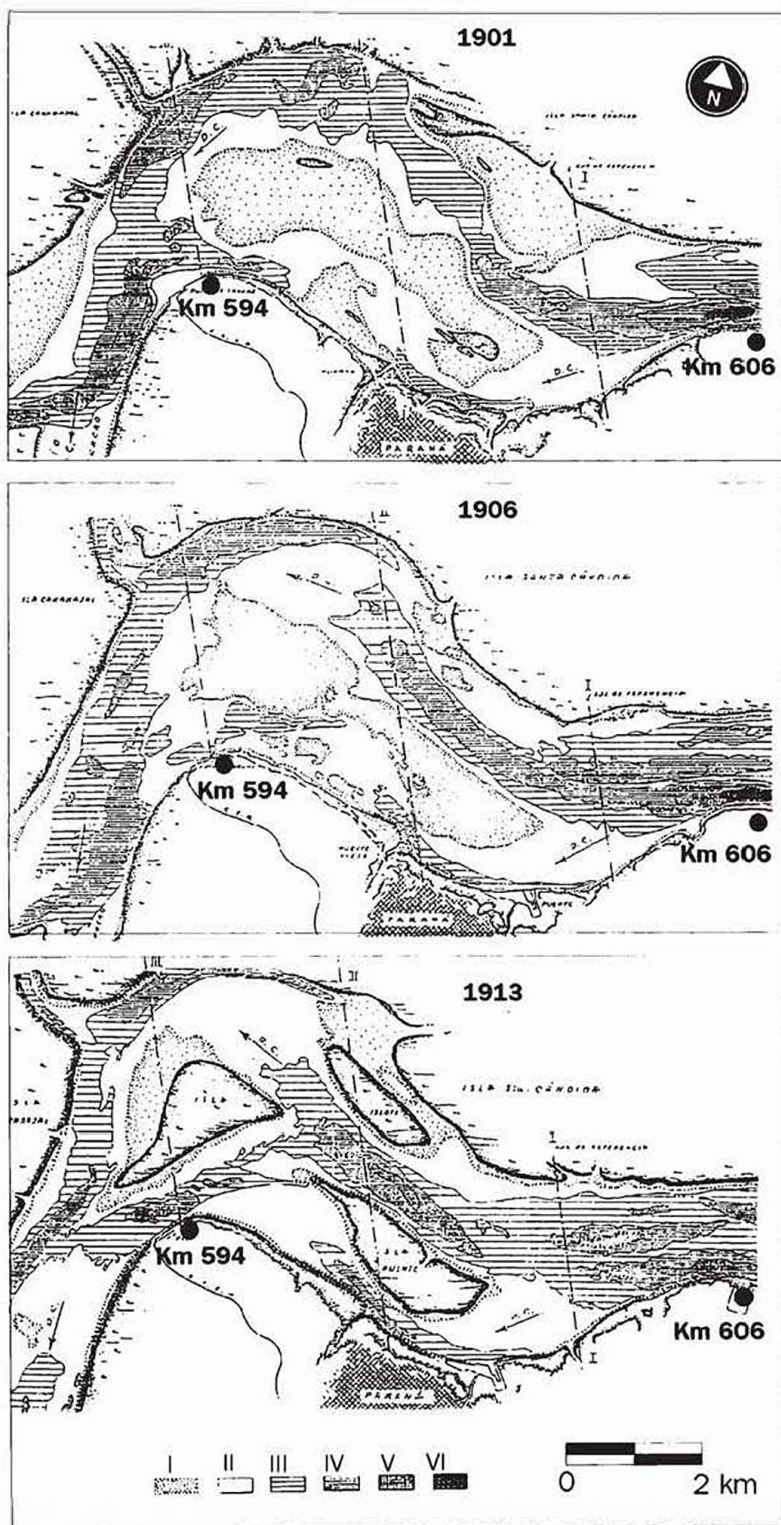
que permitió, a la vez, reproducir y/o delinear en ellos las magnitudes de profundidades puntuales, y de isobatas con una equidistancia de 1 m.

Si bien la frecuencia temporal de esos registros no fue homogénea en el tramo, la misma repartición se encargó de hacer “mapas comparativos” donde los relevamientos fueron más sistemáticos, del tipo de los presentados en las Figuras 4.3. y 4.4. a-b, por ejemplo. Justamente, las “posiciones extremas” del Paraná en la Figura 4.1. fueron obtenidas desde la cartografía fluvial producida por la DNCPyVN hasta 1995, año a partir del cual se interrumpe, lamentablemente, la toma de datos oficiales sobre la distribución de profundidades del cauce en el tramo.



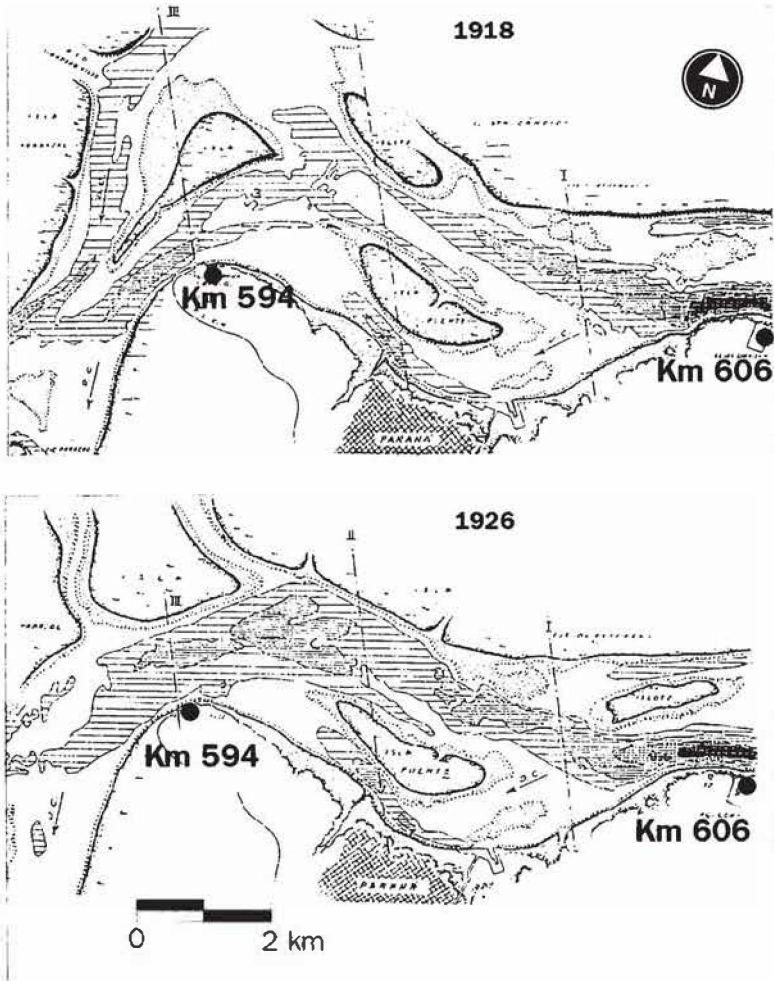
**Figura 4.3.** Reproducción del plano N° 12.431 del Dpto. Paraná Medio de la DNCPyVN, con registros batimétricos del cauce principal en los años 1914, 1928, 1944 y 1962 (equidistancia de isobatas: ca. 5 m). El km 584 permite ubicar la zona en el contexto de la Figura 4.1.



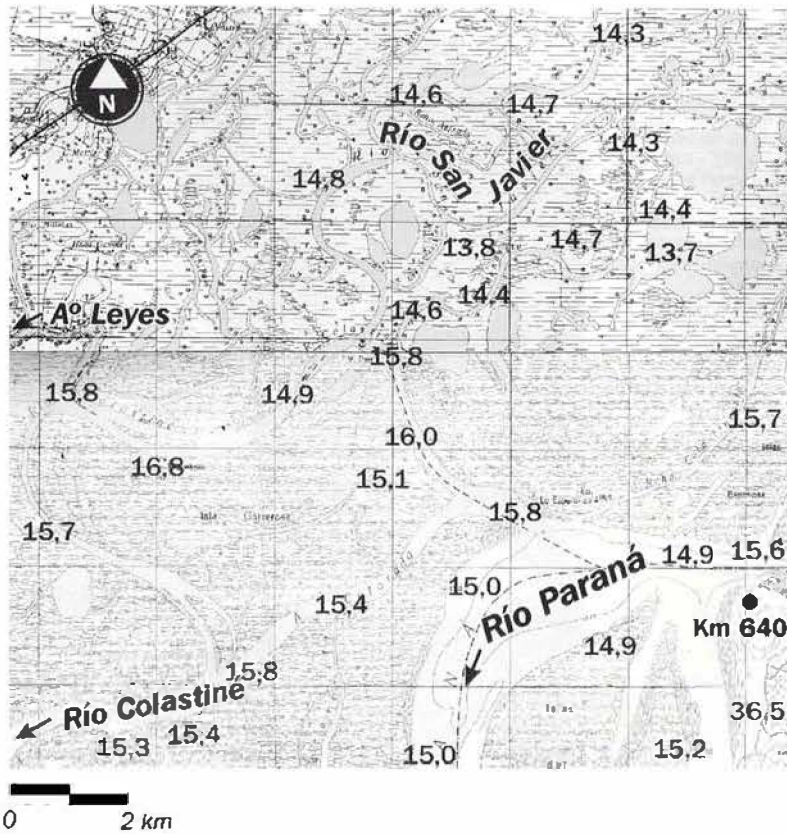


**Figura 4.4. a**  
 Reproducción parcial del plano N° 10.820 de la DNCPyVN, según la reedición hecha por Prestien (1971). Las áreas de puntos (I) corresponden a zonas del lecho del río ubicadas por encima del 0 m de la escala hidrométrica local (en este caso, del hidrómetro de Pto. Paraná,  $H_{pp}$ ), mientras que las identificadas con las tramas II a VI tienen profundidades crecientes desde ese nivel, cada 5 m (VI: profundidades mayores a 20 m bajo el 0 m de  $H_{pp}$ ).

**Figura 4.4. b**  
El río Paraná en  
la zona mostrada  
por la Figura  
4.4.a, en los  
años 1918 y  
1926



Por su parte, el IGM realizó, en la primera mitad de la década del '60, el acotamiento expeditivo de las islas del cauce y del valle de inundación fluvial, definiendo una malla normalmente compuesta por 1 a 5 puntos acotados cada 16 km<sup>2</sup> de superficie en el terreno, como se muestra en la Figura 4.5. La red de cotas obtenida es, en cierto sentido, única, puesto que una tarea semejante cubriendo la región entera no ha vuelto a ser repetida.



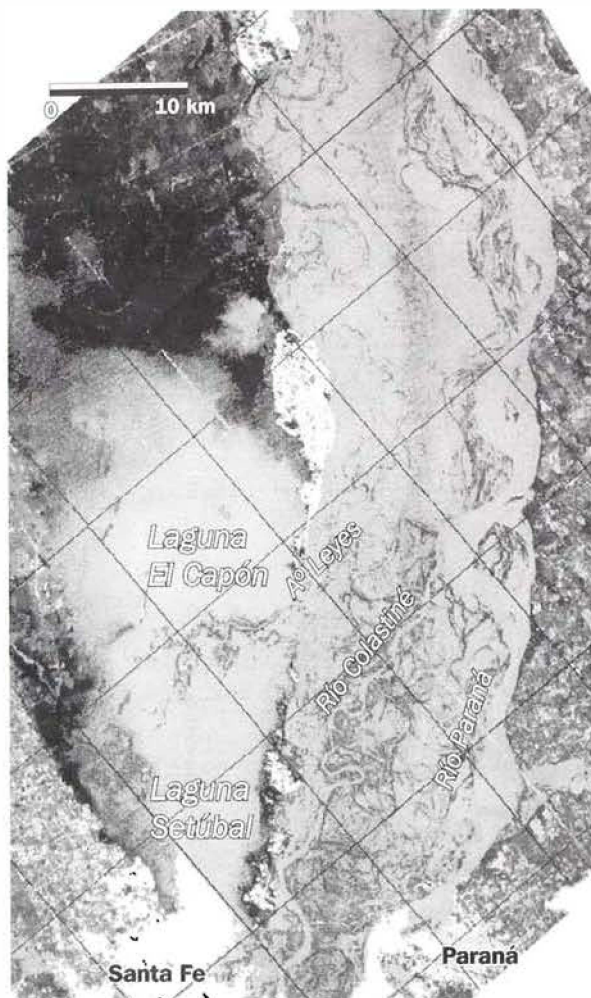
**Figura 4.5.** Mosaico topográfico de la planicie aluvial del río Paraná en la zona de Cerrito (km 640) – A° Leyes, realizado con las cartas 3160-27-1 y 3160-27-2 del IGM. Los valores de los puntos acotados en la década del '60 se han exagerado en la figura, manteniendo su ubicación geográfica.

Finalmente, los registros aéreos iniciados en los años '50 por el IGM, y ejecutados, luego, por diversos organismos públicos y privados cada vez con más frecuencia hasta la actualidad, podrían equipararse con la información secuencial obtenida por la DNCPyVN, haciendo la salvedad que ellos no permiten conocer más que la planta del cauce, o de su entorno, en un momento dado. Con todo, la Figura 4.6. (a-c) contiene unos pocos ejemplos donde se destaca el valioso rol de este tipo de datos.



**Figura 4.6.a**

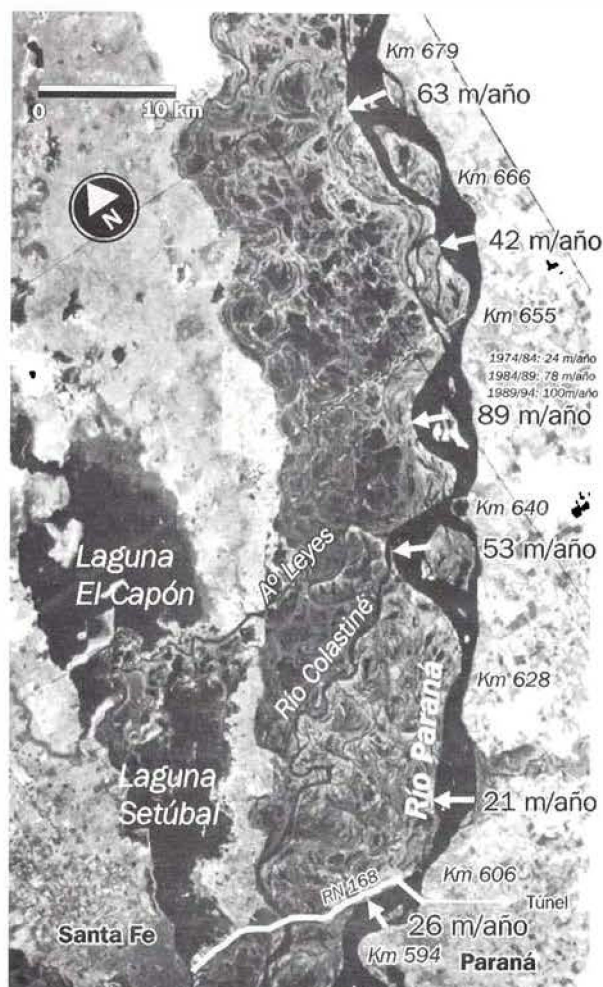
Imagen Landsat del río Paraná entre los km 679 y 594, mostrando las áreas cubiertas por la inundación fluvial en julio de 1983 ( $H_p$ : 6,83 m).



De lo mostrado, surge con claridad que la complementación de las fuentes cartográficas citadas es el modo más adecuado de llevar adelante estudios morfológicos con cierto grado de profundidad y detalle, por lo que no puede dejar de mencionarse el seguro perjuicio que ocasionará, a futuro, la interrupción de los relevamientos batimétricos sistemáticos del cauce principal, sobre todo cuando se considera la creciente presión antrópica a la que se ha estado sometiendo al río en los últimos años.

#### **Aforos líquidos y muestreo de los sedimentos del lecho**

El plano N° 917 del Dpto. Paraná Medio de la DNCI y VN, contiene el detalle de uno de los primeros aforos del Paraná en el tramo de estudio, realizado en el sector de Aguas Corrientes - Bajada Grande (km 606 - 594; Figura 4.4.a) en



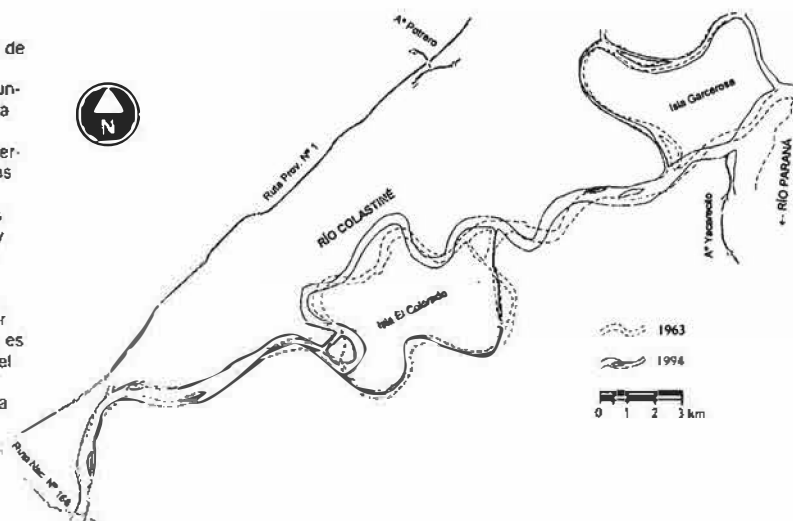
**Figura 4.6.b**

La zona de la Figura 4.6.a en aguas medias-bajas de agosto de 1984 ( $H_{pp}$ : 2,84 m); los sitios señalados por las flechas identifican los lugares con mayor tasa de corrimiento promedio de margen entre los años 1984 y 1994 (valores a la derecha de las flechas; abajo del km 655 se indican los desplazamientos para distintos períodos, a partir de 1974); todas las cifras fueron obtenidas desde imágenes aéreas.

setiembre de 1906. Hasta la década del '70 inclusive, este tipo de mediciones fue llevado a cabo exclusivamente por aquella repartición, que produjo un centenar de planos con tal información, más una cantidad semejante conteniendo trayectorias de flotadores arrojados en diversos sectores del río.

Desde fines de los '70 en adelante, aquellas tareas fueron "continuadas" por la Gerencia Proyecto Paraná Medio (GPPM) de la ex Empresa Agua y Energía Eléctrica S.E., primero, y la empresa Evaluación de Recursos S.A. (EVARSA), después, con algunos pocos registros obtenidos por la FICH y el Centro Regional Litoral del Instituto Nacional del Agua y el Ambiente (CRL-INA, ex CRL-INCYTH). Sin lugar a dudas, la información colectada por la GPPM mejoró la calidad de la existente por entonces, aunque razones de índole estratégica vinculadas al inconcluso Proyecto Presa del Paraná Medio obstaculizaron su difusión pública.

**Figura 4.6.c**  
 Posiciones sucesivas de la planta del río Colastiné (brazo secundario del Paraná cuya ubicación se da en Figura 4.6.b, de acuerdo a imágenes aéreas de los años 1963 y 1994; como en otros cauces secundarios y riachos alimentados desde el cauce principal, la información suministrada por ese tipo de registros es la única disponible (el del Colastiné es un caso "excluyente", ya que posee un solo levantamiento batimétrico de detalle, de 1971-73).



Con relación a los sedimentos del lecho del cauce principal, existen varias caracterizaciones a partir de cientos de muestras colectadas desde fines de los '50 hasta el presente en numerosos lugares entre los km 850 y 480, y aun fuera de éstos, tales como las de LH (1974), Bertoldi de Pomar (1984), HYTSA (1987), FICH (1993, 1997a,b), Passeggi (1996), y Drago y Amsler (1998). Precisamente, los Cuadros 4.1. y 4.2., y la Figura 4.7., presentan varias de las particularidades del material del lecho en el sistema fluvial, sin dar mayores explicaciones sobre fechas, sitios u otros datos vinculados con los muestreos: la excepcional homogeneidad granulométrica y mineralógica de las arenas del Paraná, tal como se desprende del análisis de las citas bibliográficas previas, permite obviar esos detalles, por lo común muy importantes en el resto de las corrientes fluviales argentinas (Ramonell y Montagnini, 1999).

**Cuadro 4.1.**  
 Características granulométricas del material del lecho en el thalweg del río Paraná (Drago y Amsler, 1998).

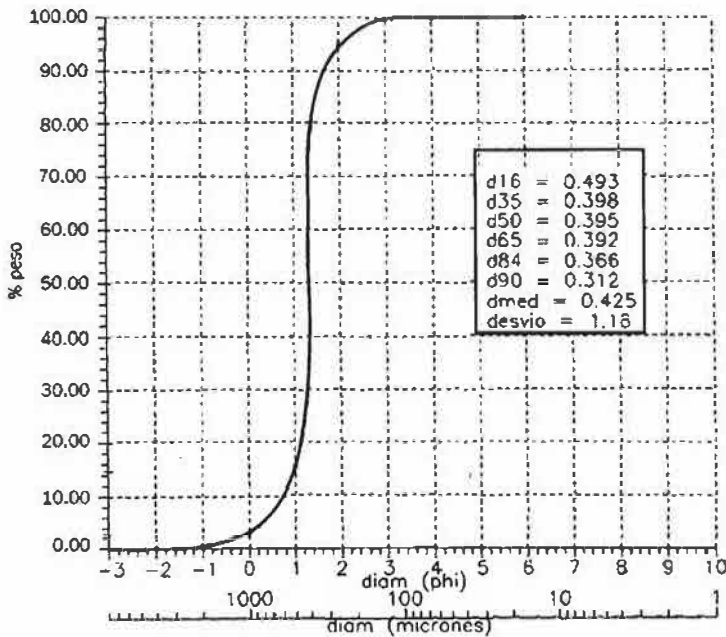
| Km   | d <sub>g</sub><br>(mm) | Selección | % de arena |       |      |          | I x 10 <sup>-5</sup> |
|------|------------------------|-----------|------------|-------|------|----------|----------------------|
|      |                        |           | muy gruesa | media | finá | muy fina |                      |
| 1008 | 0,363                  | 1,51      | 14         | 69    | 13   | 0,5      | 5,83                 |
| 867  | 0,316                  | 1,27      | 10         | 82    | 6,2  | 0,2      |                      |
| 745  | 0,371                  | 1,99      | 22         | 49    | 22   | 2,2      | 4,17                 |
| 680  | 0,260                  | 1,21      | 1,4        | 77    | 20   | 0,2      |                      |
| 605  | 0,316                  | 1,29      | 6,8        | 63    | 28   | 0,5      | 4,39                 |
| 531  | 0,278                  | 1,23      | 2,5        | 75    | 22   | 0,4      | 3,00                 |
| 498  | 0,281                  | 1,22      | 0,1        | 74    | 26   | 0,1      |                      |
| 429  | 0,291                  | 1,28      | 3,1        | 63    | 33   | 0,4      |                      |

d<sub>g</sub>: diámetro medio del sedimento del lecho.

I : pendiente longitudinal promedio de la superficie del agua en el cauce.

**Cuadro 4.2.** Descripción sedimentológica de clases granulométricas principales en muestras del material del lecho del sistema fluvial del Paraná (Ramonelli y Montagnini, 1999).

| Procedencia            | Río Paraguay  |               | Río Paraná Superior |               | Río Paraná Medio |               | RP en el delta |
|------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------|------------------|---------------|----------------|
|                        | Arena media   | Arena fina    | Arena media         | Arena gruesa  | Arena media      | Arena gruesa  |                |
| Clase granulométrica   | Arena media   | Arena fina    | Arena media         | Arena gruesa  | Arena media      | Arena gruesa  | Arena fina     |
| % de la clase          | 45,1          | 35,4          | 72,3                | 19,1          | 73,3             | 15,7          | 80,3           |
| Especie mineral        | Cuarzo        | Cuarzo        | Cuarzo              | Cuarzo        | Cuarzo           | Cuarzo        | Cuarzo         |
| % del mineral          | 92            | 95            | 90                  | 93            | 97               | 95            | 94,3           |
| Esfericidad / Redondez | 0,9 / 0,7-0,9 | 0,9 / 0,7-0,9 | 0,9-0,7 / 0,9-0,7   | 0,9 / 0,7-0,9 | 0,9 / 0,7-0,5    | 0,9 / 0,7-0,9 | 0,9 / 0,7      |



**Figura 4.7.** Curva de distribución granulométrica del material del lecho del río Paraná en la sección del Túnel Subfluvial Hemandarias (km 603). La forma de la curva se mantiene casi sin variaciones desde aguas arriba de Confluencia (km 1240) hasta el delta.

### Datos del subálveo

Este es el tópicos que posee las mayores lagunas de conocimiento a la escala del tramo entero, ya que los datos de sondeos y perforaciones en el subsuelo del cauce o su entorno han formado parte de la información reservada de la GPPM, y de otros organismos, tanto privados como oficiales. Con todo, los autores han podido analizar, en el marco de estudios

a terceros realizados por la FICH, las descripciones de geotecnia de unos cien pozos someros (hasta unos 30 m bajo el nivel del terreno) distribuidos geográficamente entre los ejes A° Leyes – km 640, y Coronda – km 560 (Figuras 4.1.c-d). En este contexto, la Figura 4.8. reproduce, con algunas modificaciones formales, uno de los pocos perfiles litológicos del subálveo publicados en el siglo.

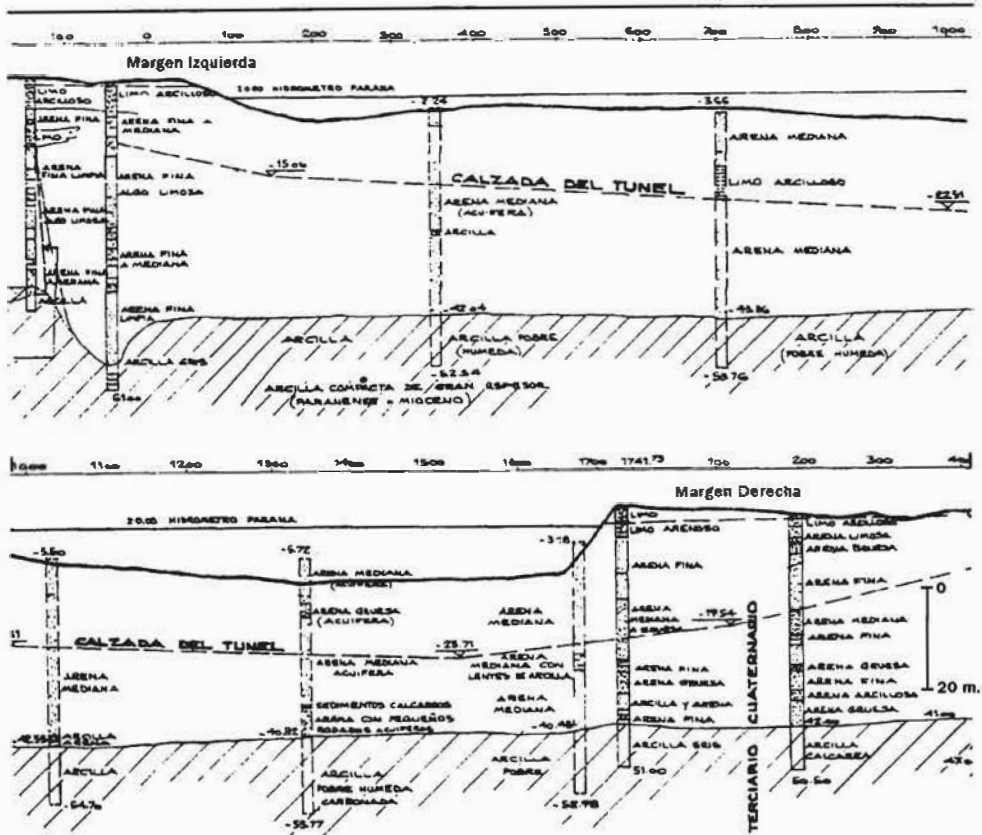


Figura 4.8. Características litológicas básicas y espesores de las unidades sedimentarias del subálveo en la zona del Túnel Subfluvial "Hernandarias". Los sedimentos depositados por el río Paraná se reconocen hasta los 40 m de profundidad, debajo del 0 m de la escala del puerto homónimo, (Gentili y Arce, 1969).

### Características geomorfológicas elementales del cauce principal

Las ilustraciones presentadas hasta aquí han ido anticipando, sucesivamente, varios de los rasgos geomorfológicos sobresalientes del sistema, que terminarán de precisarse a continuación.



## Propiedades morfométricas y morfológicas

Como se aprecia con claridad en la Figura 4.1. (o en la Figura 4.6.b, por caso), la planta del río Paraná puede describirse como una sucesión de tramos ensanchados separados por otros más estrechos y cortos que, además, son más profundos. Entre los km 850 y 480 existen 49 de estos tipos de tramo, en los que los anchos efectivos medios del cauce (i.e., sin considerar los anchos ocupados por islas),  $B$ , son de 2.150 m y 1.000 m, con desviaciones estándar,  $\sigma$ , de 840 m y 290 m, respectivamente. Las longitudes promedio,  $L$ , y profundidades típicas,  $h$ , en los ensanchamientos de la misma zona son de 11.040 m ( $\sigma = 4.930$  m) y 5 a 8 m, mientras que esos parámetros evaluados en los estrechamientos dan cifras de 1.840 m ( $\sigma = 1.440$  m) y más que 12 m. Los valores mencionados resultaron de evaluar 343 secciones en el tramo entero (74 de ellas correspondieron a estrechamientos), y son representativos del cauce en los años '90 para situaciones de aguas medias, ya que otros registros en el siglo proporcionan magnitudes distintas (p.e., las de 1913 versus 1926 en la Figura 4.4.).

Las diferencias en las dimensiones (en planta y la vertical) de los ensanchamientos y estrechamientos, parecen estar reflejadas en la pendiente longitudinal promedio de la superficie del agua,  $I$ , que, de acuerdo a mediciones realizadas por LH (1974) en el tramo Va. Urquiza (km 619) – Pto. Paraná (km 601), sería más pequeña en los estrechamientos, aunque del orden del cm/km, o  $10^{-5}$ , que mantiene el río desde la confluencia del Paraguay hasta el delta (Drago y Amsler, 1998).

Los elementos geomorfológicos característicos de los sectores anchos son las islas y los bancos de arena, estos últimos libres de vegetación y, en su gran mayoría, sumergidos para los niveles de aguas medias en el tramo. Debido a esta característica, la dificultad de reconocer y delimitar arealmente los bancos hacia las zonas profundas del río ha sido salvada, en la práctica habitual, definiendo sus bases desde las isobatas del 0 m de los hidrómetros locales (superficies punteadas de la Figura 4.4.). Sin embargo, la comodidad cartográfica de este criterio no refleja en absoluto la continuidad morfológica de los taludes de los bancos por debajo del 0 m, que, a su vez, es un indicio de la continuidad en los procesos hidráulico-sedimentológicos que los modelan. En tal sentido, los autores han observado, en batimetrías secuenciales de detalle, que la sedimentación de las arenas transportadas en contacto permanente o esporádico con el lecho (carga de fondo y fracción gruesa en suspensión, respectivamente, del Capítulo 5) asociada al desarrollo de bancos, permite mantener taludes de  $1^\circ$  o menos, mientras que los bordes más inclinados (de  $5^\circ$ , por lo común, y hasta  $15^\circ$ ) son manifestaciones frecuentes de la erosión en el perímetro de esos taludes. Evaluaciones de este tipo han sido desarrolladas en FICH (1997a), las que permitieron no

sólo identificar "bancos embrionarios" bien definidos desde la isobata de -5 m (y sin alcanzar la de 0 m), sino también canales erosivos o deposicionales sobre sus superficies.

El Cuadro 4.3. muestra una aplicación de ese criterio en el análisis de un banco ubicado aguas arriba del km 606, a la par que sirve para presentar, en forma cuantitativa, los ritmos observados de modificación de este tipo de geoformas en el Paraná.

**Cuadro 4.3.**  
Velocidades medias de crecimiento hacia aguas abajo del extremo inferior del banco de arena (definido por la isobata de -5 m al cero de la escala de Pto. Paraná), en el ensanchamiento entre los km 619 y 606 (FICH, 1997a).

| Periodo   | Velocidad media (m/año) |
|-----------|-------------------------|
| 1921-1935 | 4                       |
| 1935-1949 | 20                      |
| 1949-1960 | 66                      |
| 1960-1972 | 28                      |
| 1972-1988 | 104                     |
| 1988-1996 | 77                      |

Es importante destacar que varios de los bancos que existen actualmente en el río, pudieron ser identificados en los registros batimétricos de la primera mitad (o década, incluso) del siglo XX, como es el caso del presentado en el Cuadro 4.3. Un corolario de lo anterior es que el origen primario de los bancos del cauce no es bien conocido, fundamentalmente debido a la razonable discontinuidad en el tiempo (a la escala de uno o más ciclos hidrológicos sucesivos) de esos relevamientos. Así, los datos disponibles justifican extrapolar más de una explicación desde la literatura específica básica (p.e., Schumm y otros, 1987; Yalin, 1992; Bridge, 1993).

Por el contrario, hay claras evidencias de que una parte de las islas del tramo se formó por el crecimiento en área y altura de esos cuerpos arenosos, o por la acreción lateral de varios de ellos (Iriondo, 1972; Drago, 1973, 1977). Un ejemplo singular de tal transformación aparece en la Figura 4.4.b, frente al km 606: el desarrollo hacia aguas arriba del banco desde 1913, dio lugar al "islotre" del registro siguiente que, luego de 1932, quedó adosado a la planicie aluvial en el lugar. El Cuadro 4.4. contiene las cifras de la evolución de este banco, junto con las del que aparece en 1918 aguas arriba (y al sur) de la Isla Puente (Figura 4.4.b), no identificable en el mapa de 1913 (Figura 4.4.a).

| Año  | Isla frente Aguas Corrientes (km <sup>2</sup> ) |      | Islote del Puerto (km <sup>2</sup> ) |      |
|------|---|------|--------------------------------------|------|
|      | banco   | isla | banco                                | isla |
| 1901 | ---   | ---  | ---                                  | ---  |
| 1906 | ---   | ---  | ---                                  | ---  |
| 1913 | 0,6   | ---  | ---                                  | ---  |
| 1918 | 2,5   | ---  | 0,3                                  | ---  |
| 1926 | 3,9   | 1,6  | 1,3                                  | ---  |
| 1928 | 4,9   | 2,4  | 1,5                                  | ---  |
| 1932 | + de 8  | 2,8  | 1,7                                  | ---  |
| 1938 |   |      | 1,7                                  | ---  |
| 1943 | la isla queda adosada                           |      | 2,1                                  | 0,2  |
| 1946 | a la llanura aluvial                            |      | 3,8                                  | 1,5  |
| 1951 | (se configura el estrechamiento                 |      | 2,9                                  | 2,7  |
| 1957 | del km 606 con dimensiones                      |      | 4,4                                  | 3,5  |
| 1966 | similares a las actuales)                       |      | 7,0                                  | 6,5  |

**Cuadro 4.4.** Evolución areal de la isla frente a Aguas Corrientes (km 606) y del Islote del Puerto (km 601). En ambos casos, la superficie medida de los bancos fue la delimitada por la isobata del 0 m de Pto. Paraná (FICH, 1997a).

Además, otras islas se han originado por el desmembramiento de una más grande, a partir de la aparición y jerarquización de riachos menores, como el riacho Barroso, en la Figura 4.3., que dividió el sector oeste de la Isla Lynch en las islas Lynch - La Paciencia.

La acreción vertical del sedimento en suspensión (fracción gruesa y carga de lavado del Capítulo 5) depositado sobre las superficies de las islas del cauce no ha sido investigada sistemáticamente. Al término de una creciente, por ejemplo, los tamaños más gruesos pueden depositarse formando albardones o montículos de arena de hasta  $\approx 1$  m de altura, desniveles que luego son disminuidos por lavaje pluvial o en sucesivos desbordes del río. En este contexto, de los escasos puntos acotados por el IGM en las islas del tramo, surge que sus pendientes longitudinales están en el orden de las del cauce principal, o fluctúan alrededor del límite  $10^{-3}/10^{-4}$  en diferentes subtramos.

Los bancos e islas del Paraná recuerdan la planta de un patrón de cauce entrelazado, como el río ha sido considerado tradicionalmente en los antecedentes temáticos (Iriondo, 1988; Drago, 1990). Sin embargo, a diferencia de un río entrelazado típico, en el que la diversificación del flujo entre (y sobre) los bancos delinea un escurrimiento variable a través de canales efímeros, de similar jerarquía, el Paraná posee un thalweg bien definido en cualquiera de sus secciones transversales, donde llega a concentrarse más del 50 % del caudal líquido circulante (Toniolo, 1999). Tal "línea" o, mejor, faja de máximas profundidades está normalmente

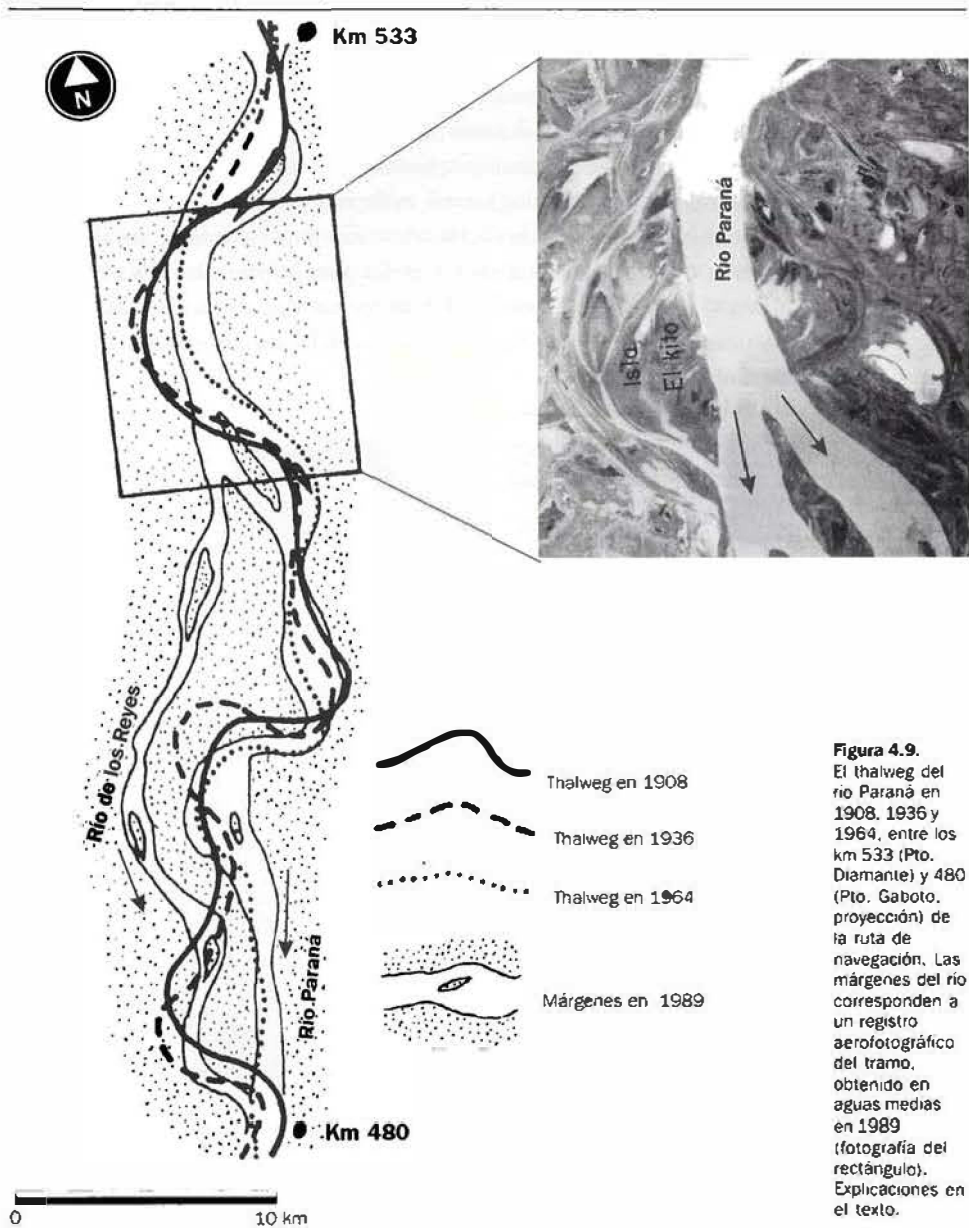
ubicada a 4 - 10 m por debajo de las profundidades más frecuentes en los ensanchamientos, y a más de 15 m (hasta 55 m, como en el km 640) bajo el mismo nivel en los estrechamientos.

Ese rasgo morfológico distintivo fue advertido por los ingenieros fluviales desde comienzos del siglo (p.e., Reposini, 1912), y en algunos textos posteriores llegó a sugerirse, incluso, que la morfología y la movilidad del cauce entero dependían de la dinámica hidráulico-sedimentológica y de las propiedades de divagación localizadas en el thalweg (Cabral, 1973; Parody y Estruco, 1975; FICH, 1989). Los autores de la segunda referencia parecen ser los primeros en adjudicarle al Paraná atributos propios de un río meandriforme, cuyo mejor ejemplo en el área es el Colastiné (Figura 4.6.c). Precisamente, no sólo la sinuosidad del thalweg visto en planta (Figura 4.9.), sino ante todo su modo de deriva lateral continua (en parte reflejada en los corrimientos de margen de la Figura 4.6.b), junto con las rectificaciones o cortes de onda del thalweg reconocidos por doquier en el tramo (en el de la Figura 4.9., por ejemplo, los que ocurrieron entre 1936 y 1964 en la zona del recuadro, e inmediatamente aguas arriba del km 480), son las bases desde las que los autores (en Ramonell y otros, 1999) han propuesto que el patrón entrelazado de thalweg meandriforme (tipo 4 de Schumm, 1985; Schumm y otros, 1987) describe mejor la morfología real (tridimensional) y la suma de procesos de erosión/sedimentación medidos en el río, como se expone en detalle más adelante, en «Dinámica geomorfológica histórica del río Paraná».

### **El cauce principal en el contexto del valle aluvial**

El análisis geomorfológico de los cuatro mapas contenidos en la Figura 4.3. permite advertir dos cortes de meandros del thalweg del Paraná, ocurridos entre 1928 y 1944 (justo en el sitio del km 584), y 1944 - 1962 (jerarquización en dimensiones y capacidad de conducción del Rcho. Barroso; Cabral, 1973; FICH, 1998). En un sentido similar, dos aspectos sobresalientes en los registros de la Figura 4.4. son la rectificación del thalweg en 1913 (al norte de Bajada Grande, km 594), y el progresivo relleno sedimentario de la onda abandonada, que condujo a la ampliación de la planicie aluvial en el área (Figura 4.4.b, 1926 versus 1918). Una ilustración más "real" del proceso anterior la ofrece la zona de la foto aérea en la Figura 4.9.

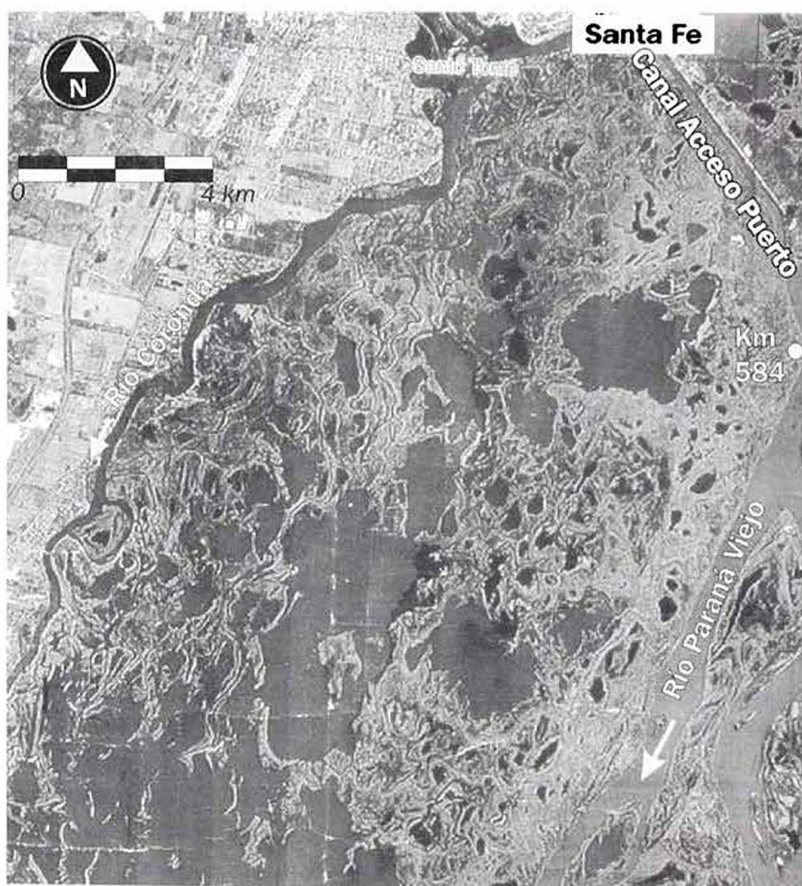
Esos mecanismos, junto con los mencionados en el ítem precedente, son los que han originado buena parte del paisaje comprendido entre las líneas rojas de la Figura 4.1., en los últimos 100 años. Otras áreas de la misma zona datan de tiempos previos (partes de islas en la Figura 4.2., por ejemplo), aunque ellas también han sido modeladas, en mayor o menor grado, por el río o sus desbordes durante el presente siglo.



Aunque la asociación de formas fluviales de la faja delineada en la Figura 4.1. suele transgredir sus límites hacia uno u otro lado (indicando las posiciones alcanzadas por el cauce en periodos anteriores a este siglo), es claro que semejante patrón no se mantiene en todo el ancho del valle de inundación: en el entorno del río Colastiné (Figura 4.6.b), por caso,

predominan las geoformas asociadas a la dinámica morfosedimentaria y de divagación típicas de ese curso meandriforme (la última, ilustrada por la Figura 4.6.c), tales como espiras de meandro, meandros abandonados, lagunas y pantanos semilunares, etc. (Leopold y otros, 1964; Reineck y Singh, 1986). Inmediatamente aguas arriba y abajo del tramo ocupado por el Colastiné, las morfologías del valle son diferentes, y prevalecen los sistemas anastomosados de riachos sinuosos, muy estrechos, con albardones laterales que limitan pantanos y lagunas poco profundas, subcirculares en planta (Figura 4.6.b; Figura 4.10.); las formas vinculadas al desplazamiento de meandros de los ríos San Javier y Coronda son minoritarias en los dos sectores indicados.

**Figura 4.10.** Sistemas de riachos estrechos con albardones laterales delimitando lagunas en el valle de inundación, al sur de la desembocadura actual del río Colastiné (ver el área en su contexto en la Figura 4.1.c).



Aquellas tres zonas han sido analizadas geomorfológicamente por Iriondo (1972, 1975, 1979, 1993), Iriondo y Drago (1972) y Drago (1973, 1990) con distintos grados de detalle, por lo que aquí sólo se mencionarán algunas peculiaridades no especificadas con anterioridad, y relacionadas con los



fenómenos de traspaso de caudales desde el Paraná hacia el resto de las corrientes en las diferentes partes del valle. En tal sentido, conviene hacer una mención general sobre la distribución y magnitud de las pendientes medias del terreno en esos ambientes: en igual dirección que la del valle, los declives tienen los mismos órdenes de inclinación que los referidos para las zonas insulares del cauce, aunque se destaca una interrupción o quiebre de pendiente singular en el sector del A° Leyes, en donde la planicie modelada por el Colastiné está a 1 m o más por encima de los niveles acotados al norte de la misma (Figura 4.5.). Otro resalto similar existe al oeste del km 690 (Figura 4.1.b).

En dirección perpendicular al valle, varias de las pendientes medidas fueron del orden de  $10^{-4}$  y, según el subtramo considerado, dirigidas hacia el cauce principal o en sentido contrario: entre los ríos Paraná Viejo y Coronda (Figura 4.10.), por ejemplo, las cotas mínimas de esa planicie se encuentran alineadas según un eje dispuesto equidistante a las trazas de ambos cauces, como lo evidencia el drenaje convergente de los riachos estrechos que nacen en ellos.

Una consecuencia de lo descripto es que el nivel de cauce lleno (o previo al desborde) del cauce principal no es constante en la dirección del escurrimiento: mientras que el valle entre los km 640 y 590 comienza a anegarse por encima de una altura hidrométrica en Pto. Paraná,  $H_{pp} = 4$  m, los tramos de las planicies de aguas arriba y abajo ya están inundados en diferente grado para ese nivel del agua (Figura 4.1.a-d). En tal escenario, parte de la transferencia de caudales desde el Paraná ocurre a través de los canales o riachos angostos mencionados, habiéndose medido, en la embocadura de uno ubicado aguas arriba del km 640 (sitio de la flecha entre los km 655 – 640 en la Figura 4.6.b), un caudal instantáneo de algo más de  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estos riachos funcionan como verdaderos deltas de tipo digitado (o “en pata de ave”) en las situaciones de inundación (Figura 4.10.), que es una variedad de delta originado por la depositación, en los laterales de cada canal (distributivo o principal), de una fracción de la carga sólida que transportan, bajo la forma de albardones (Bird, 1968; Schumm, 1977; Orton y Reading, 1993).

El delta digitado más grande en el tramo es el que forma el A° Leyes en la laguna Setúbal (Figura 4.6.a-b), cuyo crecimiento en el lapso 1984-1994 puede evaluarse al comparar su área emergida en las imágenes de las Figuras 4.6.b y 4.1., con  $H_{pp}$  de 2,84 m y 4 m, respectivamente. Empleando esa metodología, los autores han podido medir, en los registros aéreos del '94, albardones de cientos a miles de metros de longitud originados por los riachos en el valle de inundación, que no existían (emergían) en imágenes del '87, obtenidas durante niveles hidrométricos más bajos. De este modo, el patrón anastomosado de los canales de tales áreas durante el estiaje, así

como las lagunas de contorno subcircular o festoneado delimitadas por sus albardones, parecen ser el resultado de los mecanismos citados de progradación sedimentaria deltaica, mediante los cuales los riachos distributarios terminan conectándose entre sí, dada la coalescencia lateral de los “deltas” menores individuales.

Resulta claro que los resaltos en contrapendiente del perfil longitudinal del valle de inundación modifican, localmente, los esquemas de trasvasamiento y/o conducción de caudales de desborde desde el cauce principal (la importancia cada vez mayor en el tiempo del A° Leyes, descrita en el Capítulo 11, sería una consecuencia de ello, a partir del aumento en la frecuencia, permanencia e intensidad de las inundaciones fluviales en las últimas décadas, demostrado en el Capítulo 3, y sintetizado en los Cuadros 4.7. y 4.8.). También el eje deprimido indicado para la Figura 4.10. debe obrar de manera similar durante las crecientes. Al considerar el origen y el grado de definición topográfica de todos estos rasgos lineales, o del complejo lagunar Serúbal - El Capón inclusive, no deberían descartarse procesos de tectónica aún activos en la zona, más allá de las evidencias de dislocaciones recientes (en la escala de tiempo geológico) expuestas por Frenguelli (1954), Pasotti (1968, 1972, 1974) e Iriondo (1987) en el contexto regional. En este marco, cabe destacar la asociación entre patrones de cauce anastomosado y áreas de subsidencia o hundimiento tectónico activo, mencionada para varios sistemas anastomosados del planeta (Knighton y Nanson, 1993; Harbor y otros, 1994).

Con relación a los cauces de segundo orden en el tramo, las tres corrientes que se han reconocido tradicionalmente con tal jerarquía entre los km 850 y 480 son los ríos San Javier, Colastiné, y Coronda (Figura 4.1.). Tal distinción permite, de algún modo, aislar estos cursos del cauce principal: esto es, los tres poseen una identidad dinámica y morfológica propias, de la que la planicie modelada por el río Colastiné es la prueba más contundente.

Con todo, existen diferencias sustantivas entre esas corrientes. Por un lado, los ríos San Javier y Coronda tienen el rasgo común de una posición marginal en el valle, que los hace receptores directos de los afluentes chaco-pampeanos, hecho mayormente notable en la concentración de sales disueltas de sus aguas (en el caso del Coronda, aportadas por el río Salado, Figura 4.1.; Zapata Gollán, 1939; Maglianesi, 1968). Por el contrario, la alimentación del Colastiné es exclusiva del cauce principal, del que comparte, incluso, su menor tenor salino en cualquier época del año (menos de 150 ppm de sólidos disueltos, Stangenberg y Maglianesi, 1968). Los anchos de los tres cauces son indicativos de sus distintas capacidades de conducción: el San Javier y el Coronda pueden encauzar menos de 700 m<sup>3</sup>/s cada uno, mientras que el flujo previo al desborde del Colastiné ronda en 3 veces más esa cifra, al igual que su caudal medio (LH, 1974; HYTSA, 1987; SEN, 1994). Lo último representa alrededor del



10 % del caudal medio del Paraná en Corrientes (Capítulo 2), lo cual es significativo si se considera que el traspaso desde el cauce principal está concentrado en un “punto”, en la embocadura de ese brazo.

De lo anterior se desprende que el análisis de evolución del cauce principal puede realizarse prescindiendo de los ríos San Javier y Coronda, pero sin perder de vista la derivación de caudales a través del Colastiné. En tal sentido, tampoco deben pasar inadvertidas las corrientes similares que existen desde hace cien o más años en el tramo, como lo son los riachos Espinillo (km 810-765; Figura 4.1.) y Correntoso (km 695-680), y los ríos Paraná Viejo (km 582-551), Paracao (km 592-574) y de los Reyes (km 511-480). Todos estos brazos parecen haber mantenido sus propiedades morfológicas desde comienzos del siglo: de hecho, no se detectaron cambios significativos en la traza en planta de estos cauces en la cartografía histórica de la DNCPyVN, y hasta la ubicación geográfica de sus embocaduras ha sido constante en ese tiempo. Sólo el río de los Reyes incrementó su longitud en 8 km en su tramo inferior en los años '60, al adoptar como propia la faja del thalweg del Paraná que se desplazó/rectificó hacia el este (Figura 4.9.), repitiendo el mismo proceso que, a partir de 1901, ocurriera con la desembocadura del río Colastiné (Figura 4.1.c; FICH, 1998).

### **Variables de control morfológico del cauce**

La diferencia en las tasas de corrimiento puntuales de la margen derecha en los ensanchamientos mostrados por la Figura 4.6.b, pueden explicarse por los fenómenos de transfluencia y/o separación/concentración de los caudales del Paraná en el tramo, ya que no existen variaciones en la resistencia a la erosión de la margen de esos sitios. Un argumento alternativo surge de considerar el carácter más resistente de las formaciones geológicas mio-pliocénicas que allí forman el lateral izquierdo del cauce (en la base de la “barranca del Paraná” que define el límite del valle aluvial en la zona, Capítulo 1), y que se traduce en una mucho mayor estabilidad temporal de la traza en planta de ese borde: así, las salientes más o menos acentuadas hacia margen derecha en los estrechamientos (km 655, 640 o 606, por ejemplo), modeladas por el río al erosionar la pared del valle durante grandes unidades de tiempo, podrían estar direccionando el flujo contra la margen opuesta en cada ensanchamiento de aguas abajo, para producir el resultado “a corto plazo” que ilustra la figura en cuestión. Desde esta perspectiva, hasta las ondas del cauce cuyos ápices señalan las flechas de la Figura 4.6.b, podrían ser interpretadas como otra consecuencia de semejante control geológico sobre el escurrimiento, en la forma planteada por Parody y Struco (1975) para un tramo del Paraná aguas abajo del km 480.

El dilema del párrafo previo no es tal ya que ambas explicaciones no son excluyentes, pero fue presentado así para mostrar la necesidad de resolver dos aspectos esenciales en el análisis de evolución geomorfológica: por un lado, identificar las variables de primer orden que regulan los procesos hidráulico-morfológicos operando en el cauce del Paraná, y definir su comportamiento histórico; por otro, determinar la influencia relativa de los diversos controles, donde existan causas/efectos convergentes (Schumm, 1984). Aplicado a la cuestión del párrafo anterior, lo último parece tener una solución sencilla: de la observación de las dos convexidades hacia el este del límite del valle entre los km 628 y 594 (Figura 4.6.b, o Figura 4.1.), o de las ondas del thalweg cuando el flujo escurre sin entrar en contacto con la barranca (tramos de las Figuras 4.3. y 4.9.), o de la configuración actual versus pasada del cauce en la Figura 4.2., por ejemplo, puede avizorarse que la tendencia a formar meandros es una característica propia del Paraná como gran río aluvial, que, desde una perspectiva morfológica, no es menos acentuada que su proclividad al desarrollo de bancos.

En ese contexto, es bien conocido que la geometría, forma y dimensiones promedio de un cauce aluvial están gobernadas, en principio, por las características del sedimento que transporta en contacto con el fondo (y el que ha almacenado en el valle aluvial), por su pendiente de energía, y por alguna medida representativa de las magnitudes contenidas en su hidrograma (Leopold y otros, 1964; Graf, 1970; Richards, 1982). Una discusión acerca de las particularidades y evoluciones en el siglo de estas variables en el tramo, se da a continuación.

### **Material del lecho.**

#### **Propiedades del sedimento aluvial en el entorno del cauce**

En páginas precedentes, y mediante las Figuras 4.7. y 4.8., se adelantaron varias de las propiedades de los sedimentos del lecho y en el subálveo del río, destacando la singular homogeneidad sedimentológica que caracteriza a las arenas transportadas en suspensión y por arrastre de fondo. En efecto, de los antecedentes oportunamente indicados, se desprende que la totalidad, prácticamente, de estos detritos son granos esféricos/subesféricos de cuarzo, bien redondeados, cuyos tamaños modales en el tramo se ubican sobre todo en la clase de arenas medias, la que forma entre el 40 % y el 85 % (en peso) de las muestras colectadas desde mediados de siglo. Así, en la gran mayoría de los casos el diámetro medio del material del lecho apenas varía de 0,250 mm a 0,380 mm, con grados de selección de 1,3 o menores (i.e., arenas bien a muy bien clasificadas).

El detalle referido de parámetros sedimentológicos puede hacerse extensivo a la potente capa de arenas que se encuentra en el valle aluvial (Figura 4.8.), como consta en las descripciones de geotecnia de las perforaciones analizadas por los autores. Aquí es posible diferenciar, hasta donde se conoce, dos tipos de secuencias litológicas en subsuperficie, que coinciden con las áreas modeladas directamente por el cauce principal en tiempos históricos, y con aquellas donde la dinámica predominante ha sido la de inundación, es decir, en las áreas insulares o marginales del cauce dentro del valle aluvial. En las primeras, los sondeos han atravesado (desde la superficie del terreno o desde el lecho del río, hacia abajo) suelos arenosos de clases SP-SM, SP y SM casi exclusivamente, con características sedimentológicas idénticas a las referidas para el material del lecho, mientras que, en las segundas, los materiales granulares yacen debajo de un "manto" de sedimentos limo-arcillosos, por lo común de 4 a 10 m de espesor, compuesto principalmente por suelos CL-ML y CH, con escasas intercalaciones de arenas SM.

En los ensayos normalizados de penetración, el número de golpes,  $N$ , necesario para atravesar las sucesiones sedimentarias de ambos ambientes es de  $N \ll 30$  hasta los  $\approx 14 - 17$  m bajo el nivel de la superficie del valle aluvial (en sitios puntuales, hasta casi los 30 m), en tanto que, debajo de esas profundidades, cambia abruptamente a  $N \gg 30$  (frecuentemente,  $N > 45$ ). Esta discontinuidad litológica marca la presencia de una discordancia erosiva (en principio, una diferencia de antigüedad geológica) en el seno de las arenas del valle, mientras que el resto de los parámetros sedimentológicos se mantiene uniforme.

Los sedimentos caracterizados en los tres párrafos previos son los que componen los límites aluviales del cauce principal en la zona, donde debe destacarse, sin lugar a dudas, la primacía absoluta de los mencionados en primer término, integrando las diversas formas de fondo estudiadas en el río (Capítulo 5).

Al presente, no hay elementos que induzcan a sospechar que el diámetro medio, clasificación, etc., del material del lecho hayan sido diferentes en la primera mitad del siglo, que los registrados a posteriori. Por el contrario, la similitud granulométrica de las clases SP-SM atravesadas en los sondeos de geotecnia, con las muestras colectadas directamente desde el lecho, argumentan a favor de la constancia en el tiempo de aquellos parámetros texturales. De aquí que es dado presumir que las pendientes medias del río no se habrían modificado sensiblemente a lo largo de la centuria, un supuesto que descansa, sobre todo, en la correlación diámetro medio versus pendiente de energía propuesta por Drago y Amsler (1998) para el sistema fluvial completo.

### El caudal dominante (o formativo del cauce) en el río Paraná

El amplio rango de caudales que escurren en un río (Cuadro 4.5.), dificulta la elección de un valor representativo al cual asociar sus características morfológicas, sobre todo en el análisis de evolución de un tramo de cauce de longitud considerable. Esto ha conducido, en una práctica frecuente a nivel internacional, a la adopción espontánea de unas pocas magnitudes alternativas (p.e., las correspondientes al caudal módulo, o al caudal de cauce de lleno), prescindiendo del examen de otros parámetros estrechamente relacionados con las dimensiones de una corriente aluvial, como el de transporte de sedimentos, por ejemplo (Carson, 1984; Bridge, 1993). En este enfoque se encuadra, precisamente, el concepto de "caudal dominante" (también llamado "generador del lecho" o "efectivo" o "formativo"), como resultado de los estudios de magnitud-frecuencia de caudales líquidos y sólidos investigados por varios autores, desde Schaffernak (1950, en Garde y Ranga Raju, 1977) hasta Chalov y Alabyan (1997), entre otros. Con términos prácticamente idénticos a los de Schaffernak, la USBR (1960, en Garde y Ranga Raju, 1977) definió al caudal dominante,  $Q_d$ , como aquel que transporta, respecto del tiempo, la mayor carga de sedimento de diámetro más grueso que 0,0625 mm.

**Cuadro 4.5.**  
Valores de caudales del río Paraná entre la embocadura del río Coiastiné (aprox. km 635) y Bajada Grande (km 594) (serie 1904-1995).

|  |        |
|--|--------|
| Caudal módulo, $Q_{mód}$ ( $m^3/s$ )             | 13.937 |
| Caudal de cauce lleno, $Q_{ca}$ ( $m^3/s$ )      | 17.140 |
| Caudal máximo de la serie, $Q_{máx}$ ( $m^3/s$ ) | 31.757 |
| Caudal mínimo de la serie, $Q_{mín}$ ( $m^3/s$ ) | 4.493  |
| Relación $Q_{máx} / Q_{mín}$                     | 7      |

Ese análisis fue aplicado al cauce principal en FICH (1997a) para el tramo comprendido entre sus km 619 y 594, con propósitos de predicción morfológica en la sección del Túnel "Hernandarias" y su entorno (Amsler y otros, 1998). En una primera etapa de aquel estudio, y con el objetivo de lograr una visión general acerca del comportamiento de los caudales líquidos en el siglo, se calcularon los caudales medios,  $Q_m$ , para períodos de aproximadamente 10 años de extensión, obteniendo los valores consignados en el Cuadro 4.6. Allí es posible advertir que entre 1932 y 1969 existió un evento de mínimos  $Q_m$  (alrededor de los 12.500  $m^3/s$ ), seguido de un incremento consistente desde 1970, década en la cual el caudal medio fue mayor, incluso, que los calculados para la primera parte de la serie.

| Período     | $Q_m$ (m <sup>3</sup> /s) | H <sub>pp</sub> (m) |
|-------------|---------------------------|---------------------|
| 1904 - 1920 | 13.075                    | 2,57                |
| 1921 - 1931 | 13.879                    | 2,83                |
| 1932 - 1941 | 12.505                    | 2,38                |
| 1942 - 1948 | 12.048                    | 2,21                |
| 1949 - 1959 | 12.625                    | 2,42                |
| 1960 - 1969 | 12.603                    | 2,41                |
| 1970 - 1980 | 14.713                    | 2,95                |
| 1981 - 1990 | 16.435                    | 3,76                |
| 1990 - 1995 | 16.019                    | 3,62                |

**Cuadro 4.6.**  
Caudales medios ( $Q_m$ ) y alturas hidrométricas asociadas ( $H_{pp}$ ) del río Paraná en el siglo XX (FICH, 1997a).

También se realizó una caracterización de las crecidas en el tramo, considerando como tales a las que superaron el nivel de cauce lleno (ver en Cuadro 4.5.), y diferenciando en cada una de ellas su permanencia (en número de días), magnitud (a través de los volúmenes de agua escurridos) e intensidad (caudal máximo,  $Q_{máx}$ ). Una síntesis de esas determinaciones se incluye en los Cuadros 4.7. y 4.8., donde puede apreciarse, en general, la influencia de estos sucesos hidrológicos sobre los caudales medios del Cuadro 4.6. (al mismo tiempo, debe hacerse notar la falta de correlación para el lapso 1970-1980 en el caso de los eventos con  $H_{pp} > 5$  m).

Con la base del reconocimiento anterior se calculó el caudal dominante empleando el método de Schaffernak, y aplicando la fórmula de Engelund - Hansen (1967) para el cálculo del transporte total del sedimento de fondo, dada su calidad predictiva verificada con datos de campo en la zona (Capítulo 5). De esta manera, la Figura 4.11. reproduce el cómputo específico de  $Q_d$  para el período total de caudales medios bajos (1932 - 1969), en tanto que el Cuadro 4.9. presenta los valores finales a lo largo del siglo, ordenados en grupos equivalentes a las principales variaciones detectadas en el Cuadro 4.6.

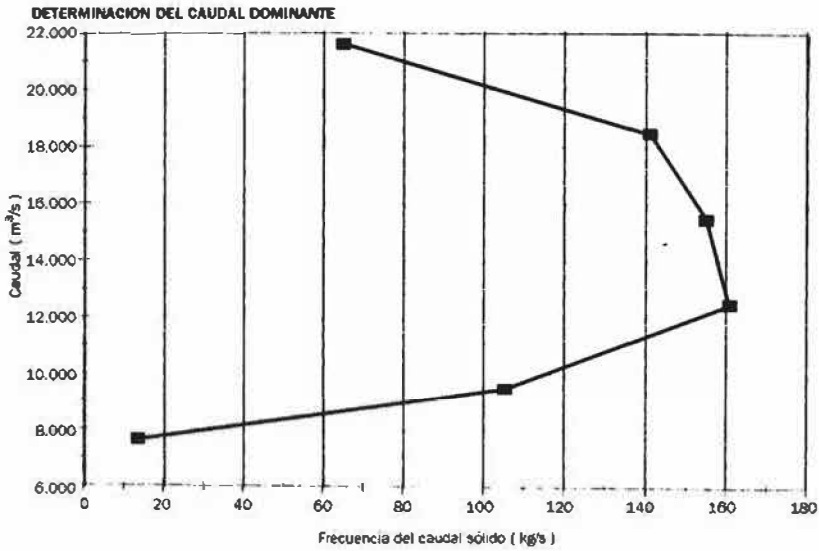
| Período     | Nº de eventos | Nº de días | Volumen escurrido (m <sup>3</sup> · 10 <sup>10</sup> ) | $Q_{máx}$ del evento mayor (m <sup>3</sup> /s) | $Q_{máx}$ del evento menor (m <sup>3</sup> /s) |
|-------------|---------------|------------|--|--|--|
| 1904 - 1920 | 15            | 1.015      | 181,99   | 33.658   | 18.314   |
| 1921 - 1931 | 13            | 896        | 162,25   | 27.833   | 18.689   |
| 1932 - 1941 | 8             | 473        | 80,50  | 23.125   | 18.521   |
| 1942 - 1948 | 6             | 324        | 56,17  | 23.623   | 18.314   |
| 1949 - 1959 | 7             | 467        | 81,20  | 25.323   | 19.027   |
| 1960 - 1969 | 6             | 490        | 92,24  | 30.625   | 18.272   |
| 1970 - 1980 | 12            | 595        | 102,09   | 25.070   | 18.219   |
| 1981 - 1990 | 15            | 1.471      | 251,05   | 31.165   | 17.285   |
| 1990 - 1995 | 7             | 567        | 94,84  | 31.757   | 18.200   |

**Cuadro 4.7.**  
Eventos de crecida ( $H_{pp} > 4$  m) del río Paraná en el siglo XX, agrupados según los períodos del Cuadro 4.6. (sintetizado de FICH, 1997a).

**Cuadro 4.8.**  
Eventos de crecida importantes ( $H_{pp} > 5$  m) del río Paraná en el siglo XX, agrupados según los periodos del Cuadro 4.6. (sintetizado de FICH, 1997a).

| Periodo     | Nº de eventos | Nº de días | Volumen escurrido ( $m^3 \cdot 10^{10}$ ) | $Q_{m\acute{a}x}$ del evento mayor ( $m^3/s$ ) | $Q_{m\acute{a}x}$ del evento menor ( $m^3/s$ ) |
|-------------|---------------|------------|---|--|--|
| 1904 - 1920 | 5             | 174        | 37,59                                     | 33.658   | 22.634   |
| 1921 - 1931 | 5             | 171        | 35,50                                     | 27.833   | 22.878   |
| 1932 - 1941 | 2             | 19         | 3,78                                      | 23.125   | 22.634   |
| 1942 - 1948 | 1             | 22         | 4,40                                      | 23.623   | 23.623   |
| 1949 - 1959 | 4             | 65         | 13,20                                     | 25.323   | 22.829   |
| 1960 - 1969 | 3             | 197        | 42,70                                     | 30.625   | 23.423   |
| 1970 - 1980 | 3             | 58         | 11,63                                     | 25.070   | 21.907   |
| 1981 - 1990 | 6             | 369        | 78,94                                     | 31.165   | 21.122   |
| 1990 - 1995 | 2             | 116        | 23,29                                     | 31.757   | 23.058   |

**Figura 4.11.**  
Resultado del cómputo del caudal dominante,  $Q_d$ , del cauce principal entre los km 619 y 594 para el lapso 1932-1969, aplicando el método de Schaffernak (FICH, 1997a).



**Cuadro 4.9.**  
Caudales dominantes,  $Q_d$ , del río Paraná en el siglo XX (y caudales medios,  $Q_m$ , en los periodos equivalentes) (FICH, 1997a).

| Periodo     | $Q_d$ ( $m^3/s$ ) | $Q_m$ ( $m^3/s$ ) |
|-------------|-------------------|-------------------|
| 1904 - 1931 | 13.600            | 13.477            |
| 1932 - 1969 | 12.560            | 12.445            |
| 1970 - 1980 | 15.146            | 14.713            |
| 1981 - 1990 | 16.460            | 16.435            |
| 1991 - 1995 | 16.311            | 16.019            |

El Cuadro 4.9. pone en relieve la estrecha correspondencia entre la evolución histórica de  $Q_d$  y  $Q_m$  en el Paraná como producto de una combinación entre la hidrología y el transporte de sedimentos del lecho, donde los máximos de este último para un tiempo dado (y, de ahí, de modificación morfológica) no tienen que asociarse, necesariamente, al paso de grandes crecientes (véase el valor de  $Q_d$  de 1970-1980, con relación a las crecientes de ese período, Cuadros 4.7. y 4.8.). Por otro lado, el  $Q_d$  siempre ha sido inferior al caudal de cauce lleno en el sector, cuyo tiempo de recurrencia es, en la actualidad, de 3,3 años (FICH, 1997a).

Es importante destacar que las modificaciones presentadas en la hidrología del cauce fueron reconocidas por García y Vargas (1998) en la totalidad del sistema fluvial del Paraná (a través de un análisis más robusto, desde su concepción metodológica, de los caudales líquidos históricos), quienes encontraron cambios de tendencia en los años 1917-18, 1943-44 y 1970-72, para la serie que examinaron (1901-1993). La última, en particular, signó el salto más abrupto y notorio de la secuencia, al punto de que los autores la han considerado más indicativa de un cambio climático, que de una simple fluctuación sostenida en el tiempo. De cualquier modo, el trabajo de referencia subraya el carácter “seco” del lapso 1944 – 1970, además del comparativamente mucho más “húmedo” (o caudaloso) del período siguiente.

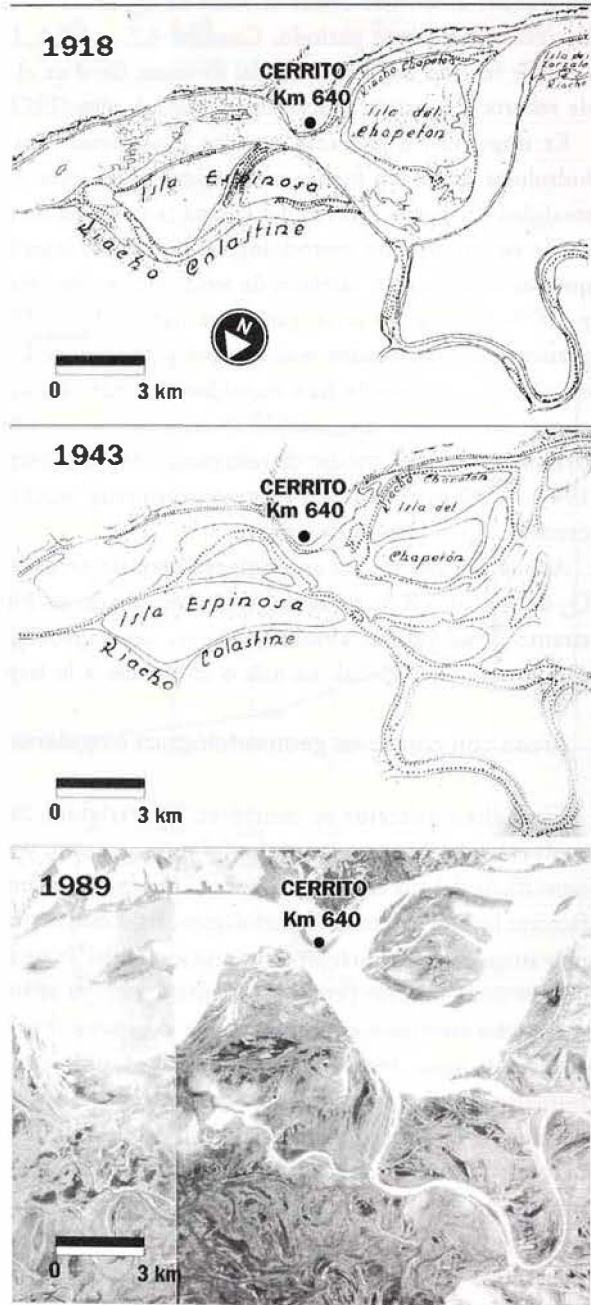
Así, la calidad de ese antecedente permite extender las variaciones de  $Q_d$  del Cuadro 4.9. fuera del sector estudiado en FICH (1997a), no en cuanto a sus valores absolutos, obviamente, sino en lo que atañe a su comportamiento global, en más o en menos, a lo largo del siglo.

### **Áreas con controles geomorfológicos singulares**

El análisis anterior se centró en las variables condicionantes de la evolución del cauce a la escala del tramo entero, y sin considerar sitios específicos del río en donde pueden conjugarse las influencias de diversos factores locales de control morfológico. Bajo este encuadre, una de las áreas más singulares, en carácter de excepcional, del Paraná entre los km 850 y 480 es la de Cerrito (km 640, Figura 4.1.c): ya se indicó que allí fueron registradas las máximas profundidades del tramo (hasta unos ca. 60 m bajo el nivel de aguas medias), a lo que debe añadirse que el lecho del río está formado, en el estrechamiento, por un fondo irregular de rocas “duras”, del tipo de las que componen la pared del valle en la acentuada saliente de margen izquierda. La ubicación misma de Cerrito coincide con la proyección hacia el este del resalto en el perfil del valle comentado para la traza del A° Leyes, sugiriendo la posibilidad que el sector guarde otro tipo de control geológico, además del litológico. Finalmente, aguas abajo del

km 640 se encuentra la embocadura del río Colastiné, la que, antes del siglo XX, se hallaba en el ensanchamiento de aguas arriba, a juzgar por la toponimia del área en los primeros planos de la DNCPyVN (ver "Riacho Colastiné" en los mapas de la Figura 4.12.), entre otras.

**Figura 4.12.** Configuraciones de la planta del cauce principal en la singular zona de Cerrito (km 640), en diferentes momentos del siglo XX.





En los mapas de la figura referida sobresale la geometría recta (en planta) del río aguas arriba del km 640, muy diferente de la forma de onda o en arco de registros posteriores, como el de la fotografía aérea de 1989 (Figura 4.12.). Justamente, el Cuadro 4.10. contiene la evolución de los anchos máximos (o amplitudes de onda,  $a_m$ ) en los ensanchamientos adyacentes a Cerrito, medidos a lo largo de 86 años.

| Año  | Ancho máximo<br>Zona Isla Chapetón (m) | Ancho máximo<br>Zona arriba Isla Espinoza (m) |
|------|--|---|
| 1908 | 6.650                                  | 2.500   |
| 1913 | 6.700                                  | 2.500   |
| 1918 | 6.650                                  | 2.600   |
| 1922 | 6.600                                  | 2.600   |
| 1936 | 5.600                                  | 3.000   |
| 1943 | 5.700                                  | 3.000   |
| 1965 | 5.600                                  | ***   |
| 1984 | 6.500 / 6.900                          | 4.600   |
| 1989 | 6.300 / 6.900                          | 4.950   |
| 1994 | 6.600 / 7.400                          | 5.450   |

**Cuadro 4.10.**  
Evolución del ancho máximo del río en los ensanchamientos de aguas abajo y arriba de Cerrito (km 640) (zonas de Isla Chapetón y arriba Isla Espinoza, respectivamente, ver Figura 4.12.) (FICH, 1997a, 1998).

El conjunto de valores presentados en ese Cuadro tiene implícito la suma de controles geomorfológicos de carácter local, además de los que condicionan los cambios en el tramo de estudio entero. Allí puede observarse que el parámetro evaluado siempre fue mayor en la zona de Isla Chapetón, poniendo en evidencia el direccionamiento del flujo hacia margen derecha que ejerce la saliente del estrechamiento. Aun con ello, tal mecanismo de enfilación de la corriente parece haber sido menos eficaz a mediados del siglo, como lo manifiesta la disminución del ancho del cauce entre 1936 y 1965, debido a la sedimentación en el ápice de la onda, con el corrimiento asociado del thalweg hacia la base del meandro (Figura 4.12., situación de 1943). Para este subtramo, las variaciones registradas en el Cuadro 4.10. marcan un comportamiento general afín a la evolución de los caudales dominantes en el siglo (Cuadro 4.9.), como fuera propuesto en FICH (1997a).

Por su parte, el sector ensanchado adyacente a la Isla Espinoza aumentó su amplitud a lo largo de todo el período, aunque con incrementos relativamente menores en la primera mitad del siglo, a medida que se producía el cegamiento (completado en los años '50) del canal que fuera tramo superior del Colastiné. Posiblemente esto haya implicado una concentración de la escorrentía por el cauce principal durante ese lapso.

De cualquier manera, las modificaciones en las dimensiones de la onda de aguas arriba de Cerrito han tenido, desde los '60 a esta parte, el mismo patrón evolutivo, y una magnitud similar (incluso mayor, ver Figura 4.6.b), que los registrados en la onda de Chapetón.

Del conjunto de datos expuesto, y a modo de cierre, parece factible concluir que hasta en un área tan singular como la mostrada, las variables de primer orden que condicionaron los cambios morfológicos en el período de cien años considerado, fueron las vinculadas con las variaciones del caudal y la erodabilidad de las márgenes aluviales. Otro tipo de controles, como el direccionamiento o “reflejo” de la corriente ejercido por la traza resistente del valle, sobre una de sus márgenes, a lo sumo podrá acentuar o mantener un estado de meandrificación en sectores localizados del cauce, como ocurriera entre las décadas del '30 y del '70 en el ensanchamiento de Chapetón.

## **Dinámica geomorfológica histórica del río Paraná**

### **La jerarquía del thalweg en la conformación y cambios morfológicos del cauce**

#### **Relaciones ancho / profundidad del thalweg del Paraná**

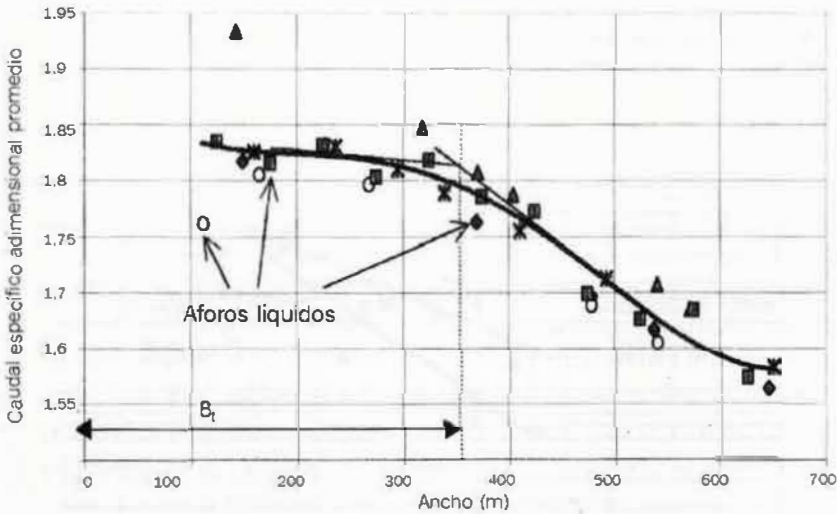
Previamente se destacó la importancia del thalweg del Paraná en los procesos de configuración morfológica del área comprendida entre las líneas rojas de la Figura 4.1., indicando que el mismo podía reconocerse como una faja más o menos bien definida en el lecho del río, antes que una línea imaginaria que resulta de unir las mayores profundidades en secciones transversales sucesivas. En otras palabras, la faja del thalweg puede concebirse como un escurrimiento concentrado, fluyendo dentro de los límites de otro más amplio, correspondiente al cauce principal mismo.

En tal sentido, los autores presentaron una metodología para la caracterización racional del thalweg del Paraná, a fin de poder definir, o aislar, sus propiedades geométricas sobresalientes, como paso previo a indagar acerca de su evolución histórica en el siglo XX (Toniolo y otros, 1999). Este último tema ha sido desarrollado recientemente en forma exhaustiva por Toniolo (1999), en base a mediciones en la totalidad del tramo entre los km 850 y 480.

Para llevar a cabo la caracterización mencionada en primer término, se examinaron 65 aforos del cauce realizados en poco más de 80 años en 16 secciones ubicadas entre Corrientes (km 1.204) y Diamante (km 533). Siete de esas secciones correspondieron a estrechamientos y sectores inmediatamente adyacentes (i.e., zonas de confluencias y expansiones), y las nueve restantes estuvieron localizadas en sectores ensanchados del cauce

principal. La totalidad de los aforos fueron seleccionados considerando situaciones hidrológicas coincidentes con las de los caudales medios en cada sitio, atendiendo a la similitud de éstos con los caudales dominantes del río,  $Q_d$ , ya explicada.

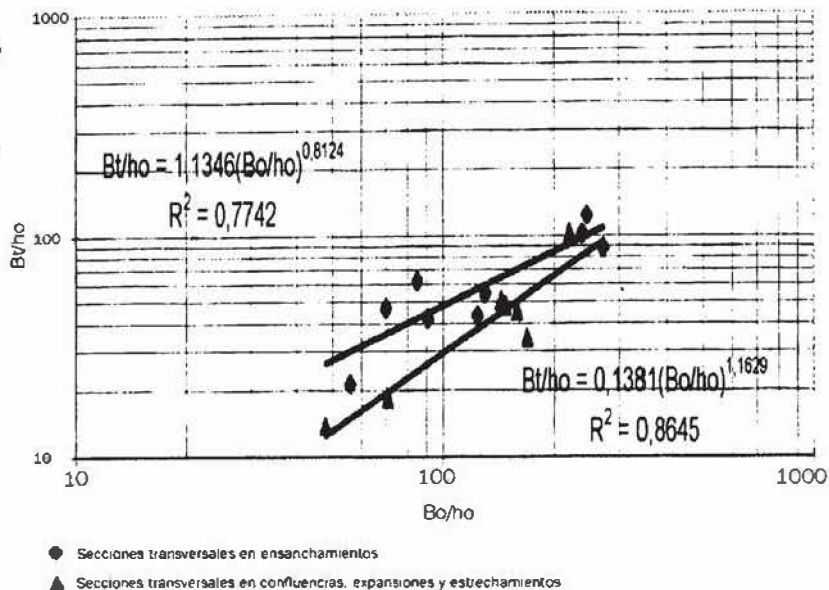
La Figura 4.13. muestra uno de los productos del tratamiento de aquella información, en donde se distingue claramente la existencia de una zona de ancho  $B_t$  (ancho del thalweg), donde se transporta el grueso del caudal circulante por la sección completa del río. Toniolo (1999) ha encontrado que, a lo largo del siglo,  $B_t$  tuvo una variación reducida en el tramo. La real asociación de esas variaciones con parámetros del escurrimiento, está siendo aún investigada en el marco de los Proyectos indicados al inicio de este capítulo.



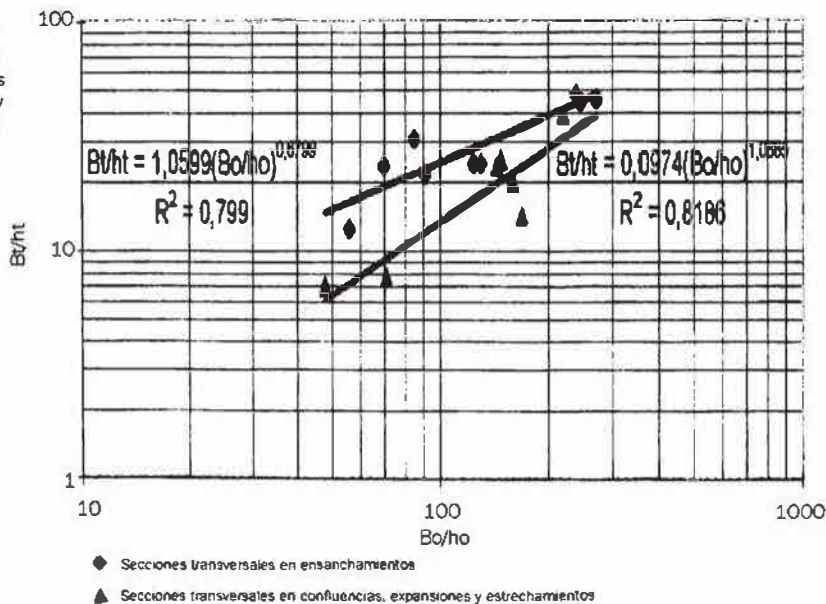
**Figura 4.13.** Determinación del ancho del thalweg mediante promedios móviles de caudales específicos. Caso de la sección del Túnel Subfluvial "Hernandarias" (km 603) (Toniolo y otros, 1999).

Luego de calcular la profundidad media del thalweg,  $h_t$ , asociada a los anchos respectivos,  $B_t$ , se ajustaron funciones empíricas vinculando las dimensiones geométricas del thalweg con las del cauce principal, a través de las relaciones ancho / profundidad  $B_t / h_t$  vs.  $B_0 / h_0$ , y  $B_t / h_t$  vs.  $B_0 / h_0$ , donde el subíndice 0 identifica los valores medios de ancho y de profundidades del río referidas al 0 m de los hidrómetros locales (Figuras 4.14. y 4.15.).

**Figura 4.14.** Relaciones  $B_i / h_o$  versus  $B_o / h_o$  en ensanchamientos (recta superior), y estrechamientos, confluencias y expansiones (recta inferior) (Toniolo y otros, 1999).



**Figura 4.15.** Relaciones  $B_i / h_i$  versus  $B_o / h_o$  en ensanchamientos (recta superior), y estrechamientos, confluencias y expansiones (recta inferior) (Toniolo y otros, 1999).



Como se advierte en esas figuras, los datos propios de los ensanchamientos se agrupan separados de los correspondientes a las secciones emplazadas en los tramos más angostos del cauce o sus inmediaciones. Las funciones ajustadas a ambos grupos de datos produjeron

coeficientes de correlación  $r$  superiores a 0,88. Los comentarios o conclusiones que permite el análisis de este conjunto de ecuaciones son varios, aunque por razones de espacio se expondrán los dos más básicos. En primer lugar, ellas permiten el cálculo del ancho y la profundidad media del thalweg del Paraná para una sección dada, una vez que las dimensiones homólogas del cauce al 0 m son conocidas para el sector. No existen antecedentes sobre una posibilidad de cómputo semejante para cauces aluviales, a nivel internacional. En segundo lugar, las relaciones diferenciadas encontradas para unidades ensanchadas y estrechas del río, están sugiriendo que los procesos de transformación morfológica (i.e., erosión y sedimentación de márgenes y del lecho) en tales tipos de tramo no son necesariamente los mismos a través del tiempo, por lo que observaciones extraídas del análisis de un sector ensanchado dado, por caso, no son linealmente extrapolables a las partes angostas adyacentes. Esto último fue advertido, también empíricamente, en FICH (1997a), mediante la evaluación de las mediciones de diversos parámetros morfológicos del Paraná en los subtramos sucesivos entre los km 616 – 612 y km 612 – 602, cuyos valores medios se reproducen en el Cuadro 4.17., explicado más adelante. Vale aclarar que Drago, en su estudio de 1977, ya había señalado a nivel semicuantitativo el distinto comportamiento esperable en las dos unidades morfológicas fundamentales del cauce principal del Paraná.

Las dimensiones de  $h_1$  obtenidas a partir de las ecuaciones de las relaciones de ancho / profundidad se utilizaron para definir el coeficiente  $I^{1/2}/n$  ( $I$  : pendiente de energía;  $n$  : coeficiente de rugosidad de Manning) en el área del thalweg, determinado mediante la ecuación de Manning para cada aforo. Este coeficiente refleja la capacidad de conducción de un canal (natural o artificial), encontrándose en el caso que se analiza valores promedio de 0,185 y 0,236, en las zonas del thalweg localizadas en estrechamientos y ensanchamientos, respectivamente.

Debe destacarse que tales promedios son prácticamente idénticos a los registrados en las secciones completas de ambas zonas morfológicas del río (0,195 y 0,221), y que, en todos los casos, los desvíos estándar,  $\sigma$ , asociados no fueron mayores que 0,039 (Toniolo y otros, 1999).

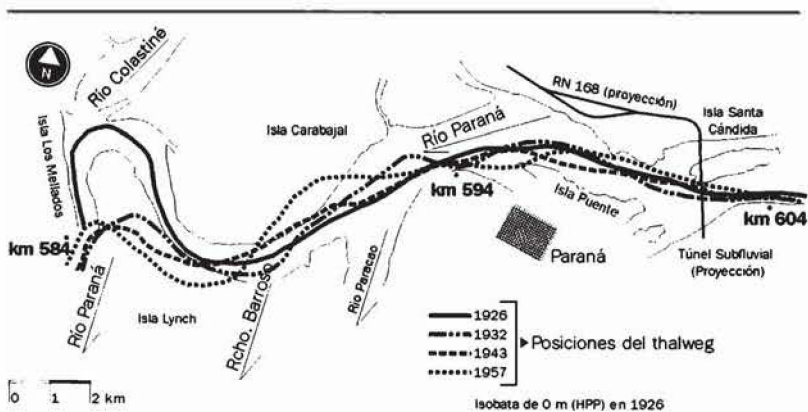
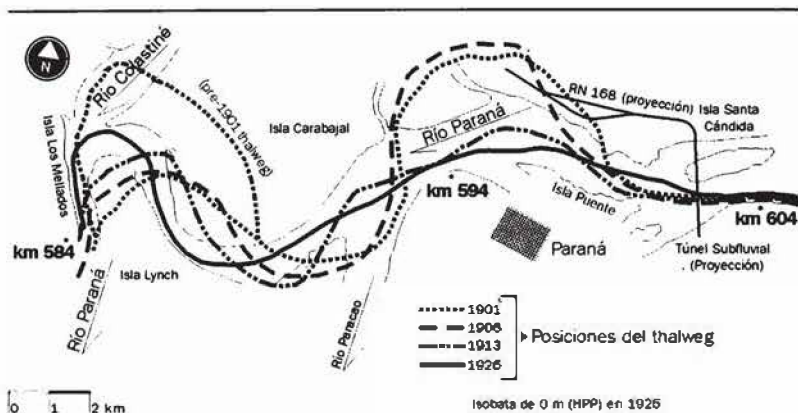
La similitud de cifras medias indicada en los dos párrafos previos revela que las características hidráulicas promedio del escurrimiento concentrado en el thalweg condicionan marcadamente a las de la sección entera del río.

#### **Divagaciones del thalweg y cambios morfológicos del cauce**

La influencia del thalweg en las modificaciones del cauce principal a corto y largo plazo ha sido evaluada de diferentes modos. Oportunamente se hizo mención a las rectificaciones de meandros del thalweg con los ejemplos de las Figuras 4.3., 4.4.a y 4.9., seguidas por el relleno sedimentario de

las ondas abandonadas en los casos de la Figura 4.9. (área de la fotografía) y la Figura 4.4.b. En este encuadre, la Figura 4.16. contiene la evolución más detallada de la faja del thalweg entre los km 604 y 584, basada en las batimetrías secuenciales elaboradas por la DNCPyVN entre 1901 y 1957.

**Figura 4.16.**  
Divagaciones del thalweg del río Paraná entre los km 604 - 584. Período: 1901 - 1957 (modificado de FICH, 1998).



De la misma manera que en las figuras mencionadas, es posible apreciar en la Figura 4.16. la naturaleza meandriforme del thalweg en el sector, y varios de los procesos dinámicos característicos de ese tipo de corrientes.

Un parámetro que permite valorar fácilmente esos movimientos es la sinuosidad del thalweg,  $P_c$ , que expresa la relación entre su longitud real y la mínima que podrá tener en un tramo dado (i.e., longitud referida a una línea recta). Para el caso ilustrado por la Figura 4.16., la evolución de  $P_c$  aparece en el Cuadro 4.11., en tanto que el Cuadro 4.12. contiene las cifras de ese parámetro medido entre los km 666 - 606 (Pto. Curriembre - Aguas Corrientes), y los km 533 - 480 (Pto. Diamante - Gaboto).

| Año  | $P_t$ |
|------|-------|
| 1901 | 1,473 |
| 1906 | 1,469 |
| 1913 | 1,152 |
| 1918 | 1,133 |
| 1926 | 1,166 |
| 1928 | 1,094 |
| 1932 | 1,099 |
| 1938 | 1,094 |
| 1943 | 1,054 |
| 1946 | 1,036 |
| 1951 | 1,073 |
| 1957 | 1,043 |
| 1966 | 1,084 |
| 1984 | 1,109 |
| 1988 | 1,120 |
| 1990 | 1,166 |

**Cuadro 4.11.**  
Evolución de la sinuosidad del thalweg ( $P_t$ ) del río Paraná entre Aguas Corrientes (km 606) y las islas Lynch-Paciencia (km 584) (FICH, 1997a).

| Año  | $P_t$ (km 666 - 606) | $P_t$ (km 533 - 480) |
|------|----------------------|----------------------|
| 1908 | 1,19                 | 1,29                 |
| 1913 | 1,20                 | 1,29                 |
| 1918 | 1,19                 | -----                |
| 1922 | 1,18                 | -----                |
| 1928 | -----                | 1,32                 |
| 1936 | 1,15                 | 1,38                 |
| 1943 | 1,14                 | 1,27                 |
| 1964 | -----                | 1,18                 |
| 1984 | 1,22                 | -----                |
| 1989 | 1,24                 | -----                |
| 1994 | 1,27                 | -----                |

**Cuadro 4.12.**  
Registros de sinuosidad del thalweg ( $P_t$ ) del cauce principal entre Pto. Curtiembre (km 666) - Aguas Corrientes (km 606), y Pto. Diamante (km 533) - Pto. Gaboto (km 480) (FICH, 1997a; 1998).

A pesar de la variedad de rangos de  $P_t$  propios de cada zona del río, existen un par de aspectos comunes en la evolución del parámetro en el Paraná, discernibles desde ambos Cuadros: por un lado, los cambios bruscos de sinuosidad corresponden a disminuciones de la longitud del thalweg debidas a rectificaciones de ondas individuales, que ya han sido



referidas, y que pueden apreciarse fácilmente en las Figuras 4.3., 4.4., 4.9. y 4.16. Por otro lado, los mínimos valores de  $P_i$  en los tres sectores ocurrieron entre las décadas del '40 y del '60, paralelamente al episodio de caudales dominantes bajos registrados en la centuria. De esta forma, el conjunto total de medidas de  $P_i$  mostrado refleja la suma de las dos dinámicas (y escalas) de evolución propias del cauce principal: una de ellas vinculada con el desarrollo normal de meandros del thalweg, de influencia local y determinada por factores hidráulico-sedimentológicos de la corriente, y la otra ligada a la evolución de trenes o cadenas de varios meandros a la escala de tramo largo, condicionada por la variable hidrológica del caudal dominante, y su comportamiento en el siglo.

En ambos casos, los modos de cambio de posición del thalweg no son diferentes, y pueden encuadrarse dentro de la sistemática propuesta en FICH (1997a, 1998) y Ramonell y otros (1999), donde se destaca que sus desplazamientos en la centuria fueron idénticos a los descriptos para corrientes meandriformes típicas, de cauce no dividido (sintetizadas, por ejemplo, por Brice; Schumm, 1985). Así, el mecanismo característico de migración continua es aquél de extensión de una onda del thalweg, o sea, el crecimiento en la amplitud del meandro en un ensanchamiento, sin cambios significativos en la longitud de onda, tal como lo ilustra la Figura 4.16. En virtud de este tipo de deriva, las máximas tasas de erosión se localizan en la parte media de las márgenes cóncavas (cercanas al ápice de las ondas; Figura 4.6.b), mientras que las costas opuestas pueden permanecer sin modificaciones sensibles, ya sea por sedimentación o por erosión.

También fue registrada la migración o desplazamiento aguas abajo del ápice de meandros del thalweg (p.e., km 480 de la Figura 4.9.; Figura 4.16.), sin que ocurrieran, en todos los casos, variaciones apreciables de la longitud de onda. El corrimiento aguas abajo de las márgenes del río relacionado con la traslación de ondas parece tener menor frecuencia e intensidad que las variaciones asociadas con los cambios de amplitud.

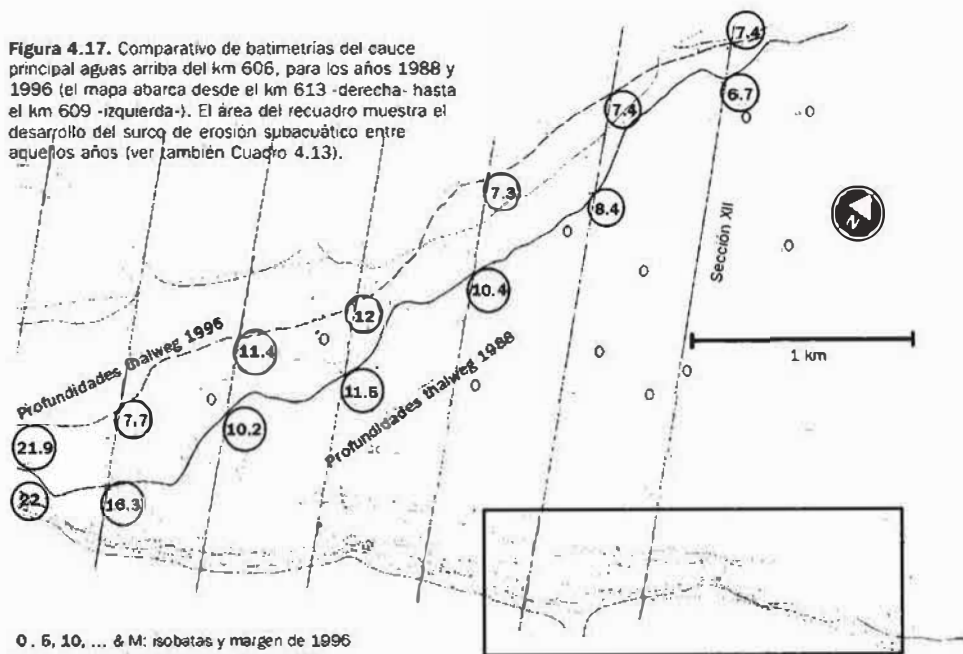
Además, se identificaron dos formas distintas de rectificaciones de meandros del thalweg: una de ellas denominada "rectificación subaérea" ("subaerial chute cut-off") por Ramonell y otros (1999), en la que la nueva faja profunda es erosionada desde el nivel de la planicie aluvial (Figura 4.3.), y que corresponde al mecanismo ordinario de corte por desborde de los ríos meandriformes, mientras que la segunda fue llamada "rectificación subacuática". En ésta, el nuevo thalweg se desarrolla en el propio lecho del río, en un lugar previamente ocupado por bancos de arena centrales o laterales del cauce. Este proceso se inicia con la aparición de una depresión lineal estrecha y muy profunda en el fondo del río, que comienza a desarrollarse desde una hoya aislada en la porción inferior de un ensanchamiento del cauce. Con el tiempo, este canal o surco erosivo



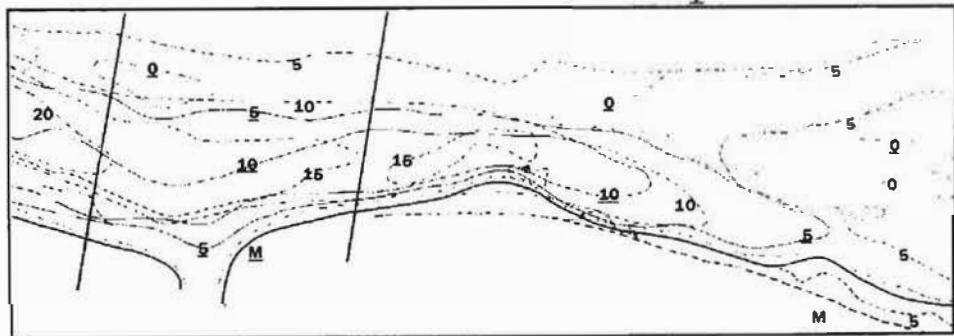
progresa hacia aguas arriba sin cambiar su morfología, mediante un mecanismo que semeja el movimiento retrocedente de la cabecera de una cárcava; la depresión se jerarquiza captando fracciones crecientes del caudal circulante, hasta transformarse, finalmente, en el nuevo thalweg sobre un sector o sobre la longitud entera de un ensanchamiento.

En FICH (1997a) se estudió un fenómeno de este tipo aguas arriba del km 606 (Figura 4.17.), donde un canal profundo se desarrolló a expensas de la erosión del gran banco existente en ese ensanchamiento, evolucionando del modo señalado en el Cuadro 4.13. Por su parte, en el mapa de 1906 de la Figura 4.4.a, las áreas bajo los 5 y 10 m justo frente al km 594 denuncian la presencia del surco erosivo por el que se ubicará el thalweg luego (ver mapa de 1913 de la misma figura).

**Figura 4.17.** Comparativo de batimetrías del cauce principal aguas arriba del km 606, para los años 1988 y 1996 (el mapa abarca desde el km 613 -derecha- hasta el km 609 -izquierda-). El área del recuadro muestra el desarrollo del surco de erosión subacuático entre aquellos años (ver también Cuadro 4.13).



0, 5, 10, ... & M: isobatas y margen de 1996  
 0, 5, 10 & M: isobatas y margen de 1988



**Cuadro 4.13.**

Evolución del surco de erosión subacuático mostrado en la Figura 4.17. Período: 1960 - 1996 (modificado de FICH, 1997a).

| Año                 | Ancho del surco definido por la isobata de -5 m (m) | Ancho del surco definido por la isobata de -10 m (m) | Longitud del surco <sup>(1)</sup> definido por la isobata de -5 m (m) | Longitud del surco <sup>(1)</sup> definido por la isobata de -10 m (m) | Profundidad máxima del surco (m) |
|---------------------|---|--|---|--|----------------------------------|
| 1960 <sup>(2)</sup> | no existe   | no existe  | no existe   | no existe  | no existe                        |
| 1972                | 175   | 100  | aprox. 1.500  | aprox. 1.600   | 10 a 16                          |
| 1988                | 175   | 100  | 950   | 575  | 10 a 15                          |
| 1996                | 300   | 575  | más de 2.000  | 715  | 15 a 20                          |

<sup>(1)</sup> Aguas arriba de la Sección XII en la Figura 4.17.<sup>(2)</sup> En 1960 la zona estaba ocupada por un banco de arena lateral.

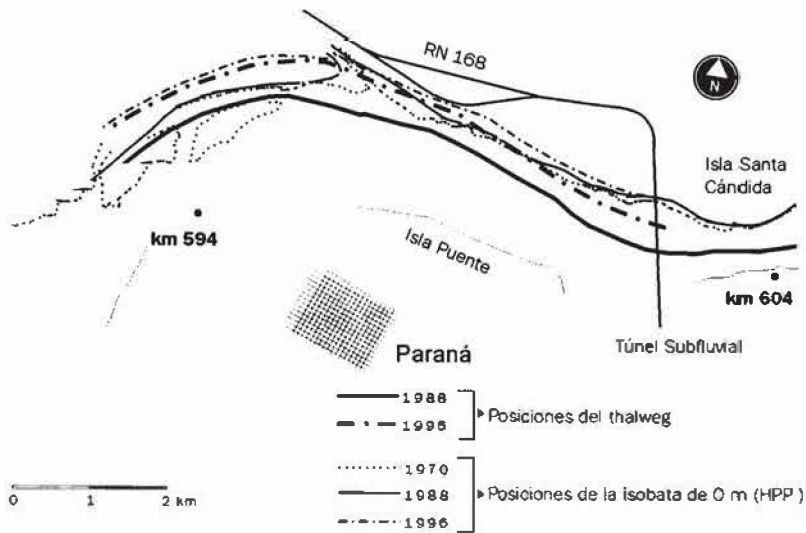
Cabe destacar que Parody y Strucco (1975) describieron mecanismos similares a los de la "rectificación subacuática" en el Paraná Inferior, sugiriendo que los mismos eran consecuencia directa de la reducción de la pendiente del cauce vinculada con el progresivo incremento en la amplitud de una onda del thalweg. En tal sentido, el examen de la evolución temporal de las distintas magnitudes presentadas en los Cuadros 4.10. a 4.12., todas las cuales reflejan fenómenos de exageración o rectificación de meandros del thalweg, permite visualizar una asociación entre los modos de divagación del thalweg que han sido descriptos hasta aquí, y las variaciones del caudal dominante a lo largo del siglo.

Por otro lado, la Figura 4.18. consigna las ubicaciones recientes (1988 - 1996) del thalweg en la zona frente a la ciudad de Paraná, junto con las posiciones de la línea del 0 m asociada a margen derecha para esos años, y la de 1970. Allí se aprecia con claridad que los desplazamientos del thalweg resultan en corrimientos en el mismo sentido de la isobata del 0 m. Con más precisión, el Cuadro 4.14. contiene valores sobre las tasas de migración de ambos elementos en el área de la Figura 4.18. desde 1957, con valores promedios obtenidos desde 15-20 secciones de medición equiespaciadas en la zona.

**Cuadro 4.14.**  
Tasas medias anuales de desplazamientos del thalweg del Paraná, y de la isobata del 0 m asociada a margen derecha, en el tramo entre los km 604 y 594. Período 1957 - 1996 (FICH, 1998).

| Período   | Thalweg (m/año) | Isobata 0 m margen derecha (m/año) |
|-----------|-----------------|------------------------------------|
| 1957-1966 | 15,6            | -0,1                               |
| 1966-1970 | 46,6            | 19,9                               |
| 1970-1975 | 24,3            | 10,5                               |
| 1975-1988 | -13,2           | 3,1                                |
| 1988-1996 | 49,6            | 16,4                               |

(-) Migración hacia la margen izquierda.



**Figura 4.18.** Exageración de la onda del thalweg frente a la ciudad de Paraná (Período: 1988 - 1996), y desplazamientos correlativos de la isobata de 0 m asociada a margen derecha.

De acuerdo con los datos disponibles, lo anterior parece ser aplicable también a la evolución de los bancos del cauce. En el ensanchamiento parcialmente mostrado por la Figura 4.17., por ejemplo, el banco de arena que ocupó la mitad izquierda del río en gran parte del siglo XX, acompañó el desplazamiento lateral del thalweg, el cual estuvo ubicado próximo a la margen derecha del subtramo. Allí, el thalweg divagó hacia la derecha en los últimos cien años, excepto en algún momento entre 1949 y 1960. Esto último está indicado con el signo (-) en el Cuadro 4.15., el que incluye, asimismo, las migraciones del borde del banco en contacto con la faja de máximas profundidades.

#### Cuadro 4.15.

Relaciones entre los desplazamientos del thalweg y los del talud del banco de arena adyacente <sup>(1)</sup>, en el ensanchamiento del cauce principal entre los km 619 - 606 <sup>(2)</sup> (FICH, 1997a).

| Período   | Desplazamiento neto del thalweg al fin del período (m) | Desplazamiento neto del borde del banco al fin del período (m) | Relación deriva del thalweg / desplazamiento del borde del banco |
|-----------|--|--|--|
| 1921-1935 | 210  | 90   | 2,3 : 1  |
| 1935-1949 | 240  | 240  | 1 : 1  |
| 1949-1960 | -560   | -420   | 1,3 : 1  |
| 1960-1972 | 820  | 680  | 1,2 : 1  |
| 1960-1988 | 350  | 390  | 0,9 : 1  |
| 1988-1996 | 290  | 360  | 0,8 : 1  |

(-) Migración hacia la margen izquierda.

(1) Borde del banco definido por la isobata de -5 m (referida al 0 m en la escala del Pto. de Paraná).

(2) Mediciones realizadas entre los km 616 y 613.

### Otros cambios morfológicos progresivos vinculados con las variaciones del caudal dominante

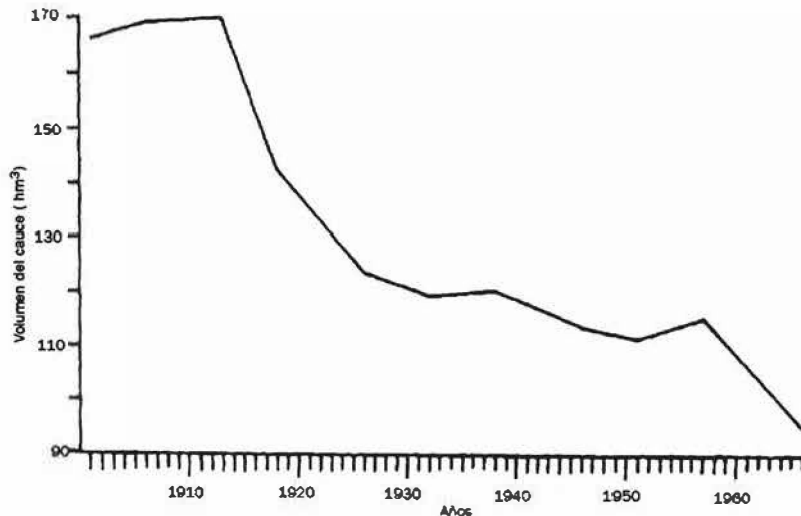
Mediante cuadros y figuras se ha mostrado que ciertos cambios del río Paraná entre las décadas del '30 y del '60 fueron el resultado de un proceso generalizado de sedimentación aluvial, originado en la disminución del caudal formativo del cauce, incidiendo en la dinámica de erosión y transporte de sedimentos por el thalweg.

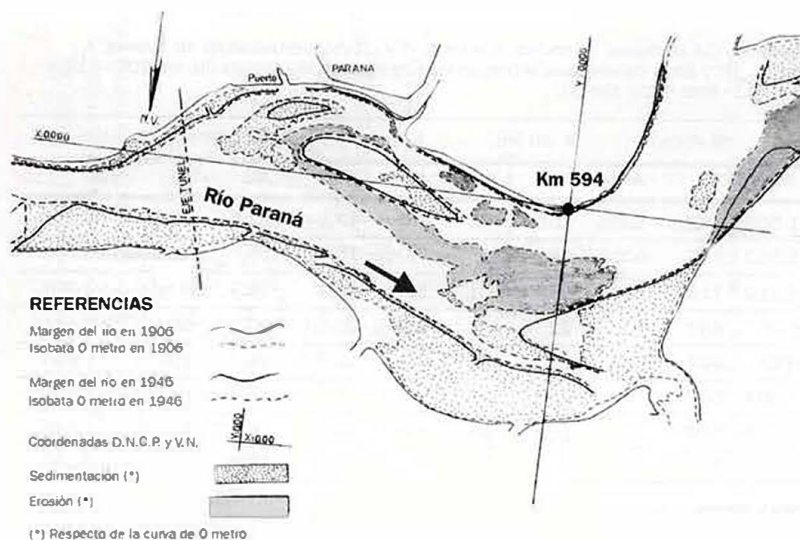
Este evento de depositación/reducción del cauce luego de 1930 aparece manifestado en la disminución en área de isobatas profundas (-5 m, por ejemplo), y la ampliación simultánea de las partes más someras del río, desde la línea del 0 m hacia arriba (Cuadros 4.4. y 4.16.). La situación entre los km 606 - 594 del Cuadro 4.4., se ilustra parcialmente en la reducción del volumen del cauce mostrada por la Figura 4.19., y en el comparativo de áreas de erosión / sedimentación de la Figura 4.20.

**Cuadro 4.16.**  
Evolución de las áreas debajo de las isobatas de 0 y 5 m del río Paraná, entre los km 655 - 594 (FICH, 1997a).

| Año  | Área al 0 m (km <sup>2</sup> ) | Área a los -5 m (km <sup>2</sup> ) |
|------|--------------------------------|------------------------------------|
| 1908 | 73,3                           | 50,3                               |
| 1913 | 79,5                           | 51,0                               |
| 1918 | 76,0                           | 54,5                               |
| 1922 | 78,8                           | 53,7                               |
| 1936 | 73,1                           | 42,8                               |
| 1943 | 73,0                           | 41,5                               |

**Figura 4.19.**  
Evolución del volumen del cauce del río Paraná entre Aguas Corrientes y la isla Lynch, entre 1901 y 1966 (reproducida de Drago, 1977). (El comienzo de la sedimentación en el cauce antes de la década del '30 estaría vinculado con el proceso local de corte del thalweg / relleno del brazo abandonado expuesto en Figura 4.4.a-b).





**Figura 4.20.** Cambios por erosión / sedimentación del río Paraná asociados a las variaciones en volumen del cauce de la Figura 4.19. (Amsler y otros, 1998).

En contraposición con lo anterior, la tendencia creciente del caudal dominante desde los años '70 hasta la actualidad, ha intervenido claramente en los parámetros considerados, cuyas magnitudes incrementadas (Figura 4.6.b y Cuadro 4.10., por ejemplo) son la consecuencia de un proceso generalizado de erosión donde, de acuerdo con las evidencias colectadas, las dimensiones actuales del cauce no alcanzaron todavía, valores acordes con los que imponen los caudales formativos calculados para las últimas décadas (FICH, 1997a). Esto se desprende, por caso, de la evolución temporal de diversos parámetros evaluados en el área entre el Túnel Subfluvial e isla Urquiza, los que se han reunido en el Cuadro 4.17. (ver también Cuadros 4.12. y 4.15.).

En este escenario, donde la tendencia actual del Paraná es la de restablecer valores morfológicos similares, o incluso mayores, que los del primer tercio del siglo (Cuadros 4.11. y 4.12.), no deja de ser sugestivo cómo el cauce tiende a reproducir (en sentido amplio, obviamente) situaciones morfológicas pasadas, como la que puede extrapolarse de la Figura 4.21. Este plano reproduce las ubicaciones extremas de la isobata del 0 m asociada a la margen derecha del Paraná en el tramo Aguas Corrientes – Paso Tragadero (km 606 – 584), indicando, en cada uno de los segmentos, el año en que se logró esa posición. También aparece dibujada la traza del 0 m de 1996. Allí es posible visualizar que la gran mayoría de los segmentos (15 sobre un total de 19) que componen la envolvente de máxima transgresión dentro de la planicie aluvial sobre margen derecha pertenecen a ubicaciones del 0 m en el primer tercio del siglo, por lo que la envolvente misma coincide, temporalmente, con el período de caudal dominante elevado de la serie analizada.

**Cuadro 4.17.**

Evolución de valores promedio (28 secciones) de anchos, B (a los 0, -5 y -10 m), profundidades del thalweg,  $h_t$ , profundidades máximas,  $h_{máx}$ <sup>(1)</sup>, y áreas transversales al 0 m, en los subtramos de Isla Urquiza (IU, km 616 - 612) y Aguas Comientes (AC, km 612 - 602) (FICH, 1997a).

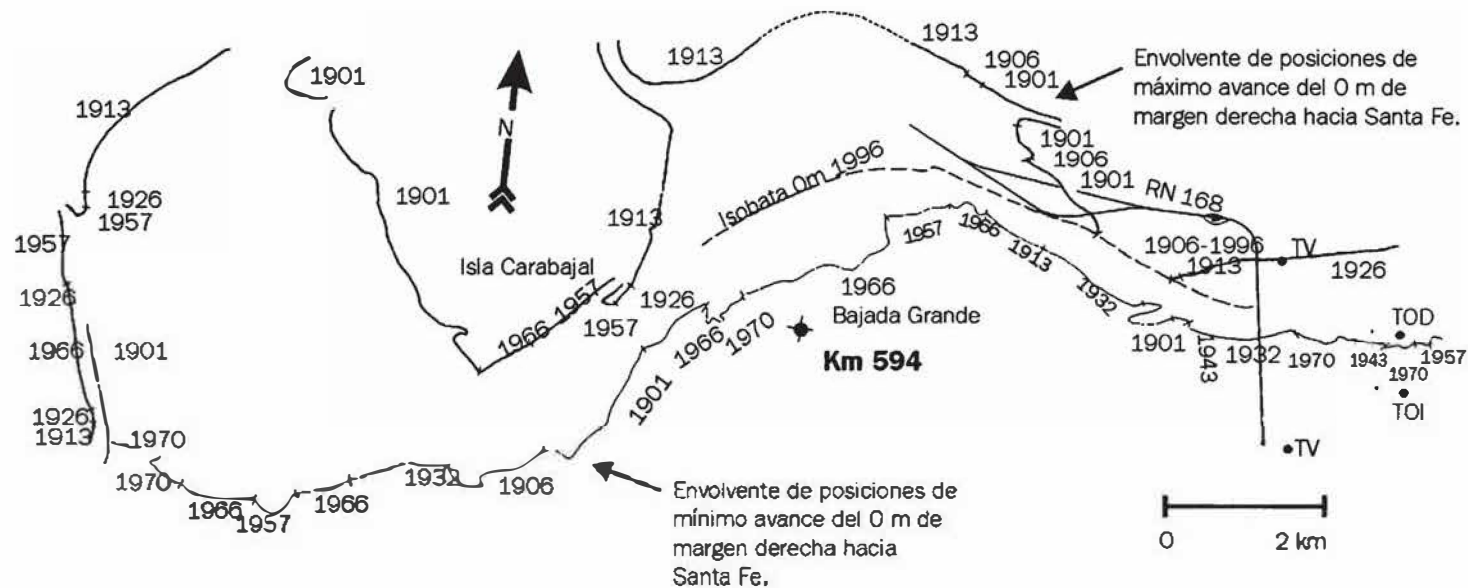
| Año  | B 0 (m) |       | B -5 (m) |       | B -10 (m) |     | $h_t$ (m) |      | $h_{máx}$ (m) | Sección (m <sup>2</sup> ) |        |
|------|---------|-------|----------|-------|-----------|-----|-----------|------|---------------|---------------------------|--------|
|      | IU      | AC    | IU       | AC    | IU        | AC  | IU        | AC   | AC            | IU                        | AC     |
| 1905 | 2.097   | 1.566 | 1.018    | 1.229 | 101       | 475 | 9,6       | 12,5 | 12,5          | 12.678                    | 14.217 |
| 1921 | 2.115   | 1.512 | 702      | 906   | 44        | 336 | 9,0       | 15,5 | 15,5          | 10.203                    | 11.760 |
| 1935 | 1.564   | 1.112 | 718      | 792   | 178       | 501 | 11,5      | 16,9 | 16,9          | 8.964                     | 12.226 |
| 1949 | s/d     | 693   | 687      | 595   | 22        | 434 | 8,9       | 20,0 | 20,0          | s/d                       | 10.141 |
| 1960 | 1.975   | 980   | 494      | 733   | 75        | 453 | 7,3       | 19,7 | 19,7          | 7.973                     | 11.696 |
| 1972 | 2.247   | 1.084 | 697      | 781   | 93        | 421 | 9,2       | 18,7 | 18,7          | 10.568                    | 11.591 |
| 1988 | 1.979   | 1.104 | 519      | 792   | 117       | 439 | 8,3       | 15,3 | 14,6          | 8.395                     | 11.189 |
| 1996 | s/d     | 1.012 | s/d      | 728   | s/d       | 430 | s/d       | 14,6 | 16,8          | s/d                       | 10.387 |

(1) media de las profundidades máximas en la sección.

De igual modo, la integral de máximo desplazamiento hacia las costas opuestas (de la ciudad de Paraná y Bajada Grande) incluye, principalmente, a porciones (17 sobre 22) de la traza del 0 m de la época de menor caudal morfológico en el Paraná, entre 1932 y 1969. La línea correspondiente a 1996 se sitúa en una posición intermedia, aunque no equidistante, de ambas envolventes, y en un tramo se sobrepone a la traza de máxima transgresión hacia Santa Fe en donde se ubicó el 0 m en 1906.

A partir de lo expresado para esa figura, es factible una lectura "dinámica" de las líneas rojas en la Figura 4.1., tanto para interpretar sucesos del pasado, como para ser aplicada con fines generales de predicción morfológica a corto y mediano plazo. En el primero de los casos, un rasgo significativo de la dinámica de exageración, migración y corte de las ondas del thalweg, está vinculado con la permanencia temporal de la ubicación geográfica de los tramos ensanchados y angostos del cauce. En tanto que Iriondo (1988) ha afirmado que estos elementos no variaron su posición en el siglo, Drago (1977) vinculó los estrechamientos del Paraná con los "puntos de control primario" investigados por Chein (1961: en Drago, 1977) en el río Amarillo, sugiriendo, además de su mayor estabilidad en planta, la posibilidad de que son los sectores angostos del río los que controlan su morfología. La comparación entre la traza de la margen actual y antigua (en rojo) del cauce en la Figura 4.1., permite ejemplificar situaciones que se examinaron en las batimetrías de detalle producidas por la DNCPyVN: así, fueron detectadas conversiones de ensanchamientos a estrechamientos (o viceversa) en el transcurso del siglo, como las ocurridas inmediatamente aguas arriba del km 810, o las de los km 757, 520, 500 y 490. Otros sectores ensanchados del río en la actualidad aparecen





TV: Torre Ventilación Túnel Subfluvial. TOD, TOI: Torres de alta tensión.

**Figura 4.21.**

Envolventes de posiciones de máximo y mínimo avance de la isobata del 0 m asociada a margen derecha, en el siglo XX. Tramo entre los km 604 (Torres de alta tensión) y 584 (FICH, 1998).

desfasados (hacia aguas abajo) respecto de sus ubicaciones previas, como es el caso de los que se encuentran arriba de los km 757 y 727, por ejemplo. Con todo, existen otras zonas del tramo de estudios en las que se cumple lo afirmado por Drago (1977) e Iriondo (1988), donde la posición de esos elementos no ha cambiado en los últimos 150 años, siendo el sector entre los km 666 y 594 el mejor exponente de ello.

### **Cambios morfológicos temporarios asociados con el paso de crecientes**

La finalidad de este punto es que el lector pueda discernir entre aquellas modificaciones del cauce que marcan una tendencia a mediano plazo (10 a 100 años), como las expuestas hasta aquí, y otros cambios asociados con la forma del hidrograma a corto plazo, cuyos efectos pueden ser tanto transitorios y reversibles, o con un nivel de permanencia mayor (en este caso, acelerando, atenuando e incluso revirtiendo temporalmente, la evolución a mediano término determinada por los caudales dominantes).

Al primer grupo se asocian las rectificaciones momentáneas del thalweg durante los eventos anuales de crecientes, y sus divagaciones a lo largo de un ciclo hidrológico, como aparecen graficadas para la sección del Túnel Subfluvial Hernandarias (km 603) en la Figura 9.1. (Capítulo 9).

Por su parte, un ejemplo de modificación permanente asociado con el paso de una creciente fue el retroceso local de la margen derecha en unos ca. 600 m en la zona de la Sección XII de la Figura 4.17., producido durante el evento extraordinario de 1983 (FICH, 1997a). Esta ampliación “súbita” del ancho efectivo del cauce en tal sector estuvo luego compensada por el avance del banco de arena allí existente, que aumentó su longitud en el extremo de aguas abajo a un ritmo que no tuvo jamás en la centuria, de acuerdo con las magnitudes contenidas en el Cuadro 4.3. (período 1972 – 1988).

Otro ejemplo de alteración permanente es la probable aceleración de la rectificación del thalweg que se ilustra en la Figura 4.4.a, atribuible a la creciente de 1905 (la mayor del siglo XX hasta los grandes eventos de las décadas del ‘80 y del ‘90; Capítulo 3). Obsérvese en la figura, para 1906, la notable reducción del ancho en la zona media del gran banco central y el avance aguas arriba, ya comentado, del surco de erosión subacuático frente al km 594. Es razonable suponer que ambos procesos hayan sido intensificados por la creciente mencionada, ya que en estos casos los ríos rectifican su escurrimiento, acortando camino a fin de ganar energía suficiente para transportar los grandes volúmenes líquidos y sólidos impuestos. El resultado de todo ello es que entre 1906 y 1913, se produjo la rectificación del thalweg con la brusca disminución de sinuosidad que se aprecia en el Cuadro 4.11., entre ambos años.



Finalmente, con 14 aforos disponibles realizados en la sección de Curtiembre (km 655) entre enero de 1971 (caudal aforado: 16.963 m<sup>3</sup>/s) y noviembre de 1972 (caudal de 18.052 m<sup>3</sup>/s), se obtuvieron las ecuaciones elementales de geometría hidráulica, analizando la velocidad, U, el ancho, B, y la profundidad, h, en función de las variaciones del caudal. Estas resultaron en lo siguiente:

$$U = 0,0042 Q^{0,57} \quad ; \quad r^2 = 0,99 \quad (4.1)$$

$$B = 277,27 Q^{0,16} \quad ; \quad r^2 = 0,74 \quad (4.2)$$

$$h = 0,8657 Q^{0,27} \quad ; \quad r^2 = 0,94 \quad (4.3)$$

$$Q_{\text{inst.mín.}} = 11.695 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (noviembre, 1971);}$$

$$Q_{\text{inst.más.}} = 18.052 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (noviembre, 1972).}$$

(Obsérvese que la suma de los exponentes y el producto de los coeficientes de las tres ecuaciones es igual a 1, como exige la condición de continuidad del escurrimiento).

De las tres ecuaciones de geometría hidráulica expuestas, se desprenden las propiedades sobresalientes del río Paraná en lo que hace a la variación del caudal a corto plazo en esa sección: la mayor modificación ocurre en la velocidad, que varía en proporción como algo más que la raíz cuadrada del caudal, en tanto que la profundidad media sólo se modifica con la raíz cuarta del caudal, parte de la cual es consecuencia del aumento en los niveles hidrométricos del río, y no de la profundización del lecho. Así, el significado morfo-hidráulico de estas dos propiedades combinadas, a la salida de un estrechamiento como el de Curtiembre (y suponiendo que la pendiente hidráulica en este tipo de unidad morfológica no varía mayormente; FICH, 1997a), es la disminución de la rugosidad general del lecho al paso de una creciente, una de las temáticas tratadas en detalle en el Capítulo 5.

Por su parte, el ancho del cauce sólo se modifica con la raíz sexta del caudal, producto de la forma "en caja" o rectangular típica del río Paraná en su tramo medio, en el que mantiene una relación ancho / profundidad normalmente mayor a 150.

## Conclusiones

De todo lo expuesto en cuanto a la geomorfología del cauce principal del río Paraná, se han agrupado a modo de conclusiones una serie de aspectos que, a criterio de los autores, constituyen la esencia de la temática abordada. Se ha tratado con ello de finalizar con una síntesis actualizada acerca de esta atrapante faceta del río, intentando destacar los recientes

logros alcanzados y lo mucho que aún resta por hacer, sin descuidar cuestiones elementales que es imprescindible tener en cuenta, para que ese “resto por hacer” pueda realmente encararse.

1. La complementación de diversas fuentes cartográficas entre las que se cuentan: los mapas batimétricos del cauce principal al estilo de los elaborados por la DNCPyVN desde principios de siglo hasta 1995; los acotamientos del Instituto Geográfico Militar (IGM) en el ambiente isleño y los documentos fotográficos aéreos, convencionales o satelitales, es el modo más adecuado de llevar adelante estudios morfológicos con cierto grado de profundidad y detalle. En consecuencia, es preciso destacar con toda la contundencia que la situación merece, el seguro perjuicio que ocasionará a futuro, la interrupción de los relevamientos batimétricos sistemáticos del cauce principal, sobre todo cuando se considera la creciente presión antrópica presente y venidera que deberá soportar el río. La preservación de estos registros esenciales para el conocimiento del comportamiento fluvial, debe acompañarse con la continuidad de las mediciones de los datos hidráulicos (aforos líquidos, corridas de flotadores, lecturas hidrométricas), y sedimentológicos (muestras de material de fondo y transporte en suspensión, registros de formas de fondo, recopilación de resultados y realización de perforaciones en cauce y llanura aluvial, etc.).

2. En lo referente a los aspectos texturales salientes de los sedimentos que componen el cauce principal del río Paraná y su llanura aluvial, cabe mencionar:

- la excepcional homogeneidad granulométrica y mineralógica de las arenas del cauce principal (Cuadros 4.1. y 4.2., y Figura 4.7.);
- que es posible en lo referente a la planicie aluvial, diferenciar dos tipos de secuencias litológicas en subsuperficie, que coinciden con las áreas modeladas directamente por el cauce principal en tiempos históricos, y con aquellas donde la dinámica predominante ha sido la de inundación, en las áreas insulares o marginales del cauce dentro del valle aluvial. En las primeras, los sondeos han atravesado (desde la superficie del terreno o desde el lecho del río, hacia abajo) suelos arenosos con características sedimentológicas idénticas a las referidas para el material del lecho, mientras que, en las segundas, los materiales granulares yacen debajo de un “manto” de sedimentos limo-arcillosos, por lo común de 4 a 10 m de espesor. En los ensayos normalizados de penetración, el número de golpes,  $N$ , necesario para atravesar las sucesiones sedimentarias de ambos ambientes es de  $N \ll 30$  hasta los  $\approx 14 - 17$  m bajo el nivel de la superficie del valle aluvial (en sitios puntuales, hasta casi los 30 m), en tanto que, debajo de esas profundidades, cambia abruptamente a  $N \gg 30$  (frecuentemente,  $N > 45$ ).

3. La planta del río Paraná puede describirse como una sucesión de tramos ensanchados separados por otros más estrechos y cortos que, además, son más profundos. Entre los km 850 y 480 existen 49 de estos

tipos de tramo. Los elementos geomorfológicos característicos de los sectores anchos son las islas y los bancos de arena, estos últimos libres de vegetación y, en su gran mayoría, sumergidos para los niveles de aguas medias en el tramo (Figuras 4.1. y 4.6.b).

4. Los casos demostrados de sinuosidad del thalweg y, sobre todo, sus modos de deriva lateral continua y sus rectificaciones o cortes de onda reconocidos por doquier en el tramo (ver Figura 4.16. a modo de ejemplo), reafirman la propuesta de que el patrón entrelazado de thalweg meandriforme (tipo 4 de Schumm, 1985; Schumm y otros, 1987) describe mejor que el entrelazado la morfología real (tridimensional) y la suma de procesos de erosión/sedimentación medidos en el río, tal como fuera hecha en FICH (1997a, 1998) y en Ramonell y otros (1999).

5. La tendencia del thalweg a formar meandros es una característica propia del Paraná como gran cauce aluvial, que, desde una perspectiva geomorfológica, no es menos acentuada que la proclividad del río al desarrollo de bancos.

6. Las pendientes medias del terreno en la llanura inundable en igual dirección que la del valle tienen los mismos órdenes de inclinación que las del cauce ( $10^{-5}$ ). Sin embargo, se destaca una interrupción o quiebre de pendiente singular en el sector del A° Leyes, en donde la planicie modelada por el Colastiné está a más de 1 m por encima de los niveles acotados al norte de la misma. Otro resalto similar existe al oeste del km 690. En dirección perpendicular al valle, varias de las pendientes medidas fueron del orden de  $10^{-4}$  y, según el subtramo considerado, dirigidas hacia el cauce principal o en sentido contrario. Una consecuencia de lo descrito es que el nivel de cauce lleno (o previo al desborde) del cauce principal no es constante en la dirección del escurrimiento: mientras que el valle entre los km 640 y 590 comienza a anegarse por encima de una altura hidrométrica en Pto. Paraná,  $H_{pp} = 4$  m, los tramos de las planicies de aguas arriba y abajo ya están inundados en diferente grado para ese nivel del agua (Figura 4.1. a-d).

7. El Cuadro 4.9. pone en relieve la estrecha correspondencia entre la evolución histórica de los caudales “dominantes” (o “formativos”, o “morfológicos”),  $Q_d$ , y medios,  $Q_m$ , en el Paraná como producto de una combinación entre la hidrología y el transporte de sedimentos del lecho, donde los máximos de este último para un tiempo dado (y, de ahí, de modificación morfológica) no tienen que asociarse, necesariamente, al paso de grandes crecientes. Por otro lado, el  $Q_d$  siempre ha sido inferior al caudal de cauce lleno en el sector, cuyo tiempo de recurrencia es, en la actualidad, de 3,3 años (FICH, 1997a). Es importante destacar que las modificaciones referidas en la hidrología del cauce fueron reconocidas por García y Vargas (1998) en la totalidad del sistema fluvial del Paraná, quienes encontraron cambios de tendencia en los años 1917-18, 1943-44 y 1970-72, para la serie

que examinaron (1901-1993). El último, en particular, representó el salto más abrupto y notorio de la secuencia, al punto de que esos autores lo han considerado más indicativo de un cambio climático, que de una simple fluctuación sostenida en el tiempo. De acuerdo con el trabajo de referencia, las evidencias hidrológicas y morfológicas aquí presentadas subrayan el carácter “seco” del lapso 1944 – 1970, y el mucho más “húmedo” (o caudaloso) del período siguiente.

8. Del conjunto de datos expuesto, parece factible concluir que las variables de primer orden que condicionaron los cambios morfológicos en el período de cien años considerado fueron las vinculadas con las variaciones del caudal dominante y la erodabilidad de las márgenes aluviales. Otro tipo de controles, como el direccionamiento o “reflejo” de la corriente ejercido por la traza resistente del valle, sobre una de sus márgenes, a lo sumo acentúan o mantienen un estado de meandricación en sectores localizados del cauce (ver Cuadro 4.10. y Figura 4.12.).

9. Se ha logrado caracterizar racionalmente el thalweg del río (Toniolo y otros, 1999), ajustando funciones empíricas que vinculan su ancho,  $B_t$ , y su profundidad media,  $h_t$ , con el ancho,  $B_o$ , y la profundidad media,  $h_o$ , del cauce completo. Ello constituye una primera verificación de que la faja del thalweg puede concebirse como un escurrimiento concentrado de ancho  $B_t$ , fluyendo dentro de los límites de otro más amplio, correspondiente al cauce principal mismo. Las funciones mencionadas (Figuras 4.14. y 4.15.) permiten, por un lado, el cálculo del ancho y la profundidad media del thalweg del Paraná para una sección dada, una vez que las dimensiones homólogas del cauce al 0 m son conocidas para el sector. En segundo lugar, las relaciones diferenciadas encontradas para unidades ensanchadas y estrechas del río, están sugiriendo que los procesos de transformación morfológica de tales tipos de tramo en el tiempo no son necesariamente los mismos, por lo que observaciones extraídas del análisis de un sector ensanchado dado, por caso, no son linealmente extrapolables a las partes angostas adyacentes.

10. La sinuosidad del thalweg,  $P_t$ , en el río Paraná presenta una variedad de rangos propios según el tramo que se trate. A pesar de ello, los mínimos valores de  $P_t$  medidos ocurrieron entre las décadas del '40 y del '60, paralelamente al episodio de caudales dominantes bajos registrados en la centuria. De esta forma, el conjunto total de cifras de  $P_t$  mostrada en los Cuadros 4.11. y 4.12. refleja la suma de las dos dinámicas (y escalas) de evolución propias del cauce principal: una de ellas vinculada con el desarrollo normal de meandros del thalweg, de influencia local y determinada por factores hidráulico-sedimentológicos de la corriente, y la otra ligada a la evolución de trenes de varios meandros a la escala de tramo largo, condicionada por la variable hidrológica del caudal dominante, y su comportamiento en el siglo.

11. Los desplazamientos laterales del thalweg hacia las márgenes aluviales, resultan en corrimientos en el mismo sentido de esas costas y de las isobatas del 0 m asociadas. De acuerdo con los datos disponibles, lo anterior parece ser aplicable también a la evolución de los bancos del cauce (ver Figura 4.18. y Cuadros 4.14 y 4.15. a modo de ejemplos).

12. No sólo las variaciones en  $P_i$  están vinculadas con los cambios en el caudal dominante. El evento de depositación/reducción del cauce luego de 1930 también está asociado a tal disminución en la hidrología del sistema, lo cual se manifestó en la reducción en área de isobatas profundas (-5 m, por ejemplo), y la ampliación simultánea de las partes más someras del río, desde la línea del 0 m hacia arriba (Cuadros 4.4. y 4.16. y Figura 4.19.).

13. La tendencia creciente del caudal dominante desde los años '70 hasta la actualidad ha influido claramente en los parámetros morfológicos considerados, cuyas magnitudes incrementadas son la consecuencia de un proceso generalizado de erosión donde, de acuerdo con las evidencias colectadas, las dimensiones actuales del cauce no alcanzaron todavía valores acordes a los que imponen los caudales formativos calculados para las últimas décadas. En este escenario, parecería que la tendencia actual del Paraná es la de restablecer valores morfológicos similares, o incluso mayores, que los del primer tercio del siglo.

14. Por último, ha sido posible discernir entre aquellas modificaciones del cauce que marcan una tendencia a mediano plazo (10 a 100 años), y otros cambios asociados con la forma del hidrograma a corto plazo, cuyos efectos pueden ser tanto transitorios y reversibles, o con un nivel mayor de permanencia, en este caso acelerando, atenuando e incluso revirtiendo temporalmente, la evolución a mediano plazo determinada por los caudales dominantes.

### **Agradecimientos**

Los autores desean expresar su agradecimiento al PTC Claudio CARRION de la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables, por facilitar el acceso a los planos batimétricos históricos de los archivos de esa Institución, sin los cuales este trabajo no se hubiera podido realizar. Asimismo extienden su reconocimiento a la Empresa Evaluación de Recursos S.A. (EVARSA), que proporcionó planillas de aforos líquidos, imprescindibles en el diseño del procedimiento para determinar las dimensiones del thalweg del río Paraná. La colaboración del Sr. Darío TABERNIC en la confección de dibujos, gráficos y mapas de esta contribución, se agradece especialmente.

## Reconocimiento

En casi todos los aspectos tratados a lo largo de este Capítulo, el lector habrá advertido que se ha mencionado a la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables (DNCPyVN; Dirección Nacional de Vías Navegables, en la actualidad), como fuente de aporte de información, normalmente clave, para el tratamiento del tema. Ello no es casualidad, ya que este organismo nacional estuvo registrando desde hace casi 100 años el cauce principal del río Paraná y sus tributarios y brazos más importantes. Esos registros se componen fundamentalmente de relevamientos batimétricos detallados, complementados con aforos, corridas de flotadores y lecturas hidrométricas, almacenados en los archivos de los Distritos de la repartición en las ciudades de Corrientes, Paraná, Rosario y Buenos Aires. Pero no solamente existen allí datos sino también estudios plasmados en decenas de informes, publicaciones en congresos, libros, etc., realizados por los ingenieros y técnicos de la Dirección a través de los años, utilizando esas fuentes. Este material constituye un intento, pionero en su momento, de comprender el funcionamiento del “gran río”, y ha sido y es, todavía, de consulta ineludible por parte del especialista que pretende investigar alguna de las facetas del Paraná o solucionar las problemáticas que plantea cuando el hombre trata de interactuar con él.

Parecería obvio mencionarlo, pero aquella inmensa tarea, a tono con la dimensión del objeto involucrado, no debe ser descuidada por el Estado, como lamentablemente ha ocurrido durante los últimos 10 años. Todos aquellos que aprendimos, y seguimos haciéndolo, del legado que comenzaron a construir en los albores del siglo XX los hombres de la vieja Dirección General de Obras Hidráulicas (primer nombre de la DNCPyVN), deseamos fervientemente que la situación se revierta. No hay futuro posible si un Estado desatiende irresponsablemente su función indelegable de conocer, evaluar y sostener un recurso natural riquísimo del que bien podría decirse que es envidia de la mayoría de los países del orbe.

Ese último concepto lo comprendieron muy bien los que trabajaron y lucharon para que la DNCPyVN pudiera cumplir con los objetivos para los cuales fue creada. Así nos dejaron el tesoro invaluable de un siglo de historia detallada del río Paraná. Sin esa historia este Capítulo, y tal vez el libro mismo, no hubieran sido posibles.

## Bibliografía

- Amsler, M. L., H. Toniolo y C. G. Ramonell** (1998). *Evolución morfológica del Río Paraná: criterios metodológicos empleados en el dimensionamiento de la extensión de la cubierta protectora del Túnel Subfluvial Hemandarias*, Anales XVII Cong. Nac. del Agua, Santa Fe, Tomo 3, pp. 386-395.
- Bertoldi de Pomar, H.** (1984). *Estudios limnológicos en una sección transversal del tramo medio del Río Paraná: Caracteres texturales de los sedimentos de fondo*, Rev. Asoc. Cs. Nat. Litoral, 15, pp. 57-58.
- Bird, E.** (1968). "Delta dynamics", en: The encyclopedia of geomorphology, Editado por R. W. Fairbridge, Dowden, Hutchinson & Ross.
- Bridge, J. S.** (1993). "The Interaction between channel geometry, water flow, sediment transport and deposition in braided rivers", en: Braided rivers, Editado por J. L. Best y C. S. Bristow, Geol. Soc. Spec. Publ. N° 75, Geol. Soc. of London.
- Cabral, S.** (1973). *Presencia del efecto Coriolis en el Río Paraná*, Ed. Colmegna, Santa Fe.
- Carson, M. A.** (1984). *The meandering-braided river threshold: a reappraisal*, J. of Hydrol., 73, pp. 315-334.
- Chalov, R. S. y A. M. Alabyan** (1997). *Channel processes and their role in river ecosystems*, Intern. Hydrol. Prog. – UNESCO, Tech. Docum. in Hydrology, N° 10, pp. 216-226.
- Drago, E.** (1973). *Caracterización de la llanura aluvial del Paraná Medio y de sus cuerpos de agua*, Bol. Paranaense de Geociências, N° 31, pp. 31-44.
- Drago, E.** (1977). *Erosión y sedimentación en un tramo del cauce del Río Paraná Medio*, Rev. Asoc. Geol. Arg., T. XXXII, N° 4, pp. 277-290.
- Drago, E.** (1990). *Geomorphology of large alluvial rivers: Lower Paraguay and Middle Paraná*, Interciencia, Vol. 15, N° 16, pp. 378-387.
- Drago, E. y M. L. Amsler** (1998). *Bed sediment characteristics in the Paraná and Paraguay rivers*, Water Internat. (IWRA), 23, pp. 174-183.
- Engelund, F. y E. Hansen** (1967). *A monograph on sediment transport in alluvial streams*, Teknisk Forlag, Copenhagen.
- FICH** (1989). *Estudio hidráulico-sedimentológico del río Paraná en los pasos de navegación Tacuani y Tragadero, Primer Informe Técnico de Avance: "Evolución histórica del cauce del río Paraná en Paso Tacuani"*, Fac. de Ing. y Cs. Hídricas, Univ. Nac. del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- (1993). *Navegación con ultramarinos en el tramo Santa Fe – Puerto San Martín. Factibilidad técnico-económica*, Informe Final, Fac. de Ing. y Cs. Hídricas, Univ. Nac. del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- (1997a). *Análisis de la evolución de los principales parámetros hidráulico-morfológicos que podrían influir sobre el comportamiento futuro de la obra de protección del Túnel Subfluvial Hemandarias*, Informe Final, T. 1-4, Fac. de Ing. y Cs. Hídricas, Univ. Nac. del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- (1997b). *Estudio de prefactibilidad para la navegación en el tramo Puerto Paraná – Puerto Iguazú del río Paraná y del río Paraguay hasta Asunción*, Informe Final, Fac. de Ing. y Cs. Hídricas, Univ. Nac. del Litoral, Santa Fe, Argentina.

- FICH (1998).** *Análisis preliminar de alternativas de ubicación de posibles terminales complementarias del puerto de Santa Fe*, Informe Final, Fac. de Ing. y Cs. Hídricas, Univ. Nac. del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Frenguelli, J.** (1954). *La margen derecha del Río Paraná a la altura del pueblo de Cayastá*, Santa Fe, Notas del Museo, T. XVII, Geol., Nº 65, pp. 377-387.
- García, N. O. y W. M. Vargas** (1998). *The temporal climatic variability in the 'Río de la Plata' basin displayed by the river discharges*, Climatic Change, 38, pp. 359-379.
- Garde, R. J. y K. G. Ranga Raju** (1977). *Mechanics of sediment transportation and alluvial streams problems*, Wiley Eastern.
- Gentill, C. A. y C. M. Arce** (1969). *Descenso de la capa de agua mediante pozos filtrantes profundos para el Túnel Subfluvial Paraná – Santa Fe*, Actas 4ta. Jorn. Geol. Arg., Mendoza, III, pp. 77-85.
- Graf, W. H.** (1970). *Hydraulics of sediment transport*, McGraw-Hill.
- Guzmán, R. D. de** (1998). *Historia argentina del descubrimiento, población y conquista de las provincias del Río de la Plata*, Ed. Emecé.
- Harbor, D. J.; S. A. Schumm y M. D. Harvey** (1994). "Tectonic control of the Indus River in Sindh, Pakistan", en: *The variability of large alluvial rivers*, Editado por S. A. Schumm y B. R. Winkley, ASCE.
- HYTSA** (1987). *Cruce subfluvial del Gasoducto Mesopotámico - Estudios hidráulicos*, Informe Final, Vol. A-E, Gobierno de Entre Ríos.
- Iriondo, M.** (1972). *Mapa geomorfológico de la llanura aluvial del Río Paraná desde Helvecia hasta San Nicolás*, República Argentina, Rev. Asoc. Geol. Arg., T. XXVII, Nº 2, pp: 155-160.
- Iriondo, M. y E. Drago** (1972). *Descripción cuantitativa de dos unidades geomorfológicas de la llanura aluvial del Paraná Medio*, República Argentina, Rev. Asoc. Geol. Arg., T. XXVII, Nº 2, pp. 143-154.
- Iriondo, M.** (1975). *Morfología y sedimentología del Río Colastiné*, Rev. Asoc. Geol. Arg., T. XXX, Nº 4, pp. 349-359.
- (1979). *Origen y evolución del Río Paraná*, Trab. Presentados II Jorn. del Paraná Medio, Santa Fe, pp. d<sub>1</sub>-d<sub>5</sub>.
- (1987). *Geomorfología y Cuaternario de la Provincia de Santa Fe*, D'Orbignyana, Nº 4, pp. 1-54.
- (1988). *A comparison between the Amazon and Paraná river systems*, Mitt. Geol.-Palaont. Inst. Univ. Hamburg, H. 66, pp. 77-92.
- (1993). "El Litoral", en *El Holoceno en la Argentina* (Vol. 2), Editado por M. Iriondo.
- Knighton, A. D. y G. C. Nanson** (1993). *Anastomosis and the continuum of channel pattern*, Earth Surf. Proc. and Landforms, V. 18, pp. 613-625.
- Leopold, L. B.; M. G. Wolman y J. P. Miller** (1964). *Fluvial processes in geomorphology*, W. H. Freeman.
- LH (Laboratorio de Hidráulica)** (1974). *Estudio del sistema fluvial Paraná – Santa Fe*, Convenio SERNAH – INCYTH – PNUD – UNESCO, Vol. I y II.
- Maglianesi, R. E.** (1968). *Fenómenos de salinización en algunos brazos de la margen derecha*



- del Paraná Medio, *Physis*, T. XXVIII, N° 76, pp. 1-13.
- Orton, G. J. y H. G. Reading** (1993). *Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size*, *Sedimentology*, N° 40, pp. 475-512.
- Parody, H. y J. Estruco** (1975). *Racionalización del dragado del Río Paraná. Teoría de las mutaciones periódicas*, IV Reunión Asoc. Latinoamericana de Dragado (ALAD), Buenos Aires, pp. 1-54.
- Pasotti, P.** (1968). *Evidencias morfológicas del levantamiento de la 'Pampa Levantada' en un sector de la llanura santafesino-bonaerense*, Publ. LIII Inst. de Fisiogr. y Geol. Univ. Nac. Rosario, pp. 1-46.
- (1972). *Sobre la presencia del último paleomodelo de red hidrográfica de edad pleistocénica en la llanura de la Provincia de Santa Fe*, Publ. LVII Inst. de Fisiogr. y Geol. Univ. Nac. Rosario, pp. 1-27.
- (1974). *La neotectónica en la Llanura Pampeana. Fundamentos para el mapa neotectónico*, Publ. LVIII Inst. de Fisiogr. y Geol. Univ. Nac. Rosario, pp. 1-28.
- Passeggi, E.** (1996). *Variaciones mineralógicas de los sedimentos de lecho en cauces secundarios de la llanura aluvial del Río Paraná*, *Rev. Asoc. Geol. Arg.*, T. 51, N° 2, pp. 156-164.
- Prestien, F.** (1971). *Hidráulica Fluvial, Escuela de Graduados - Ingeniería Portuaria*, Fac. de Ingeniería, Univ. Nac. de Buenos Aires, T. II, pp. 1-274.
- Ramonell, C. G. y M. D. Montagnini** (1999). *Particularidades del sedimento del lecho en ríos de origen andino y extra-andino de Argentina*, Memorias del Taller Reg. sobre Tópicos Básicos y Aplicados de la Hidráulica Fluvial, Santa Fe, (en prensa).
- Ramonell, C. G.; H. Toniolo y M. L. Amsler** (1999). *Shifting modes of the Paraná River thalweg in its "braided" middle-lower reaches*, *Boletim Goiano de Geografia*, V. 19 (1), pp. 32-37.
- Reineck, H.-E. y I. B. Singh** (1986). *Depositional sedimentary environments*, Springer-Verlag.
- Resossini, J. P.** (1912). *Memoria sobre el Río Paraná*, XIIº Congreso Internacional de Navegación, Filadelfia, pp. 1-151.
- Richards, K.** (1982). *Rivers. Form and process in alluvial channels*, Methuen.
- Schmidl, U.** (1997). *Viaje al Río de la Plata*, Ed. Emecé.
- Schumm, S. A.** (1977). *The fluvial system*, Wiley & Sons.
- (1984). "River morphology and behavior: problems of extrapolation", en: *River meandering*, Editado por C. M. Elliot, ASCE.
- (1985). *Patterns of alluvial rivers*, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 13, pp. 5-27.
- Schumm, S. A.; M. P. Mosley y W. E. Weaver** (1987). *Experimental fluvial geomorphology*, John Wiley & Sons.
- SEN** (1994). *Estadística Hidrológica 1994*, Contrato Secretaría de Energía de la Nación - EVARSA, Tomo I.
- Stangenberg, M. y R. E. Maglianesi** (1968). *Composición química de las aguas de la cuenca del Paraná Medio. Segunda Parte: Río Colastiné*, *Physis*, T. XXVIII, N° 76, pp. 111-121.

**Toniolo, H.A.** (1999). *Las divagaciones del thalweg del río Paraná*, Tesis remitida a la Comisión de Post-Grado de la Fac. de Ing. y Cs. Hídricas, como parte de los requisitos para la obtención del grado de Magister en Ingeniería de los Recursos Hídricos de la Univ. Nac. del Litoral.

**Toniolo, H.; M. L. Amsler y C. G. Ramonell** (1999). *Prediction of the thalweg aspect ratio at a large alluvial river: the Paraná River (Argentina)*, XXVIII Intern. Assoc. Hydraulics Res. Congress, Grass, Austria (en prensa).

**Yalin, M. S.** (1992). *River mechanics*, Pergamon Press.

**Zapata Gollán, C.** (1939). *Agua de la Provincia de Santa Fe*, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Provincia de Santa Fe, Santa Fe.

# 5.

## **TRANSPORTE DE SEDIMENTOS Y PROCESOS FLUVIALES ASOCIADOS**

Mario Luis AMSLER  
y Héctor Hugo PRENDES

# 5.

## **Introducción**

### **Conceptos básicos**

Concepto de corriente aluvial

Variables dimensionales y adimensionales habituales en el estudio de ríos aluviales

La rugosidad del fondo y la división de las tensiones de corte

### **El transporte de sedimentos**

Conceptos sobre transporte de sedimentos en ríos aluviales

Antecedentes destacados sobre cuantificación del transporte

Carga de lavado - La influencia del río Bermejo.

El transporte de fondo

### **Formas de Fondo**

Conceptos generales sobre formas de fondo

Mediciones de formas de fondo

Caracterización geométrica de las formas de fondo en el tramo medio

Valores extremos asociados con las crecientes.

Importancia de la geometría del tramo

Clasificación de formas de fondo y predicción de alturas, longitudes y velocidades de desplazamiento de dunas

### **La resistencia al escurrimiento**

Conceptos generales sobre resistencia al escurrimiento en corrientes aluviales

Aplicaciones de los predictores altura-caudal. Su relación con el factor de fricción

El coeficiente de rugosidad de Manning en el río Paraná

La altura de rugosidad total,  $k_s$ , equivalente de arena

## **Bibliografía**

## Introducción

El transporte de sedimentos en el río Paraná y sus procesos asociados, como la generación de formas de fondo y la influencia de estas últimas en la resistencia al escurrimiento, han sido materia de permanente estudio en la FICH desde fines de la década del '70. En sus comienzos las investigaciones sobre este particular se basaron en información de campo proveniente de otras instituciones, en especial de la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables (DNCP y VN), que ha realizado mediciones desde principios de siglo.

Posteriormente fue posible incorporar a los estudios datos propios obtenidos específicamente para este tipo de investigaciones, o surgidos de servicios encomendados a la Facultad por terceros, que tuvieron como objeto la solución de diferentes problemas fluviales en distintos sectores del río (véanse Capítulos 9 y 10). En los últimos años, a los datos de campo se añadieron los generados como consecuencia de experiencias de laboratorio llevadas a cabo con creciente nivel de sofisticación, diseñadas para examinar en detalle las características del escurrimiento sobre formas de fondo semejantes a las del río Paraná.

En este Capítulo se exponen los resultados más significativos de las investigaciones mencionadas, los cuales constituyen en conjunto un panorama actualizado del estado del conocimiento en el río Paraná sobre estos temas básicos de la Hidráulica Fluvial. Se comienza ofreciendo una breve síntesis de conceptos teóricos necesarios para que el lector no especializado tenga una comprensión cabal de las materias específicas tratadas.

La primera de ellas es el transporte de sedimentos en sí mismo. Se presenta una descripción de las características y evaluación de sus distintas modalidades en el río Paraná (carga de lavado y de fondo), que permite arribar a estimaciones de la carga total de sedimentos que es transportada anualmente hasta el Río de La Plata. Se incluye aquí un detalle de algunos antecedentes disponibles acerca de cuantificaciones realizadas sobre este particular.

Uno de los procesos derivados del transporte de sedimentos en corrientes aluviales, es la deformación del fondo en ondulaciones de diversos tipos. En el caso del río Paraná su lecho está cubierto de dunas de variadas dimensiones según el sector de cauce que se considera y la intensidad de la corriente. Las características geométricas de estas formas, la alteración de esa geometría en función del estado del río, la predicción de sus dimensiones y velocidad de desplazamiento, constituyen los principales puntos que se tratan sobre esta temática.

Se finaliza el Capítulo con el análisis del problema de la resistencia al escurrimiento, evaluando los distintos factores que intervienen en ella y su incidencia sobre los parámetros de la corriente. En este contexto se brindan metodologías verificadas en el río Paraná destinadas a estimar los valores típicos del coeficiente de rugosidad “n” de Manning o el factor de fricción “f” de Darcy-Weisbach. Se demuestra, asimismo, qué tipo de dunas dentro de las distintas jerarquías de formas que cubren el lecho del río, tienen mayor influencia en la altura de rugosidad total,  $k_s$ , del cauce.

Cabe aclarar, por último, que todos los valores cuantitativos de los distintos parámetros tratados del río, tienen implícito un grado de confiabilidad variable que es función principalmente de la cantidad y calidad de datos con que fueron verificados. Como es bien sabido por los ingenieros fluviales, las mediciones sedimentológicas de campo en corrientes aluviales involucran errores importantes, quizás intolerables en otras ramas de la ingeniería, en muchos casos por deficiencias inevitables de los métodos empleados. Oportunamente a lo largo del Capítulo se hace referencia a este aspecto fundamental, a fin de que el lector pueda justipreciar adecuadamente las diversas valoraciones presentadas. Es de destacar que, en última instancia, la mayoría de ellas son sólo aproximaciones sobre diferentes facetas de la realidad de un fenómeno natural complejo. El mismo es consecuencia de la interacción de numerosas variables. Algunas de ellas, de gran importancia como el “caudal morfológico”, registran un proceso de cambio consistente durante los últimos 30 años (véase Capítulo 4). Otras, como los niveles de turbulencia del escurrimiento, comienzan a ser medidas sólo recientemente (López y otros, 1998), por medio de métodos aún no incorporados a la hidrometría clásica.

## **Conceptos básicos**

### **Concepto de corriente aluvial**

El estudio con fines científicos y/o ingenieriles de un río como el Paraná, involucra enfrentarse con problemas derivados de las *interacciones* que se



Se deduce que en un escurrimiento como el descrito, los movimientos del fluido (la fase líquida) y del sedimento (la fase sólida), son *interdependientes*. Ninguno de ellos puede ser estudiado sin tener en cuenta las propiedades mecánicas del otro. En otras palabras, el movimiento simultáneo de dos fases (líquida y sólida) constituye una *totalidad mecánica inseparable*.

Para resolver completamente los problemas fluviales que en definitiva surgen de esta *mezcla* de fluido y sólidos dentro de contornos que se *deforman* a través de procesos de *erosión* y *deposición*, es necesario contar con ecuaciones que describan:

- a) el escurrimiento del fluido,
- b) el transporte de sedimentos,
- c) la geometría del contorno,

En sentido estricto todas estas ecuaciones deberían resolverse simultáneamente. En la actualidad la modelación matemática propone procedimientos más o menos complejos, tendientes a este objetivo (Raudkivi, 1990).

Una corriente de esta naturaleza es lo que se denomina:

#### Corriente aluvial

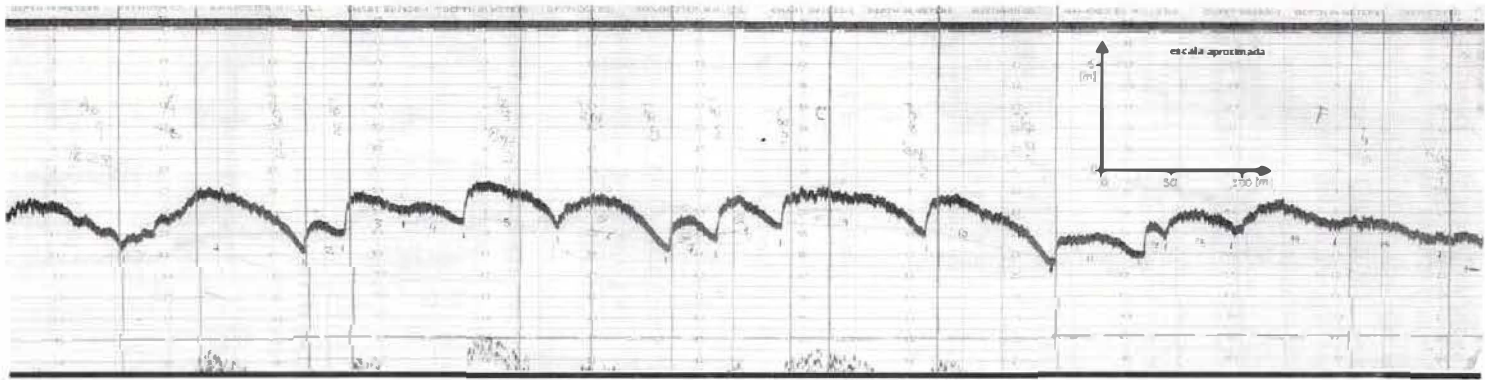
- Transporta el sedimento que compone su propio cauce que a su vez influye en el escurrimiento.
- Posee contornos no fijos o conocidos a priori.

Más allá de sectores limitados del lecho y/o márgenes fijos, en general el río Paraná presenta este tipo de características en sus tramos medio e inferior, es decir entre Paso de la Patria (km 1.240) y su delta (km 231). Todos los procedimientos, fórmulas, etc, que se presentan en este Capítulo, fueron verificados y/o aplicados con datos provenientes de este sector, por lo tanto su extensión a otros tramos del río debe efectuarse con precauciones, por ejemplo entre Paso de la Patria y Yaciretá (km 1.464), donde en algunos puntos del cauce se producen afloramientos rocosos en el lecho que hacen que la corriente en esos lugares no posea características *netamente* aluviales.

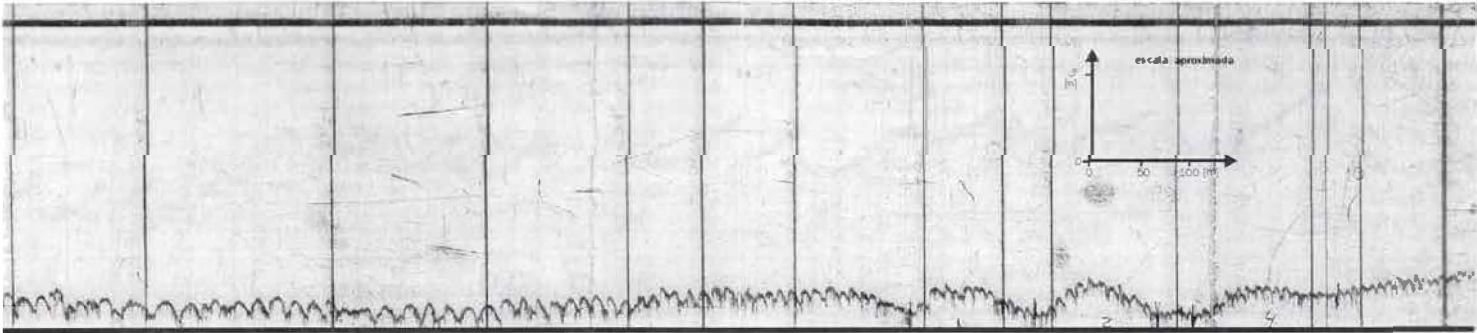
#### Variables dimensionales y adimensionales habituales en el estudio de ríos aluviales

Las corrientes naturales no se comportan por lo general como escurrimientos uniformes, bidimensionales y permanentes. Para ilustrar este concepto, en Figura 5.2. se presentan registros longitudinales del fondo del río Paraná a la altura de Villa Urquiza (km 619), en donde el





Perfil longitudinal P3



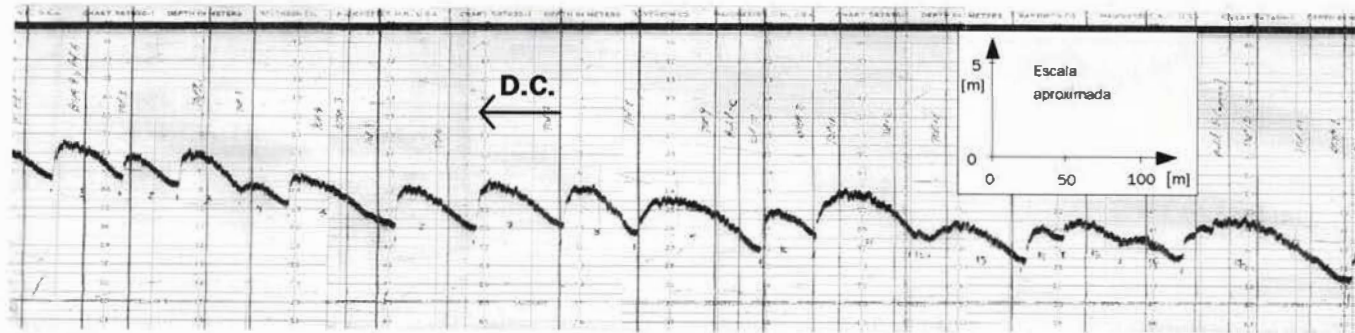
Perfil longitudinal P5

**Figura 5.2.**  
Registros longitudinales de sonda ecográfica del fondo del río Paraná en Villa Urquiza.  
Perfil longitudinal P3 (17/03/87 -  $H_{VU}$  : 4.03 m.)  
Perfil longitudinal P5 (7/07/87 -  $H_{VU}$  : 5.05 m.)

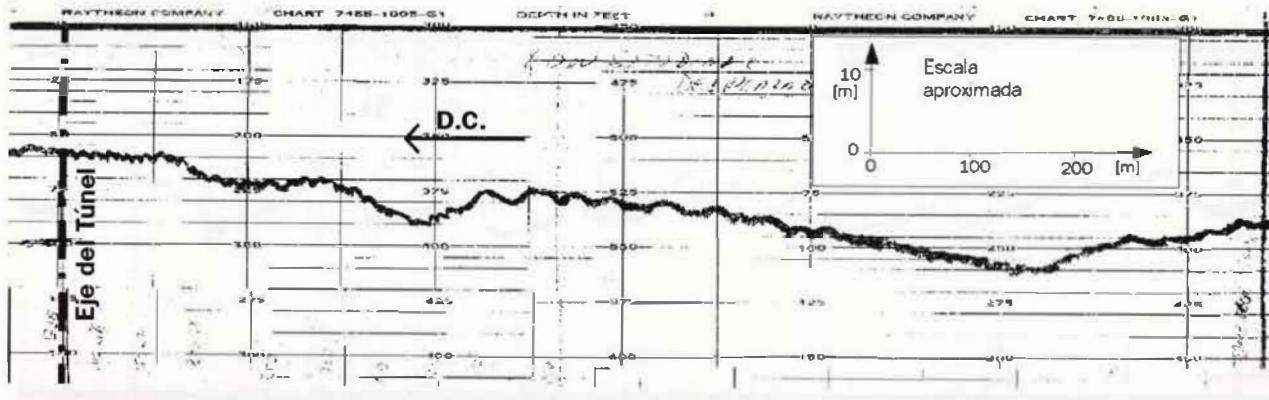
Figura 5.3.

Ejemplos de escurrimiento no uniforme en el río Paraná

- Perfil P1' - Villa Urquiza.
- Sector aguas arriba del Túnel Subfluvial.



Perfil longitudinal P1'



Sector aguas arriba del Túnel Subfluvial

escurrimiento es aproximadamente uniforme. Pero en Figura 5.3., se aprecian registros del mismo tramo de Villa Urquiza y en el sector del Túnel Subfluvial (km 602), con una clara no uniformidad de la corriente. Por otra parte, en Cuadro 5.1., se muestra la fuerte tridimensionalidad del escurrimiento del río Paraná, también frente a Villa Urquiza, a través de la variación transversal entre márgenes izquierda y derecha de varios de sus parámetros hidráulicos y sedimentológicos. También se advierten allí, las marcadas diferencias de los valores mínimos (m), máximos (M) y medios ( $\bar{x}$ ) de las variables en cada punto, consecuencia de los diversos estados que puede tener el río en el tiempo.

**Cuadro 5.1.** Variación transversal de parámetros hidráulicos y sedimentológicos en Villa Urquiza (río Paraná).

| Lugar | h [m] |       |           | $\bar{u}$ [m/s] |      |           | q [m <sup>3</sup> /s] |       |           | d <sub>s</sub> [mm] | σ <sub>s</sub> | T [°C] |
|-------|-------|-------|-----------|-----------------|------|-----------|-----------------------|-------|-----------|---------------------|----------------|--------|
|       | m     | M     | $\bar{x}$ | m               | M    | $\bar{x}$ | m                     | M     | $\bar{x}$ |                     |                |        |
| MI    | 3,90  | 8,00  | 6,01      | 0,54            | 1,11 | 0,88      | 2,09                  | 8,68  | 5,50      | 0,600               | 1,60           | 13-30  |
| MD    | 12,0  | 18,60 | 15,70     | 1,00            | 1,74 | 1,39      | 12,90                 | 32,20 | 22,20     | 0,300               | 1,40           |        |

MI: margen izquierda; MD: margen derecha; m, M,  $\bar{x}$ : valores mínimo, máximo y medio, respectivamente.

h = profundidad

u = velocidad media en la vertical

q = caudal específico

d<sub>s</sub> = tamaño medio del sedimento de fondo.

σ<sub>s</sub> = desvío estándar de la distribución de tamaños.

T = temperatura del agua (rango de variación de temperaturas en el Paraná Medio).

Además de estas características de las corrientes naturales, existen todavía muchos problemas de la fluidodinámica en ríos, como los asociados a la turbulencia, fenómenos de capa límite y difusión de partículas en el seno de un fluido, insuficientemente resueltos o comprendidos.

Dadas estas circunstancias, el grado de complejidad de los fenómenos involucrados es tal, que aun en la actualidad muchos problemas de la Hidráulica Fluvial se formulan de manera de poder resolverlos con las expresiones más simples y manejables del escurrimiento permanente, uniforme y bidimensional.

Bajo estas condiciones, Yalin (1977), demuestra que cualquier propiedad de una corriente aluvial compuesta con fondo granular no cohesivo, puede ser expresada como una cierta función de las siguientes cuatro variables adimensionales:

$$\tau_* = \frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)d_s} = \frac{\rho u_*^2}{(\rho_s - \rho)gd_s} = \frac{u_*^2}{(s-1)gd_s} \quad \text{: tensión de corte adimensional o número de movilidad}$$

$$R_* = \frac{(u_* d_s)}{\nu} \quad \text{: número de Reynolds del grano}$$

$\frac{d_s}{h}$  : rugosidad relativa

$\frac{\rho_s}{\rho} = s$  : densidad o gravedad específica de las partículas

donde:

$\gamma_s = \rho_s g$  : peso específico de las partículas de sedimento.

$\rho$  : densidad de las partículas.

$g$  : aceleración de la gravedad.

$\gamma = \rho g$  : peso específico del agua.

$\rho$  : densidad del agua.

$\nu$  : viscosidad cinemática del agua.

$d_s$  : diámetro representativo del sedimento de fondo.

$u_* = \sqrt{\tau_* / \rho}$  : velocidad de corte.

(el resto de los símbolos ya fue presentado)

De manera funcional el concepto se puede expresar:

$$\Pi_A = \varphi_A (\tau_* ; R_* ; h/d_s ; \rho_s/\rho) \quad (5.1)$$

donde  $\Pi_A$  es cualquier propiedad del escurrimiento bifásico (transporte de sedimentos; velocidad media de la corriente; altura, longitud y velocidad de desplazamiento de dunas; etc), expresada de manera adimensional. Estas cuatro variables son necesarias y suficientes para una completa definición del fenómeno bifásico, pero no todas pueden aparecer en la expresión simplificada de una propiedad  $\Pi_A$  particular, como se verá en lo que sigue.

De las cuatro variables, la más importante es la tensión de corte adimensional,  $\tau_*$ . Es posible demostrar que la misma es la relación entre las fuerzas activas del escurrimiento representadas por,  $\tau_o$ , que aparece en el numerador, y las resistentes de la partícula (en esencia, su peso sumergido) que figuran en el denominador. Se deduce que cuanto más grande es  $\tau_*$  para un dado tamaño de granos (i.e., cuando crece  $\tau_o$  o la fuerza activa), la partícula se "moverá con mayor facilidad" (de ahí el nombre de "número de movilidad", para esta variable) y crecerá el transporte de sedimentos. Por el contrario, cuando  $\tau_o$  se aproxima por arriba a un umbral inferior,  $\tau_c$ , o "tensión de corte crítica" o de "iniciación del movimiento" (ver Figura 5.1.), el transporte disminuye hasta cesar por completo cuando  $\tau_o \leq \tau_c$ . En estas circunstancias para partículas de arena mayores que  $\sim 2$  mm,  $\tau_c (= \tau_c / (\gamma_s - \gamma) d_s) = 0,05 - 0,06$  (Vanoni, 1975b).

La otra variable que sigue en importancia es el número de Reynolds del grano, el cual permite conocer las condiciones del escurrimiento en torno de las partículas que se transportan por el fondo. Es decir, de acuerdo a su tamaño la viscosidad del agua (en el caso de las más pequeñas), puede influir en su movimiento, o no tener ninguna importancia en el transporte (en la situación de los más grandes). Estos hechos determinan que los fondos se comporten como lisos, en transición o rugosos de acuerdo al valor que adopte  $R_*$ . Yalin (1992), considera un valor de  $R_* \approx 35$  como límite de influencia de los efectos viscosos. Por encima de este valor se tendría una condición rugosa del fondo y  $R_*$  ya no se debería considerar como una variable de influencia en el fenómeno bifásico.

Otros parámetros habituales utilizados en las distintas formulaciones y métodos de la hidráulica fluvial, normalmente asociados con las variables adimensionales citadas, son los siguientes:

- Velocidad terminal de caída de la partícula,  $w$ . Es la velocidad de caída uniforme que adquiere un grano de diámetro  $d$ , cayendo solo en una columna de agua sin efectos de contorno a una temperatura dada. Interviene en numerosos cálculos de erosión y sedimentación en corrientes aluviales. Su valor se establece en base a tablas o gráficos para los distintos tamaños y temperaturas de caída (Vanoni, 1975a).

- Tamaño del sedimento. Los diámetros de los sedimentos fluviales se clasifican de acuerdo con la conocida escala de tamaños de Wentworth (Vanoni, 1975a). Según ella los grandes límites de tamaños de los distintos tipos de sedimentos posibles de encontrar en los ríos aluviales son los siguientes:

|  |                 |    |
|--|-----------------|----|
| - Cantos rodados: muy grandes a pequeños | 4.096 - 256     | mm |
| - Guijarros: grandes a pequeños          | 256 - 64        | mm |
| - Gravas: muy gruesas a muy finas        | 64 - 2          | mm |
| - Arenas: muy gruesas a muy finas        | 2 - 0,062       | mm |
| - Limos: gruesos a muy finos             | 0,062 - 0,004   | mm |
| - Arcillas: gruesas a muy finas          | 0,004 - 0,00024 | mm |

Normalmente los sedimentos fluviales están constituidos por proporciones variables de uno o más rangos de los diámetros presentados, conformando distribuciones de donde se extrae la información de tamaños característicos comúnmente usados en los cálculos:  $d_{50}$  (mediana de la distribución);  $d_g$  ( $=\sqrt{d_{16} \cdot d_{84}}$ : media geométrica de la distribución);  $\sigma_g$  ( $=\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ : desvío estándar geométrico de la distribución);  $d_{16}$ ,  $d_{84}$ ,  $d_{90}$ ,.....(diámetros para el cual el 16%, 84%, 90%,..... de la distribución es más fino).

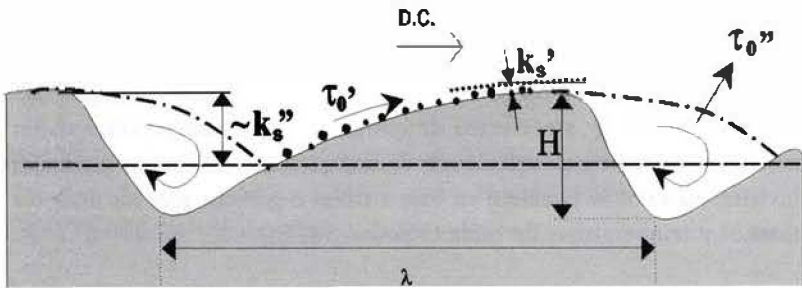
## La rugosidad del fondo y la división de las tensiones de corte

El hecho de que el fondo de las corrientes aluviales por lo general no sea plano, sino que esté recubierto con formas de diverso tipo (Figuras 5.2. y 5.3.; más adelante se brinda la clasificación de los tipos de formas de fondo que pueden aparecer en corrientes naturales), determina que la altura de rugosidad total,  $k_s$ , en el lecho de un río, sea distinta de la considerada por Nikuradse (del orden del tamaño del grano de arena), en sus clásicos experimentos en tuberías (Schlichting, 1979).

En realidad, en ríos aluviales esa altura de rugosidad estaría constituida, esencialmente, por dos componentes (Figura 5.4.):

$$k_s = k'_s + k''_s \quad (5.2)$$

Figura 5.4.  
Rugosidades y tensiones de corte "de grano" y "forma" sobre una duna aluvial.



$k'_s$ : altura de rugosidad debida al grano en la cara de aguas arriba de la duna o rizo (=  $2d_{95}$ , según Engelund, 1966; =  $3d_{90}$ , según Van Rijn, 1984; =  $2d_{50}$ , según Yalin, 1992).

$k''_s$ : altura de rugosidad por forma, a causa de la zona de separación del escurrimiento en la cara de aguas abajo de la duna o rizo. Dependerá de  $H$  y  $H/\lambda$ , de acuerdo a Yalin (1977).

Teniendo en cuenta estos hechos, la tensión de corte,  $\tau_o$ , requerida por el escurrimiento para vencer la resistencia generada por los dos tipos de rugosidad descriptos se invierte en:

- Un arrastre, asociado a  $k'_s$ , sobre los granos en la cara de aguas arriba de las dunas que producen una resistencia superficial en esa zona, y que se denomina tensión de corte "de grano",  $\tau'_o$ .
- Un arrastre, asociado a  $k''_s$ , producto de la pérdida de energía debida a la separación aguas abajo de las dunas y que se conoce como tensión de corte "por forma",  $\tau''_o$ .

Es decir que la tensión de corte,  $\tau_o$ , en corrientes aluviales, se suele dividir, por las razones anteriores, en al menos dos componentes:

$$\tau_o = \tau'_o + \tau''_o \quad (5.3)$$

En el título «La resistencia al escurrimiento» se demuestra cómo ambas componentes están claramente asociadas a  $k_s'$  y  $k_s''$ . Normalmente en escurrimientos aluviales como el del río Paraná, una tercera resistencia originada por la difusión de partículas en el seno del fluido, es muy pequeña comparada con las “de grano” y “forma”, por lo que no se la considera en la división de  $\tau_o$ .

### El transporte de sedimentos

#### Conceptos sobre transporte de sedimentos en ríos aluviales

Las corrientes aluviales transportan dos tipos de sedimentos o, dicho de otro modo, la fase sólida en movimiento está constituida por dos clases de materiales:

- el transporte de material de fondo
- la carga de lavado

#### El transporte de fondo

Está compuesto como se deduce de la propia definición de curso aluvial, por el material del propio cauce del río. Las partículas del transporte de fondo se pueden mover de diferentes modos según la relación existente entre su tamaño y la capacidad de la corriente para transportarlas. Esos modos son los siguientes (Figura 5.5.):

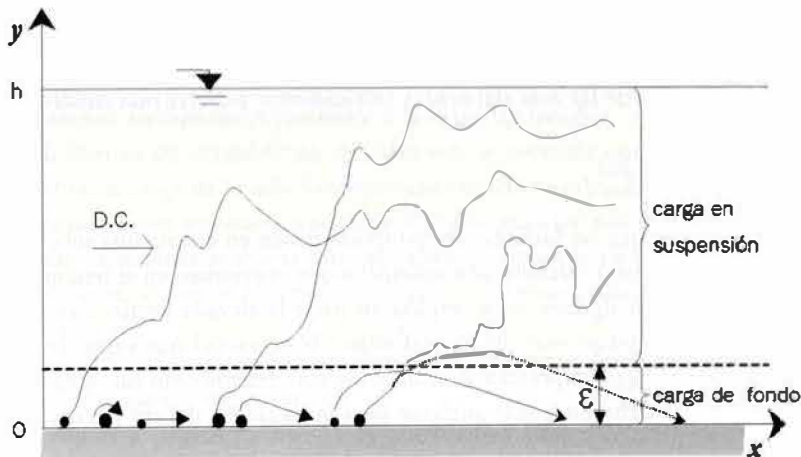
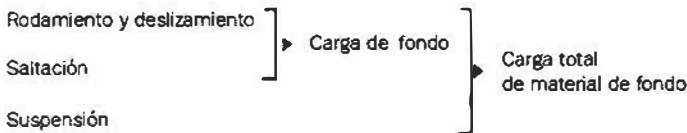


Figura 5.5. Modos en que se transporta el sedimento de fondo.



La carga de fondo está conformada por todos aquellos granos que se trasladan por algunos de los modos mencionados, casi en permanente contacto con el fondo dentro de una capa de espesor,  $\epsilon$ . Este espesor se identifica con la altura de un cierto salto límite para un dado tamaño de partícula.

Cuando se incrementa  $\tau_0$  (i.e.,  $\tau$ ), algunos granos en movimiento se "difunden" en el seno del fluido debido a la turbulencia y forman la carga en suspensión del material de fondo, que se añade a la primera (siempre que haya carga en suspensión, la carga de fondo estará también presente). En consecuencia, la carga total de material de fondo por unidad de ancho,  $g_s$ , expresada en volumen o peso por unidad de tiempo, estará dada por la suma de la carga de fondo,  $g_{sf}$  y la carga en suspensión,  $g_{ss}$ :

$$g_s = g_{sf} + g_{ss} \quad (5.4)$$

Habitualmente en la literatura específica, el transporte viene expresado de manera adimensional del siguiente modo:

$$\Phi = \frac{g_s \rho^{1/2}}{[(\gamma_s - \gamma) d_s]} \quad (5.5)$$

si  $g_s$ , posee dimensiones de [Peso] / ([Tiempo] . [Longitud]).

El transporte adimensional,  $\Phi$ , es una de las propiedades  $\Pi_A$ , del escurrimiento bifásico que de acuerdo a la ecuación 5.1, estará expresada por alguna función de las cuatro variables adimensionales básicas. En este sentido, es posible comprobar que la mayoría de las fórmulas que aparecen en la literatura especializada para cuantificar el transporte de sedimentos en ríos, se reducen a una expresión del siguiente tipo:

$$\Phi = \varphi_{g_s}(\tau_s) \quad (5.6)$$

y en el caso de las más elaboradas teóricamente y en las más modernas:

$$\Phi = \varphi_{g_s}(\tau_s ; R_*^*) \quad (5.7)$$

Se advierte que las fórmulas de transporte tienen en cuenta una sola, a lo sumo dos, de las 4 variables adimensionales que intervienen en el fenómeno. Este hecho, en algunos casos, explica en parte la elevada imprecisión que normalmente posee este tipo de fórmulas y la necesidad que surge de una adecuada calibración previa a su utilización con determinado fin ingenieril, tal como se demuestra más adelante para la situación del río Paraná.



### La carga de lavado

La carga de lavado, llamada a veces “carga foránea”, generalmente está formada por partículas muy finas que no se encuentran en cantidades apreciables en el fondo del cauce ya que se transportan casi permanentemente en suspensión a una velocidad aproximadamente igual a la de la corriente (en alguna bibliografía se las identifica como “partículas en suspensión prolongada”). Su concentración está determinada por la cantidad suministrada a la corriente. Este suministro es consecuencia fundamentalmente de la erosión laminar y en surcos que se produce sobre la cuenca de aporte, que depende de una serie de factores y procesos físicos tales como:

- Pendiente de la superficie de la cuenca.
- Cubierta vegetal.
- Tipo de suelo.
- Intensidad y distribución de las precipitaciones.
- Tamaño de la gota de lluvia, etc.

Las concentraciones de partículas de carga de lavado son normalmente independientes de la potencia de la corriente para transportarlas, ya que escurrimientos comparativamente de baja intensidad están fácilmente capacitados para transportar los sedimentos disponibles de este tipo.

El hecho de que la carga de lavado esté constituida por granos muy finos, significa que los tamaños de limo y arcilla son preponderantes en su composición. Luego, para distinguir de modo práctico a esta clase de sedimento con el que proviene del fondo, se establece el siguiente límite:

|                   |              |                   |
|-------------------|--------------|-------------------|
|                   |              | transporte de     |
| carga de lavado < | 50 – 70 mm < | material de fondo |

(De contarse con información detallada se pueden hacer ajustes más precisos de este límite, como el que se presenta para el río Paraná más adelante).

Cabe destacar que, en general, en los cauces fluviales la mayor parte del sedimento transportado pertenece a la carga de lavado.

Si bien en un tramo de río aluvial donde se pretenda realizar algún tipo de obra, la carga de lavado habitualmente no es considerada debido a que en condiciones normales no incide en la estabilidad del tramo, existen ciertas situaciones ante una disminución muy marcada en la velocidad de la corriente, donde su determinación adquiere importancia ingenieril. Son los casos de:

- Depositación en embalses o lagos (naturales y artificiales).
- Depositación en estuarios.
- Algunos accesos y dársenas de puertos fluviales.

### Carga total de sedimentos

Teniendo en cuenta lo expresado, la carga total de sedimentos transportados por unidad de ancho, a través de una sección transversal de un cauce aluvial, estará dada por:

$$g_T = g_{sf} + g_{ss} + g_w = g_s + g_w \quad (5.8)$$

donde:

$g_w$ : carga de lavado por unidad de ancho.

Multiplícando por el ancho, B de la sección, se obtienen los correspondientes valores para la sección completa. Es decir:

$$G_T = G_{sf} + G_{ss} + G_w = G_s + G_w \quad (5.9)$$

con dimensiones de [peso] o [volumen] por unidad de [tiempo].

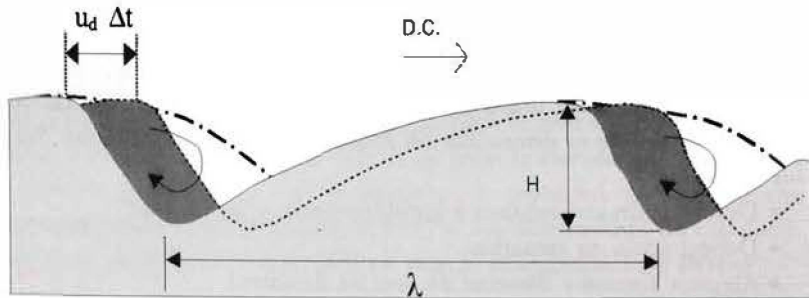
### Método de desplazamiento de dunas para medición de la carga de fondo

Los principios y métodos para la medición de los distintos modos de transporte de sedimentos en corrientes aluviales, conforman un campo tan extenso dentro de la especialidad, que su tratamiento, aun sintético, excede completamente los objetivos de este Capítulo. El lector interesado en profundizar sobre este particular, puede recurrir a Benedict (1975), Hayes (1978) o al tratado más reciente de Van Rijn (1993).

Por su relación con lo que sigue, a continuación se brindan algunos conceptos acerca del método de desplazamiento de dunas, que permite medir *indirectamente* la carga de fondo,  $g_{sf}$ , en ríos aluviales. Este procedimiento ha sido utilizado en diversas oportunidades en el río Paraná (Stuckrath, 1969; DNCP y VN-CNEA, 1977).

Las formas de fondo de los cauces aluviales con escurrimientos en régimen subcrítico (véase «Formas de fondo»), no permanecen inmóviles sino que se mueven aguas abajo a una cierta velocidad  $u_d$ , mucho menor que la de la corriente (Figura 5.6.).

Figura 5.6.  
Duna típica del fondo de una corriente aluvial.



De observaciones experimentales se ha comprobado que ese desplazamiento se produce por erosión de sus caras de aguas arriba y deposición en la cara de aguas abajo. También se ha verificado (Fredse, 1981) que en este proceso prácticamente no participa el sedimento en suspensión, ya que el material depositado pertenece fundamentalmente a  $g_r$ . Luego, midiendo las dimensiones y el desplazamiento de las dunas del lecho se demuestra que es posible cuantificar la carga de fondo mediante la siguiente expresión:

$$g_{sf} = 0,66 (1 - P) H u_d \quad (5.10)$$

donde:

H: altura promedio de las dunas del lecho.

$u_d$ : velocidad de desplazamiento de las dunas.

P: porosidad del material de fondo ( $\approx 0,4$  para arenas).

0,66: constante de forma para las dunas naturales.

### Antecedentes destacados sobre cuantificación del transporte

El estudio del sedimento transportado por el río Paraná, la materia prima con que la corriente modela el paisaje fluvial tan variado y dinámico que caracteriza sus tramos medio e inferior, paradójicamente está lejos de haber sido completado, a pesar de la importancia del tema. En efecto, hasta la primera mitad de los '90 no había resultados publicados de estudios específicos basados en mediciones sistemáticas y confiables, que permitieran conocer las particularidades de los distintos tipos de transporte. Los diversos autores que se ocuparon de la materia, sólo produjeron estimaciones fundadas en series de datos aislados o de corta duración. Más aún, una buena parte de estas fuentes evaluaron el transporte anual sin discriminar entre carga de lavado y material de fondo. Con relación a este último tipo de sedimento, los datos disponibles son todavía más escasos.

Entre los antecedentes más salientes, cabe mencionar a: Soldano (1947), Cotta (1963), Depetris y Griffin (1968), Struckrath (1969), Scartascini (1971), LH (1974), Milli (1974), DNCP y VN – CNEA (1977), Lelievre y Navntoft (1980), Hopwood y Buceta (1982), Prendes (1983) e HYTSA (1987), a los que se refiere al lector interesado.

Teniendo en cuenta la información medida sobre transporte de sedimento informada en varios de los antecedentes citados, es posible aproximar el estado del conocimiento que se tenía sobre el particular hasta fines de la década del '80.

En el Cuadro 5.2. se han agrupado los datos aludidos teniendo en cuenta su procedencia, el modo de transporte que evalúan y otras observaciones pertinentes. Se evidencia aquí lo mencionado anteriormente acerca de la escasa y fragmentada información disponible sobre transporte de sedimentos en el río Paraná.

Cabe destacar, asimismo, que de acuerdo a varias de las fuentes citadas, parecería que la fórmula de Engelund-Hansen (1967) para el cálculo de  $g_s$ , sería apta para predecir este valor en el río Paraná (Lelievre y Navntoft, 1980; Prendes, 1983; Hopwood y Buceta, 1982).

**Cuadro 5.2.**  
Resumen de mediciones disponibles sobre transporte de sedimentos en el río Paraná hacia fines de la década del '80.

| Fuente                     | Tipo de transporte   |  |       |          |                  |       |                                 |
|----------------------------|----------------------|--|-------|----------|------------------|-------|---------------------------------|
|                            | $g_{sf}$             | $g_{ss}$   | $g_s$ | $G_{sf}$ | $G_{ss}$         | $G_s$ | $G_T$                           |
|                            | kg/s/m               |  |       | t/año    |                  |       |                                 |
| Soldano (1947)             |                      |  |       |          |                  |       | $90 \times 10^6$ <sup>(1)</sup> |
| Depetris y Griffin (1968)  |                      |  |       |          |                  |       | $112 \times 10^8$               |
| Stuckrath (1969)           | 0,067 <sup>(2)</sup> |  |       |          |                  |       |                                 |
| DNCPVU-CNEA (1977)         | 0,017 <sup>(3)</sup> |  |       |          |                  |       |                                 |
| Lelievre y Navntoft (1980) |                      |  |       |          | $30 \times 10^6$ |       |                                 |
| HYTSA (1987)               |                      | 0,201 <sup>(4)</sup><br>0,108 <sup>(5)</sup><br>0,757 <sup>(6)</sup> |       |          |                  |       |                                 |

<sup>(1)</sup> Corresponde al río Bermejo en la sección de Pto. Expedición a 117 km de su desembocadura. Se lo incluye como referencia dada la influencia que este río ejerce sobre el  $G_s$  del Paraná.

<sup>(2)</sup> Valor medio en el thalweg del río ( $h = 11-14$ m), a la altura del Túnel Subfluvial para niveles entre 2,40 y 3,10 m en el hidrómetro de Pto. Paraná.

<sup>(3)</sup> Valor medio a la altura de Corrientes fuera de la zona del thalweg ( $h = 4,80$  m).

<sup>(4)</sup> Valor medio de dos aforos (aguas medias) en la zona de margen izquierda ( $h = 10,5$  m) de la sección del km 565 del Paraná.

<sup>(5)</sup> Idem que (4) en la zona central de la sección ( $h = 4,3$  m).

<sup>(6)</sup> Idem que (4) en la zona del thalweg ( $h = 12,7$  m) cercana a margen derecha.

Es interesante señalar finalmente, que combinando la información para  $g_f$  y  $g_s$ , proporcionada por diversas fuentes para similares profundidades y estados del río en el Cuadro 5.2., es posible demostrar que la relación  $g_s/g_f$  para aguas medias en el río Paraná, estaría entre 7,4 y 12,3. Ello, en un principio, ratificaría la suposición realizada por Milli (1974), de 10:1, para esta relación, en su trabajo de aplicación de fórmulas de transporte frente a Villa Urquiza.

### Carga de lavado - La influencia del río Bermejo

De acuerdo con lo explicado sobre la naturaleza de la carga de lavado en cauces aluviales, en el caso del tramo medio del río Paraná esta fracción está formada por limos y arcillas. El tamaño límite de las partículas que pertenecen a la carga de lavado en este curso fue determinado por Drago y Amsler (1988), teniendo en cuenta que este tipo de granos se encuentran en

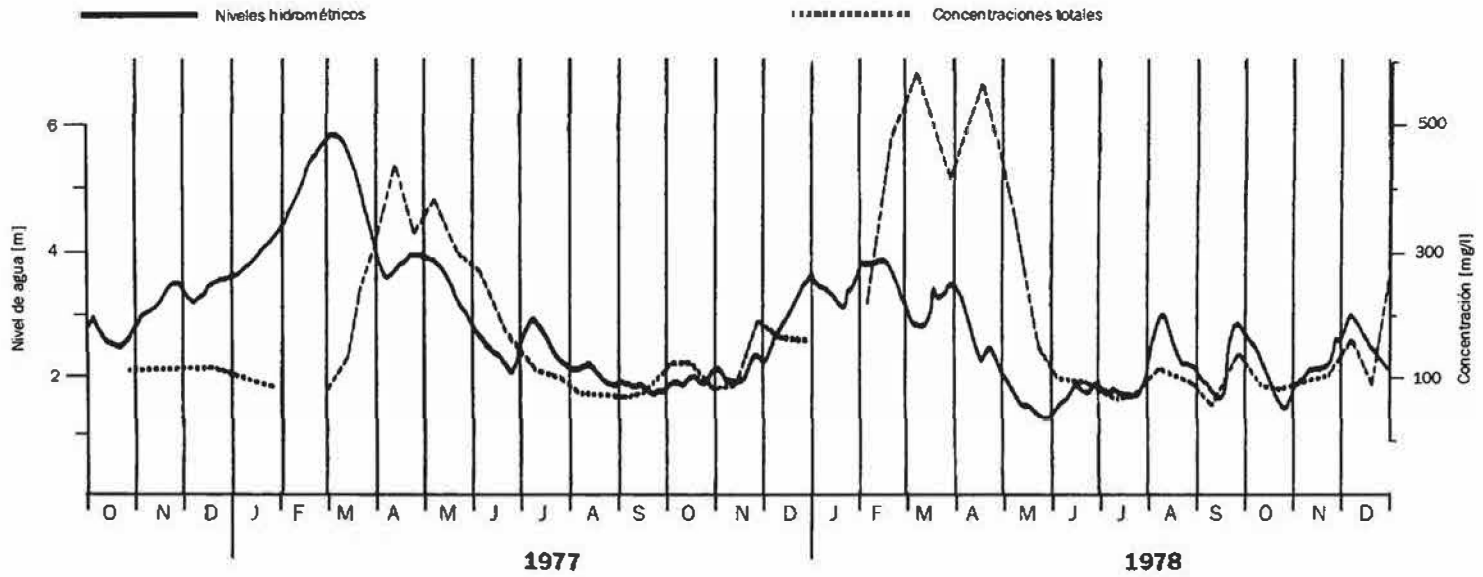
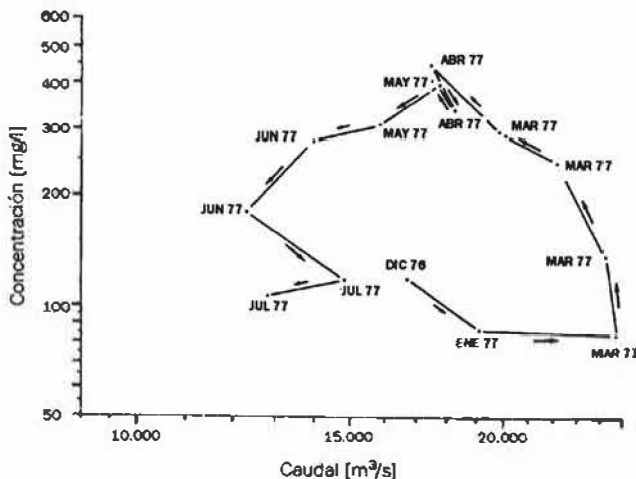


Figura 5.7. Limnigramas e hidrogramas de concentraciones totales a la altura del Túnel Subfluvial. Años: 1977 y 1978 (tomado de Drago y Amster, 1988).

el cauce activo en muy pequeñas cantidades. En base a muestras de material de fondo obtenidas a lo largo del Paraná Medio y durante cinco años (1976-1981) en una sección próxima al Túnel Subfluvial (Bertoldi de Pomar, 1980 y 1984), los autores mencionados concluyeron que el diámetro de  $31,2 \mu\text{m}$  es el límite entre carga de lavado y las fracciones más gruesas en suspensión. Este tamaño es muy similar al establecido por Lelievre y Navntoft (1980),  $37 \mu\text{m}$ , en sus mediciones frente a la ciudad de Corrientes. De todos modos, si se tiene en cuenta que la presencia de limos en el lecho del cauce principal es prácticamente despreciable (las muestras de Bertoldi de Pomar, a lo largo del Paraná Medio, revelaron que los tamaños entre  $62 \mu\text{m}$  y  $31,2 \mu\text{m}$  no superan el 2,5% en promedio y el 0,6 % los inferiores a  $31,2 \mu\text{m}$ ; por otra parte en las zonas con mayor sedimentación del cauce, los pasos de navegación, la presencia de limos es insignificante [FICH, 1995]), la suposición que arcillas y limos en su totalidad representan la carga de lavado no resultaría una simplificación cuestionable.

Es sabido (Soldano, 1947; Cotta, 1963), que el origen del sedimento más fino transportado en suspensión por el río Paraná, son los aportes del río Bermejo. En términos muy generales los caudales líquidos de este río son sólo un 5% de los del Paraná Medio (Capítulo 2), mientras que el volumen anual de sedimentos finos aportados, como se verá en lo que sigue, es superior al 80%. Es decir, agua y sedimentos finos provienen de diferentes cuencas y, como consecuencia de ello, las concentraciones de la carga de lavado en el tramo medio del río Paraná son muy variables espacial y temporalmente, sin guardar relación con la descarga líquida. Este hecho se puede apreciar en Figuras 5.7. y 5.8., donde se han vinculado limnigramas y caudales a la altura del Túnel Subfluvial con los respectivos hidrogramas de concentraciones totales, durante los años 1977 y 1978.

**Figura 5.8.**  
Relación entre concentraciones totales y caudales a la altura del Túnel Subfluvial para la crecida de 1977 (tomado de Drago y Amster, 1988).



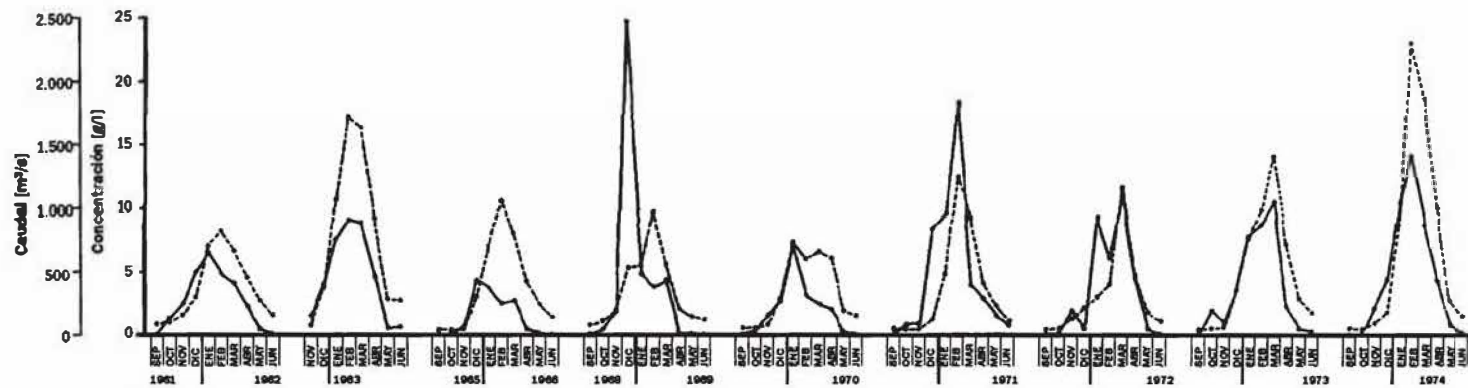


Figura. 5.9. a)

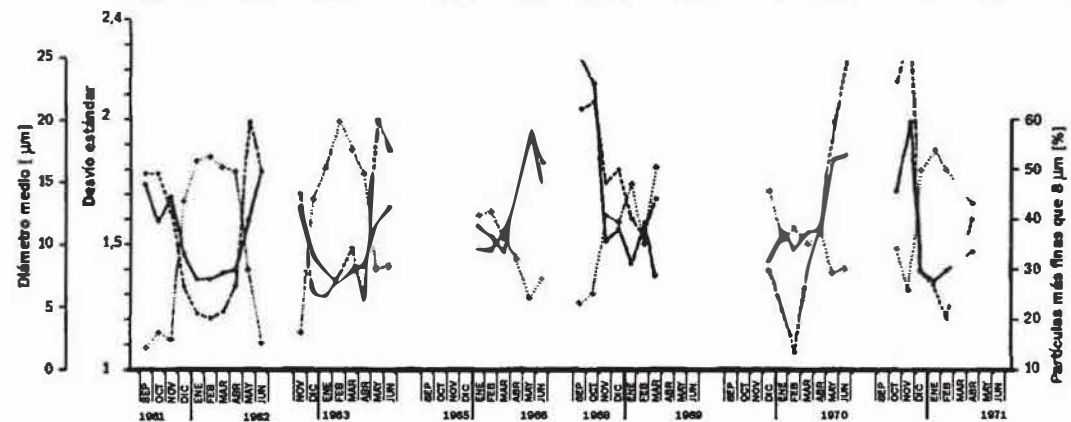


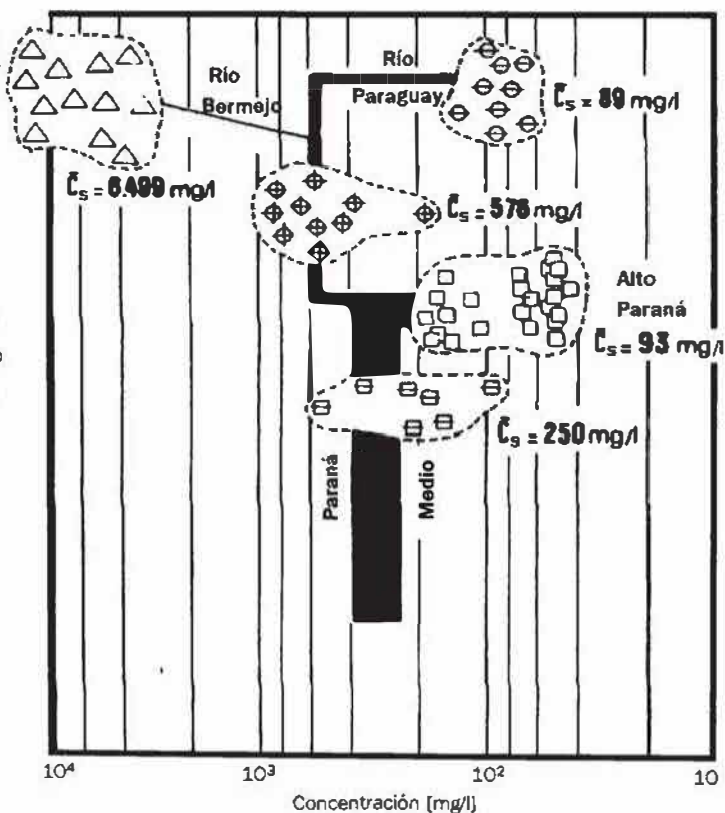
Figura. 5.9. b)

**Figura. 5.9. a)**  
Caudales y concentraciones totales de sedimentos suspendidos en el río Bermejo. Sección: Zanja del Tigre.  
**Figura. 5.9. b)**  
Diámetro medio, desvío estándar y contenido de partículas inferiores a 8 μm en el río San Francisco. Sección: El Caimancito (tomado de Drago y Amsler, 1988).

El río Bermejo en sus nacientes está conformado por numerosos afluentes de régimen torrencial que son los responsables de producir esta carga de lavado. Las lluvias intensas se producen en el verano, entre los meses de octubre a abril. El resto del año los aportes sedimentarios son menores y provienen sólo del río Iruya. La mayor producción de sedimentos se obtiene entre los meses de diciembre y febrero, época en la cual se producen entre 3 y 6 tormentas mensuales que generan escurrimientos importantes en la cuenca superior, con concentraciones elevadas, a veces mayores a los 100 gr/l. Este comportamiento se puede visualizar en Figura 5.9. para el período comprendido entre 1961 y 1974 en la sección Zanja del Tigre, a la salida de la alta cuenca. Se incluyeron allí, asimismo, datos granométricos de la carga suspendida del río San Francisco, uno de los principales afluentes del Bermejo en la misma zona.

Los sedimentos finos del Bermejo, una vez erosionados en sus nacientes, se transportan en suspensión con elevadas concentraciones hasta llegar al sistema Paraná, ingresando primero al Paraguay y luego al propio río Paraná en Confluencia. En Figura 5.10., se demuestra esta influencia del Bermejo sobre el Paraná en base a datos de concentraciones totales de todos los ríos involucrados medidos entre 1971-'74 durante el período de máximos aportes del sistema (diciembre-mayo).

**Figura 5.10.** Cambios en las concentraciones totales de sedimento en suspensión en los ríos Paraguay y Paraná por influencia del Bermejo durante el período de máximos aportes sólidos.  $\bar{C}_s$ : valor medio para cada grupo de concentraciones (tomado de Drago y Amsler, 1988).

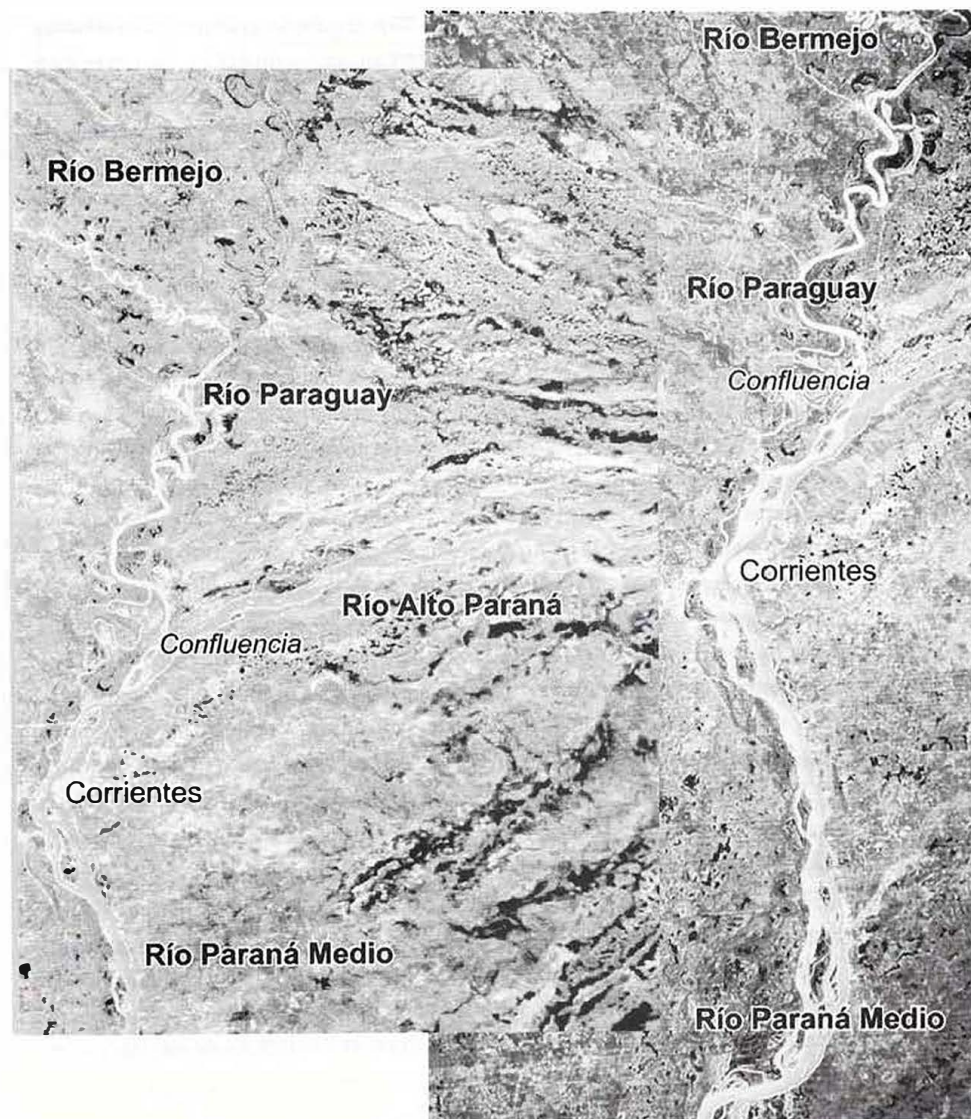




La carga de sedimentos provenientes del Bermejo ingresa sobre la margen derecha del Paraná originando concentraciones más de 20 veces superiores respecto de las de margen izquierda, con agua relativamente clara suministrada desde el Alto Paraná. El 28/03/95 y 04/04/95 se midieron concentraciones de 1.150 mgr/l sobre margen izquierda y menos de 50 mgr/l en la margen derecha (Prendes y otros, 1996). Esta diferencia de concentraciones (Foto 5.1.) llega a notarse hasta proximidades de la ciudad de Goya, es decir más de 200 kilómetros aguas abajo.

**Foto 5.1.**

Diferencia de concentraciones entre márgenes izquierda y derecha del río Paraná Medio debido a la influencia del río Bermejo.



El hecho que se muestra en Foto 5.1., pone de manifiesto los tiempos que se necesitan (varios días) para que, a pesar de los importantes niveles de turbulencia, la mezcla se uniformice en toda la sección del cauce principal.

Los afluentes del tramo medio son arroyos y cursos menores que si bien aportan también sedimentos finos lo hacen en cantidades tales que prácticamente no influyen sobre los valores totales generados por las descargas del Bermejo. Los más destacados serían los arroyos Feliciano y Cavallú Cuatí, ambos sobre margen izquierda.

Cantidades significativas de limos y arcillas participan en la formación de bancos e islas (ver Capítulo 4). También es común encontrar abundantes proporciones de limos en el lecho de cauces secundarios menores con francos procesos de colmatación. Un ejemplo notable lo constituye el riacho Barranqueras que no tiene capacidad de conducir las altas concentraciones de sedimentos finos impuestas en su boca y las deposita en su interior. Mediciones realizadas del material del cauce en cercanías de su desembocadura evidencian porcentajes elevados (60-80%) de limos y arcillas depositados en el lecho.

Por su parte el valle aluvial, encargado de amortiguar los niveles de las crecidas, recibe durante las mismas volúmenes de carga de lavado que ingresan durante los desbordes del cauce principal. En el valle, las velocidades disminuyen sustancialmente, existen zonas deprimidas como lagunas y esteros donde son prácticamente nulas, y este sedimento fino se deposita generando a través del tiempo la capa de cohesivos superficiales que caracterizan la zona de islas y valle. Si bien la carga de lavado transportada por el cauce no interacciona con su morfología, hacia aguas abajo el transporte y concentraciones de esta fracción disminuyen en proporciones aún no establecidas, como consecuencia de los procesos descritos en oportunidad de las inundaciones. Sin embargo, el mayor porcentaje de la carga de lavado impuesta aguas arriba del tramo medio llega hasta el Río de la Plata donde sedimenta, creando los conocidos problemas de calado en los canales de navegación del estuario.

En Cuadro 5.3., se puede apreciar la composición granulométrica de la carga de lavado cuando se registraron los picos de concentraciones a la altura del Túnel Subfluvial en 1977 (Figura 5.7.).

Se advierte que cuando se producen en la sección los picos de concentración, se transporta el sedimento en suspensión más fino y mejor seleccionado, consecuencia de que ocurren los máximos porcentajes de carga de lavado y de arcilla en suspensión. Si se cotejan estos valores con los presentados en Figura 5.9., queda clara la influencia de las fracciones finas del Bermejo en ellos.

| Fecha    | Centro del cauce                 |                 |                     |                      |
|----------|----------------------------------|-----------------|---------------------|----------------------|
|          | Diámetro medio ( $\mu\text{m}$ ) | Desvío estándar | Carga de lavado (%) | Fracción arcilla (%) |
| 28/10/76 | 16                               | 1,62            | 66                  | 22                   |
| 27/01/77 | 12                               | 1,70            | 73                  | 36                   |
| 01/03/77 | 14                               | 1,74            | 66                  | 31                   |
| 28/03/77 | 6                                | 1,06            | 97                  | 55                   |
| 13/04/77 | 7                                | 1,26            | 93                  | 51                   |
| 25/04/77 | 7                                | 1,30            | 92                  | 51                   |
| 09/05/77 | 7                                | 1,33            | 92                  | 49                   |
| 23/05/77 | 7                                | 1,27            | 94                  | 47                   |
| 06/06/77 | 7                                | 1,31            | 92                  | 47                   |
| 25/07/77 | 12                               | 1,52            | 77                  | 31                   |
| 08/08/77 | 14                               | 1,52            | 73                  | 23                   |
| 31/10/77 | 15                               | 1,58            | 67                  | 22                   |
| 14/11/77 | 11                               | 1,47            | 81                  | 26                   |

**Cuadro 5.3.** Porcentajes máximos y mínimos de carga de lavado y fracción de arcilla, con diámetros medios y desvíos estándar de todos los tamaños en suspensión (promedios en la vertical de muestreo) (tomado de Drago y Amsler, 1988).

Otra información de que se dispone en el tramo medio son los estudios de sedimentación en el embalse del Aprovechamiento Hidroeléctrico Paraná Medio (Prendes, 1981). En aquella oportunidad se efectuaron mediciones frecuentes del transporte de sedimentos en suspensión en la sección del cierre Chapetón (aprox. 30 km aguas arriba de Paraná), entre los meses de febrero de 1980 y abril de 1981. Se obtuvieron los siguientes resultados:

|   |                         |
|---|-------------------------|
| Caudal sólido en suspensión ( $d > 50 \mu\text{m}$ )                  | 8.750.000 tn/año (8%)   |
| Caudal sólido en suspensión ( $50 \mu\text{m} > d > 10 \mu\text{m}$ ) | 35.230.000 tn/año (32%) |
| Caudal sólido en suspensión ( $d < 10 \mu\text{m}$ )                  | 65.530.000 tn/año (60%) |

Aporte medio total de sedimento en suspensión: 109.500.000 tn/año

Como puede notarse, en ese período se midió que 100.760.000 tn/año, es decir el 92% del transporte total en suspensión, corresponde a la carga de lavado (adoptando  $d < 50 \mu\text{m}$  como tamaño límite de separación). También se obtuvo para esos dos años de mediciones que el caudal medio máximo mensual de sedimentos muy finos ( $d < 10 \mu\text{m}$ ) se produjo en el mes de abril con un valor de aprox. 6 tn/s. Drago y Amsler (1988), detectaron también que el mes de abril sería la época en que cabría esperar que ocurran en la zona las máximas concentraciones provenientes del Bermejo (Figura 5.7.)

Con respecto al transporte citado de arenas en suspensión ( $d > 50 \mu\text{m}$ ), corresponde destacar que el método de medición empleado estaría

subestimando los valores. Ello se debe a que el captador utilizado (puntual e instantáneo) no resultaría eficiente para determinar el transporte de las partículas mayores (arenas), como así tampoco el método de muestreo empleado, consistente en 5 posiciones en cada vertical, con un solo punto próximo al fondo, donde se producen las mayores concentraciones. Esta circunstancia explicaría la marcada diferencia con los valores registrados por Lelievre y Navntoft (1980) a la altura de la ciudad de Corrientes para el mismo tipo de transporte (Cuadro 5.2.)

Dado que las mediciones de AyEE en el Paraná Medio se realizaron en un período muy corto (2 años) los estudios de sedimentación para el embalse se desarrollaron utilizando como datos para la carga de lavado la serie más extensa disponible. Los aportes totales se obtuvieron sumando el Alto Paraná (sección Candelaria con datos de la década del 70) y el Bermejo (sección Zanja del Tigre con datos disponibles hasta 1970) y suponiendo que los caudales sólidos de los demás afluentes (río Paraguay incluido) son despreciables, y se compensarían con el aporte extra del Bermejo entre Zanja del Tigre y su desembocadura en el Paraguay. De esta manera se determinó que el transporte medio anual resultaría de aproximadamente  $87 \times 10^6$  tn/año, de los cuales el 63 % provendría del río Bermejo (Prendes, 1981).

Drago y Amsler (1988), por su parte, mediante datos de concentraciones totales a la altura del Túnel Subfluvial obtenidas durante 5 años (1976-1981), establecieron transportes totales en suspensión del Paraná del orden de los  $112,8 \times 10^6$  tn/año. De esta carga total alrededor de un 45% lo aportaría el Bermejo durante el período de máximos aportes (diciembre-mayo). Según esos autores alrededor del 80% del transporte anual ( $90,2 \times 10^6$  tn/año) sería carga de lavado, de la cual el 56% es suministrada por el Bermejo. Al evaluar estas cifras se debe tener presente lo advertido por Drago y Amsler en cuanto a que la fracción arena en la carga total anual estaría subestimada debido al muestreador y procedimiento de muestreo utilizados en sus mediciones. Otro dato interesante que surge del trabajo de estos autores es que alrededor del 65% de la carga total anual en suspensión del Paraná, se transporta durante el período de máximos aportes sólidos (diciembre-mayo).

Desde la década del '70 y hasta la actualidad, el porcentaje de sedimentos que proporciona el Bermejo ha ido aumentando como consecuencia del aumento de la cantidad de represas construidas en el Alto Paraná que retienen parte de los sedimentos y el cambio general de las condiciones meteorológicas con mayores volúmenes de precipitaciones, particularmente en la cuenca del Bermejo.

Información que caracteriza el funcionamiento sedimentológico más reciente del tramo, puede obtenerse de aforos sólidos realizados desde 1993 hasta la fecha (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación).

Si bien no se han efectuado estudios detallados, una simple observación de estos datos permite advertir que las concentraciones de sedimentos finos en suspensión (carga de lavado) provenientes del Alto Paraná han disminuido considerablemente y las del Bermejo han aumentado, estimándose que en esta última década sus aportes estarían en el orden del 80-85% del transporte total. El Alto Paraná sólo proporcionaría porcentajes del orden del 10%. El resto correspondería al Paraguay y demás afluentes del tramo medio.

Con respecto a la distribución temporal, considerando que durante los meses de invierno y primavera las lluvias en el Bermejo son mínimas, se puede inferir que entre los meses de diciembre y abril la carga de lavado del río Paraná provendría casi totalmente del río Bermejo. Durante este período las concentraciones medias del sistema se podrían ubicar entre los siguientes entornos:

|               |         |       |                   |
|---------------|---------|-------|-------------------|
| Río Bermejo:  | 3.000 a | 8.000 | gr/m <sup>3</sup> |
| Río Paraguay: | 40 a    | 70    | gr/m <sup>3</sup> |
| Alto Paraná:  | 10 a    | 20    | gr/m <sup>3</sup> |
| Paraná Medio: | 100 a   | 300   | gr/m <sup>3</sup> |

Con respecto a las concentraciones máximas de carga de lavado, son muy variables cada año pero existen algunos pocos valores extremos medidos durante la última década (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación) que sin ser los máximos ocurridos dan una buena idea del funcionamiento en situaciones sedimentológicas extremas:

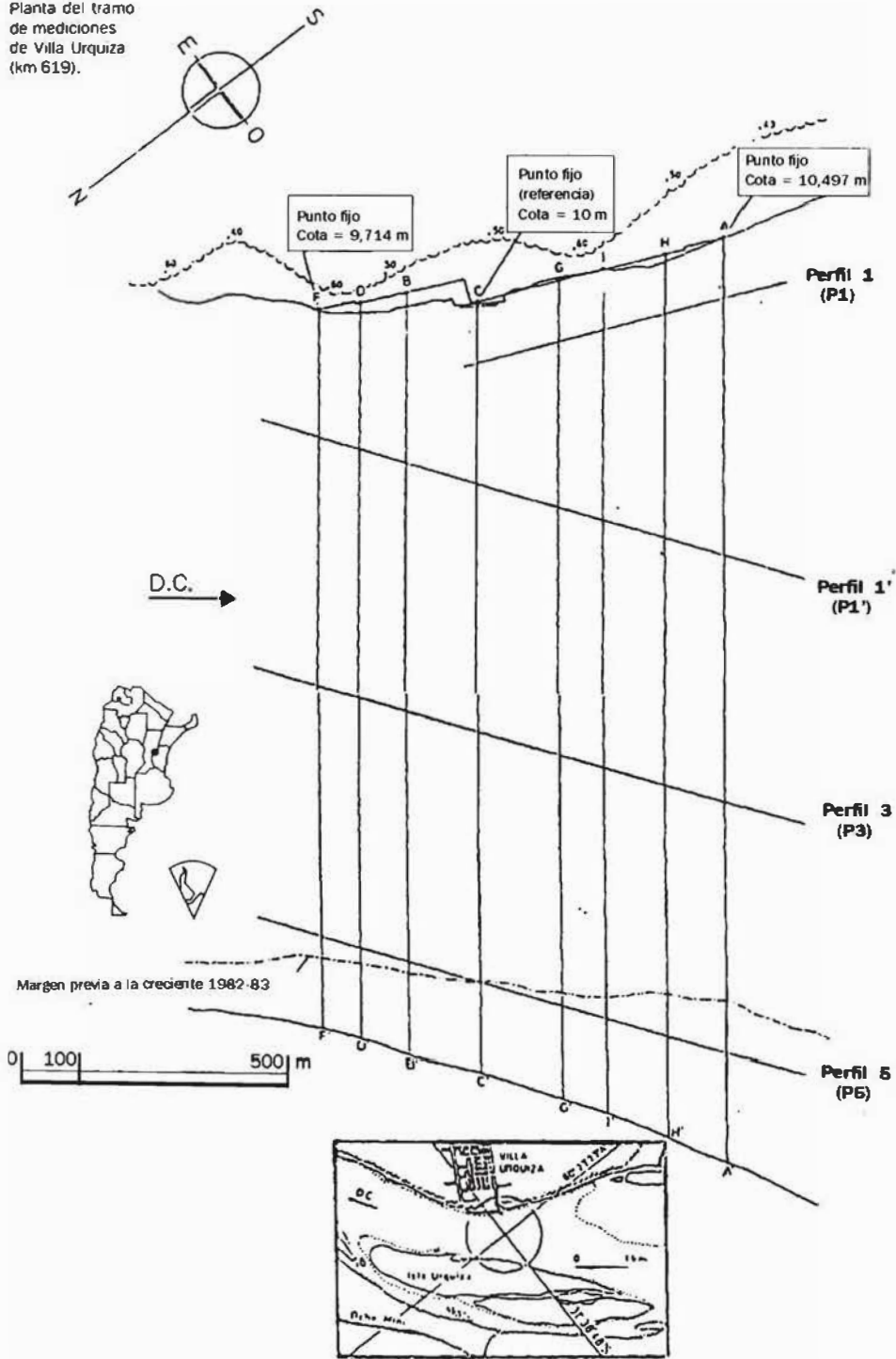
|               |        |  |
|---------------|--------|--|
| Río Bermejo:  | 15.000 | gr/m <sup>3</sup> (véase también Figura 5.9.a) |
| Río Paraguay: | 150    | gr/m <sup>3</sup>                              |
| Alto Paraná:  | 30     | gr/m <sup>3</sup>                              |
| Paraná Medio: | 450    | gr/m <sup>3</sup> (véase también Figura 5.7.)  |

Los máximos valores de caudales sólidos instantáneos medidos de la carga de lavado del sistema se podrían resumir de la siguiente manera:

|               |     |                             |
|---------------|-----|-----------------------------|
| Río Bermejo:  | 20  | tn/s                        |
| Río Paraguay: | 0,4 | tn/s                        |
| Alto Paraná:  | 0,6 | tn/s                        |
| Paraná Medio: | 8   | tn/s (sólo cauce principal) |

Se advierte que existe una importante atenuación del caudal sólido pico desde el Bermejo al Paraná Medio. Se interpreta que esto se debe a una distribución más uniforme en el tiempo de los aportes puntuales e intensos

**Figura 5.11.**  
 Planta del tramo  
 de mediciones  
 de Villa Urquiza  
 (km 619).





del Bermejo. Asimismo, esa descarga concentrada de sedimentos se distribuye no solamente en el cauce principal sino también en los secundarios, donde las velocidades son menores y la onda de concentraciones se expande y atenúa en el tiempo. No se debe descartar incluso la sedimentación de parte de la carga de lavado, como se ha explicado anteriormente, sobre el valle aluvial cuando el río está crecido.

## El transporte de fondo

### Mediciones del transporte de fondo

La medición del transporte de fondo en un río de las características del Paraná no es una tarea sencilla de realizar. Ello se debe, entre otros factores, a los grandes errores asociados a los captadores de sedimentos transportados por el fondo, que se incrementan al tener que operarlos en presencia de altas velocidades y profundidades de la corriente (Hubbell, 1964).

La opción en grandes ríos es medir el transporte de la carga de fondo,  $g_{s,f}$  mediante el método indirecto de desplazamiento de formas de lecho (dunas), en donde se aplica la ecuación 5.10 y que, como se ha explicado, ha sido empleado ya en el Paraná. Esta metodología fue adoptada en investigaciones desarrolladas por el Instituto Nacional de Limnología (INALI) del CONICET, en convenio con la ex-Empresa Agua y Energía Eléctrica (Proyecto Paraná Medio) hacia fines de la década del 80. Las mediciones, por su grado de detalle y continuidad en el tiempo (9 campañas durante 1987 cubriendo la creciente de ese año), aportaron valiosos datos que permitieron descifrar muchos aspectos cualitativos y cuantitativos sobre la mecánica del transporte de fondo en este gran río. Esta información aún hoy es motivo de estudios sobre el fenómeno dunas en el río Paraná.

El método se aplicó en el tramo de cauce del Paraná frente a la localidad de Villa Urquiza (Figura 5.11.), sobre varias líneas de corriente (P1, P1', P3 y P5) cubriendo un amplio espectro de velocidades, profundidades y tamaños de sedimento.

Dado el carácter aleatorio del movimiento de las formas de fondo, el desplazamiento de una duna individual no es representativo de las condiciones medias de transporte que se producen en el tramo. Para aplicar la ecuación 5.10, en consecuencia, se planteó la necesidad de identificar "series de dunas" que incluyan un buen número de ellas, a fin de evaluar sus características promedio: altura, longitud, coeficiente de forma y velocidad de desplazamiento.

En el Cuadro 5.4. se muestran los valores de  $g_{s,f}$  obtenidos en Villa Urquiza mediante el procedimiento señalado, en los perfiles P3 (centro del cauce) y P5 (thalweg).

**Cuadro 5.4.**  
Carga de fondo en el tramo de Villa Urquiza (km 619 del río Paraná) en el centro del cauce y en el thalweg. Año 1987. (Tomado de Amstler y Gaudin, 1994).

| H <sub>pp</sub><br>[m] | P3 (Centro del cauce) |                    |                      | P5 (Thalweg) |                    |                      |
|------------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|--------------|--------------------|----------------------|
|                        | h<br>[m]              | $\bar{u}$<br>[m/s] | $g_{sr}$<br>(kg/s/m) | h<br>[m]     | $\bar{u}$<br>[m/s] | $g_{sr}$<br>(kg/s/m) |
| 3,40                   |                       |                    |                      | 14,27        | 1,18               | 0,085                |
| 3,58                   | 8,58                  | 1,15               | 0,062                | 14,01        | 1,24               | 0,091                |
| 3,94                   | 9,07                  | 1,22               | 0,077                | 15,02        | 1,30               | 0,110                |
| 4,61                   | 9,94                  | 1,51               | 0,216                | 16,42        | 1,49               | 0,180                |
| 5,30                   |                       |                    |                      | 14,65        | 1,67               | 0,307                |
| 5,04                   | 10,58                 | 1,56               | 0,411                | 17,12        | 1,49               | 0,411                |
| 5,00                   | 10,16                 | 1,30               | 0,255                | 16,28        | 1,42               | 0,255                |
| 4,50                   | 9,20                  | 1,30               | 0,179                | 15,69        | 1,41               | 0,179                |
| 4,09                   |                       |                    |                      | 15,49        | 1,37               | 0,094                |
| 2,58                   | 7,13                  | 1,01               | 0,080                |              | 1,34               | 0,081                |

H<sub>pp</sub>: altura en el hidrómetro de Puerto Paraná.

Se advierte que los valores de  $g_{sr}$  observados en Villa Urquiza para aguas medias, están en el orden de los medidos por Stuckrath (Cuadro 5.2.) en el área del Túnel Subfluvial para la misma condición. Pero en situación de creciente los  $g_{sr}$  registrados (quizá uno de los resultados más importantes de estas mediciones), pueden ser de 5 a 7 veces mayores que los de aguas medias.

El mismo tratamiento que a los datos de Villa Urquiza, también le fue aplicado a relevamientos de dunas realizados en la zona del thalweg en el área del Túnel Subfluvial por personal técnico de ese organismo. Ello permitió conocer otros valores de  $g_{sr}$  en ese sector, no sólo en situación de aguas medias sino también para los picos de las grandes crecientes de 1983 y 1992. Los resultados se muestran en el Cuadro 5.5.

**Cuadro 5.5.**  
Carga de fondo en la zona del Túnel Subfluvial Hernandarias (km 602 del río Paraná) en el sector del thalweg del río (datos suministrados por la Comisión Administradora Ente Túnel Subfluvial Hernandarias).

| H <sub>pp</sub><br>[m] | Fecha          | h<br>[m] | $\bar{u}$<br>[m/s] | $g_{sr}$<br>(kg/s/m) |
|------------------------|----------------|----------|--------------------|----------------------|
| 1,87-2,75              | 20/02-10/03/86 | 18,60    | 0,91               | 0,025                |
| 2,72-3,02              | 29/10-25/11/86 | 17,54    | 1,06               | 0,072                |
| 2,90-3,15              | 17/09-08/10/84 | 19,41    | 0,95               | 0,043                |
| 3,26-3,43              | 21/03-17/04/84 | 22,00    | 1,01               | 0,038                |
| 3,59-3,26              | 14/03-21/03/84 | 22,90    | 1,03               | 0,037                |
| 3,43-3,58              | 17/04-02/05/84 | 22,10    | 1,05               | 0,047                |
| 3,58-3,58              | 02/05-10/05/84 | 22,50    | 1,06               | 0,086                |
| 3,82-3,80              | 13/06-27/06/84 | 21,70    | 1,02               | 0,070                |
| 6,62-6,35              | 12/07-18/07/83 | 25,60    | 1,93               | 0,700                |
| 6,70                   | 23/06-28/06/92 | 24,50    | 1,63               | 1,070                |



Según ecuación (5.10), los marcados incrementos de  $g_r$  en creciente se pueden deber a aumentos en la altura de la duna y su velocidad de desplazamiento  $u_d$ . Ambos aspectos se tratan más adelante en el punto específico referido a formas de fondo en crecientes.

Otra técnica para medir la carga de fondo, muy usada en laboratorio y relativamente sencilla de aplicar en cursos menores, es la ejecución de trincheras o trampas de sedimentos. En estos casos la construcción de una zanja perpendicular al flujo atrapa en su interior prácticamente toda la carga de fondo, la cual es medida cubicando el depósito al cabo de un cierto tiempo. En un río de las características del Paraná esto resultaría económicamente imposible de justificar, salvo aprovechando la oportunidad que brindaría la realización de una obra de ingeniería. Al respecto la construcción del Túnel Subfluvial consistió en un acontecimiento muy singular de la década del 60, que aportó valiosas mediciones de la colmatación de una fosa de prueba dragada durante su construcción que aún hoy sigue generando conocimientos sobre el transporte de sedimentos en este río.

#### Aplicaciones de fórmulas de transporte

El transporte de fondo en un río ( $g$ ,  $g_s$  o  $g_{sr}$ ), se puede determinar utilizando fórmulas de transporte que, por lo general, adquieren la forma de las ecuaciones (5.6) o (5.7). Anteriormente se mencionaron algunos de los intentos de aplicación en el río Paraná de varias de las numerosas fórmulas que ofrece la bibliografía, aunque sin una adecuada verificación con datos observados. Ello es necesario desde el momento en que la aplicabilidad de cada fórmula está restringida, por un lado por la información que requieren y, por otro, por las condiciones para las cuales fueron desarrolladas. La experiencia de la FICH sobre este particular sugiere considerar a las fórmulas de Van Rijn (1984) y Engelund-Fredsoe (1976), como dos opciones para el cálculo de  $g_r$  de relativamente buenos resultados en el tramo medio.

#### Fórmula de Van Rijn:

El transporte de fondo se expresa como:

$$g_{sr} = 0,053 \frac{T^{2,1}}{D_*^{0,3}} [(s-1)g]^{0,5} d_{50}^{1,5} \quad (5.11)$$

$T$  : parámetro de transporte  $(= (u_*^2 - u_{*c}^2) / u_{*c}^2)$

$u_*$ : velocidad de corte en términos de la rugosidad de grano (ver título: «La resistencia al escurrimiento»)  $[= (\bar{u}\sqrt{g}) / C']$

$u_{*c}$ : velocidad de corte crítica del sedimento de acuerdo a Shields.

$D_*$ : parámetro adimensional de la partícula  $(= d_{50} [(s-1)g / \nu^2]^{1/3})$

$d_{50}$ : mediana de la distribución de tamaños del sedimento de fondo.  
 $s$  : gravedad específica  
 $g$  : aceleración de la gravedad  
 $\bar{u}$  : velocidad media de la corriente.  
 $C'$  : coeficiente de Chezy debido a la rugosidad del grano (ver título «La resistencia al escurrimiento»):

$$\left[ = 18 \log \left( 11,5 \frac{\bar{u} h}{\nu C'} \right) \right]$$

$h$  : profundidad del escurrimiento  
 $\nu$  : viscosidad cinemática del agua.

**Fórmula de Engelund-Fredsoe:**

$$g_{sf} = \left[ (s - 1) g d_{50}^3 \right]^{1/2} \frac{10}{\beta} \left( \tau_*' - \tau_{*c} \right) \left( \sqrt{\tau_*'} - 0,7 \sqrt{\tau_{*c}} \right) \tag{5.12}$$

donde:

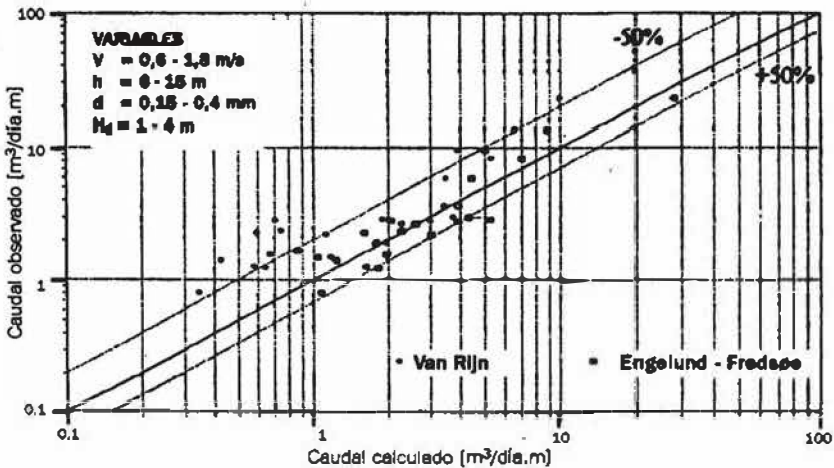
$\tau_*'$  : tensión de corte adimensional debida a la rugosidad del grano (ecuación 5.31).

$\tau_{*c}$  : tensión de corte adimensional crítica (Shields).

$\beta$  : coeficiente de fricción dinámico ( $\approx 0,8$ ).

Estas fórmulas fueron verificadas con la serie de datos presentados en Cuadros 5.4. y 5.5. que involucraron el análisis de 35 dunas seleccionadas en la zona del Túnel Subfluvial y más de 100 en Villa Urquiza. Los resultados se presentan en Figura 5.12.

**Figura 5.12.**  
 Verificación de las fórmulas de Van Rijn y Engelund-Fredsoe, para el cálculo de  $g_{sf}$  en el río Paraná (tomada de Prendes y otros, 1994).



Se advierte que ambas fórmulas predicen satisfactoriamente los transportes observados. Tanto la fórmula de Engelund-Fredsoe como la de Van Rijn siguen la tendencia de los valores medidos. La de Engelund-Fredsoe genera errores menores, y la de Van Rijn subestima los resultados, pero con diferencias aproximadamente constantes.

Otra validación importante de la fórmula de Engelund-Fredsoe en el tramo medio del río Paraná, se obtuvo en los numerosos estudios de sedimentación en pasos de navegación realizados por la FICH, especialmente en aquellos en travesía, donde se presentan ángulos de sesgo importantes entre dirección de corriente y traza del canal (Capítulo 10). Los ajustes logrados con datos observados permitieron ratificar indirectamente la excelente aptitud de esta fórmula para calcular la carga de fondo en el río Paraná.

Resta aún la determinación de  $g_{ss}$  (la carga de fondo en suspensión), o en su defecto de  $g_b$ , lo cual es clave puesto que las pocas mediciones disponibles demuestran que  $g_{ss}$  puede ser varias veces superior a  $g_b$  (Cuadro 5.2.). Como la mayoría de las fórmulas de transporte, las de sedimentos en suspensión también fueron generadas en base a datos de laboratorio en régimen permanente. La inevitable objeción que presentan estas fórmulas de laboratorio tiene que ver con la natural y continua variación de los parámetros hidrosedimentológicos que se producen en los ríos.

El Paraná no es una excepción a este hecho. Como es sabido, cuando una línea de corriente pasa de una condición morfológica determinada a otra, especialmente cuando se produce una expansión en planta y/o en profundidad, el perfil de velocidades reacciona casi inmediatamente. Lo mismo ocurre con el transporte de la carga de fondo,  $g_b$ , tan pronto como el nuevo perfil de velocidades se establece cerca del mismo. Pero el transporte en suspensión,  $g_{ss}$ , necesita mayor tiempo y en consecuencia mayor recorrido de la corriente para que el perfil de concentraciones se "ajuste" en correspondencia con la nueva condición hidráulica.

En los cálculos de transporte para tramos estables en equilibrio, es decir donde la morfología y velocidades se mantienen constantes, este efecto puede despreciarse. No ocurre lo mismo en el caso de variaciones morfológicas relativamente importantes, especialmente en las mencionadas expansiones del río Paraná. A diferencia de las contracciones (que rápidamente incorporan mayor cantidad de partículas al flujo), en la expansión, los granos en exceso para la nueva condición de la corriente deben precipitar con una muy baja velocidad relativa de descenso (ya que la turbulencia tiende a levantarlos) y llegar hasta el fondo, distante varios metros para aquellos que se transportan cerca de la superficie.

En estas situaciones las concentraciones de sedimentos en suspensión no dependen exclusivamente de los parámetros hidrosedimentológicos en esa misma sección, sino de la concentración de sedimentos que el río puso en suspensión en los tramos inmediatos aguas arriba. Es decir, el material suspendido que se mide en una dada sección de un tramo de río es consecuencia no sólo de la capacidad de transporte en la sección de entrada al tramo, sino además de la "adaptación" del perfil de concentraciones a medida que la corriente se desplaza. Se concluye que para emplear exitosamente una fórmula de transporte en suspensión en un río de régimen variado, no sólo es importante ajustar la fórmula en sí, obtenida de laboratorio, sino además el proceso de "adaptación" del perfil de concentraciones.

Para tener en cuenta este fenómeno en una corriente con continuos cambios de velocidades y profundidades, existen varios criterios o alternativas metodológicas que se pueden utilizar. La mayoría de ellas tienen en cuenta la velocidad de adaptación mediante una función matemática en cuyo argumento interviene la relación entre la velocidad de caída del sedimento, representando a la fuerza de gravedad, y la velocidad de corte del fondo, representando la fuerza de sustentación.

En oportunidad de estudios que realizó la FICH con el fin de diseñar la trinchera dragada para colocar la cubierta de protección del Túnel Subfluvial Hernandarias (FICH, 1992), se utilizaron 2 fórmulas alternativas de transporte y adaptación, que han mostrado también en otras ocasiones buenos ajustes en el Paraná Medio. Fueron las siguientes:

a) La de Eysink-Vermaas (1983), adaptada por Van Rijn y cuya expresión es la siguiente:

$$g_{sa}(x) = \frac{b_o}{b_1} g_{so} - \left[ \frac{b_o}{b_1} g_{so} - g_{s1} \right] \left[ 1 - e^{-Ax/h_1} \right] \quad (5.13)$$

donde:

$$A = 0,015 \left( 2 \frac{w}{u_{*1}} \right) \left( 1 + 2 \frac{w}{u_{*1}} \right) \left[ 1 + 4,1 \left( \frac{k_s}{h_1} \right)^{0,25} \right]$$

$g_{sa}(x)$  : transporte en suspensión adaptado ( $m^2/día$ ).

$g_{so}$  : transporte en suspensión a la entrada de la trinchera ( $m^2/día$ ).

$g_{s1}$  : transporte en suspensión dentro de la trinchera ( $m^2/día$ ).

$b_o$  : ancho del tubo de corriente que se aproxima a la trinchera (m).

$b_1$  : ancho del tubo de corriente en la trinchera (m).

$x$  : longitud de sedimentación a lo largo del tubo de corriente (m).

- $h_1$  =  $d + h_0$  : profundidad del agua en la trinchera (m).  
 $d$  : profundidad de la trinchera dragada (m).  
 $w$  : velocidad de caída de la partícula de sedimento suspendido (m/s).  
 $u_{c1}$  : velocidad de corte de fondo en la trinchera (m/s).  
 $k_s$  : altura de rugosidad del fondo (m).

b) La de Engelund-Hansen (Vanoni, 1975c) adaptada en forma lineal, resultando:

$$g_{sa}(x) = g_{so} - \frac{xw}{\bar{u}h_1}(g_{so} - g_{ss}) \quad (5.14)$$

donde:

$$g_{ss} = g_s - g_f$$

y  $g_s$  está dada por la fórmula de Engelund-Hansen:

$$g_s = 0,05 \cdot \bar{u}^2 \cdot \sqrt{\frac{d_{50}}{g(s-1)}} \left[ \frac{\tau_o}{(s-1)d_{50}} \right]^{1,5} \quad (5.15)$$

(El resto de los símbolos ya ha sido definido)

A fin de ajustar la sedimentación de las partículas en suspensión, se tuvo la posibilidad de efectuar un dragado de prueba en la zona del Túnel y observar el recrecimiento de la trinchera dragada. Los trabajos respectivos se desarrollaron entre los días 18/07/92 y 24/07/92. A partir de la última de las fechas citadas se comenzó el seguimiento de la trinchera mediante el relevamiento sistemático detallado del área dragada.

El procedimiento de análisis consistió en simular, mediante modelo matemático, el recrecimiento del nivel medio del lecho en la zona de prueba, utilizando diferentes condiciones, métodos de adaptación y juegos de parámetros de calibración.

En el siguiente cuadro se transcriben los valores medios obtenidos:

|  | VARIANTE 1<br>(Engelund-Hansen)<br>Adap. lineal |                  | VARIANTE 2<br>(Engelund-Hansen)<br>Adap. lineal |                  | VARIANTE 3<br>(Eysink-Vermaas)<br>Adap. expon. |                  |
|--|---|------------------|---|------------------|--|------------------|
|  | $\Delta h$<br>(cm)                              | Tasa<br>(cm/día) | $\Delta h$<br>(cm)                              | Tasa<br>(cm/día) | $\Delta h$<br>(cm)                             | Tasa<br>(cm/día) |
| CONDICION A<br>$\bar{u}=0,9$ m/s $h=9$ m | 41-44   | 0,79-0,85        | 61-68   | 1,17-1,31        | 58-68  | 1,12-1,31        |
| CONDICION B<br>$\bar{u}=1$ m/s $h=11$ m  | 32-34   | 0,62-0,65        | 57-62   | 1,10-1,19        | 60-66  | 1,15-1,27        |

$\Delta h$ : espesor medio calculado del depósito en la trinchera.

Teniendo en cuenta que los valores promedio observados sedimentados en la trinchera de prueba variaron entre 50 y 70 cm (tasa = 0,96 – 1,35 cm/día), la simulación del proceso mediante el modelo matemático estaría mejor representada utilizando las variantes de calibración 2 y 3 cuyos resultados son prácticamente similares. Los resultados obtenidos con la variante 2 son importantes en el sentido de que ratifican indirectamente la aptitud de la fórmula de Engelund-Hansen (ecuación 5.15), para determinar valores de  $g_c$  en el río Paraná.

En los estudios de sedimentación de pasos críticos para la navegación (ver Capítulo 10), si bien se produce un proceso de adaptación del perfil de concentraciones en suspensión, en la mayoría de los pasos el mismo pierde relevancia. Esto se debe a que las velocidades de corriente y profundidades son bajas y, salvo en los casos de expansiones bruscas, el perfil de concentraciones se ajusta continuamente a la gradual disminución de velocidades. En esos estudios de navegación, el recrecimiento de los pasos también fue simulado utilizando la fórmula de Engelund-Hansen, la cual brindó predicciones adecuadas del transporte verificadas también de manera indirecta con datos observados de evolución de perfiles batimétricos en esos sectores (Capítulo 10).

Con ambos efectos, transporte en suspensión,  $g_s$ , y carga de lecho,  $g_r$ , ajustados separadamente como se ha explicado, se consideró conveniente verificar el método de cálculo del transporte total de sedimentos de fondo en forma conjunta. Para ello se dispuso de los datos observados ya citados, sobre la evolución de la trinchera dragada para la construcción del Túnel Subfluvial en el año 1961/62.

Con un modelo matemático se simuló la evolución de esa trinchera empleando diferentes variantes de cálculo de caudales sólidos y afectando a los mismos por un juego de coeficientes que variaban el grado de participación de cada tipo de transporte. En primera instancia se intentó ajustar los volúmenes totales y parciales sedimentados dentro de la trinchera y posteriormente reproducir la evolución del perfil longitudinal a través del tiempo. En la Figura 5.13. se pueden observar los resultados obtenidos para diferentes tiempos parciales de la simulación, en contraste con los valores medidos.

A modo de verificación se simuló, con el modelo calibrado, la evolución del perfil longitudinal sobre otras progresivas de la misma trinchera de prueba, obteniéndose resultados similares. La Figura 5.13., corresponde al ajuste utilizando la fórmula de Engelund-Fredsoe para la carga de fondo. Todo este proceso se repitió nuevamente empleando la fórmula de Van Rijn, lográndose iguales resultados con sólo afectar la expresión original por un coeficiente de mayorización. Se desprende, en consecuencia, que con ambas fórmulas es posible reproducir, con similar grado de precisión, la evolución morfológica de la trinchera de prueba.

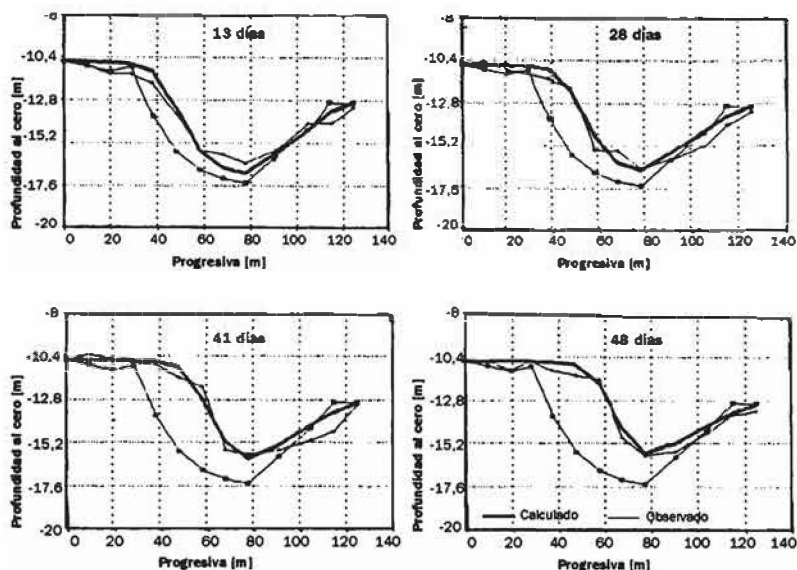


Figura 5.13. Calibración final y verificación de las fórmulas de transporte de fondo recomendadas para el río Paraná en la trinchera de construcción del Túnel Subfluvial. (Tomada de Prendes y otros, 1994).

Sintetizando los aspectos más importantes tratados en cuanto al transporte de fondo en el río Paraná, se puede concluir que:

- El ajuste de las fórmulas de transporte presentadas se ha logrado con abundantes mediciones de campo: primero individualmente cada modalidad de transporte, y luego en forma conjunta, lográndose reproducir satisfactoriamente la evolución de una trinchera medida. Con estos hechos se suman suficientes antecedentes como para garantizar cálculos confiables de  $g$  y  $g_r$  (y por lo tanto,  $g_w$ ) en las condiciones del río Paraná en su tramo medio.

- Un resultado importante que merece destacarse es el siguiente: al comparar valores de carga de fondo calculados por fórmulas con observados, entendiéndose por tales a los obtenidos indirectamente a través de desplazamiento de dunas, persistía la duda sobre la representatividad que tendría una "serie de dunas" con visibles deformaciones y variaciones del estado hidrológico del río, mediante una duna media y un estado permanente intermedio. Las mediciones en la trinchera para la colocación del Túnel, representan físicamente una verdadera trampa de sedimentos donde no existen dudas sobre la determinación del transporte de fondo. Indirectamente, la verificación del método con las mediciones del dragado para la protección, también respalda la técnica de medir transporte de fondo a través del desplazamiento de dunas, en un río de las características del Paraná.

- Las herramientas ajustadas para establecer el transporte de fondo en el río Paraná, en conjunto con series de caudales líquidos de suficiente longitud y otros datos hidráulicos y sedimentológicos necesarios ( $I$ ,  $h$ ,  $d_{50}$ ), permitirán salvar una de las carencias en el conocimiento del río aún

pendiente. Se trata de los transportes de fondo anuales,  $G_s$ ,  $G_{sf}$  y  $G_{ss}$ , sus promedios, sus distribuciones en el año de acuerdo a la magnitud y tipo de creciente, las relaciones entre ellos, etc.

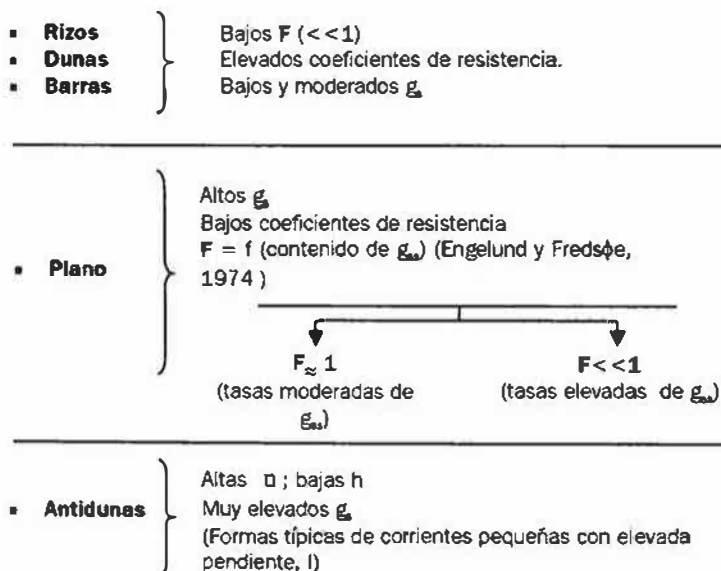
## Formas de fondo

### Conceptos generales sobre formas de fondo

Cuando se brindaron los conceptos sobre corrientes aluviales se explicaba que cuando en un lecho granular no cohesivo (inicialmente plano),  $\tau_0$  superaba el valor crítico de iniciación del movimiento,  $\tau_c$ , y comenzaba el transporte ( $g_s > 0$ ), la superficie de ese lecho se comenzaba a *ondular*. Se dice que el fondo se deforma adquiriendo *irregularidades estadísticamente periódicas*, comúnmente llamadas, *formas de fondo*.

Como ya se dijo, esas formas se desplazan hacia aguas abajo con una velocidad que es sólo una pequeña fracción de la que posee la corriente. Tanto ese movimiento, como el tamaño que pueden adquirir, es variable *espacial y temporalmente*, con la periodicidad estadística implícita aludida (véanse Figuras 5.2. y 5.3.).

En corrientes aluviales se pueden producir diversos tipos de formas de fondo, dependiendo de los valores que alcancen ciertos parámetros del escurrimiento. En general, estas formas se clasifican de acuerdo al número de Froude,  $F = \bar{u} / \sqrt{gh}$  que caracteriza a la corriente (Yalin, 1977). Como es bien sabido (Chow, 1959), el F divide a los escurrimientos en subcríticos (o tranquilos, o fluviales) si  $F < 1$ , y supercríticos (o torrenciales) si  $F > 1$ . Teniendo en cuenta este hecho las formas de fondo que pueden aparecer en corrientes aluviales son las siguientes:





En lo que hace al río Paraná, las formas típicas más comunes que se generan en su lecho son las dunas (Figura 5.6.), que suelen aparecer superpuestas tal como se advierte en los registros de Figuras 5.2. y 5.3. (pequeñas dunas sobre grandes dunas).

### Mediciones de formas de fondo

Gran parte del conocimiento disponible que existe sobre formas de fondo en el río Paraná, proviene del análisis de tres fuentes principales de datos:

- i) Las llevadas a cabo en el tramo de Villa Urquiza (Figura 5.11.).
- ii) Las realizadas por el Ente Interprovincial Túnel Subfluvial "Hernandarias", como parte del control sistemático del río en relación con el diseño y la seguridad de la obra.
- iii) Los relevamientos en pasos de navegación ejecutados por la FICH, como parte de Servicios a Terceros (SATs) desarrollados con el objetivo del mejoramiento de la vía navegable, y en otros sectores del cauce, también como parte de servicios realizados.

Además de estos importantes antecedentes específicos figuran, formando parte de la información accesible, valiosos registros (aunque esporádicos) realizados por el Instituto Nacional de Limnología (INALI) del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) (véase Drago, 1984), y estudios como el del Laboratorio de Hidráulica Aplicada (LH, 1974) del ex-Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas (INCyTH).

A continuación se describen brevemente algunas características sobre las tres principales bases de datos mencionadas.

#### i) Las mediciones en Villa Urquiza

Como se explicara anteriormente, en las mediciones de Villa Urquiza las formas de fondo se registraron en cuatro perfiles longitudinales: P1, P1', P3 y P5 (Figura 5.11.). Estos perfiles se materializaron mediante cuatro boyas colocadas entre las secciones F-F' y A-A'. En cada campaña las boyas se posicionaron aproximadamente en el mismo lugar del cauce, el cual fue fijado mediante dos ángulos medidos con teodolito desde margen izquierda. La longitud de cauce relevada fue de 1-1,2 km en P1', P3 y P5 y de 0,4-0,6 km en P1.

La dirección general de los perfiles longitudinales se determinó mediante floradores superficiales y lastrados lanzados desde aguas arriba de la sección F-F'. Cada perfil fue registrado con sonda ecógrafa, no menos de tres veces en cada oportunidad, conformando una faja de cauce relevado de aproximadamente 40-50 m de ancho.

En los registros se marcaron los valles de la mayor cantidad de dunas presentes. Simultáneamente con cada marcación de valle se tomaron dos ángulos con los teodolitos ubicados en margen izquierda.

La frecuencia adoptada para la realización de los relevamientos de campo fue aproximadamente de 30-40 días para las situaciones de aguas medias y se redujo a 10-15 días en los casos de creciente.

Para cada estado del río relevado, la profundidad media se mantuvo sin grandes variaciones en P3 y P5 por lo que en estos sectores se garantizaría la uniformidad de la corriente (Figura 5.2.). No ocurre lo mismo en P1 y P1' donde en general la profundidad disminuye hacia aguas abajo (Figura 5.3.). Trento y otros (1990), demostraron que el comportamiento de los caudales específicos es similar al de las profundidades a lo largo de los 4 perfiles longitudinales relevados.

Los relevamientos de formas de fondo fueron complementados con mediciones simultáneas detalladas de velocidad de corriente, sedimento en suspensión y material de fondo, en verticales ubicadas en ambos extremos y en un punto intermedio de los perfiles longitudinales citados. Esta última información fue obtenida básicamente en estados medios del río y, aunque presente algunas discontinuidades en relación con la serie de campañas efectuadas, brinda datos hidráulicos y sedimentológicos imprescindibles para interpretar el comportamiento observado de las dunas del lecho.

#### ii) Mediciones del Ente Interprovincial Túnel Subfluvial "Hernandarias"

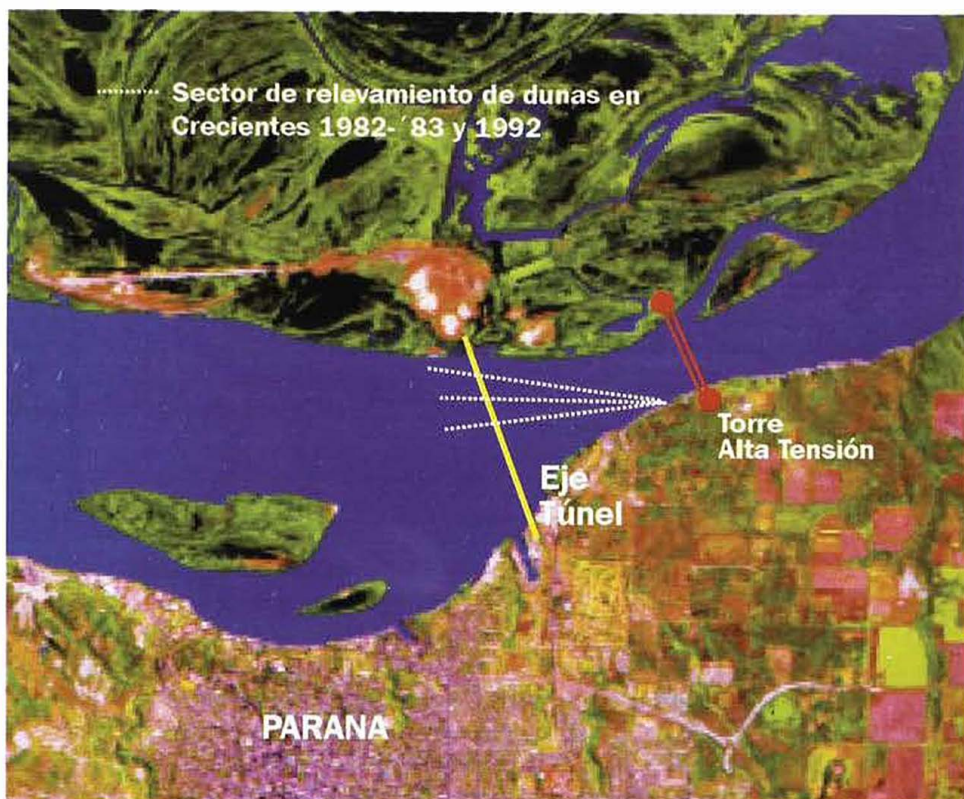
En la zona del Túnel Subfluvial se han realizado mediciones de las formas de fondo prácticamente desde su etapa de diseño (Stuckrath, 1969), hasta la actualidad. Esos relevamientos se concentran particularmente durante los períodos de crecientes, cuando los valles de las grandes dunas del lecho pueden llegar a destapar y poner en riesgo la seguridad de la obra (véase Capítulo 9). En este sentido los datos obtenidos por el personal técnico del Túnel durante las grandes crecientes del río Paraná de 1982-83 y 1992 (las mayores del siglo), constituyen un volumen de información sobre dunas sumamente valioso para el estudio de su dinámica. Concretamente los períodos de registros durante esas crecientes fueron los siguientes:

**Crecida 1982/83: mayo 1983 – febrero 1984**

**Crecida 1992 : junio 1992 – agosto 1992**

Los perfiles longitudinales fueron relevados con una frecuencia que dependió del nivel del río en Pro. Paraná, con un rango que abarcó desde un relevamiento semanal en las épocas más alejadas del pico, hasta una frecuencia de dos veces al día en los momentos de máximos niveles.

Durante la crecida de 1983 se relevaron uno o dos perfiles longitudinales que cruzaban el eje del Túnel en progresivas 1.200 a 1.350 m aproximadamente (origen de progresivas en Torres de Ventilación de la obra en margen derecha) (Figura 5.14.), y con alineación hacia la torre de alta tensión de margen izquierda.



**Figura 5.14.** Ubicación de los perfiles longitudinales para registros de dunas en el área del Túnel. Crecientes 1982-'83 y 1992.

En la crecida de 1992, se registró un conjunto de perfiles longitudinales que, con igual alineación que en la crecida de 1983, cortaban al eje del Túnel en progresivas 1.100, 1.150, 1.200, 1.250, 1.300, 1.350 y 1.400m respectivamente.

En lo referente a la longitud de los perfiles, durante la crecida de 1983 fueron relevados en una extensión que abarcaba desde 400 m aguas abajo del eje del Túnel hasta 1.200 m aguas arriba del mismo. Esta última distancia se extendió en algunos perfiles hasta 1.600 m. Durante la crecida de 1992, la longitud relevada se redujo, comenzando 100 m aguas abajo de la sección del Túnel y finalizando 500 m aguas arriba del mismo. Sobre margen derecha se colocaron señales cada 100 m a lo largo de todas las extensiones mencionadas, de modo de contar con las referencias necesarias para el cómputo de longitudes y velocidades de desplazamiento de las formas de fondo registradas.

### iii) Relevamiento de dunas en pasos de navegación

En los estudios realizados por la FICH destinados al mejoramiento de la navegación en el río Paraná, la estimación de la sobreprofundidad a considerar en los dragados de mantenimiento de los pasos de navegación, por efecto de las dunas del lecho (véase Capítulo 10), exigió contar con registros de las formas de fondo que se podían presentar en esos sitios. Teniendo en cuenta que esos estudios abarcaron gran parte del río Paraná en territorio argentino, se cuenta con abundantes relevamientos de entre 0,5 y 1 km de longitud en un considerable número de pasos llevados a cabo, por lo general, a lo largo del centro del canal de navegación (Figura 5.15.).

La información disponible se refiere normalmente a las alturas medias de dunas, complementadas en diversas oportunidades con mediciones de la velocidad de corriente mediante flotadores, y muestras del tamaño del material de fondo.

Se advierte a través de lo explicado, que se cuenta con mediciones de dimensiones de dunas, localizadas en dos tramos como los de Villa Urquiza y el Túnel, con rasgos morfológicos diferenciados y que permiten caracterizarlas a través del tiempo, incluyendo dos de las grandes crecientes del siglo. Por otro lado se dispone de dimensiones de formas de fondo registradas con un criterio extensivo para estados determinados de la corriente (por lo general, aguas medias), en sectores del cauce normalmente asociados con los ensanchamientos, donde se reducen las profundidades y caudales específicos. Los datos complementarios, hidráulicos y sedimentológicos, necesarios para interpretar lo observado en el lecho, existen en el tramo de Villa Urquiza en número y detalle considerable, aunque no suficiente. En el sector del Túnel se dispone de información en este sentido, aunque por lo general no con el grado de detalle de Villa Urquiza y desfasada en el tiempo con respecto a los eventos relevados en el fondo.

### **Caracterización geométrica de las formas de fondo en el tramo medio**

Sobre la base de datos descripta en el punto anterior, es posible obtener una caracterización adecuada de la geometría de las formas de fondo que cubren el lecho del río Paraná. Como se desprende de los conceptos generales brindados acerca de formas de fondo, su geometría es consecuencia de las características del escurrimiento ( $h$ ,  $u$ ) y sedimentológicas del cauce (tamaño del material de fondo), que en definitiva condicionan el transporte de sedimentos ( $g_{st}$  y  $g_{sw}$ ), variable espacial y temporalmente. Es por ello que junto con los parámetros geométricos que se brindan a continuación se ha incluido, en la medida de su disponibilidad, información adicional acerca de determinados parámetros de la corriente en el momento de los registros del lecho. De este modo el lector podrá en varios casos comprender mejor las posibles causas de las variaciones en las dimensiones observadas de las formas de fondo. Más adelante, dentro de este tema, se ofrecen estudios detallados acerca de la correlación mencionada entre las características del escurrimiento y diversas variables de las dunas del río Paraná.





### Geometría de las formas de fondo en el tramo de Villa Urquiza

En el Cuadro 5.6, se presentan valores de parámetros geométricos medios de las dunas en los cuatro perfiles longitudinales del fondo relevados en Villa Urquiza (Figura 5.11.), para tres estados del río.

**Cuadro 5.6.**  
Características geométricas de las dunas relevadas en el tramo de Villa Urquiza (río Paraná).

| Perfil  | h<br>[m] | Q<br>[m <sup>3</sup> /s] | Dunas grandes |                  |              | Dunas pequeñas superpuestas |                  |              |                |
|---|----------|--------------------------|---------------|------------------|--------------|-----------------------------|------------------|--------------|----------------|
|   |          |                          | H<br>[m]      | $\lambda$<br>[m] | H/ $\lambda$ | H<br>[m]                    | $\lambda$<br>[m] | H/ $\lambda$ | C <sub>f</sub> |
| Estado del río: aguas medias - H <sub>pp</sub> = 3,51 - 3,73 m - Fecha: 20-24/04/87 |          |                          |               |                  |              |                             |                  |              |                |
| P1  | 6,8      | 16875                    | 0,66          | 31,8             | 0,024        | 0,16                        | 3,87             | 0,047        | 0,64           |
| P1'   | 10,3     |                          | 1,69          | 63,2             | 0,028        | 0,17                        | 3,99             | 0,048        | 0,60           |
| P3  | 9,5      |                          | 1,38          | 82,2             | 0,018        | 0,17                        | 4,14             | 0,044        | 0,60           |
| P5  | 14,4     |                          | 1,53          | 97,5             | 0,018        | 0,19                        | 5,55             | 0,038        | 0,63           |
| Estado del río: creciente - H <sub>pp</sub> = 5,06-5,25 m - Fecha: 22-26/06/87      |          |                          |               |                  |              |                             |                  |              |                |
| P1  | 8,6      | 22125                    | 0,91          | 30,8             | 0,032        | 0,16                        | 3,68             | 0,051        | 0,63           |
| P1'   | 12,8     |                          | 1,98          | 81,9             | 0,026        | 0,26                        | 10,22            | 0,031        | 0,60           |
| P3  | 11,8     |                          | 1,46          | 289              | 0,005        | 0,70                        | 14,02            | 0,051        | 0,63           |
| P5  | 17,0     |                          | 1,04          | 238              | 0,005        | 0,50                        | 13,88            | 0,037        | 0,64           |
| Estado del río: aguas medias - H <sub>pp</sub> = 2,52 - 2,62 m - Fecha: 14-18/09/87 |          |                          |               |                  |              |                             |                  |              |                |
| P1  | --       | 13900                    | --            | --               | --           | --                          | --               | --           | --             |
| P1'   | 9,8      |                          | 2,08          | 90,1             | 0,025        | 0,20                        | 6,66             | 0,035        | 0,63           |
| P3  | 8,9      |                          | 1,05          | 87,6             | 0,013        | 0,16                        | 4,67             | 0,042        | 0,64           |
| P4  | 14,0     |                          | 0,71          | 138              | 0,006        | 0,18                        | 7,98             | 0,030        | 0,66           |

C<sub>f</sub> = Área de la duna: coeficiente de forma de las dunas; H/ $\lambda$ : empinamiento.

H .  $\lambda$

|                        | P1    | P1'   | P3    | P5    |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| d <sub>f</sub><br>[mm] | 0,750 | 0,600 | 0,300 | 0,300 |

d<sub>f</sub>: tamaño medio del material de fondo.

A través de los datos del Cuadro 5.6. es posible discriminar entre las características geométricas de las grandes dunas del lecho y de las pequeñas dunas superpuestas, incluyendo su variación a lo ancho del cauce y con el estado de la corriente. La superposición de dunas, como ya se mencionara, es un fenómeno común en el lecho del río Paraná con fuerte incidencia en la hidráulica de la corriente (como se demuestra más adelante). Este hecho fue observado en muchas otras corrientes aluviales del mundo (Coleman, 1969; Allen y Collinson 1974), aunque descrito de manera cualitativa. En este sentido, la cuantificación que ofrecen los datos de Villa Urquiza, es única.

### Geometría de las formas de fondo en la zona del Túnel Subfluvial

El volumen de registros del lecho del Paraná en la zona del Túnel durante las crecientes de 1982-'83 y 1992, fue sometido a un cuidadoso tratamiento (FICH, 1997a), que permitió definir las dimensiones de las grandes dunas observadas durante aquellos eventos.

Las dimensiones promedio se presentan en el Cuadro 5.7. Los valores consignados son medios para intervalos de escala hidrométrica de 25 cm, excepto para los niveles próximos al pico, donde se redujo a 10 cm. Se adoptó este criterio en el análisis de los datos, a fin de contar con suficiente información de dunas individuales como para obtener promedios representativos.

| Intervalo (m)           | H (m) | $\lambda$ (m) | $H/\lambda$ | h (m) | $\bar{u}$ (m/s) |
|-------------------------|-------|---------------|-------------|-------|-----------------|
| <b>Crecida 1982-'83</b> |       |               |             |       |                 |
| 4,00-4,25               | 4,05  | 285           | 0,017       | 18,7  | —               |
| 4,25-4,50               | 4,15  | 326           | 0,016       | 19,6  | —               |
| 4,50-4,75               | 4,22  | 334           | 0,015       | 20,4  | —               |
| 4,75-5,00               | 4,79  | 408           | 0,012       | 20,4  | —               |
| 5,00-5,25               | 5,19  | 402           | 0,013       | 22,5  | —               |
| 5,25-5,50               | 4,54  | 453           | 0,010       | 22,5  | —               |
| 5,50-5,75               | 3,77  | 498           | 0,008       | 22,1  | 1,38            |
| 5,75-6,00               | 3,70  | 488           | 0,008       | 22,5  | 1,43            |
| 6,00-6,25               | 4,10  | 361           | 0,013       | 23,2  | 1,48            |
| 6,25-6,50               | 4,56  | 315           | 0,017       | 23,9  | 1,53            |
| 6,50-6,62               | 4,71  | 325           | 0,016       | 23,4  | 1,64            |
| 6,62-6,74               | 4,64  | 296           | 0,017       | 23,5  | 1,69            |
| 6,74-6,82               | 5,52  | 346           | 0,016       | 24,6  | 1,66            |
| <b>Crecida 1992</b>     |       |               |             |       |                 |
| 4,50-4,75               | 1,76  | 88            | 0,020       | 21,2  | 1,19            |
| 4,75-5,00               | 2,46  | 169           | 0,016       | 20,9  | 1,26            |
| 5,00-5,50               | 2,43  | 158           | 0,021       | 21,2  | 1,33            |
| 5,50-5,75               | 3,09  | 218           | 0,015       | 22,2  | 1,37            |
| 5,75-6,00               | 3,39  | 233           | 0,017       | 22,7  | 1,41            |
| 6,00-6,25               | 4,48  | 270           | 0,017       | 22,9  | 1,45            |
| 6,25-6,50               | 4,57  | 247           | 0,019       | 23,3  | 1,56            |
| 6,50-6,75               | 4,62  | 244           | 0,019       | 23,5  | 1,66            |
| 6,70                    | 4,23  | 227           | 0,021       | 24,5  | 1,63            |

**Cuadro 5.7.** Dimensiones de las grandes dunas del lecho en la zona del Túnel Subfluvial "Hernandarias" durante las crecientes de 1982-'83 y 1992.

Más adelante dentro de este tema se analiza en detalle la evolución de las dimensiones de las grandes dunas a la altura del Túnel Subfluvial durante ambas crecientes y se proponen causas que explicarían ese comportamiento.

### Geometría de las formas de fondo en pasos de navegación

Las dimensiones más habituales de dunas que pueden aparecer en los pasos de navegación del río Paraná se presentan en Cuadro 5.8. Se brinda la información disponible para cada paso ordenados en dirección de la corriente, comenzando en el km 1.460 inmediatamente aguas abajo de la presa de Yaciretá.

Cuadro 5.8.  
Dimensiones de dunas en los pasos de navegación del río Paraná.

| Fecha registro                  | Estado del río                  | Paso           |         | H (m)         | $\lambda$ (m) | H/ $\lambda$ | h (m)  | d <sub>50</sub> (mm) | u <sub>s</sub> (m/s) |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------|---------|---------------|---------------|--------------|--------|----------------------|----------------------|
|                                 |                                 | Denominación   | Km      |               |               |              |        |                      |                      |
| 1-2/96<br><br>(11-12/96 y 3/97) | Aguas altas<br><br>(Aguas med.) | Loro Cuervo    | 1460    | 0,5           |               |              |        |                      |                      |
|                                 |                                 | Pta. Mercedes  | 1428    | 1<br>(0,90)   |               |              | (4,80) | (0,520)              | (0,88)               |
|                                 |                                 | Las Palmas     | 1417    | (0,70)        |               |              | (6,40) | (0,390)              | (1,00)               |
|                                 |                                 | San Pablo      | 1408    | 1<br>(0,80)   |               |              | (4,40) | (0,350)              | (0,78)               |
|                                 |                                 | Entre Ríos     | 1389    | 1<br>(0,90)   |               |              | (6,00) | (0,520)              | (0,97)               |
|                                 |                                 | Santa Isabel   | 1382    | 1,5           |               |              |        |                      |                      |
|                                 |                                 | Las 2 Hinas    | 1358    | 1<br>(1,00)   |               |              | (5,90) | (0,388)              | (0,99)               |
|                                 |                                 | Tacuaraí       | 1353    | (1,30)        |               |              | (5,40) | (0,340)              | (0,82)               |
|                                 |                                 | Inibú Cué      | 1309    | 1<br>(0,50)   |               |              | (5,00) | (0,330)              | (0,84)               |
|                                 |                                 | Travesía       | 1292    | 0,7-1         |               |              |        |                      |                      |
|                                 |                                 | Ibatí          | 1280    | 0,5<br>(1,15) |               |              | (6,00) | (0,330)              | (0,98)               |
|                                 |                                 | Empedrado      | 1140    | 1-1,15        |               |              |        |                      |                      |
|                                 |                                 | Goya           | 989     | 0,5           |               |              |        |                      |                      |
|                                 |                                 | Melabrigo      | 915     | 1,00          |               |              |        |                      |                      |
|                                 |                                 | El Selgo       | 890     | 1,00          |               |              | 6,00   | 0,350                | 0,95                 |
|                                 |                                 | 786            | 1,00    |               |               |              |        |                      |                      |
| 6/93                            | (Aguas med.)                    | Tragadero      | 581-583 | 0,45          | 65,2          | 0,007        | 7,70   | 0,400                | 1,14                 |
|                                 |                                 | Vinculación    | 579-581 | 0,61          | 20,6          | 0,030        | 7,20   | 0,310                | 1,45                 |
|                                 |                                 | Ab. Diamante   | 522-524 | 0,74          | 90,9          | 0,008        | 7,50   | 0,290                | 1,20                 |
|                                 |                                 | Arr. Tacuaraní | 518-518 | 1,00          | 86,0          | 0,013        | 7,00   | 0,320                | 1,38                 |
|                                 |                                 | Tacuaraí       | 509-512 | 1,06          | 73,2          | 0,015        | 8,10   | 0,350                | 1,38                 |
|                                 |                                 | Ab. Tacuaraní  | 504-505 | 1,15          | 87,9          | 0,013        | 8,60   | 0,290                | 1,22                 |
|                                 |                                 | Paribaticó     | 492-493 | 0,65          | 41,0          | 0,016        | 7,50   | 0,250                | 1,18                 |
| Ab. Corrientes                  | 472-474                         | 0,27           | 105,2   | 0,003         | 8,80          | 0,230        | 1,25   |                      |                      |

u<sub>s</sub>: velocidad superficial medida con flotadores.

Se advierte que, en general, las alturas de dunas medidas en los pasos de navegación del río Paraná, oscilan entre 0,5 y 1,0 m. Los promedios y desvíos de las alturas medias, separando los datos entre los correspondientes a los sectores de ruta "barcacera" (km 585-1460) y "fluvio-marítimo" (km 456-585) relevados, son los siguientes:



|                | Km 585-1460 |              | Km 456-585   |
|----------------|-------------|--------------|--------------|
|                | Aguas altas | Aguas medias | Aguas medias |
| $\bar{H}$      | 0,92        | 0,88         | 0,75         |
| $\sigma_{n-1}$ | 0,27        | 0,27         | 0,32         |
| Cv             | 29%         | 31%          | 43%          |
| n              | 14          | 8            | 8            |

Cv: coeficiente de variación ( $=\sigma_{n-1}/\bar{H}$ )  
n: número de datos de la muestra.

Estas últimas observaciones corresponden a tres situaciones medidas de los pasos de navegación en los tramos mencionados. Ello no significa que no puedan existir pasos críticos en donde se presenten dunas con dimensiones fuera de los rangos especificados debido a condiciones hidrosedimentológicas particulares de la corriente en esos sitios. En el paso "Canal de Muelles" frente a Rosario (km 412-418), por ejemplo, se han registrado dunas de entre 2-3 m de alturas medias, lo cual está siendo estudiado actualmente (octubre, 1999) en la FICH.

#### Valores extremos asociados con las crecientes Importancia de la geometría del tramo

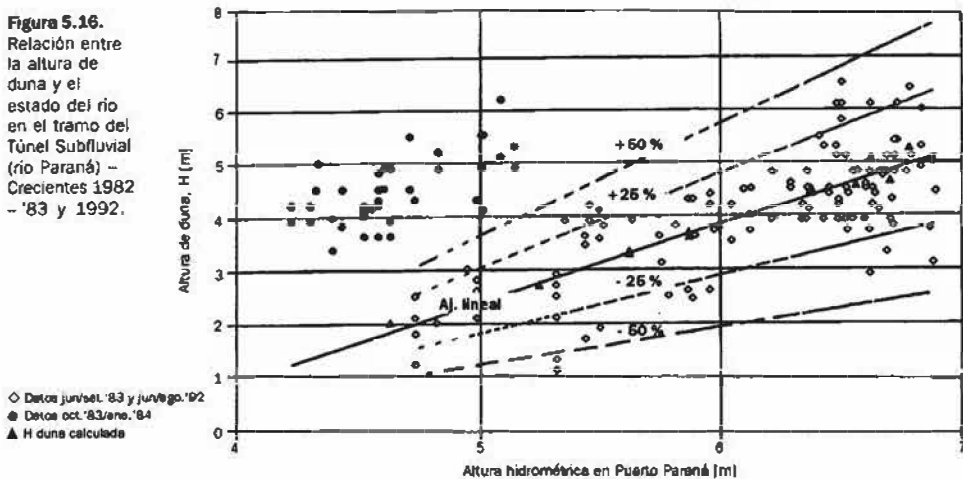
Utilizando los datos hidráulicos, sedimentológicos y de dimensiones de dunas para las crecientes medidas en Villa Urquiza y en la zona del Túnel, fue posible estudiar el comportamiento de las grandes formas de fondo durante esos eventos (Amsler y Schreider, 1999).

Cabe agregar con respecto a la información del Túnel, que la cantidad de dunas individuales seleccionadas durante las crecientes de 1982-'83 y 1992, para el estudio realizado fueron las siguientes:

|                              |                  |
|------------------------------|------------------|
| <b>Creciente 1982 - '83:</b> | <b>113 dunas</b> |
| <b>Creciente 1992:</b>       | <b>56 dunas</b>  |
| <b>TOTAL:</b>                | <b>169 dunas</b> |

A fin de tener una primera idea sobre las tendencias que pudieran existir, estos 169 datos puntuales de alturas de dunas se representaron en función del estado del río (nivel hidrométrico en Puerto Paraná), dado que éste tiene en cuenta globalmente las variaciones de los parámetros del escurrimiento (Figura 5.16.).

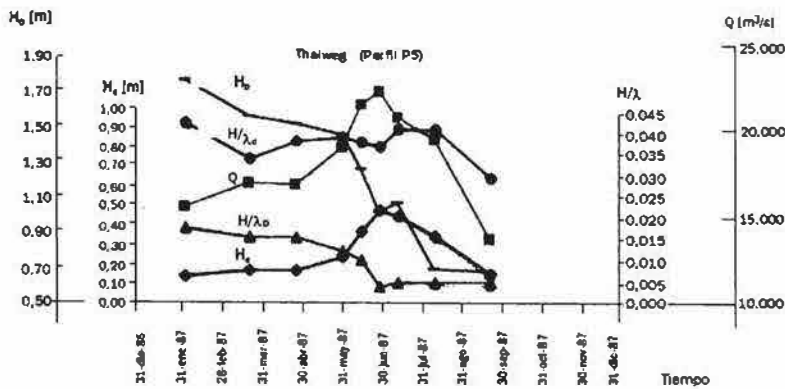
**Figura 5.16.**  
Relación entre la altura de duna y el estado del río en el tramo del Túnel Subfluvial (río Paraná) – Crecientes 1982 – '83 y 1992.



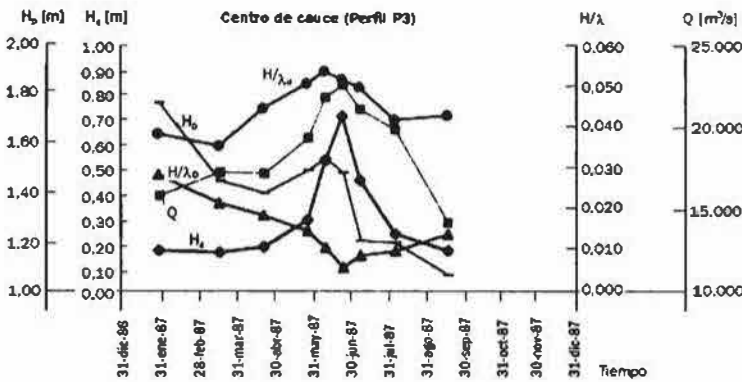
La regresión lineal entre ambas variables permitió definir las tendencias buscadas y las bandas de dispersión. El mejor ajuste ( $r^2 = 0,6$ ) se logró con una recta, lo cual tiene su lógica si se considera la forma exponencial de la curva de descarga ( $H_{pp}$  vs  $Q$ ) y la relación logarítmica entre las alturas de dunas promedio de Cuadro 5.7, y la velocidad de escurrimiento que se presenta más adelante. En lo que respecta a la dispersión, el 80% de los puntos se agruparon dentro de las líneas de  $\pm 25\%$  de error, y el 99% dentro de las correspondientes al  $\pm 50\%$  de error.

Es necesario destacar que un cierto número de puntos (círculos negros en Figura 5.16.), registrados entre octubre de 1983 y enero de 1984, se agruparon fuera de la nube principal y no se incluyeron en la regresión. Este hecho fue el resultado de un “efecto de retardo”, entre la evolución de la altura de la duna y el cambio rápido del hidrograma en ese período (véase Figura 11.5. desde el día 300 en adelante). Debido a esta súbita variación, las grandes formas de fondo no habrían alcanzado a ajustar sus dimensiones a las nuevas condiciones hidráulicas. Durante la creciente de 1992 (Figura 11.9.), se detectó un retardo de sólo 15 días entre las máximas alturas de dunas y los caudales pico. Las distorsiones que este último efecto origina en la Figura 5.16. están disimuladas dentro de la dispersión de los datos puntuales. El “efecto de retardo” en el ajuste de las dimensiones de las dunas a cambios en las condiciones hidráulicas, está bien documentado en la literatura (véase, por ejemplo, Allen, 1976).

Estos resultados en el tramo del Túnel, muestran que la altura de las grandes dunas en ese sector aumenta durante las crecientes del río Paraná. Esta conclusión contradice el comportamiento verificado en el tramo de Villa Urquiza (Amsler y García, 1997; Figura 5.17.) en los perfiles longitudinales P3 y P5.



**Figuras 5.17.** Evolución de las dimensiones de las grandes dunas y pequeñas dunas superpuestas en los perfiles longitudinales P3 y P5 durante la creciente de 1987 en Villa Urquiza (río Paraná).



En Figura 5.17., se advierte que la altura de las grandes dunas en Villa Urquiza disminuye con los estados crecientes del río.

A fin de explicar este comportamiento disímil observado en ambos tramos del Paraná, se calcularon las relaciones sedimento en suspensión/carga de fondo ( $g_{ss}/g_{sf}$ ), correspondientes a cada uno de los registros disponibles. Fredsøe (1981), demostró a través de la teoría de la estabilidad que con tensiones de corte en aumento, " la carga de fondo ( $g_{sf}$ ), tratará de incrementar la altura de la duna mientras que la carga en suspensión ( $g_{ss}$ ) actúa en contra de esto tratando de destruir la duna. Se deduce que si se producen grandes aumentos de  $g_{ss}$ , la altura de la duna tenderá a disminuir a medida que la tensión de corte crece".

La relación  $g_{ss}/g_{sf}$  en ambos tramos se determinó mediante las fórmulas de Engelund-Hansen (ecuación 5.15) y de Fedele (1995) (ecuaciones 5.24 y 5.25), para  $g_s$  ( $g_{ss} + g_{sf}$ ) y  $g_{sf}$ , respectivamente. Ambas fórmulas fueron verificadas con datos observados ya presentados en ambos sitios. En el

caso de la fórmula de Fedele, parte de los datos de desplazamientos de dunas usados en su calibración, se registraron en el mismo tramo del Túnel. Los resultados se presentan en Cuadro 5.9.

**Cuadro 5.9.**  
Evolución de las alturas de dunas y de la relación  $g_w/g_r$  en los tramos de Villa Urquiza y el Túnel (río Paraná) (valores del thalweg).

| Q<br>(m <sup>3</sup> /s)               | h<br>(m) | H<br>(m) | H/λ   | $g_w/g_r$ | Fecha        |
|--|----------|----------|-------|-----------|--------------|
| <b>Tramo de Villa Urquiza (Km 619)</b> |          |          |       |           |              |
| Creciente de 1987                      |          |          |       |           |              |
| 16.880                                 | 14,4     | 1,53     | 0,016 | 9,7       | Abr/20-24/87 |
| 18.980                                 | 17,1     | 1,47     | 0,013 | 9,8       | May/26-29    |
| 21.400                                 | 17,4     | 1,28     | 0,011 | 13,2      | Jun/8-12     |
| 22.125                                 | 17,0     | 1,04     | 0,005 | 12,7      | Jun/22-26    |
| 20.680                                 | 17,2     | 1,09     | 0,006 | 21,0      | Jul/6-10     |
| 19.480                                 | 16,6     | 0,72     | 0,006 | 20,1      | Ago/3-7      |
| 13.900                                 | 14,0     | 0,72     | 0,006 | 12,2      | Sep/14-18    |
| <b>Tramo del Túnel (Km 603)</b>        |          |          |       |           |              |
| Creciente de 1983 (*)                  |          |          |       |           |              |
| 23.106                                 | 22,1     | 3,77     | 0,008 | 2,3       |              |
| 24.360                                 | 22,5     | 3,70     | 0,008 | 2,1       |              |
| 25.790                                 | 23,2     | 4,10     | 0,013 | 2,0       |              |
| 27.435                                 | 23,8     | 4,56     | 0,017 | 1,9       |              |
| 28.790                                 | 23,4     | 4,71     | 0,016 | 1,4       |              |
| 29.790                                 | 23,5     | 4,64     | 0,017 | 1,3       |              |
| 30.690                                 | 24,6     | 5,52     | 0,016 | 1,6       |              |
| Creciente de 1992                      |          |          |       |           |              |
| 19.150                                 | 21,2     | 1,76     | 0,020 | 3,4       |              |
| 20.030                                 | 20,9     | 2,46     | 0,016 | 2,8       |              |
| 21.440                                 | 21,2     | 2,43     | 0,021 | 2,4       |              |
| 23.106                                 | 22,2     | 3,09     | 0,015 | 2,4       |              |
| 24.360                                 | 22,7     | 3,39     | 0,017 | 2,2       |              |
| 25.020                                 | 22,9     | 4,48     | 0,017 | 2,1       |              |
| 27.435                                 | 23,3     | 4,57     | 0,019 | 1,7       |              |
| 29.360                                 | 23,5     | 4,62     | 0,019 | 1,4       |              |
| 29.970                                 | 24,5     | 4,23     | 0,021 | 1,5       |              |

(\*) Valores medios tomados de Cuadro 5.7.

Como se observa en el Cuadro 5.9., la importancia de  $g_w$  en relación a  $g_r$  en Villa Urquiza, es marcadamente mayor que en el tramo del Túnel y con una tendencia opuesta a medida que la creciente progresa. Se ve también que los máximos valores de  $g_w/g_r$  ocurren luego de los caudales pico (un hecho predicho por Fredsøe (1981), en ríos con caudales

gradualmente variables como el Paraná), con un claro efecto de retardo sobre las alturas de dunas.

En el tramo del Túnel la creciente importancia de  $g_{r,f}$  con respecto a  $g_{s,}$  a medida que los caudales crecen, explicarían por qué las alturas de dunas aumentan en esta zona.

Las posibles razones de las diferencias observadas entre ambos tramos, se deberían a la geometría particular de la corriente en cada sitio. Como ya se mencionara, la morfología del cauce en el tramo del Túnel da lugar a una fuerte no uniformidad de la corriente (Figura 5.3.). Por el contrario, en Villa Urquiza, las formas de fondo se registraron a lo largo de los perfiles longitudinales P3 y P5 (Figura 5.2.), con profundidades y caudales específicos casi constantes, i.e., las condiciones bajo las cuales se desarrollaron casi todas las teorías concernientes al comportamiento de corrientes aluviales.

Con respecto a la evolución de las pequeñas dunas superpuestas en creciente, los únicos datos cuantitativos disponibles de Villa Urquiza, revelaron que crecen y disminuyen en fase con los caudales (Figura 5.17.), en los perfiles aproximadamente uniformes P3 y P5. No se detectan aquí "efectos de retardo" como en el caso de las grandes dunas.

### **Clasificación de formas de fondo y predicción de alturas, longitudes y velocidades de desplazamiento de dunas**

La predicción del tipo de formas de fondo que se pueden producir en una corriente aluvial dada, conjuntamente con su geometría y velocidad de desplazamiento, son cuestiones clave en la solución de problemas como la evaluación de la resistencia hidráulica o del transporte de sedimentos. El contar con métodos apropiados para efectuar esas predicciones evita, o al menos reduce, la frecuencia de las siempre costosas mediciones sedimentológicas de campo.

Como resultado de los estudios realizados (Schreider y Amsler, 1992 a,b; Fedele, 1995 y FICH, 1997 a,b), se han desarrollado una serie de metodologías que permiten realizar los pronósticos mencionados en las condiciones del río Paraná.

#### **Clasificación de formas de fondo**

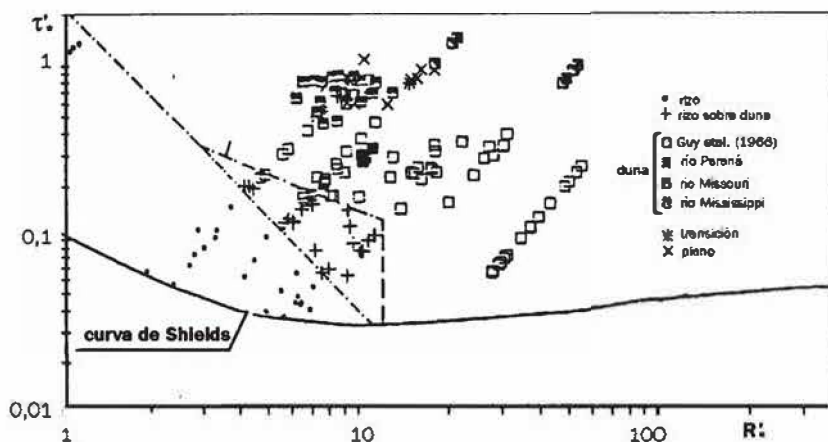
Schreider y Amsler (1992a), construyeron un diagrama de predicción del tipo de formas de fondo que se pueden presentar en régimen subcrítico ( $F < 1$ ), sobre la base de 128 datos de laboratorio y 48 de campo. Estos últimos provienen de los ríos Missouri, Mississippi y Paraná.

Todos los datos correspondieron a valores de  $h/d_s > \approx 100$ , por lo que este parámetro en conjunto con el  $F$ , dejan de tener importancia en las propiedades del escurrimiento bifásico (Yalin, 1977). Bajo estas condiciones

la propiedad "tipo de forma de fondo", quedaría expresada en función de las variables  $\tau_c$  y  $R_c$  de ecuación (5.1). [La variable  $\rho_s/\rho$  no se considera por las razones que se explican en relación con la ecuación (5.26).

Teniendo en cuenta estas consideraciones los autores construyeron su diagrama en función de las variables adimensionales citadas, pero expresadas utilizando la tensión de corte "de grano", es decir  $\tau_c'$  y  $R_c'$ . De este modo presentaron un gráfico similar al de Shields para iniciación de movimiento (Vanoni, 1975b), conteniendo incluso su curva de comienzo del transporte (Figura 5.18.).

Figura 5.18.  
Diagrama de  
clasificación de  
formas de  
fondo.



La ubicación de los datos del río Paraná, pone en evidencia la posibilidad de ocurrencia de dunas con efectos viscosos ( $R_c' < 12$  o  $R_c < 35$ ), siempre que se verifiquen intensidades de transporte suficientes, es decir elevados números de movilidad,  $\tau_c'$ .

Este diagrama constituye una herramienta especialmente apta para escurrimientos en grandes ríos de llanura, ya que combina la posibilidad de incluir los efectos viscosos con un esquema de parámetros adimensionales expresados en función de la tensión de corte de grano, que representa adecuadamente el transporte de la carga de fondo ( $g_{st}$ ), responsable de la generación de las ondas de arena.

#### Predicción de las dimensiones de las formas de fondo

El pronóstico de las dimensiones o geometría de las formas de fondo, significa determinar su altura,  $H$ , su longitud de onda,  $\lambda$ , o la relación entre ambas, el "empinamiento"  $H/\lambda$ , para un dado estado de la corriente.

En el caso del río Paraná, las mediciones de Villa Urquiza permitieron comprobar que para las grandes dunas del lecho en situaciones de aguas medias, se cumple aproximadamente la clásica relación (Yalin, 1977):

$$\frac{\lambda}{h} = 5a7 \quad (5.16)$$

(El valor teórico de la relación es  $\approx 6$ ).

La ecuación (5.16) no se verifica en creciente en los perfiles longitudinales P3 y P5, cuando las grandes dunas se deforman aumentando marcadamente su longitud (véase Cuadro 5.6.).

Para condiciones de permanencia y uniformidad de la corriente, se diseñó un gráfico (Schreider y Amsler, 1992b), que permite predecir el empinamiento,  $H/\lambda$ , cuando los efectos viscosos en el lecho no son despreciables (i.e. cuando  $R_*' < \approx 12$ ). El gráfico incorpora datos del río Paraná el cual, con tamaños del material de fondo donde predominan las arenas medias y finas (Capítulo 4), normalmente se encuentra en esa situación.

Un análisis de los diagramas existentes de  $H/\lambda$  [entre ellos los de Van Rijn (1993) y Yalin (1977)], permitió arribar a las principales conclusiones siguientes:

- Todos los gráficos disponibles para dunas, dan su relación  $H/\lambda$  en casos de escurrimientos hidrodinámicamente rugosos, donde la influencia de  $R_*$  es despreciable.
- Sería teóricamente más consistente expresar  $H/\lambda$  en función de  $\tau_o^*$ , y no de  $\tau_o$ , debido a que la evolución de la tensión de corte total con  $\bar{u}$ , impide definir con claridad la rama descendente del diagrama de empinamiento.

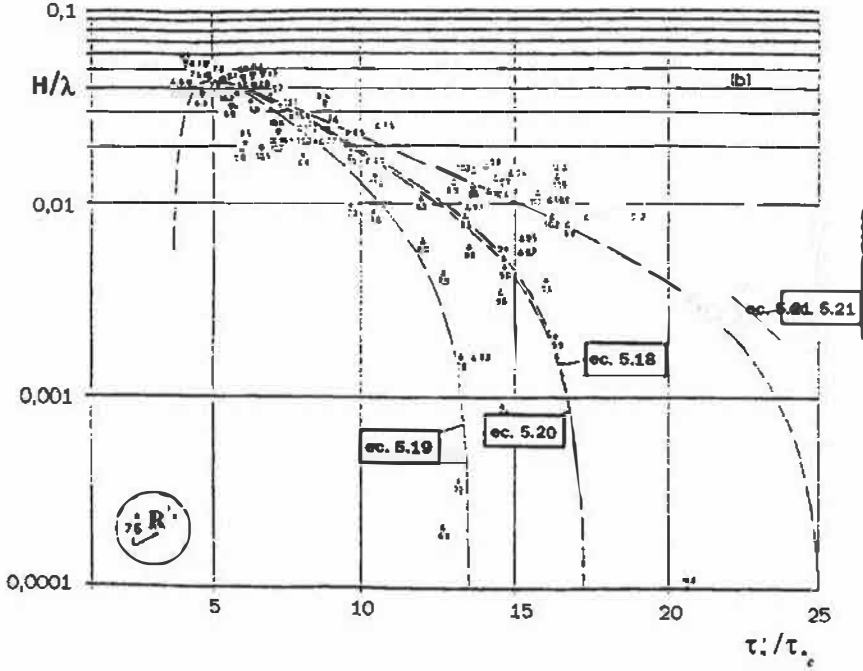
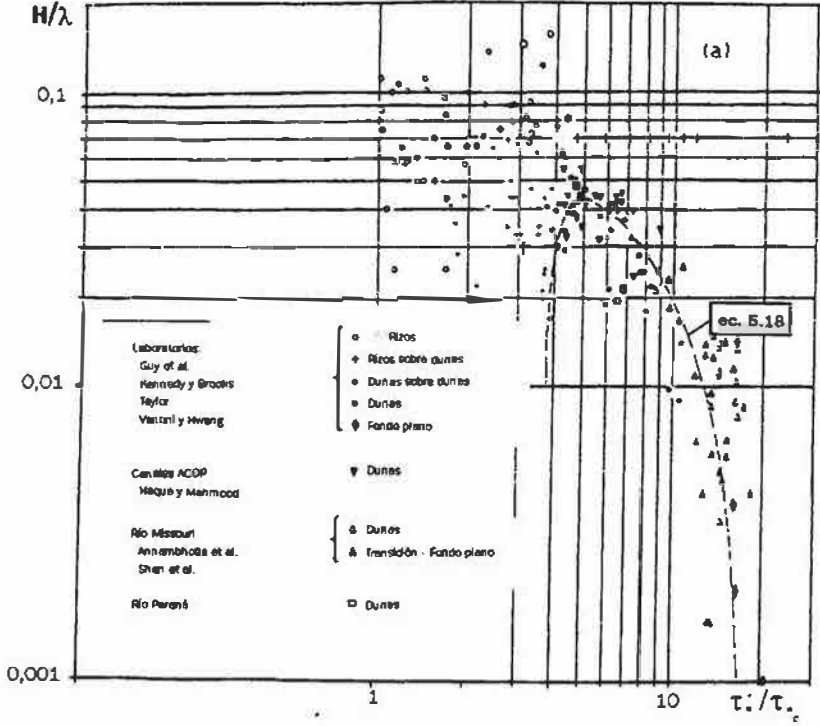
Teniendo en cuenta estos hechos, Schreider y Amsler construyeron su diagrama, representando la siguiente función:

$$\frac{H}{\lambda} = \varphi^*_{H/\lambda}[\tau_o^*; R_*'] \quad (5.17)$$

que no es otra cosa que la ecuación (5.1), en donde la "propiedad",  $H/\lambda$ , se representa en función de las variables  $\tau_o$  y  $R_*$ , pero expresadas en función de la tensión de corte "de grano",  $\tau_o^*$ .

La función  $\varphi^*_{H/\lambda}$  se definió en base a 151 datos de laboratorio y 83 de campo, todos con  $R_*' < \approx 12$  y  $(h/d_s) > \approx 100$ . Esta última circunstancia determina que esta variable no sea relevante en el fenómeno que se intenta formular, por las mismas razones explicadas en relación con el diagrama de Figura 5.18. La variable  $\rho_s/\rho$ , tampoco interviene por motivos ya señalados. En Figura 5.19. (a,b), se presenta el diagrama de empinamiento elaborado por los autores citados.

Figura 5.19. (a) Diagrama de empinamiento en función de  $\tau'/\tau_c$ .  
 Figura 5.19. (b) Representación de los datos de dunas del diagrama en coordenadas semi-logarítmicas.





(En abscisas  $\tau'$ , aparece dividido por la tensión de corte adimensional de iniciación de movimiento,  $\tau_{*c}$ , para asimilarlo a la forma en que aparecen habitualmente en la bibliografía los diagramas de empinamiento).

En Figura 5.19. para el caso solo de dunas, fue posible ajustar a los puntos la siguiente función:

$$\frac{H}{\lambda} = 0,0463 \ln\left(\frac{\tau'_{*}}{\tau_{*c}} - 2,7\right) \exp\left(-0,604 \ln\left(\frac{\tau'_{*}}{\tau_{*c}} - 2,7\right)\right) \left(2,69 - \ln\left(\frac{\tau'_{*}}{\tau_{*c}} - 2,7\right)\right) \quad (5.18)$$

Cuando  $(\tau'_{*}/\tau_{*c}) > \approx 10$ , se observa en Figura 5.19.b, que los datos de dunas se pueden agrupar de acuerdo a ciertos rangos de  $R'$ . Teniendo en cuenta ello, Schreider y Amsler, ajustaron también funciones a cada uno de esos rangos. Son las siguientes:

$$\approx 6,0 < R' < \approx 8,5$$

$$\frac{H}{\lambda} = 0,0588 \ln\left(\frac{\tau'_{*}}{\tau_{*c}} - 2,7\right) \exp\left(-0,644 \ln\left(\frac{\tau'_{*}}{\tau_{*c}} - 2,7\right)\right) \left(2,397 - \ln\left(\frac{\tau'_{*}}{\tau_{*c}} - 2,7\right)\right) \quad (5.19)$$

$$\approx 8,5 < R' < \approx 10,0$$

$$\frac{H}{\lambda} = 0,0482 \ln\left(\frac{\tau'_{*}}{\tau_{*c}} - 2,7\right) \exp\left(-0,644 \ln\left(\frac{\tau'_{*}}{\tau_{*c}} - 2,7\right)\right) \left(2,690 - \ln\left(\frac{\tau'_{*}}{\tau_{*c}} - 2,7\right)\right) \quad (5.20)$$

$$\approx 10,0 < R' < \approx 12,0$$

$$\frac{H}{\lambda} = 0,0404 \ln\left(\frac{\tau'_{*}}{\tau_{*c}} - 2,7\right) \exp\left(-0,708 \ln\left(\frac{\tau'_{*}}{\tau_{*c}} - 2,7\right)\right) \left(3,105 - \ln\left(\frac{\tau'_{*}}{\tau_{*c}} - 2,7\right)\right) \quad (5.21)$$

Como consecuencia de todos los elementos brindados, se advierte que en el río Paraná en condiciones de aguas medias y uniformidad aproximada de la corriente, es posible predecir alturas,  $H$ , y longitudes,  $\lambda$ , medios de las *grandes dunas* del lecho, combinando las ecuaciones 5.16 y 5.19 a 5.21. Los datos necesarios para ello son: profundidad,  $h$ ; distribución de tamaños del material de fondo; temperatura del agua y pendiente,  $I$ , o velocidad media de la corriente,  $\bar{u}$ .

Para situaciones de creciente sólo existen herramientas desarrolladas para predecir las alturas de las grandes dunas en la zona del Túnel Subfluvial que, como se ha señalado presenta una marcada no uniformidad de la corriente. Una de ellas es el ajuste empírico a los datos de dunas individuales disponibles presentado en Figura 5.16. En base a la información de Cuadro 5.7., también se logró ajustar la siguiente ecuación que permite predecir la altura media de las grandes dunas en el mismo sitio (FICH, 1997a):

$$\frac{H}{h} = \left( \frac{h}{d_{50}} \right)^{-0,3} [5,05 \ln u^2 + 0,71] \quad (5.22)$$

( $r^2 = 0,895$ )

Esta ecuación brinda buenos resultados con  $\bar{u} > \approx 1,20$  m/s y  $h > \approx 20$  m. Como era esperable, en Figura 5.16. se puede observar el buen ajuste de los valores de alturas de dunas calculadas con ecuación (5.22) sobre la recta de regresión de la figura.

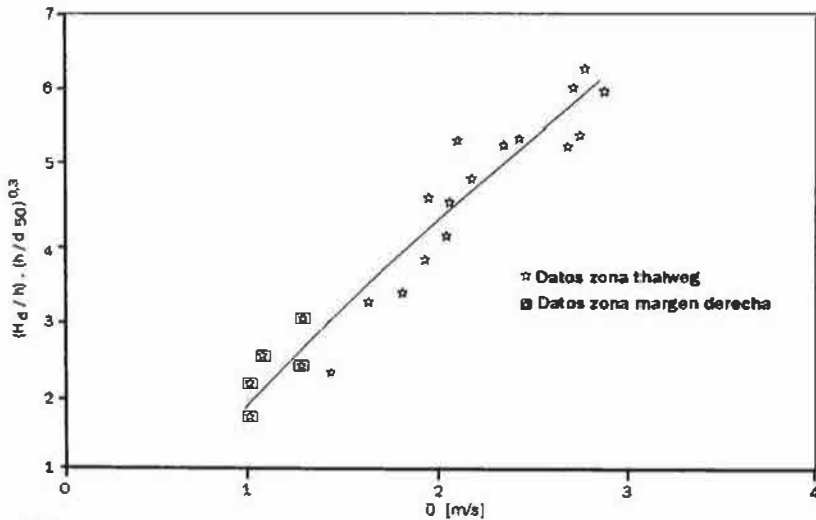
Dado que la ecuación (5.22), es válida para las grandes dunas relevadas en la zona de máximas profundidades (thalweg) del río, surgió la necesidad de ampliar su rango de aplicación (FICH, 1997b) incorporando observaciones complementarias de otros sectores del río en la misma zona. Nuevos perfiles longitudinales relevados en el tramo del Túnel cubriendo prácticamente todo su ancho en setiembre de 1997 para una situación de aguas medias ( $H_{pp} = 3,58$ m), brindaron los datos necesarios que se añadieron a los del Cuadro 5.7. La expresión que produjo el mejor ajuste al total de la información, fue la siguiente:

$$\frac{H}{h} = \left( \frac{h}{d_{50}} \right)^{-0,3} [-0,153\bar{u}^2 + 2,771\bar{u} - 0,703] \quad (5.23)$$

( $r^2 = 0,925$ )

En Figura 5.20., se presenta el ajuste de la ecuación (5.23) a los datos observados. Se advierte allí que la nueva información se dispone adecuadamente siguiendo la tendencia de las observaciones realizadas en las crecientes de 1982-'83 y 1992 sobre el thalweg, produciendo incluso un  $r^2$  mayor que el de la ecuación (5.22).

**Figura 5.20.**  
Evolución de las alturas de las grandes dunas en creciente en la zona del Túnel Subfluvial Hemandarias (río Paraná),



**Predicción de la velocidad de desplazamiento de las formas de fondo**

Utilizando los datos del río Paraná medidos en los tramos de Villa Urquiza y el Túnel Subfluvial, del río Paraguay en su tramo inferior (HRS, 1972) y de Guy y otros (1966), en laboratorio, fue posible calibrar fórmulas que permiten predecir la velocidad de desplazamiento de las dunas del lecho en corrientes aluviales de un amplio rango de tamaños (Fedele, 1995). Son las siguientes:

$d_{50} < \approx 0,4 \text{ mm}$

$$\frac{u_d \cdot H}{\sqrt{g d_{50}^3}} = 5,75 \times 10^{-9} \left[ \left( 1 + 26,4 \cdot d_{50}^{0,22} \cdot \frac{H}{h^{1/3}} \right)^{3,56} \cdot \frac{u^{-3,56}}{d_{50}^{2,4} \cdot h^{0,6}} \right] \quad (5.24)$$

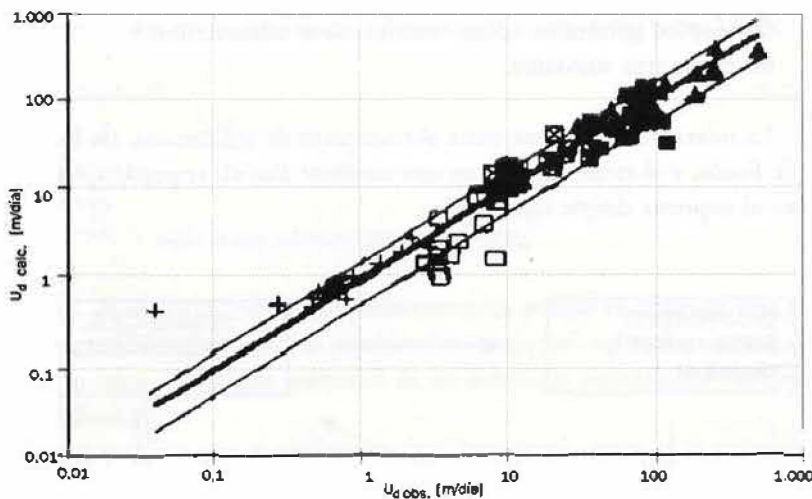
$(r^2 = 0,77)$

$d_{50} > \approx 0,4 \text{ mm}$

$$\frac{u_d \cdot H}{\sqrt{g d_{50}^3}} = 1,5 \times 10^{-9} \left[ \left( 1 + 26,4 \cdot d_{50}^{0,22} \cdot \frac{H}{h^{1/3}} \right)^{4,05} \cdot \frac{u^{-4,05}}{d_{50}^{2,7} \cdot h^{0,68}} \right] \quad (5.25)$$

$(r^2 = 0,95)$

En Figura 5.21, se puede observar cómo ambas fórmulas predicen los datos con los cuales fueron calibradas. Se incluye la banda de dispersión de  $\pm 50\%$ .



**Figura 5.21.** Datos observados y calculados de  $u_d$  con ecuaciones 5.24 y 5.25, con bandas de dispersión de  $\pm 50\%$ . [ Los datos observados fueron usados en la calibración de las ecuaciones 5.24 y 5.25].

- ◊ Paraguay
- Paraná (dunas pequeñas)
- ▲ Lab.  $d = 0,03 \text{ mm}$
- ▣ Paraná (duna grande)
- Lab.  $d < 0,4 \text{ mm}$

Es necesario señalar lo siguiente en relación con las expresiones presentadas:  
 - Con ellas es posible predecir  $u_d$ , tanto de las grandes dunas como de las pequeñas dunas superpuestas. En el primer miembro se emplea como,

H, la altura media de la duna que corresponda (grande o pequeña superpuesta). En el término entre paréntesis del segundo miembro que tiene en cuenta la resistencia al escurrimiento, se recomienda en grandes ríos como el Paraná utilizar como, H, a la altura media de las pequeñas dunas por razones que se explican más adelante.

- Ambas fórmulas están expresadas en función de variables fácilmente medibles con las técnicas hidrométricas habituales ( $d_{50}$ , h,  $\bar{u}$ )

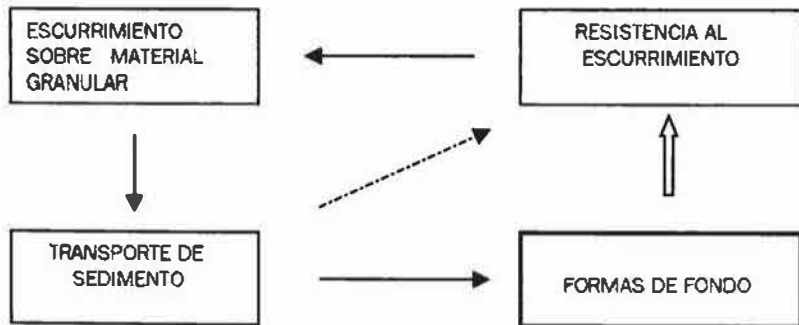
- La ecuación (5.24) válida para  $d < 0,4$  mm, implica que se están considerando en el valor de  $u_d$  los efectos viscosos del escurrimiento, habituales con diámetros de fondo pequeños. Es decir, la influencia de R, implícitamente está tenida en cuenta.

- El cálculo de  $u_d$  con una u otra ecuación implica automáticamente la determinación de  $g_{r,r}$  ya que  $u_d H / \sqrt{gd^3}$  no es otra cosa que la carga de fondo volumétrica adimensional por unidad de ancho debida al desplazamiento de dunas. En otras palabras, Fedele expresó el segundo miembro de ecuación (5.10), en función de las variables globales habituales de la corriente y el sedimento.

## La resistencia al escurrimiento

### Conceptos generales sobre resistencia al escurrimiento en corrientes aluviales

La interacción existente entre el transporte de sedimentos, las formas de fondo, y el escurrimiento, en una corriente aluvial, se puede visualizar en el esquema simple siguiente:



Se evidencia claramente que las formas de fondo inciden marcadamente en la resistencia que el cauce opone al escurrimiento y, a través de ella, influyen sobre este último (i.e. sobre su "estructura mecánica"), condicionando su profundidad, su pendiente y, en definitiva, su velocidad, tal como se explicó al comienzo de este capítulo.

Es decir, *la resistencia*, expresada en forma habitual en términos de los coeficientes "C" de Chezy o "n" de Manning como en la Hidráulica de Canales clásica (Chow, 1959; Henderson, 1966), es otra propiedad importante de los ríos aluviales que es necesario conocer de algún modo. También suele utilizarse para ello el coeficiente de fricción,  $f$ , de Darcy-Weisbach (Kennedy, 1975).

En corrientes aluviales permanentes, uniformes y bidimensionales, la resistencia está determinada por tres factores principales:

- i) la rugosidad producida por los granos de la superficie del lecho;
- ii) las irregularidades mayores de la superficie del lecho (formas de fondo!);
- iii) el material granular difundido en el cuerpo de la corriente.

*(Nota: En el caso de corrientes naturales pueden existir un gran número de condicionantes adicionales a los anteriores que generan mayores resistencias al escurrimiento. Entre ellos se pueden citar la presencia de fosas, bancos, islas, contracciones, expansiones, bifurcaciones, curvas, confluencias, etc.)*

Como la resistencia es otra propiedad de los ríos aluviales, dependerá de las variables adimensionales básicas. De manera funcional queda expresada (Yalin, 1992):

$$c = \varphi_c \left[ \tau_*; R_*; \frac{h}{d_s} \right] \quad (5.26)$$

donde:

$$c = \frac{C}{\sqrt{g}} \quad : \text{coeficiente adimensional de Chezy.}$$

(En 5.26. no se ha incluido el parámetro  $\rho_s/\rho$ , porque se considera que el transporte de sedimentos se produce "en conjunto" o "masivamente", y por lo tanto las fuerzas inerciales de las partículas individuales estarían equilibradas).

Se demuestra que el coeficiente de Chezy involucrado en la relación funcional (5.26.), se puede expresar en términos de los factores principales de resistencia señalados anteriormente:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{1}{C'^2} + \frac{1}{C''^2} \quad (5.27)$$

Del mismo modo se puede proceder con el coeficiente de rugosidad de Manning:

$$n^2 = n'^2 + n''^2 \quad (5.28)$$

o el coeficiente de fricción,  $f$ : (5.29)

$$f = f' + f''$$

En los tres casos ambas componentes principales de resistencia están asociadas a las respectivas tensiones de grano,  $\tau_o'$ , y de forma,  $\tau_o''$ .

Adoptando una expresión de tipo logarítmico para la relación funcional 5.26., considerando un contorno rugoso y valores altos de  $h/d_s$ , es posible demostrar asimismo que:

$$C = 18 \log \left( 12 \frac{h}{k_s} \right) \quad (5.30)$$

donde  $k_s$  es la altura de rugosidad equivalente de arena, presentada en relación con la división de la tensión de corte total,  $\tau_o$ .

A través de lo explicado, se advierte que dos importantes problemas de la hidráulica de ríos como lo son:

- la predicción de la velocidad media (y por ende del caudal), en la sección transversal de un cauce fluvial para una profundidad y pendiente dadas, o
- la predicción de la profundidad (nivel) con que escurrirá por una sección un caudal determinado,

requieren necesariamente conocer la forma de la función (5.26.), o los valores que adquirirán las componentes “de grano” y “de forma” respectivas. Durante los cálculos correspondientes, en la mayoría de los casos se requiere determinar la magnitud que alcanzará,  $\tau_o'$  ( $\tau'$ ), mediante algunos de los métodos diseñados para este fin, como los de Engelund (1966) o Van Rijn (1984).

### **Aplicaciones de los predictores altura-caudal**

#### **Su relación con el factor de fricción**

Los predictores altura-caudal ( $h/Q$ ), constituyen métodos disponibles desarrollados para la estimación del coeficiente de resistencia en corrientes aluviales (Kennedy, 1975). En función de este cálculo, y empleando una serie de datos de partida, permiten predecir el caudal que escurrirá para una profundidad dada a través de la sección transversal de un cauce aluvial, bajo condiciones de permanencia, uniformidad y bidimensionalidad.

En el río Paraná se investigó el comportamiento de varios predictores sin la pretensión de estimar curvas de descarga, pues los aforos líquidos que se realizan regularmente permiten hacerlo mejor, sino buscando en realidad verificar la bondad

de los mismos en un río tan particular, y profundizar así el conocimiento de su mecánica fluvial. Los predictores ensayados fueron los siguientes: (Pujol y otros, 1985):

- Einstein – Barbarossa (1952)
- Lovera-Alam-Kennedy (1969)
- Engelund (1966 – 1967)

En lo que sigue se presenta un detalle de los resultados alcanzados, enfatizando particularmente lo relativo al predictor de Engelund, con el cual se lograron las mejores predicciones.

Este último autor, basado en experiencias en modelos físicos fluviales a fondo móvil, y empleando datos de laboratorio, demuestra la existencia de una vinculación entre la tensión de corte adimensional total,  $\tau_*$ , y la correspondiente a la rugosidad de grano,  $\tau_*'$  (Figura 5.22.).

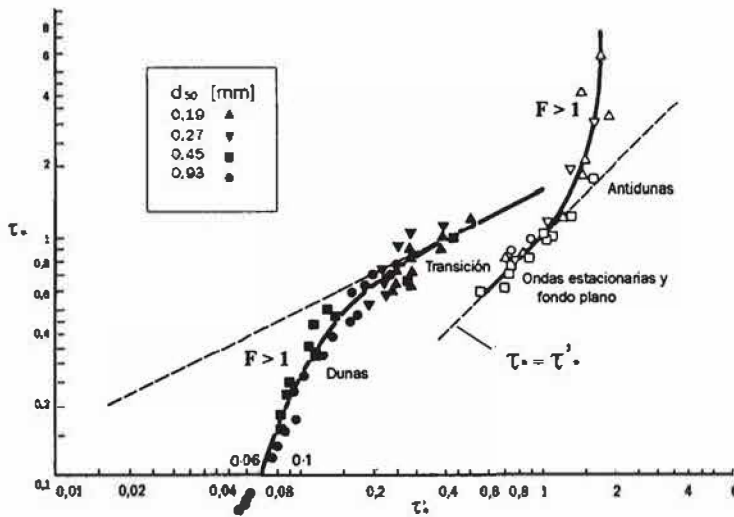


Figura 5.22.  
Diagrama de  
Engelund

Este diagrama fue denominado “Relación Universal de Resistencia”. Se advierte que está constituido por dos curvas:

- La correspondiente al régimen subcrítico o tranquilo con fondo cubierto con dunas, que se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_*' = 0,06 + 0,3 \tau_*'^{1,5} \quad (5.31)$$

- La correspondiente al régimen crítico y supercrítico (o torrencial) con fondo plano o antidunas.



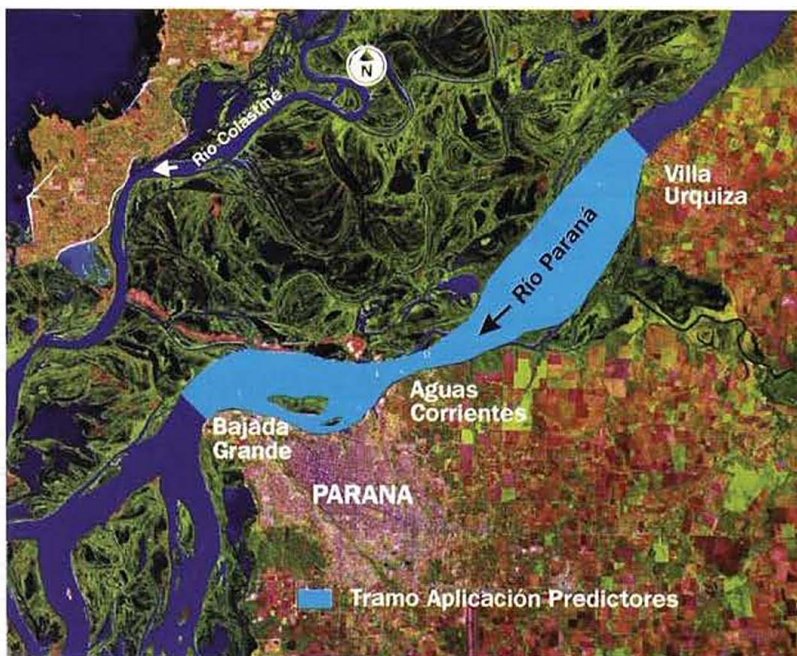
Utilizando este diagrama y una ecuación para la velocidad media,  $\bar{u}$ , basada en la tensión de corte de grano,  $\tau_0'$ , Engelund propone un procedimiento (Kennedy, 1975) el cual, partiendo de los siguientes datos de entrada:

$B$ ,  $h$ ,  $I$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{65}$ , régimen del escurrimiento (subcrítico, etc)

permite calcular el caudal,  $Q$ , que escurrirá para la profundidad media,  $h$ , dada. Asimismo, es posible determinar los coeficientes de fricción  $f$  y  $f'$ , y por lo tanto,  $f'' = f - f'$ , o de ser preferible, los otros coeficientes de resistencia,  $C$  o  $n$ .

Dado que todos los predictores mencionados fueron desarrollados para escurrimientos permanentes, uniformes y bidimensionales, al aplicarlos se debe intentar adoptar una situación lo más cercana posible a esas condiciones. En el caso del río Paraná su régimen es gradualmente variable, con lo cual la condición de permanencia se cumple aceptablemente. En cuanto a la uniformidad (y bidimensionalidad), existen sectores uniformes y no uniformes en el cauce (Figuras 5.2. y 5.3.) y aunque el Paraná presenta grandes relaciones de  $B/h$  (entre 70 y 200) el carácter de bidimensionalidad no se cumple (Cuadro 5.1.). Ante estas circunstancias, Pujol y otros, siguiendo la recomendación de Kennedy (1975), aplicaron los predictores en un tramo largo de cauce de alrededor de 20.500 m con escalas hidrométricas en Villa Urquiza (extremo de aguas arriba), Puerto Paraná y Bajada Grande (extremo de aguas abajo), y con abundante información batimétrica, hidráulica (entre ellas una curva de descarga con aforos periódicos en Aguas Corrientes) y sedimentológica (Figura 5.23.).

**Figura 5.23.**  
Tramo de aplicación de los predictores en el río Paraná.





Todos esos datos sufrieron un cuidadoso tratamiento (DHGyA – SECyT, 1983), que permitió obtener:

a) Curvas de áreas de secciones transversales ( $\Omega$ ), anchos (B) y radios hidráulicos (R), promedios en el tramo mencionado y subtramos interiores en función de la altura hidrométrica en Paraná ( $H_{pp}$ ).

b) Pendientes promedios de pelo de agua y de energía (I), entre las escalas existentes, para aguas bajas, medias y altas y curva de pendientes en función de alturas hidrométricas en Paraná.

c) Distribución granulométrica promedio de tamaños del sedimento de fondo para todo el tramo, determinada en base a muestras obtenidas a lo largo y a lo ancho del mismo. De allí, se estableció la siguiente información para tamaños característicos del material de fondo:

$$\begin{array}{ll} d_{16} = 0,160 \text{ mm} & d_{65} = 0,358 \text{ mm} \\ d_{35} = 0,232 \text{ mm} & d_{84} = 0,520 \text{ mm} \\ d_{50} = 0,287 \text{ mm} & d_{90} = 0,760 \text{ mm} \end{array}$$

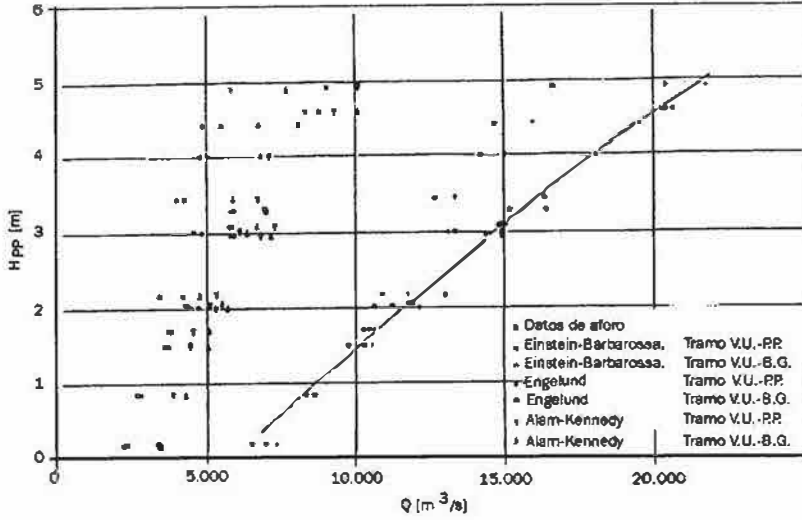
d) Variaciones de las temperaturas medias mensuales del agua del río Paraná obtenidas en base a cinco años de registros.

De este modo se lograron promediar las irregularidades en la geometría del tramo de cauce real (el prototipo) y en la granulometría del sedimento de fondo. Al reducir esas variaciones a través de parámetros medios representativos del tramo seleccionado asociados a una pendiente hidráulica global, se pretende aproximar las condiciones de uniformidad y bidimensionalidad requeridas.

Los predictores mencionados se aplicaron con toda esta base de información, en el subtramo entre Villa Urquiza (VU) y Puerto Paraná (PP) y en el tramo completo (VU-BG: Bajada Grande), de dos modos diferentes:

- Se comprobó la aptitud de predicción de los caudales aforados utilizando alturas de escalas, pendientes y viscosidad del agua de las fechas de los aforos (Figura 5.24.).

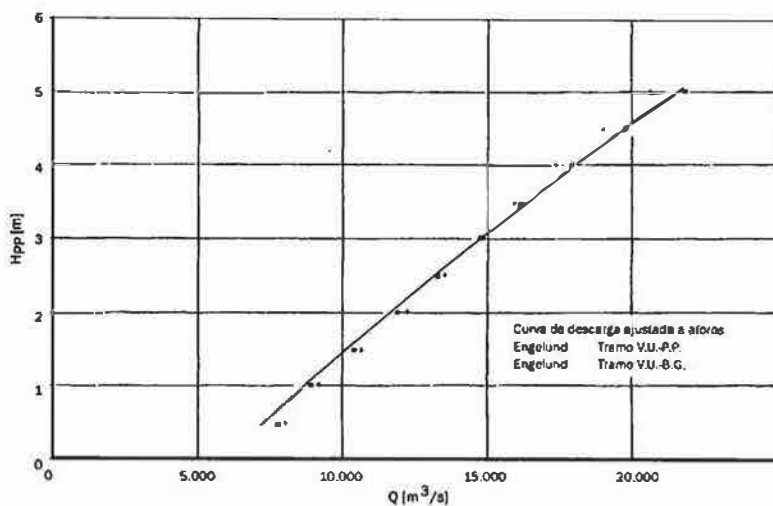
**Figura 5.24.**  
Caudales aforados y calculados en el río Paraná con predictores h/Q. Datos del día del aforo.



• Se predijeron los caudales de la curva de descarga disponible en Aguas Corrientes utilizando temperaturas medias mensuales y pendientes obtenidas de la curva  $I = \varphi_1 [H_{pp}]$ . Para este último caso se brindan los resultados del predictor de Engelund en Cuadro 5.10. y Figura 5.25.

**Cuadro 5.10.** Aplicación del predictor de Engelund en el río Paraná. Tramo Villa Urquiza – Bajada Grande. Predicción con datos medios.

| H [m] | $I \cdot 10^5$ | R [m] | $\Omega$ [m <sup>2</sup> ] | $u_{calc}$ [m/s] | $Q_{calc}$ [m <sup>3</sup> /s] | $Q_{obe}$ [m <sup>3</sup> /s] | $\varepsilon_Q$ [%] | $n_{calc}$ | f     | f'    | f''   |
|-------|----------------|-------|----------------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------|------------|-------|-------|-------|
| 0,50  | 4,34           | 5,93  | 10,050                     | 0,781            | 7,849                          | 7.200                         | 9,0                 | 0,028      | 0,033 | 0,012 | 0,021 |
| 1,00  | 4,44           | 6,17  | 10,850                     | 0,824            | 8,949                          | 8.500                         | 5,3                 | 0,027      | 0,032 | 0,012 | 0,020 |
| 1,50  | 4,60           | 6,45  | 11,700                     | 0,885            | 10,365                         | 10.200                        | 1,6                 | 0,027      | 0,030 | 0,012 | 0,018 |
| 2,00  | 4,74           | 6,75  | 12,550                     | 0,950            | 11,923                         | 11.700                        | 1,9                 | 0,026      | 0,028 | 0,011 | 0,017 |
| 2,50  | 4,78           | 7,02  | 13,400                     | 0,995            | 13,333                         | 13.100                        | 1,8                 | 0,025      | 0,026 | 0,011 | 0,015 |
| 3,00  | 4,80           | 7,30  | 14,250                     | 1,038            | 14,700                         | 14.700                        | 0,7                 | 0,025      | 0,025 | 0,011 | 0,014 |
| 3,50  | 4,80           | 7,57  | 15,100                     | 1,077            | 16,268                         | 16.350                        | -0,5                | 0,025      | 0,025 | 0,011 | 0,014 |
| 4,00  | 4,82           | 7,85  | 16,000                     | 1,122            | 17,958                         | 17.800                        | 0,9                 | 0,024      | 0,024 | 0,011 | 0,013 |
| 4,50  | 4,86           | 8,15  | 16,800                     | 1,176            | 19,752                         | 20.000                        | -1,2                | 0,024      | 0,022 | 0,011 | 0,011 |
| 5,00  | 4,96           | 8,45  | 17,600                     | 1,245            | 21,909                         | 21.500                        | 1,9                 | 0,023      | 0,021 | 0,010 | 0,011 |



**Figura 5.25.** Curva de descarga en Aguas Corrientes (río Paraná) y caudales predichos con el predictor de Engelund. Predicción con datos medios.

De acuerdo con los resultados obtenidos, en términos generales puede observarse que las predicciones efectuadas con el predictor de Engelund son mucho mejores que las obtenidas con los otros dos métodos. Pujol y otros (1985), interpretaron que los predictores de Einstein-Barbarossa y Alam-Kennedy estarían sobrestimando el valor del coeficiente de resistencia del río Paraná mientras que el de Engelund lo aproximaría mejor.

Teniendo en cuenta que el diagrama universal fue ajustado con datos de canales de laboratorio en donde la resistencia es únicamente "de grano" y "por forma", el excelente comportamiento del predictor de Engelund en el río Paraná estaría indicando, en principio, que componentes de resistencia adicionales debido a la influencia de márgenes, cambios de sección, bancos e islas de cauce, etc., tendrían una importancia minoritaria frente a las "de grano" y "forma".

En Cuadro 5.10, se pueden apreciar los reducidos porcentajes de diferencia entre los caudales observados de la curva de descarga disponible en Aguas Corrientes y los calculados con el método de Engelund. También se han incluido en esa Tabla los valores del coeficiente de Manning,  $n$  y del factor de fricción,  $f$ , y sus componentes,  $f'$  y  $f''$ , obtenidos a partir de los parámetros brindados por Engelund, según lo ya explicado. Al evaluar estos coeficientes se deben tener presentes las siguientes circunstancias:

- Que son promedios representativos de un "tramo" del río y que tanto sus valores absolutos como tendencias con el estado de la corriente, pueden llegar a variar si se intenta aplicarlos en sectores localizados del cauce.

▪ Sus valores reflejan las variaciones que han experimentado los parámetros globales de la corriente de donde han sido obtenidos, esto es, el radio hidráulico,  $R$  ( $\approx h$  en el caso del Paraná), la pendiente y la velocidad. Es decir no han sido calculados con el sentido de la ecuación 5.34. como función de los factores responsables directos de la resistencia al escurrimiento: el diámetro de sedimento y la altura de duna.

Como corolario de estos hechos surge que si se pretenden establecer coeficientes de resistencias en zonas puntuales del lecho de un río como el Paraná, donde la determinación de un parámetro como la pendiente de energía,  $I$ , es muy dificultosa o tal vez inviable, es aconsejable el empleo de una ecuación como la (5.34), con variables de medición más sencilla y confiable a través de las técnicas hidrométricas habituales.

### El coeficiente de rugosidad de Manning en el río Paraná

Considerando que las componentes “de grano” y “de forma” del factor de resistencia total dependen, según lo ya explicado, de un tamaño representativo del sedimento del lecho y de las dimensiones  $H$  y  $\lambda$  de las formas de fondo presentes, la ecuación (5.26) puede expresarse del siguiente modo (Fedele, 1995):

$$c = \varphi_c \left[ \frac{h}{d_s}; \frac{H}{\lambda}; \frac{\lambda}{h} \right] \quad (5.32)$$

Al ser representada en términos del coeficiente  $n$ , de Manning la (5.32.) queda:

$$n = \varphi_n \left[ \frac{h}{d_s}; \frac{H}{h} \right] h^{1/6} \quad (5.33)$$

[En la ecuación (5.33) se eliminó  $\lambda$ , utilizando la ecuación (5.16.)]

La forma de la función  $\varphi_n$  se estableció empíricamente a través de un procedimiento basado en series seleccionadas de los datos de laboratorio de Guy y otros (1966). Ello permitió obtener expresiones para las componentes  $n'$  (resistencia de grano) y  $n''$  (resistencia por forma), con las cuales se determinó para el coeficiente  $n$ :

$$n = h^{1/6} \left[ 0,057 \left( \frac{d_s}{h} \right)^{1/6} + 1,504 d_s^{0,39} \frac{H}{h^{1/2}} \right] \quad (5.34)$$

En la Figura 5.26. se presentan los valores de  $n_{obs}$  versus los valores de  $n$  calculados con la ecuación (5.34) y las bandas de dispersión de  $\pm 20\%$ .

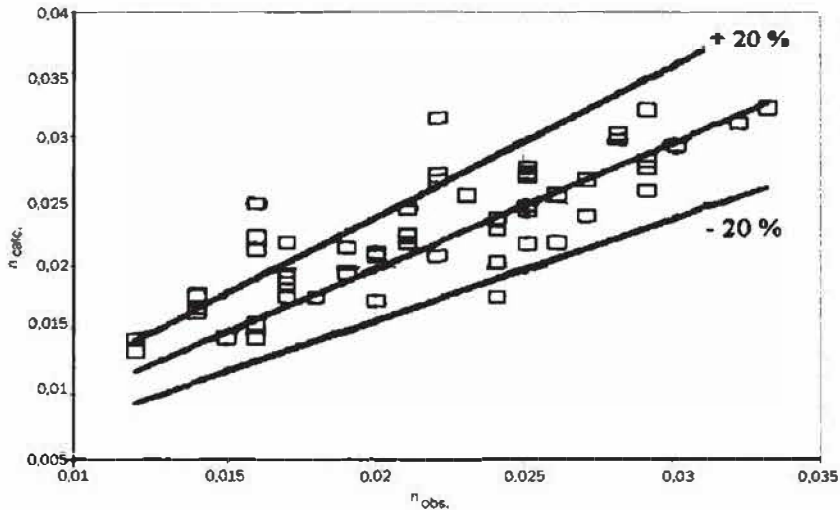


Figura 5.26. Valores de  $n_{obs}$  (Guy y otros, 1966) versus  $n$  calculados con ecuación (5.34).

La Figura 5.26. muestra sólo la aptitud de la ecuación (5.34) para representar los propios datos con que fue calibrada, y no su capacidad de predicción del coeficiente  $n$  de Manning en corrientes aluviales. Si se pretende utilizarla debe considerarse, como mínimo, que fue ajustada con  $n$  observados en canales de laboratorio con tamaños,  $d_{50}$ , del lecho, entre  $\sim 0,200$  mm y  $\sim 1$  mm.

Cabe señalar que Fedele (1995) introdujo la ecuación (5.34), en las funciones (5.24.) y (5.25.) para predecir la velocidad de desplazamiento de dunas. En el caso de los datos del río Paraná ( $d_{50} \approx 0,300$ mm), como altura  $H$  utilizó en la ecuación (5.34) un valor medio correspondiente a las pequeñas dunas superpuestas, ya que estas últimas serían responsables de buena parte de la resistencia por forma en este río, como se demuestra en lo que sigue.

Si bien las ecuaciones para  $u_d$  con la ecuación (5.34) incorporada representan muy bien los datos utilizados para su calibración (Figura 5.21), aún se necesita más investigación para verificar la aptitud del predictor de  $n$  desarrollado en ríos aluviales como el Paraná. De acuerdo con los primeros resultados obtenidos, el tamaño de las pequeñas dunas superpuestas intervendría en una proporción importante en el valor de  $H$  a reemplazar en (5.34.), especialmente en situaciones de creciente del río. Asimismo, es necesario tener en cuenta la suposición de uniformidad del escurrimiento implícita en las ecuaciones de partida, por lo que no serían esperables predicciones confiables de  $n$  en sectores muy localizados del cauce donde aquella condición no se cumpla.

### La altura de rugosidad total, $k_s$ , equivalente de arena

Utilizando los datos informados por Pujol y otros (1985) acerca de la aplicación de los predictores, Amsler y Schreider (1992), determinaron mediante la ecuación (5.30), la altura de rugosidad total media,  $\bar{k}_s$ , equivalente de arena en el subtramo entre Villa Urquiza y Paraná (Figura 5.23). En Cuadro 5.11, se presentan los resultados.

**Cuadro 5.11.**  
Altura de rugosidad total media equivalente de arena entre Villa Urquiza y Paraná (datos de Pujol y otros, 1985).

| $H_{pp}$<br>[m] | Q<br>[m <sup>3</sup> /s] | $\bar{u}$<br>[m/s] | h<br>[m] | C<br>[m <sup>1/2</sup> /s] | $\bar{k}_s$<br>[m] |
|-----------------|--------------------------|--------------------|----------|----------------------------|--------------------|
| 0,50            | 7200                     | 0,70               | 5,92     | 43,85                      | 0,23               |
| 1,00            | 8500                     | 0,76               | 6,17     | 45,78                      | 0,18               |
| 1,50            | 10200                    | 0,84               | 6,45     | 48,72                      | 0,13               |
| 2,00            | 11700                    | 0,90               | 6,75     | 50,34                      | 0,11               |
| 2,50            | 13100                    | 0,94               | 7,02     | 51,65                      | 0,10               |
| 3,00            | 14700                    | 0,99               | 7,30     | 54,40                      | 0,07               |
| 3,50            | 16350                    | 1,04               | 7,57     | 56,16                      | 0,06               |
| 4,00            | 17800                    | 1,07               | 7,85     | 56,80                      | 0,05               |
| 4,50            | 20000                    | 1,15               | 8,15     | 60,30                      | 0,04               |
| 5,00            | 21500                    | 1,17               | 8,45     | 60,07                      | 0,04               |

Comparando los datos de  $\bar{k}_s$ , con las alturas de dunas presentados en el Cuadro 5.6, se advierte que la altura de rugosidad total en el cauce del Paraná estaría en el orden de la altura de las pequeñas dunas superpuestas y no de las grandes dunas del lecho. Más aún, en apariencia sería una cierta fracción de la altura de las pequeñas dunas. Ante esta comprobación, los autores citados profundizaron el análisis de este aspecto empleando los perfiles detallados de velocidad medidos sobre las crestas de las grandes dunas en P3 y P5 en el tramo de Villa Urquiza.

A través del ajuste a esos perfiles de velocidad observados de ecuaciones disponibles en la Mecánica de Fluidos (Clauser, 1956) para escurrimientos turbulentos rugosos, Amsler y Schreider obtuvieron evidencias que les permitieron concluir lo siguiente:

- La magnitud de la altura de rugosidad total equivalente de arena,  $k_s$ , en el río Paraná tendría un valor que se ubica entre 0,5 y 1 vez la altura de las pequeñas dunas superpuestas.
- Ese valor de  $k_s$ , es varias veces mayor que la altura de rugosidad de grano,  $k_s'$ .
- Teniendo en cuenta la ecuación (5.2), se deduce que buena parte de la altura de rugosidad por forma,  $k_s''$ , y por lo tanto de la resistencia que ella

origina en el río Paraná, se debería a las pequeñas dunas que aparecen superpuestas a las más grandes en su cauce activo. En apoyo de esta observación, cabe señalar que se han registrado grandes dunas en el tramo de Villa Urquiza (en el área del thalweg donde se concentran los mayores caudales), con caras de aguas abajo muy tendidas en donde no existiría separación. Luego, las pérdidas por forma asociadas a estos casos serían mínimas (véase por ejemplo perfil P5 en Figura 5.2.).

## Bibliografía

- Alam, A. M. Z. y Kennedy, J. F.** (1969). "Friction factor for flow in sand-bed channels". Journal of the Hydraulics Division. ASCE. Vol. 95. No. HY6, pp. 1973-1992.
- Allen, J. R. L. y Collinson, J. D.** (1974). "The superimposition and classification of dunes formed by unidirectional aqueous flows". Sedimentary Geology. Vol. 12. No. 3, pp.169-178.
- Allen, J. R. L.** (1976). "Computational models for dune time lag: general ideas, difficulties, and early results", Sedimentary Geology. Vol. 15. No 1, pp. 1-53.
- Amsler, M. L. y García, M.** (1997). Discussion of "Sand-dune geometry of large rivers during floods" by P. T. Julien and G. J. Klaasen. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 123. No. 6, pp. 582-584.
- Amsler, M. L. y Gaudin, H. E.** (1994). "Influencia de la superposición de dunas en el transporte de la carga de fondo en el río Paraná". XV Congreso Nacional del Agua. La Plata. Argentina.
- Amsler, M. L. y Schreider, M. I.** (1992). "Aspectos hidráulicos de la superposición de formas de fondo en el río Paraná (Argentina)". Memorias XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Soc. Colombiana de Ingenieros. Asoc. Int. de Inv. Hidráulicas. Vol.3. Cartagena. Colombia, pp. 39-48.
- (1999). "Dunes height prediction at floods in the Paraná river, Argentina". River Sedimentation. Jayawardena, Lee & Wang (eds). A. A. Balkema. Rotterdam, pp. 615-620.
- Benedict, P. C.** (1975). "Fluvial sediment" (Chapter III – Sediment Measurement Techniques, pp. 317-349). En: Sedimentation Engineering. ASCE. No 54. Vito A. Vanoni Ed. New York. 745 p.
- Bertoldi de Pomar, H.** (1980). "Campaña limnológica KERATELLA I en el río Paraná Medio: Sedimentos de fondo". Revista Ecología Argentina. No 4, pp. 31-43.
- (1984). "Estudios limnológicos en una sección transversal del tramo medio del río Paraná, V: Caracteres texturales de los sedimentos de fondo". Rev. Asoc. Cienc. Nat. Litoral. Vol. 15, pp. 57-78.
- Clauser, F. H.** (1956). "The turbulent boundary layer". Applied Mechanics. Vol. 4, pp. 1-51.
- Coleman, J. M.** (1969). "Brahmaputra river: Channel processes and sedimentation". Sedimentary Geology. Vol. 3, Nos. 2/3, pp. 129-239.
- Cotta, R.** (1963). "Influencia sobre el río Paraná del material sólido transportado por el río Bermejo". Comisión Nacional del río Bermejo. Publ. No. 92 EH.
- Chow, V. T.** (1959). "Open channels hydraulics". Mc. Graw-Hill Kogakusha Ltd. Tokyo. 680 p.
- Depetris, P. J. y Griffin, J. J.** (1968). "Suspended load in the Río de la Plata drainage basin". Sedimentology. Vol. 11. No. 1/2, pp. 53-60.
- DHGA-SECYT** (Departamento de Hidrología General y Aplicada – Secretaría de Estado de Ciencia y Tecnología). (1983). "Caracterización hidráulica del río Paraná y sus tributarios en el Litoral". Tercer Informe de Avance. DHGA-UNL. No. 021/83.
- DNCpyVN-CNEA** (Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables-Comisión Nacional de Energía Atómica). (1977). "Transporte de sedimentos por acarreo. Río Paraná. Técnicas nucleares y batimétricas". República Argentina.



- Drago, E.C.E.** (1984). "Estudios limnológicos en una sección transversal del tramo medio del río Paraná; I: Caracteres geomorfológicos e hidrológicos". Rev. Asoc. Ciencias Nat. Litoral. Vol. 15, pp. 1-6.
- Drago, E.C.E. y Amsler, M.L.** (1988). "Suspended sediment at a cross section of the Middle Paraná river: concentration, granulometry and influence of the main tributaries". Sediment Budgets. IAHS Publ. No. 174, pp. 381-396.
- Einstein, H. A. y Barbarossa, N.** (1952). "River channel roughness". Transactions. ASCE. Vol. 117, pp. 1121-1146.
- Engelund, F.** (1966). "Hydraulic resistance of alluvial streams". Journal of the Hydraulics Division. ASCE. Vol. 92. No. HY2, pp. 315-327.
- (1967). Closure to "Hydraulic resistance of alluvial streams". Journal of the Hydraulics Division. ASCE. Vol. 93. No. HY4, pp. 287-296.
- Engelund, F. y Fredsøe, J.** (1974). "Transition from dunes to plane bed in alluvial channels". Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering. Technical University of Denmark. Series Paper 4. 56 p.
- (1976). "A sediment transport model for straight alluvial channels". Nordic Hydrology. Vol. 7, pp. 293-306.
- Engelund, F. y Hansen, E.** (1967). "A monograph on sediment transport in alluvial streams". Teknisk Forlag. Copenhagen. Denmark.
- Eysink, W. y Vermaas, H.** (1983). "Computational method to estimate the sedimentation in dredged channels and harbour basins in estuarine environment". Int. Conf. on Coastal and Ports Eng. in Developing Countries. Colombo. Sri Lanka.
- Fedele, J. J.** (1995). "Dune velocity in sand bed rivers". Hydra 2000. XXVIth IAHR Congress student papers. Vol. 5. London, pp. 37-42.
- FICH** (Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas). (1992). "Diseño del sobreancho del área de dragado para la obra de protección del Túnel Subfluvial". Convenio: Universidad Nacional del Litoral - Comisión Administradora Interprovincial Túnel Subfluvial. Informe Final. Santa Fe. Argentina.
- (1995). "Estudio de las condiciones de navegabilidad de los ríos Paraná y Paraguay, al norte de Santa Fe en territorio argentino". Comitentes: Gob. Prov. de Santa Fe, Bolsas de Comercio de Rosario y Santa Fe y Empresa del Bene S.A. (Representante Usuarios). Tomo III. Santa Fe. Argentina.
- (1997a). "Análisis de la evolución de los principales parámetros hidráulico-morfológicos que podrían influir sobre el comportamiento futuro de la obra de protección del Túnel". Comitente: Comisión Administradora Interprovincial Ente Túnel Subfluvial "Hemandanas". Informe Final. Santa Fe. Argentina.
- (1997b). "Ubicación y dimensiones de la obra de continuación de la cubierta protectora del Túnel Subfluvial. Primera etapa: protección del lecho". Comitente: Comisión Administradora Interprovincial Ente Túnel Subfluvial "Hemandanas". Informe Final. Santa Fe. Argentina.

- Fredsøe, J.** (1981). "Unsteady flow in straight alluvial streams. Part 2. Transition from dunes to plane bed". *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 102, pp. 431-453.
- Guy, H. P.; Simons, D. B. y Richardson, E. V.** (1966). "Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-61". Professional Paper 462-I. U.S. Geological Survey. Washington, D.C.
- Hayes, F. Ch.** (1978). "Guidance for hydrographic and hydrometric surveys". Delft Hydraulics Laboratory. Publication No. 200. 248 p.
- Henderson, F. M.** (1966). "Open channel flow". Mc Millan Publishing Co., Inc. New York. 522 p.
- Hopwood, H. J. y Buceta, J. S.** (1982). "Túnel Subfluvial Hernandarias. Estudio sobre modelo hidráulico". Informe Final. Laboratorio de Hidráulica Aplicada. Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas. Ezeiza. Argentina.
- HRS** (Hydraulics Research Station). (1972). "River Paraguay Study". Report No. EX606. Wallingford. Berkshire. England.
- Hubbell, D. W.** (1964). "Apparatus and techniques for measuring bed load". Water-Supply Paper 1748. U.S. Geological Survey. Washington, D.C.
- HYTSA-Estudios y Proyectos S.A.** (1987). "Cruce subfluvial del Gasoducto Mesopotámico". Estudios Hidráulicos. Vols. B, D y E. Gobierno de Entre Ríos. Consorcio TECHINT-SADE-DYOPSA-SUPERCEMENTO.
- Kennedy, J. F.** (1975). "Hydraulic relations for alluvial streams" (Chapter II - Sediment transportation mechanics, pp. 114-154). En: *Sedimentation Engineering*. ASCE. No. 54. Vito A. Vanoni Ed. New York. 745 p.
- Lelievre, J. y Navntoft,** (1980). "Measuring sediment load in the Paraná river". *Water Power & Dam Construction*, pp. 21-24.
- LH** (Laboratorio de Hidráulica). (1974). "Estudio del sistema fluvial Paraná-Santa Fe". Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. UNESCO. Programa SF/ARG/66/521. Subsecretaría de Recursos Hídricos. Ezeiza. Argentina.
- López, F.; García, C. M.; Droz, C. J. y Prendes, H. H.** (1998). "Mediciones de la estructura del flujo medio y de la turbulencia con un ADCP en el río Paraná, Argentina". *Memorias XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Avances en Hidráulica 2*. Oaxaca. México, pp. 995-1004.
- Lovera, F. y Kennedy, J. F.** (1969). "Friction-factors for flat bed flows in sand channels". *Journal of the Hydraulics Division*. ASCE. Vol. 95. No. HY4, pp. 1227-1234.
- Milli, H.** (1974). "Transporte total de material de lecho en el río Paraná (una aproximación teórica)". Subsecretaría de Recursos Hídricos. Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas. Laboratorio de Hidráulica. Ezeiza.
- Prendes, H. H.** (1981). "Sedimentación en el embalse del Paraná Medio. Cierre Chapetón". Informe Técnico. Proyecto Ejecutivo. Aprovechamiento Paraná Medio. Tomo III. Cap. VII. Empresa Agua y Energía Eléctrica S.E.
- (1983). "A mathematical model with movable bed. Its application to the Paraná river". Second International Symposium on River Sedimentation. Nanjing. China.

- Prendes, H. H.; Huespe, J.; Schreider, M. I.; Amsler, M. L. y Zanardi, L.** (1994). "Pronóstico de evolución de una trinchera dragada en un cauce aluvial. Influencia de las distintas modalidades de transporte". XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Vol. 2., Asoc. Int. de Inv. Hidráulicas. Santiago. Chile, pp. 393-404.
- Prendes, H. H.; Torres, G. R. y Zapata, C. R.** (1996). "Aspectos Sedimentológicos del Riacho Barranqueras". XIV Congreso Nacional del Agua. Neuquén. Argentina.
- Pujol, A.; Amsler, M.L.; Sabatier, M.A. y Gaudín, H.E.** (1985). "Verificación de tres predictores  $Q/h$  en el río Paraná". XII Congreso Nacional del Agua. Mendoza. Argentina.
- Raudkivi, A. J.** (1990). "Loose boundary hydraulics". Pergamon Press. Thirel Edition. 538 p.
- Scartascini, G.** (1971). "Caudales sedimentarios en suspensión del río Alto Paraná". Actas V Congreso Nacional del Agua. Santa Fe. Argentina.
- Schlichting, H.** (1979). "Boundary-layer theory". Mc Graw-Hill Book Co. New York. 817 p.
- Schreider, M. I. y Amsler, M. L.** (1992a). "Diagrama de clasificación de formas de fondo en una corriente aluvial". Memorias XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Soc. Colombiana de Ingenieros. Vol 3. Cartagena. Colombia, pp. 27-37.
- (1992b). "Bedforms steepness in alluvial streams". Journal of Hydraulic Research. Vol. 30. No. 6, pp. 725-743.
- Soldano, F.** (1947). "Régimen y aprovechamiento de la red fluvial argentina". Címera. Buenos Aires. Argentina.
- Stuckrath, T.** (1969). "Movimiento de las ondulaciones del lecho del río Paraná". Mitteilungen des Franzius Institute. Universität Hannover. 20p. [Traducción del original alemán por el Ing. M. H. Balderiote].
- Trento, A.E.; Amsler, M.L. y Pujol, A.** (1990). "Perfiles observados de velocidad en un tramo del río Paraná - Análisis teórico". Memorias XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Vol. 3. Asoc. Int. de Inv. Hidráulicas. Montevideo. Uruguay, pp. 1190 -1121.
- Van Rijn, L. C.** (1984). "Sediment transport, Part I: Bed load transport". Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. Vol 110. No. 10, pp. 1431-1456.
- (1993). "Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas". Aqua Publications. Amsterdam. Holanda.
- Vanoni, V. A.** (1975a). "Properties of sediment" (Chapter II – Sediment transportation mechanics; pp. 19-44). En: Sedimentation Engineering. ASCE. No. 54. Vito A. Vanoni Ed. New York. 745 p.
- (1975b). "Initiation of motion" (Chapter II – Sediment transportation mechanics; pp. 91-114). En: Sedimentation Engineering. ASCE. No. 54. Vito A. Vanoni Ed. New York. 745 p.
- (1975c). "Sediment discharge formulas" (Chapter II – Sediment transportation mechanics; pp. 190-230). En: Sedimentation Engineering. ASCE. No. 54. Vito A. Vanoni Ed. New York. 745 p.

**Yalin, M. S.** (1977). *"Mechanics of sediment transport"*. Pergamon Press. 2<sup>nd</sup> Edition. Oxford, England. 298 p.

— (1992). *"River mechanics"*. Pergamon Press. Oxford, England. 219 p.

# 5.

## **TRANSPORTE DE SEDIMENTOS Actualización**

Mario Luis AMSLER,  
Héctor Hugo PRENDES,  
María Daniela MONTAGNINI  
y Ricardo Nicolás SZUPIANY

# 5.

## **Introducción**

### **Cuantificación del transporte de sedimentos**

La carga de lavado

El transporte de fondo

El transporte total de sedimentos

### **Alcances de los resultados**

### **Bibliografía**

## Introducción

A principios del corriente siglo, el conocimiento de los caudales sólidos transportados en sus distintas modalidades por el río Paraná en su tramo medio, a través de promedios confiables (i.e. a lo largo de series temporales de datos de extensión decenal según lo aconsejado en la bibliografía específica), constituía todavía una carencia, señalada en el cuerpo principal de este capítulo. El saber sobre esta cuestión se limitaba a datos aislados, medidos en sectores específicos del cauce principal o en años particulares, producto del esfuerzo científico y/o de obras de infraestructura que interaccionaban con el cauce principal (Cuadro 5.2). Este sorprendente vacío en un río de la talla del Paraná implicaba no tener información del ingrediente clave en todos los procesos morfológicos que operan en los cauces principales del sistema, que interviene en los diseños de obras de ingeniería relacionadas con ellos y en la construcción y sostenimiento de la gigantesca llanura aluvial adyacente, la cual conforma—a su vez— uno de los humedales más grandes del planeta.

En esta actualización se presentan los resultados logrados en la FICH para cubrir la faltante mencionada en cuanto al transporte de sedimento en el tramo medio en sus dos modalidades principales, la carga de lavado y el material de fondo. En el primer caso, se aborda con cierto detalle el balance sedimentológico derivado de los caudales sólidos que ingresan en Paso de la Patria y los que se registran ~640 km aguas abajo en la sección Túnel Subfluvial. La diferencia, que cierra el balance, sería transferida a través de diversos mecanismos a la planicie aluvial. Se brinda y discute información cuantitativa sobre estas cuestiones por su interés, tanto científico como para la planificación del uso y manejo del humedal mencionado, asociado con aquella.

Tanto para la carga de lavado como para el transporte de material de fondo, se ofrecen solo los resultados cuantitativos ordenados en cuadros y gráficos, con discusiones limitadas a los hechos más significativos y con un mínimo de referencia a los métodos utilizados. Para los detalles de este

último aspecto, el metodológico, se remite al lector a las fuentes bibliográficas que se mencionan en cada caso.

De hecho, todo lo presentado está lejos aún de agotar un tema tan trascendente y solo pretende constituir una base objetiva, científicamente fundada y con conocidos márgenes de incertidumbre (ver Alcances de los resultados), desde donde iniciar nuevas líneas de investigación aprovechando las nuevas tecnologías de medición disponibles en grandes cursos aluviales (ver Capítulo 12 del Tomo 3).

Por razones de espacio, en esta actualización no se tratan los otros tópicos abordados oportunamente en el Capítulo 5, esto es, las formas de fondo y la resistencia al escurrimiento en un gran río como el Paraná. El lector interesado puede consultar los avances realizados en la FICH sobre estas temáticas en: Latosinski et ál. (2017, Capítulo 12 del Tomo 3) y Cisneros et ál. (2020). Geometría de las formas de fondo; Amsler et ál. (2000, 2003). Predicción de alturas de dunas; Latosinski et ál. (2014, 2017). Resistencia por forma con superposición de dunas; Amsler et ál. (2009) y Sandbach et ál. (2012)- Altura de rugosidad total del lecho.

## **Cuantificación del transporte de sedimentos**

### **La carga de lavado**

Se presentan aquí resultados vinculados con los siguientes aspectos de la fracción más fina del sedimento transportado por el río Paraná en su tramo medio: actualización de los cambios en las concentraciones en suspensión en el sistema presentado en figura 5.10, magnitud del transporte de carga de lavado y balance sedimentológico en el tramo medio con información referida a la transferencia de sedimento a la planicie aluvial.

### **Cambios en las concentraciones en suspensión en el sistema**

Amsler y Drago (2009) actualizaron los cambios en las concentraciones medias en suspensión a la entrada del tramo medio (Figura 5.10) con datos de 1993–2003. La figura 5.10 ilustra la situación en la década de 1970. Al comparar la información más reciente con la de los años 70, esos autores señalaron dos hechos: por un lado, la conocida y decisiva influencia de los suministros del río Bermejo sobre las concentraciones de carga de lavado en el río Paraná, aguas abajo de su confluencia con el río Paraguay, y por otro, las concentraciones significativamente más bajas (casi tres veces) de carga de lavado provenientes del Alto Paraná. Ambas cuestiones se discuten en los títulos siguientes.



## El transporte de carga de lavado en el tramo medio

Alarcón et ál. (2003), utilizando datos de concentraciones obtenidos entre 1991 y 1998 por la SIPOH, determinaron los caudales sólidos de carga de lavado en la sección Túnel Subfluvial, inmediatamente aguas arriba de la ciudad de Paraná (Figura 5.27). Esos caudales se obtuvieron con el método (modificado) de la curva de transporte que vincula concentraciones y caudales líquidos diarios observados (Walling, 1977, entre otros). La modificación fue necesaria debido a la falta de coincidencia entre los picos de concentraciones de carga de lavado y caudales líquidos (Figuras 5.7 y 5.8), que dificulta el ajuste de una curva de transporte adecuada. Los resultados se pueden observar en el cuadro 5.12.

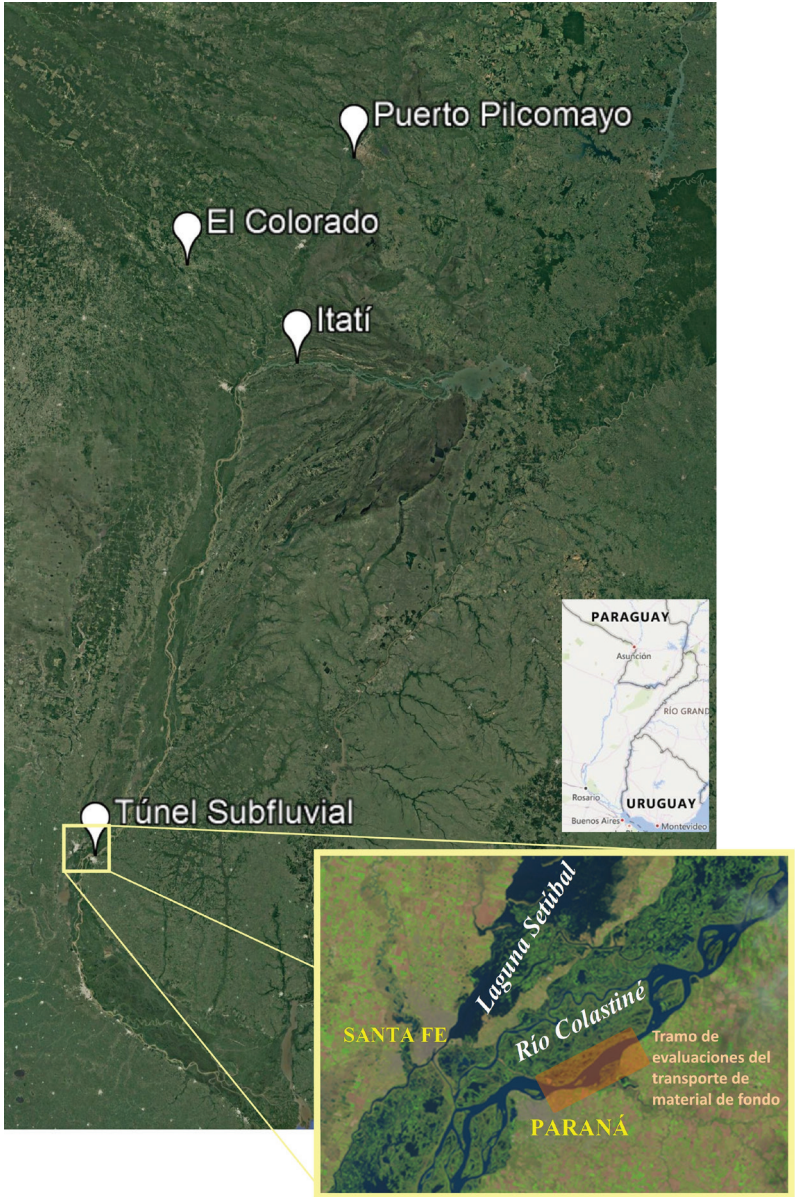
| AÑO      | Transporte total anual de carga de lavado $G_w$<br>[ton/año] |           |                  |             | Aporte de $G_w$<br>del Bermejo<br>al tramo medio<br>del río Paraná [%] |
|----------|--|-----------|------------------|-------------|--|
|          | El Colorado  | Itatí     | Puerto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

**Cuadro 5.12.** Transporte anual de carga de lavado (período 1991–1998) en cada una de las estaciones hidrométricas de figura 5.27 (tomado de Alarcón et ál., 2003).

En el cuadro 5.12 se advierte lo siguiente: (i) la variabilidad anual que puede tener el transporte de carga de lavado en el tramo medio (casi tres veces), reflejo de lo que sucede en la principal fuente de suministro, el río Bermejo, que da cuenta del 92% en promedio de este tipo de transporte en el período considerado; (ii) la necesidad, por un lado, de obtener datos a lo largo de varios años según lo mencionado, para lograr promedios consistentes y, por otro, de especificar la serie temporal de datos a considerar por razones vinculadas con la variabilidad climática a nivel de cuenca, que incide sobre la producción de sedimentos (ver Balance sedimentológico...); (iii) si al promedio de  $G_w$  en la sección del túnel se lo incrementa un 17% para tener en cuenta los caudales que se derivan por el río Colastiné y el sistema Leyes–Setúbal (Figura 5.27), según Alarcón et ál. (2003), el transporte medio de carga de lavado en el eje Paraná–Santa Fe habría sido de alrededor de  $110 \times 10^6$  t/año entre 1991–1998; (iv) este valor es aproximadamente un 20–25% mayor que el estimado por Prendes (1981) a la altura de la isla Chapetón y el obtenido por Drago y Amsler (1988), en ambos casos utilizando datos de la década de 1970 y anteriores (ver capítulo principal). Las causas de este incremento se discuten en el título siguiente.

**Figura 5.27.**

Ubicación de las estaciones hidrométricas en los ríos Bermejo, Paraguay, Alto Paraná y tramo medio (SIPOH) para los estudios del transporte de carga de lavado y material de fondo. Nota: El rectángulo naranja indica el tramo de cauce de 14,75 km entre los hidrómetros de Paraná y Villa Urquiza, donde se determinó el transporte de material de fondo,  $G_s$  y  $G_{sf}$  (modificada de Alarcón et ál., 2003).



## Balance sedimentológico en el tramo medio. La transferencia de sedimento a la planicie aluvial

Nótese en el cuadro 5.12 que en siete de los ocho años, la cantidad de carga de lavado transportada hasta la confluencia Paraná-Paraguay es apreciablemente mayor que la registrada en la sección Túnel Subfluvial. Alarcón et ál. (2003) cuantificaron esas diferencias y brindaron los primeros datos sobre ellas en el período de máximos aportes provenientes del río Bermejo. Encontraron que los valores podían variar entre  $5,1$  y  $46,7 \times 10^6$  t en ese periodo. Esos autores atribuyeron las diferencias a los casi 640 km de llanura aluvial entre confluencia y el túnel (con un ancho promedio de alrededor de 28 km), que actuarían como una gran cubeta de retención de buena parte de la carga que llega al inicio del tramo medio. Lo retenido en la planicie sería mínimo cuando se combinan bajos aportes sedimentarios desde el Bermejo, con escurrimiento intenso y prolongado sobre la llanura aluvial; tal el caso de lo sucedido durante 1998 con la gran creciente ocurrida ese año.

Amsler (2006) ofreció más información sobre este tema en un estudio referido a la evolución del transporte de la carga de lavado entre 1968 y 2004 en estación Itatí, en el Alto Paraná (Figura 5.27). Se utilizaron datos hidráulicos y sedimentológicos de diversas fuentes, tratados y depurados en detalle. En el cuadro 5.13 se presentan los relacionados con el balance sedimentológico en el sistema:

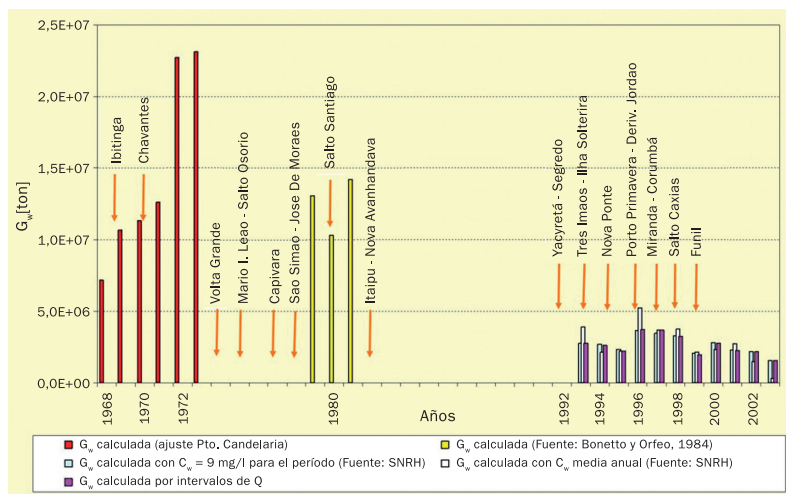
| Período   | $G_w$ ( $\times 10^6$ )<br>[ton] |                 |                    |                     | Deposición<br>( $\times 10^6$ )<br>[ton] |
|---|----------------------------------|-----------------|--------------------|---------------------|--|
|   | Bermejo<br>(1)                   | Paraguay<br>(2) | Alto Paraná<br>(3) | Paraná Medio<br>(4) |  |
| <b>Media en el período</b>                          |                                  |                 |                    |                     |  |
| 1968-1974   | 52,69                            | 1,44            | 14,60              | 53,55               | 15,18                                    |
| 1979-1982   | 142,20                           | 2,69            | 12,50              | 96,69               | 60,70                                    |
| 1993-2004   | 95,27                            | 2,63            | 2,67               | 82,89               | 17,70                                    |
| <b>Años con aportes comparables del río Bermejo</b> |                                  |                 |                    |                     |  |
| 1972-1973   | 73,72                            | 1,51            | 22,71              | 73,58               | 24,36                                    |
| 1981-1982   | 138,35                           | 2,90            | 14,19              | 96,59               | 58,85                                    |
| 1995-1996   | 74,59                            | 2,76            | 2,27               | 75,32               | 4,30                                     |
| 1998-1999   | 134,99                           | 3,54            | 3,51               | 110,70              | 31,34                                    |
| <b>Creciente 1997-'98</b>                           |                                  |                 |                    |                     |  |
| 1997-1998   | 51,62                            | 3,62            | 3,58               | 68,62               | -9,80                                    |

**Cuadro 5.13.**  
Balance sedimentológico en el sistema de la Figura 5.27 con deposiciones de carga de lavado (aguas arriba de la estación Túnel Subfluvial), durante el período de máximos aportes sólidos desde el río Bermejo (tomado de Amsler, 2006).

En el cuadro 5.13 se destacan los siguientes hechos:

(a) La carga de lavado del Alto Paraná disminuyó en términos medios de  $\sim 15 \times 10^6$  toneladas durante los años 70 a menos de  $3 \times 10^6$  toneladas en la década de los 90. Esta situación se visibiliza con claridad en la figura 5.28.

**Figura 5.28.** Evolución temporal del transporte de carga de lavado en Itatí (Alto Paraná; Figura 5.27) durante el período de máximos aportes en el sistema. Las flechas indican los años de puesta en operación de los embalses de referencia en la alta cuenca del río Paraná. Nota: las tres barras desde 1993 hasta 2004 responden a los tres métodos utilizados para valorar  $G_w$  en ese período. SNRH: Subsecretaría Nacional de Recursos Hídricos, ahora SIPOH (tomada de Amsler, 2006).



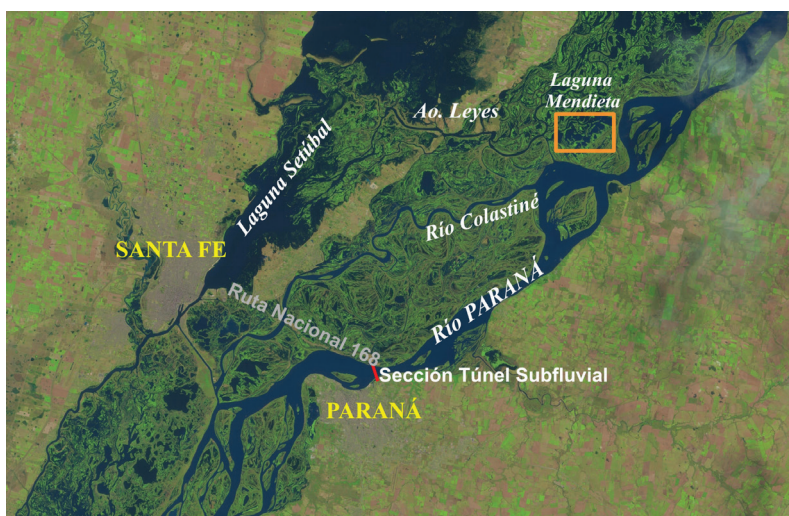
(b) El origen de esa disminución sería el efecto de «atrape» de los grandes embalses, entre ellos Itaipú y Yacyretá, construidos en la alta cuenca desde fines de la década del 60 (flechas en figura 5.28). La influencia de estas obras sobre el sedimento fino transportado por el Paraná y sus afluentes antes de la confluencia con el Paraguay adquiere mayor dimensión si se consideran los cambios a gran escala en las prácticas agrícolas en suelo brasileño desde los años 60 (García et ál., 2002) y las conocidas variaciones climáticas ocurridas a partir de 1970 (Antico et ál., 2014, entre otros), que incrementaron las precipitaciones y caudales en la cuenca del Paraná. Todo ello, que normalmente deriva en degradación de suelos y aumento en la producción de sedimentos, no se reflejó en los 11 años de registros (1993–2004) en estación Itatí, situada sobre el final del Alto Paraná.

(c) En términos medios, la sedimentación aguas arriba de la estación Túnel Subfluvial no varió mayormente entre 1993–2004 con respecto a 30 años atrás, pese a la reducción de los aportes del Alto Paraná. Ello se debería a los mayores suministros del Bermejo, que habrían compensado las reducciones del Alto Paraná. Sin embargo, al considerar años específicos (1972–1973 vs. 1995–1996 y 1981–1982 vs. 1998–1999 en el cuadro 5.13) con aportes comparables desde el Bermejo, se verifica que la deposición hacia el presente en ciertos años puede ser entre un 50%



y más de cinco veces menor que la que se registraba en la década del 70. Más aún, en situaciones límites (1997–1998), con los mínimos caudales sólidos del Bermejo entre 1968 y 2004, ocurridos simultáneamente con la cuarta creciente registrada en el Paraná, se puede producir degradación de la planicie aluvial.

(d) La carga de lavado que sedimenta a lo largo de la planicie aluvial es transferida desde el cauce principal a través de diversos mecanismos (Ramonell, 2020). Los cauces menores que se desprenden de margen derecha y se conectan con la multitud de lagunas de diverso tipo y forma presentes en toda la llanura adyacente (véanse, por ejemplo, figuras 4.1, 4.6b y 4.10) jugarían un papel central como agentes de transferencia y distribución del sedimento. Mangini et ál. (2003) estudiaron uno de esos mecanismos mediante mediciones en la laguna Mendieta, conectada directamente con el cauce principal por un curso menor del mismo nombre (Figura 5.29). Interesaba en particular la detección de floculación en la deposición de la carga de lavado, dado el alto contenido de arcillas presente en ella (Cuadro 5.3).



**Figura 5.29.** Ubicación de la laguna Mendieta en la llanura aluvial del río Paraná en su tramo medio a la altura del km 645 de la ruta de navegación. Conexión directa con el cauce principal a través del riacho del mismo nombre (tomada de Mangini et ál., 2003).

Se realizaron ocho campañas entre el 15 de marzo y 15 de mayo de 1999, esto es, durante el período de máximos aportes del río Bermejo, donde se ejecutaron mediciones hidráulicas y sedimentológicas simultáneas. Los principales resultados y conclusiones de este estudio se puntualizan a continuación:

- La composición mineralógica promedio de las arcillas presentes en la carga de lavado fue: illita (50%), montmorillonita (24%), caolinita (10%), clorita (10%) y otros minerales (6%). Según Depetris y Griffin (1968), la illita está suministrada principalmente por ese río desde su alta cuenca cuando drena los ambientes de la precordillera andina. Ello explica su elevado porcentaje. En relación con la caolinita, los mismos autores (y otros) sugieren que las cuencas de los ríos Paraguay y Alto Paraná serían las principales áreas de origen. En cuanto a la montmorillonita, segundo mineral en importancia, son bien conocidas sus propiedades floculantes. Es el mineral de arcilla con mayor “capacidad de intercambio de cationes” (CEC), seguido por la clorita, para formar flóculos (Mehta y McAnally, 2008), aún en aguas con bajo contenido de sólidos disueltos como las del Paraná. En línea con este hecho, el contenido de montmorillonita en el sedimento de fondo de la laguna Mendieta fue 38% mayor que el registrado en el sedimento en suspensión.

- Es necesario dividir la carga de lavado en dos fracciones para estudiar su deposición. Una fracción está compuesta por las partículas más gruesas que depositan individualmente sin interactuar entre ellas; la otra, formada por las más finas (limos finos y arcillas), es la afectada por la floculación para su sedimentación. El diámetro límite entre ambas fracciones sería 13–18  $\mu\text{m}$  (15  $\mu\text{m}$  en promedio).

- El 68% de la carga de lavado total depositada en la laguna fue de la fracción inferior a 15  $\mu\text{m}$ , lo cual demostraría que la formación de agregados es un mecanismo importante para la deposición de esas partículas en los ambientes lagunares de la llanura aluvial.

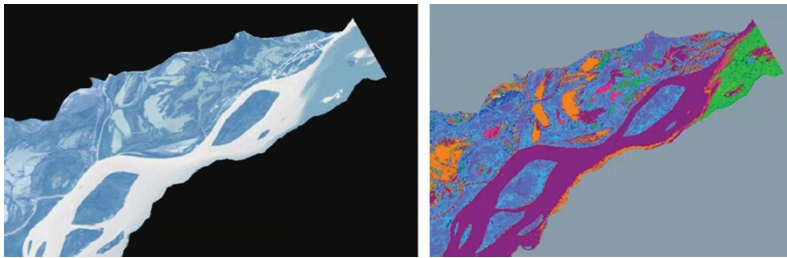
- Finalmente (y tal vez el resultado de mayor importancia práctica), casi todas las partículas menores a 11–15  $\mu\text{m}$  permanecieron en suspensión dentro de la laguna hasta que la velocidad del agua disminuyó por debajo de un valor crítico de 0,15–0,20 m/s. Alcanzada esa condición, se produjo una súbita y masiva deposición por floculación.

(e) Boller Troncoso et ál. (2017) brindaron resultados preliminares en cuanto a la distribución de la carga de lavado transferida desde el cauce principal a la planicie. Lo hicieron mediante el tratamiento de imágenes satelitales del cauce principal y la planicie aluvial en todo el tramo medio. Para tratarlas utilizaron el software de clave abierta SoPI (CONAE, 2015), en los escenarios de febrero–marzo de 1997 y abril de 1998 (meses de aportes máximos desde el Bermejo) y caudales relativamente altos y com-

parables en el río Paraná. Los valores de  $G_w$  en El Colorado fueron muy diferentes en esos años:  $148 \times 10^6$  tn/año (1997) y  $61 \times 10^6$  tn/año (1998). En la figura 5.30 se presenta la situación de 1997 en el sector inmediatamente aguas abajo de la confluencia con el río Paraguay.

**Figura 5.30.**

Río Paraná y planicie aluvial aguas abajo de la confluencia con el Paraguay. Fecha: 02-03/1997. Rango de caudales: 19929–21750 m<sup>3</sup>/s. (a) Nótese, en color blanquecino, las altas concentraciones sobre margen derecha al inicio del tramo, con una mezcla en casi todo el ancho del curso principal solo 10 km aguas abajo de la confluencia. (b) Color violeta: sector de altas concentraciones mencionado en (a) y áreas específicas de lagunas y cauces menores en planicie aluvial de margen derecha; color verde: zona de agua con concentraciones bajas del Alto Paraná y en algunas lagunas de la planicie; color naranja: sectores con concentraciones intermedias en: (i) un delgado sector del cauce principal sobre margen izquierda y en la interfase con el sector violeta (zona de mezcla con las aguas del Alto Paraná) y (ii) lagunas y sectores de ellas en la planicie de margen derecha (las diferencias en la coloración de estos cuerpos de agua se asocian a sus distintos grados de conectividad (directa, indirecta, aislada) con el cauce principal (tomada de Boller Troncoso et ál., 2017).



Boller Troncoso et ál. (2017) establecieron que el sector de planicie aluvial, donde eventualmente sedimentaría la carga de lavado transferida desde el río Paraná para las situaciones estudiadas, se extiende en fajas de ancho variable adyacentes al cauce principal y secundarios de mayor jerarquía (e.g. Colastiné, San Javier). Ese sector representó un 9,4% y 7,7% de la superficie total de la planicie (13702 km<sup>2</sup>; se incluyen aquí las islas de los cursos principales del sistema) en 1997 y 1998, respectivamente. Esa distribución del área de sedimentación se compadece con lo explicado en el Capítulo 16 del Tomo 3 en cuanto a que las deposiciones más altas se verifican próximas a las principales vías de transporte de la carga de lavado, dando cuenta de las mayores cotas topográficas de esas zonas y las fuertes pendientes transversales registradas hacia el interior de la planicie.

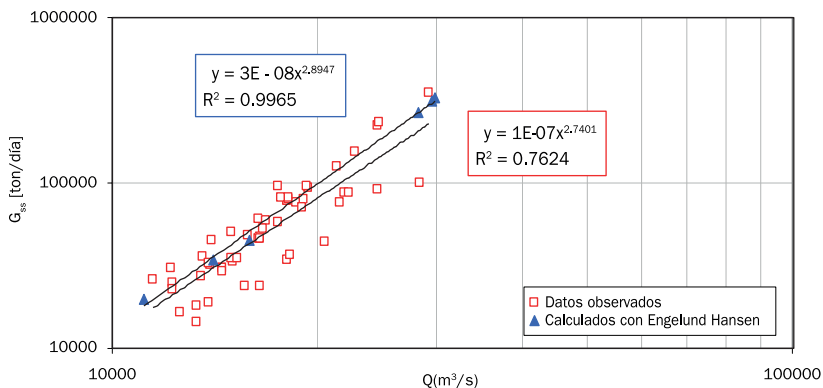
### El transporte de fondo

Se ha verificado que, con las fórmulas de Engelund–Fredsoe (1976) (Ec. 5.12) y Engelund–Hansen(1967) (Ec. 5.15), se alcanzan predicciones

confiablen el tramo medio del río Paraná, de la carga de fondo,  $G_{sf}$ , y del transporte total de material de fondo,  $G_s$ , respectivamente. Ello, a su vez, permite conocer el transporte de material de fondo en suspensión,  $G_{ss}$  ( $= G_s - G_{sf}$ ) (Ec. 5.9).

Alarcón et ál. (2003) aplicaron esas ecuaciones en el tramo de cauce indicado en la figura 5.27. Previamente llevaron a cabo una calibración adicional de la Ec. 5.15 en la sección Túnel Subfluvial, aprovechando la información de  $G_{ss}$ , disponible en ese lugar (SIPOH). Los datos hidráulicos y sedimentológicos necesarios para el cálculo fueron obtenidos de mediciones realizadas por la FICH y otras instituciones durante la década del 90, en la sección del túnel (Figura 5.31).

**Figura 5.31.** Comparación entre datos observados de sedimento de fondo en suspensión y valores calculados con Engelund-Hansen (1967) en la sección Túnel Subfluvial de la figura 5.27 (tomada de Alarcón et ál., 2003).



Nótese que la fórmula sigue correctamente la tendencia de la curva observada y se ubica ligeramente por encima de esta, lo cual tiene su lógica, puesto que E-H, además de  $G_{ss}$ , tiene en cuenta  $G_{sf}$  y la arena en suspensión de la «zona no medida» por el muestreador, cercana al fondo. El grado de apartamiento entre ambas curvas es aceptable si se tienen en cuenta las proporciones de  $G_{ss}$  y  $G_{sf}$  en  $G_s$ , que se presentan en el cuadro 5.14.

La aplicación de las ecs. 5.12 y 5.15 en el tramo mencionado se realizó utilizando valores medios de secciones transversales, profundidades, anchos, pendientes superficiales y de la granulometría del material de fondo, provenientes de diversas fuentes y para todo el rango de alturas hidrométricas diarias disponibles entre 1976 y 1998. Los caudales líquidos se establecieron con la curva de descarga ajustada en la sección Túnel Subfluvial. Los resultados se ofrecen en el cuadro 5.14.



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

**Cuadro 5.14.**

Transporte anual de material de fondo en todas sus modalidades en el tramo medio del río Paraná. Tramo: Villa Urquiza–Puerto Paraná (Figura 5.27). Período: 1976–1998 (tomado de Alarcón et ál., 2003).

Se advierte que el río Paraná, a la altura de la sección Túnel Subfluvial, transportó en promedio un caudal sólido total de material de fondo ( $G_s$ ) de  $25,24 \times 10^6$  t/año entre 1976 y 1998. De ese total, solo 8,8% es carga de fondo ( $G_{sf}$ ) y el resto es sedimento de fondo en suspensión ( $G_{ss}$ ). En ese periodo ocurrieron tres de las cuatro mayores crecientes registradas en el tramo medio en poco más de 100 años de registros (1982–83, 1992 y 1998; la restante es la de 1905; ver Capítulo 3). En esos casos, el material de fondo total transportado fue de  $58,0 \times 10^6$  t/año (1983);  $31,4 \times 10^6$  t/año (1982);  $44,7 \times 10^6$  t/año (1982 y 1983 en promedio);  $29,05 \times 10^6$  t/año (1992) y  $34,9 \times 10^6$  t/año (1998). Son notables los casos de 1982–83 y 1998, que si bien tuvieron caudales máximos menores que en 1992 (y 1905), sus duraciones fueron muy elevadas (Capítulos 3 y 11).

### El transporte total de sedimentos

Teniendo en cuenta el período 1991–1998 en que se contó con información sobre los transportes anuales, tanto de  $G_w$  (Cuadro 5.12), como de  $G_s$  (Cuadro 5.14), Alarcón et ál. 2003 obtuvieron los valores de transporte total anual de sedimentos,  $G_{\tau}$ , en la sección Túnel Subfluvial para esos años. En el cuadro 5.15 se presentan los resultados, incluyendo la proporción que representa la carga de lavado en  $G_{\tau}$ .

**Cuadro 5.15.**

Transporte total de sedimento en el tramo medio del río Paraná. Período: 1991–1998. Sección: Túnel Subfluvial (tomado de Alarcón et ál., 2003).

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

Nótese que la carga de lavado representa anualmente alrededor del 80% del transporte total en la sección Túnel Subfluvial. Si se la incrementa el 17% por razones ya mencionadas, su transporte anual se eleva a  $110,2 \times 10^6$  t/año, con lo cual el  $G_T$  a la altura del eje Paraná–Santa Fe sería de  $133,5 \times 10^6$  t/año. A este valor habría que agregar aún la arena que se deriva hacia el Colastiné desde el cauce principal. Una estimación de ello fue realizada por Amsler et ál. (2007), en el tramo localizado inmediatamente aguas arriba del puente de la Ruta Nacional 168, utilizando la Ec. 5.15 aplicada con datos batimétricos, hidráulicos y sedimentológicos medidos entre 2001 y 2005. Obtuvieron que el río Colastiné habría transportado en ese período un  $G_s = 1,4\text{--}1,6 \times 10^6$  t/año. No se ha hecho aún una valoración de similar calidad para la arena que eventualmente se derivaría por el complejo Leyes–Setúbal. Esa arena es la principal componente que construye el delta interno del Leyes al desembocar en la laguna Setúbal (Figura 5.29). Por otro lado, no se conoce tampoco cuánto de esa arena proviene del Paraná y qué cantidad aporta el propio cauce del Leyes (ver Capítulo 16 del tomo 3 y Ramonell, 2020).

En definitiva, el transporte total promedio de sedimento,  $G_T$ , del río Paraná entre 1991–1998 en la sección mencionada no habría sido menor a los  $135 \times 10^6$  t/año. Este valor es similar al mencionado por Brea y Spalletti (2010), pero obtenido con datos del período 1969–1989 y empleando métodos similares a los de Alarcón et ál. (2003).

### Alcances de los resultados

Los procesos que operan en un sistema tan vasto como el del río Paraná (Capítulo 1) implican un grado de complejidad compatible con las escalas espaciales involucradas. Los tramos medio e inferior constituyen los receptores, con múltiples particularidades intrínsecas, que interaccionan con aportes (en este caso de agua y sedimento), de muy diverso origen. Se deduce de ello que, en cálculos del transporte y deposición del sedimento fluvial como los brindados aquí, los márgenes de incertidumbre implícitos no serían menores. Sin pretender un análisis exhaustivo de estos

últimos, a continuación se discuten algunas cuestiones que se consideran importantes a la hora de evaluar los alcances de los resultados presentados.

(a) La curva de transporte ( $G_w$  vs  $Q$ ;  $Q$ : caudal líquido) en la estación El Colorado, en base a la cual se determinaron los valores de  $G_w$  anuales transportados por el río Bermejo, presentó muy buenos ajustes en todos los períodos analizados. Ello implicaría un factor positivo para la precisión de los cálculos en donde interviene  $G_w$  en el tramo medio, dado el predominio de los suministros del Bermejo, ya comentado y estimado.

(b) En las deposiciones de parte de la carga de lavado en la planicie aluvial del tramo medio, estimadas en el balance sedimentológico realizado, existen diversas fuentes de incertidumbre que se discuten a continuación:

i. A pesar de lo mencionado en (a), se debe tener en cuenta que la estación de El Colorado está situada a 210 km de la confluencia entre el río Paraguay y el Paraná. Surge el interrogante, entonces, en cuanto a si los caudales sólidos de El Colorado llegan sin mayores variaciones a Paso de la Patria. Este factor no ha sido aún evaluado.

ii. Bajo la suposición de una mayor frecuencia de sedimentaciones de parte de la carga de lavado anual medida en El Colorado en los 210 km mencionados en i, las deposiciones en la planicie del tramo medio que se presentan en los cuadros 5.12 y 5.13 deberían ser consideradas como valores máximos posibles. De verificarse esta situación, la deposición promedio que surge del cuadro 5.12 ( $[118,9-94,2 \times 1,17] \times 10^6 = 8,7 \times 10^6$  t/año) sería aún más reducida y por lo tanto existirían más posibilidades de degradación de la planicie, además de la registrada en 1997–1998. Cabe recordar que la década analizada de 1990 fue muy húmeda (Antico et ál., 2014) y con grandes crecientes (e.g. 1991–1992 y 1997–1998, Capítulo 3). Dependiendo de la magnitud de las reducciones en las deposiciones, sus valores podrían quedar dentro de los márgenes de error de los métodos para establecer  $G_w$  (Walling, 1977), lo cual obliga a analizar con cuidado las imprecisiones inherentes en los transportes involucrados en el balance sedimentológico.

iii. En cuanto a los resultados preliminares sobre la distribución de la carga de lavado en planicie, obtenidos con técnicas de análisis de imágenes satelitales, para lograr apreciaciones más concluyentes todavía son necesarios estudios similares para otros estados hidrométricos en el sistema con distintos suministros desde el río Bermejo. Además, se requiere una verificación en campo que asocie las bandas de color utilizadas con rangos (en mg/l) de concentraciones medidas.

(c) Los valores de transporte de material de fondo a nivel anual, promedios de varios años y total del cuadro 5.14, son confiables dada la buena calibración de las dos fórmulas utilizadas en los cálculos de  $G_{sf}$  y  $G_s$ . En estimaciones a resoluciones espaciales y temporales más reducidas, los

errores podrían magnificarse dada la variabilidad que presenta este tipo de transporte. En ese caso, la disponibilidad de las modernas tecnologías de medición en campo (ver Capítulo 12 del Tomo 3) puede brindar soluciones relativamente rápidas y eficaces.

## Bibliografía

- Alarcón, J.J., Szupiany, R., Montagnini, M.D., Gaudin, H.E., 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* organizado por el Instituto Nacional del Agua (Laboratorio de Hidráulica), Ezeiza.
- Amsler, M.L., Prendes, H.H., Romano, C. y Huespe, J.** (2000). Características de Grandes Dunas Observadas en el Río Paraná. En *Memorias XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica* organizado por la Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas (AIH), Córdoba.
- Amsler, M.L., Prendes, H.H., Montagnini, M.D., Szupiany, R. y García, M.H.** (2003). Prediction of dune height in large sand-bed rivers: the case of the Paraná River, Argentina. En *Proceedings Third IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics RCEM 2003*, Barcelona.
- Amsler, M.L.** (2006). Evolución de la carga de lavado en el Alto Paraná (1968–2004). Incidencia sobre las sedimentaciones en la planicie aluvial del Paraná Medio. *III Congreso Iberoamericano sobre Control de la Erosión y los Sedimentos* organizado por la International Erosion Control Association, Buenos Aires.
- Amsler, M.L., Drago, E.C. y Paira, A.R.** (2007). Fluvial sediments: Main channel and floodplain interrelationships. En M.H. Iriondo, J.C. Paggi y M.J. Parma (Eds.). *The Middle Paraná River: Limnology of a Subtropical Wetland* (pp. 123–142). Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg.
- Amsler, M.L. y Drago, E.C.** (2009). A review of the suspended sediment budget at the confluence of the Paraná and Paraguay Rivers. *Hydrological Processes*, 23 (22), 3230–3235.
- Amsler, M.L., Blettler, M. y Ezcurra de Drago, I.** (2009). Influence of hydraulic conditions over dunes on the distribution of the benthic macro-invertebrates in a large sand bed river. *Water Resources Research*. 45, W06426, doi:10.1029/2008WR007537.
- Antico, A., Schlotthauer, G. y Torres, M. E.** (2014). Analysis of hydroclimatic variability and trends using a novel empirical mode decomposition: Application to the Paraná River Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 119, 1218–1233.
- Boller Troncoso, I., Yoya, F., Montagnini, M. D. y Amsler, M. L.** (2017). Distribución espacial de sedimentos finos en la planicie aluvial del río Paraná en su tramo medio. *RÍOS 2017. VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos* organizado por la Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
- Bonetto, A. y Orfeo, O.** (1984). Caracteres sedimentológicos de la carga en suspensión del río Paraná entre Confluencia y Esquina (provincia de

- Corrientes, República Argentina). *Revista de la Asociación Argentina de Mineralogía, Petrología y Sedimentología*, 15, (3–4), 51–61.
- Brea, J.D. y Spalletti, P.** (2010). Generación y Transporte de Sedimentos en la Cuenca Binacional del Río Bermejo. Caracterización y análisis de los procesos intervinientes. *PEA/BERMEJO-COBINABE*, Buenos Aires.
- Cisneros, J., Best, J., Van Dijk, T., Paes de Almeida, R., Amsler, M., Boldt, J., Freitas, B., Galeazzi, C., Huizinga, R., Ianniruberto, M., Ma, H., Nittrouer, J.A., Oberg, K., Orfeo, O., Parsons, D., Szupiany, R., Wang, P. y Zhang, Y.** (2020). Dunes in the world's big rivers are characterized by low-angle lee-side slopes and a complex shape. *Nature Geoscience*. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0511-7>.
- CONAE.** (2015). SoPI (Software de Procesamiento de Imágenes). Comisión Nacional de Actividades Espaciales, Argentina. <https://sopi.conae.gov.ar/>
- García, N.O., Vargas, W.M. y Venencio, M.** (2002). About of the 1970/71 climatic jump on the 'Río de la Plata' basin. En *Proceedings of the 12<sup>th</sup> Conference on Hydrology* organizado por la American Meteorological Society, Orlando, Florida.
- Latosinski, F., Szupiany, R., Amsler, M., Vionnet, C., Carrasco, A. y García, M.** (2014). The fluid and sediment dynamics over dunes (Parana River, Argentina). *2<sup>nd</sup> International Conference on the Status and Future of the World's Large Rivers*, Manaus. Amazonas.
- Latosinski, F., Heredia, A., Diaz Lozano, J.M., Szupiany, R.N., García, C.M. y Amsler, M.L.** (2017). Estructura del flujo y transporte de sedimento sobre dunas en ríos de distinta escala. *RÍOS 2017. VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos* organizado por la Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
- 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. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, XVIII (3), II Epoca, 55–69.
- Mehta, A.J. y McAnally, W.H.** (2008). Fine-grained Sediment Transport. En M.H. García (Ed.), *Sedimentation Engineering* (pp. 251–304). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, (110), Reston, Virginia.
- Ramonell, C.G.** (2020). Geomorfología y morfodinámica de la planicie aluvial del río Paraná en su tramo medio. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Argentina.
- Sandbach, S.D., Lane, S.N., Hardy, R.J., Amsler, M.L., Ashworth, P.J., Best, J.L., Nicholas, A.P., Orfeo, O., Parsons, D.R., Reesink, A.J.H. y**

**Szupiany, R.N.** (2012). Application of a roughness-length representation to parameterize energy loss in 3-D numerical simulations of large rivers. *Water Resources Research* 48, doi:10.1029/2011WR011284.

**SIPOH (Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica).** Sistema Nacional de Información Hídrica. <https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/hidricas/base-de-datos-hidrologica-integrada>.

**Walling, D.E.** (1977). Limitations of the rating curve technique for estimating suspended sediment loads, with particular reference to British rivers. *Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters*. IAHS Publ. (122).

## Sobre los editores

### **Carlos Ubaldo Paoli**

Ingeniero Civil (Universidad Nacional de Rosario). Diplomado en Hidrología (Instituto de Hidrología, Consejo Superior Investigaciones Científicas de España). Exbecario en el Service d'Hydrologie del ORSTOM (París, Francia). Curso de posgrado en Planificación (CIDIAT, Venezuela).

Fue profesor Titular de Hidrometeorología e Hidrología Aplicada en las carreras de Ingeniería en Recursos Hídricos e Ingeniería Ambiental, respectivamente. Profesor Responsable de posgrado de Gestión Integrada de Crecidas e Inundaciones y Análisis de frecuencia para diseño y dimensionamiento hidrológico (MIRH).

Fue Director de Proyectos CAII+D del Grupo de Ingeniería Hidrológica (Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL). Es Investigador colaborador en el proyecto «Impacto de los escenarios climáticos futuros sobre las disponibilidades hídricas en la región argentina de Cuenca del Plata».

Fue Director de la carrera Ingeniería en Recursos Hídricos (FICH, UNL). Actualmente es Profesor Honorario.

Exdirector del Centro Regional Litoral del Instituto Nacional del Agua (INA, Argentina), actualmente Investigador Asociado.

Ha participado y dirigido investigaciones y proyectos en Planificación y Gestión de Recursos Hídricos e Ingeniería Hidrológica, particularmente en la temática de crecidas e inundaciones. Ha actuado como experto en recursos hídricos en Asistencia Técnica en Paraguay, Colombia, República Dominicana, Méjico y Uruguay. Ha participado en más de 100 reuniones científicas y técnicas de relevancia nacional e internacional. Autor de numerosas publicaciones y artículos sobre recursos hídricos. Miembro del Grupo IFI (PHI-LAC de Unesco).

### **Mario Isaac Schreider**

Ingeniero en Recursos Hídricos (Universidad Nacional del Litoral). Magister Scientiae en Desarrollo de los Recursos de Aguas y Tierras (Universidad de Los Andes, Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras —CIDIAT—, Mérida, Venezuela).

Es profesor Titular de las asignaturas de grado y posgrado (Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL). Director de la Cátedra UNESCO Agua y Educación para el Desarrollo Sostenible (FICH, UNL). Cooordinador de Red Latinoamericana de



Desarrollo de Capacidades para la Gestión Integrada del Agua LA-WETnet (afiliada a la Cap-Net PNUD). Miembro de la Red Latinoamericana de Centros de Conocimiento en Gestión de Recursos hídricos de la Unión Europea (RALCEA).

Fue Decano (FICH, UNL), Secretario de Ciencia y Técnica (UNL) y Secretario de Ciencia y Técnica (FICH, UNL).

Ha dirigido y participado en numerosos proyectos de investigación en las temáticas de Hidráulica e Ingeniería Fluvial. Ha dictado cursos, seminarios y talleres en temas vinculados a la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en diferentes países de América Latina.

## Sobre las y los autores

### Mario Luis Amsler

Ingeniero en Recursos Hídricos (UNL). Profesor Titular (jubilado de las asignaturas de grado: Hidráulica Fluvial, Ingeniería Fluvial (Ingeniería en Recursos Hídricos). Integrante de los proyectos «Estudio sedimentológico, geológico e hidráulico del transporte y sedimentación de la carga en suspensión en ambientes fluviales de llanura» y «Bifurcaciones en el sistema del río Paraná: procesos hidro-sedimentológicos e implicancias en su morfodinámica» (FICH, UNL). Investigador Independiente (CONICET, Jubilado). Responsable del Laboratorio de Hidroecología en el Instituto Nacional de Limnología (CONICET, UNL). Director del Proyecto «Fluctuaciones hidrológicas/hidráulicas de corto y largo plazo en el río Paraná: Efectos sobre el ensamble de invertebrados bentónicos de su cauce principal» (CONICET, UNL).

*mamsler2003@yahoo.com.ar*

### Pablo Alberto Cacik

Ingeniero en Recursos Hídricos (UNL). Profesor Adjunto en la Cátedra de Hidrometeorología e Hidrología Aplicada, en las carreras de Ingeniería en Recursos Hídricos e Ingeniería Ambiental. Docente de la Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos en la asignatura Análisis

de frecuencia para diseño y dimensionamiento hidrológico. Integrante del Proyecto de Investigación «Impacto de los escenarios climáticos futuros sobre las disponibilidades hídricas en la región argentina de Cuenca del Plata» (FICH, UNL). Director Provincial de Evaluación, Estudios y Proyectos (2005) y Subsecretario de Gestión y Planificación (2006–2007) en el Ministerio de Asuntos Hídricos de la Provincia de Santa Fe. Director de Proyecto y Gerente de Proyectos en Worley Parsons (ex Halcrow – CH2M – Jacobs).  
*pablo.cacik@gmail.com*

### Ignacio Martín Cristina

Ingeniero en Recursos Hídricos (UNL). Magíster en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos Ayudante de Cátedra, Dedicación Exclusiva asignaturas de grado y posgrado Hidrometeorología–IRH, Hidrología Aplicada–IA, Tratamiento de Datos Hidrogeoatmosféricos –IRH, Integrante de los Proyectos de IyD «Evaluación interdisciplinar de procesos de apertura, mantenimiento y cierre de cauces secundarios del río Paraná» y «Aplicación de un Índice de Similitud Hidrológica Distribuido Para la Simulación Precipitación – Escorrentía en la Cuenca Inferior del Río Salado».  
*tato71.ic@gmail.com*

**Norberto Oscar García**

Licenciado en Ciencias Meteorológicas (UBA). Profesor Titular de la asignatura Climatología Aplicada, de la carrera de Ingeniería en Recursos Hídricos (FICH, UNL). Director de la Unidad de investigación Hidroclimática. Director del Proyecto «Variabilidad de los escurrimientos y su predicción en la cuenca del Río de la Plata». Representante de la UNL en el Grupo Temático de Meteorología Aplicada y Sensoramiento Remoto de la Asociación de Universidades del Grupo Montevideo (AUGM).  
*norberto\_garcia@gigared.com*

**Ricardo Hugo Giacosa**

Ingeniero en Recursos Hídricos. Especialista en hidrología en áreas de llanura (VITUKI, Hungría). Profesor Adjunto Ordinario de Topografía e hidro-metría de la carrera de Ingeniería en Recursos Hídricos. Integrante Comisión Evaluadora Prácticas Profesionales Supervisadas. Profesional del Centro Regional Litoral del Instituto Nacional del Agua. Consultor privado en proyectos de saneamiento hídrico en áreas urbanas y rurales.  
*ricardogiacosa@gmail.com*

**Rosana del Carmen Hämmerly**

Ingeniera en Recursos Hídricos (UNL). Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos (UNL). Doctora Internacional en el Programa de Ciencia y Tecnología Ambiental (Universidade A Coruña, España). Profesora Adjunta Ordinaria en las asignaturas de grado: Hidrometeorología–Hidrología Aplicada (FICH, UNL), Hidráulica General y Aplicada (FFRA, UTN). Posgrado Introducción a la GIRH–Gestión Integrada de Crecidas e Inundaciones. MGIRH / Análisis de frecuencia para diseño y dimensionamiento hidrológico MIRH (FICH, UNL). Directora del Proyecto de Investigación «Impacto de los escenarios climáticos futuros sobre las disponibilidades hídricas en la región argentina de Cuenca del Plata» (FICH, UNL).  
*rhammer@fich.unl.edu.ar*

**Martín Horacio Iriondo†**

Geólogo y Doctor en Ciencias Geológicas (UNC). Profesor Titular. Director del Programa de Investigación «Cambios y variabilidad climáticos: impactos hidrológicos y ambientales». Director del Proyecto de Investigación «Cambios climáticos en la cuenca del Uruguay en el Cuaternario Superior». Director del International INQUA Project: Quaternary and Present Climates of the Paraná and Uruguay Basins, SE South América (Argentina, Brazil, Uruguay and Paraguay). Investigador Principal del CONICET.

**José Luis Macor**

Ingeniero en Recursos Hídricos (UNL). Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos (FICH, UNL). Doctor en Sciences et Techniques de l'Environnement – ENPC–ParisTech, Francia. Profesor Adjunto en las asignaturas de grado Hidrología de Superficie, Drenaje Urbano y Tratamiento de Datos Hidrogeotomográficos (FICH, UNL). De posgrado, Hidrología de Superficie. Doctorado en Ingeniería y MIRH (FICH, UNL). Drenaje Urbano MIRH (FICH, UNL). Director del Centro de Informaciones Meteorológicas (FICH, UNL). Codirector del Centro de Hidrología y Gestión del Agua (FICH, UNL). Integrante del Proyecto de Investigación «Respuesta de los subsistemas acoplados zona no saturada – acuífero libre a eventos hidroclimáticos extremos y sus escenarios futuros en la provincia de Santa Fe, en el contexto del cambio climático»  
*jlmacor@gmail.com*

**María Daniela Montagnini**

Ingeniera en Recursos Hídricos (UNL). Jefa de Trabajos Prácticos. Dedicación exclusiva. Hidráulica Fluvial. Ingeniería en Recursos Hídricos. Mecánica de Fluidos. Ingeniería en Recursos Hídricos e Ingeniería Ambiental. Integrante del Proyecto de Investigación «Estudio sedimentológico, geológico e hidráulico del transporte y

sedimentación de la carga en suspensión en ambientes fluviales de llanura». CAI+D 2016. Proyecto Tipo III, Grupos Consolidados. PIC 50420150100048LI.

*danielamontagnini@yahoo.com.ar*

### **Carlos Ubaldo Paoli**

Ingeniero Civil, Orientación Hidráulica (UNR). Diplomado en Hidrología. Instituto de Hidrología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España. Profesor Titular (Jubilado) de las asignaturas de grado Hidrometeorología, carrera IRH e Hidrología Aplicada, carrera IA (FICH–UNL). Profesor Responsable de posgrado de Gestión Integrada de Crecidas e Inundaciones» (MGIRH) y Análisis de frecuencia para diseño y dimensionamiento hidrológico (MIRH). Investigador colaborador en el proyecto «Impacto de los escenarios climáticos futuros sobre las disponibilidades hídricas en la región argentina de Cuenca del Plata» (FICH, UNL). Es Profesor Honorario de la UNL. Exdirector del Centro Regional Litoral del Instituto Nacional del Agua (INA), actualmente Investigador Asociado.

*carlosupaoli@gmail.com*

### **Héctor Hugo Prendes**

Ingeniero en Recursos Hídricos (UNL). Profesor Titular Ordinario de Obras Hidráulicas II IRH. Ingeniería Fluvial IRH. Ingeniería Fluvial Aplicada A Navegación MIRH. Director de ocho proyectos de investigación relacionados con hidrovías. Consejero Directivo (FICH). Consultor Independiente.

*hectorhugoprendes@gmail.com*

### **Carlos Guillermo Ramonell**

Licenciado en Ciencias Geológicas (UNSL). Profesor Titular en Geomorfología, carrera Ingeniería en Agrimensura, Perito Topocartógrafo. Responsable en Geología, Geomorfología y Suelos, carrera Ingeniería en Recursos Hídricos, Ingeniería Ambiental. Profesor en Hidráulica

Fluvial carrera Ingeniería en Recursos Hídricos. Director de PI–CAID «Evaluación interdisciplinar de procesos de apertura, mantenimiento y cierre de cauces secundarios del río Paraná». Director de PACT «Investigación y desarrollo en Hidráulica, Geomorfología e Ingeniería Fluvial». Responsable del Laboratorio de Sedimentología (FICH, UNL). Profesional Principal de CONICET

*cgramonell@yahoo.com.ar*

### **Ricardo Nicolás Szupiany**

Ingeniero en Recursos Hídricos (UNL). Doctor en Ingeniería, mención Recursos Hídricos (UNL). Profesor Adjunto Ordinario Exclusivo en asignaturas de grado y posgrado. Hidráulica Fluvial IRH (FICH, UNL). Mecánica de los Fluidos MIRH (FICH, UNL). Director CAI+D «Bifurcaciones en el sistema del río Paraná: procesos hidro–sedimentológicos e implicancias en su morfodinámica». Director del Proyecto ASACTEI «Estudio del comportamiento hidráulico y sedimentológico del sistema deltaico arroyo leyes–laguna Setúbal, Santa Fe». Miembro del Comité Académico del Doctorado en Ingeniería (FICH, UNL). Investigador Adjunto (CONICET).

*rszupian@fich.unl.edu.ar*

### **Horacio Antonio Toniolo**

Ingeniero en Recursos Hídricos (UNL). Master en Ingeniería de los Recursos Hídricos (UNL). Jefe de Trabajos Prácticos de la asignatura Hidráulica Fluvial (FICH, UNL). Integrante del proyecto de investigación «Caracterización de las divagaciones del thalweg del río Paraná».

*hatorniolo@alaska.edu*

### **Ofelia Clara Tujchneider**

Licenciada en Ciencias Geológicas (UNdeIS). Doctora en Geología (Summa cum Laude) (UNT). Profesora Honoraria (UNL). Docente de grado y postgrado (UNL, UNR, UTN y UNSA). Past Directora del Grupo de Investigaciones

Geohidrológicas (FICH, UNL). Miembro del Programa UNESCO GRAPHIC. Punto focal por Argentina del Programa UNESCO–OEA Acuíferos Transfronterizos de las Américas; corresponsable del grupo de trabajo Aguas Subterráneas del Programa GEF–UNU: Enhancing the Use of Science in International Projects to Improve Pro-

jects Results; Miembro de Proyecto UNESCO–GEF–WB–FAO–IAH. Miembro del Programa Unesco GGRETA: Goundwater Governance in TransboundaryAquifers. Miembro del programa Goundwater and Climatic Change (Universidad de Tesalónica, Grecia).

*ofeliatujchneider@yahoo.com.ar*



Imagen de tapa: Carlos G. Ramonell

