

ANÁLISIS DE PENDIENTES HIDROMÉTRICAS EN GRANDES CRECIDAS SOBRE TRAMO DEL RÍO PARANÁ

Marina L. Garcia⁽¹⁾, Pedro A. Basile⁽¹⁾, Gerardo A. Riccardi^{(1),(2)}

⁽¹⁾Dto. Hidráulica y Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario,

⁽²⁾Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario
Riobamba 245 bis, (2000) Rosario, Santa Fe, Argentina.

E-mail: mgarcia@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio sobre el comportamiento hidráulico de un tramo del sistema cauce-planicie aluvial del Río Paraná, desde Diamante hasta Ramallo, involucrando una longitud de 200 km aproximadamente. En el tramo se observa que el flujo encauzado en el curso principal, sobre margen derecha, es separado del escurrimiento en el valle de inundación mediante albardones naturales hasta aguas abajo de Rosario. El objetivo del trabajo es analizar el comportamiento del río en grandes crecidas a partir de registros de niveles hidrométricos y caudales sobre el cauce principal. Los resultados son importantes para la realización de calibraciones de modelos aplicados en este tramo, y como antecedente para ríos con configuraciones similares. Se calcularon pendientes longitudinales de la superficie libre por tramos y se contrastaron gráficas de pendientes-caudales-alturas. Cuando los caudales aumentan, manteniéndose menores a 25000 m³/s (flujo encauzado), se incrementan niveles hidrométricos y pendientes en todo el tramo. En cambio, al superar 25000 m³/s (anegamiento en el valle), el nivel hidrométrico en Rosario crece, pero más rápidamente se incrementa en San Nicolás por el retorno de flujo al cauce principal desde el valle, causando pendientes menores. Con caudales máximos, esta situación es más evidente. Se observa que en la interacción cauce-planicie el aumento del caudal no necesariamente implica un incremento de la pendiente hidráulica en el cauce, sino que depende de la configuración integral cauce-planicie y de la situación hídrica antecedente aguas abajo.

Palabras clave: Río Paraná, grandes ríos de llanura, registros en grandes crecidas.

ABSTRACT

In this work a study on the hydraulic behavior of a river-floodplain reach of the Paraná River, from Diamante to Ramallo is presented. The studied reach has a length of 200 Km approximately. In the reach it is observed that the stream flow channeled into the main course is separated from the runoff in the floodplain by natural levees up to downstream of Rosario. The study aims to analyze the hydraulic behavior of the river during large floods from water levels and discharge measurements performed in the main stream. The results are important for the calibration of mathematical models used in the reach, and as background for rivers with similar configurations. Longitudinal water surface slopes were calculated and slope-discharge-water level relationships were analyzed. It is observed that when the discharge is increased, keeping less than 25000 m³/s (channeled flow), the water level and slopes are correspondingly augmented in the entire river reach. In contrast, exceeding 25000 m³/s (inundated floodplain), the water level in Rosario grows, but increases faster in San Nicolás due to the return of flow from the valley to the main channel, causing a lowering in water surface slopes between Rosario and San Nicolás. That behaviour is much more evident for maximum discharges during very large floods. It is observed that, in the channel-floodplain interaction, increasing the discharge does not necessarily imply an increase in water surface slopes in the main channel, but depends on the integral morphological configuration of channel-floodplain system and the state of the system downstream previous to the incoming floods flows.

Keywords: Paraná River, large lowland rivers, large flood records.

INTRODUCCIÓN

El estudio de procesos hidrodinámicos en crecidas de grandes ríos de llanura, de conformación tipo cauce-planicie, es importante para evaluar el anegamiento en sus valles, consecuencias y problemas hidroambientales asociados. El Río Paraná es uno de los principales cursos de agua en el territorio argentino, formado en su tramo inferior por un cauce principal y valle de inundación lateral. Aquí se analiza el comportamiento hidrodinámico del mismo en grandes crecidas ocurridas, desde la ciudad de Diamante (Km 533 de la vía navegable) aguas arriba a Ramallo (Km 325) aguas abajo; a partir de los registros de alturas limnimétricas en

las escalas existentes de los puertos del tramo mencionado. La configuración del río es tal que, aguas arriba de Diamante, el cauce principal se presenta recostado netamente sobre la margen izquierda y valle de inundación con cursos y espejos de agua interiores, y a partir de esta localidad hacia aguas abajo cruza el cauce principal todo el valle y se recuesta sobre la margen santafesina a la altura de las ciudades de Maciel y Oliveros. A partir de esa zona, la planicie aluvial se desarrolla sobre la margen izquierda del río y el ancho del mismo varía entre 40-60 Km, mientras que, el ancho del cauce principal varía entre 0,5-3 Km aproximadamente. En la Figura 1 se puede visualizar el área en estudio y los cursos de aguas principales.

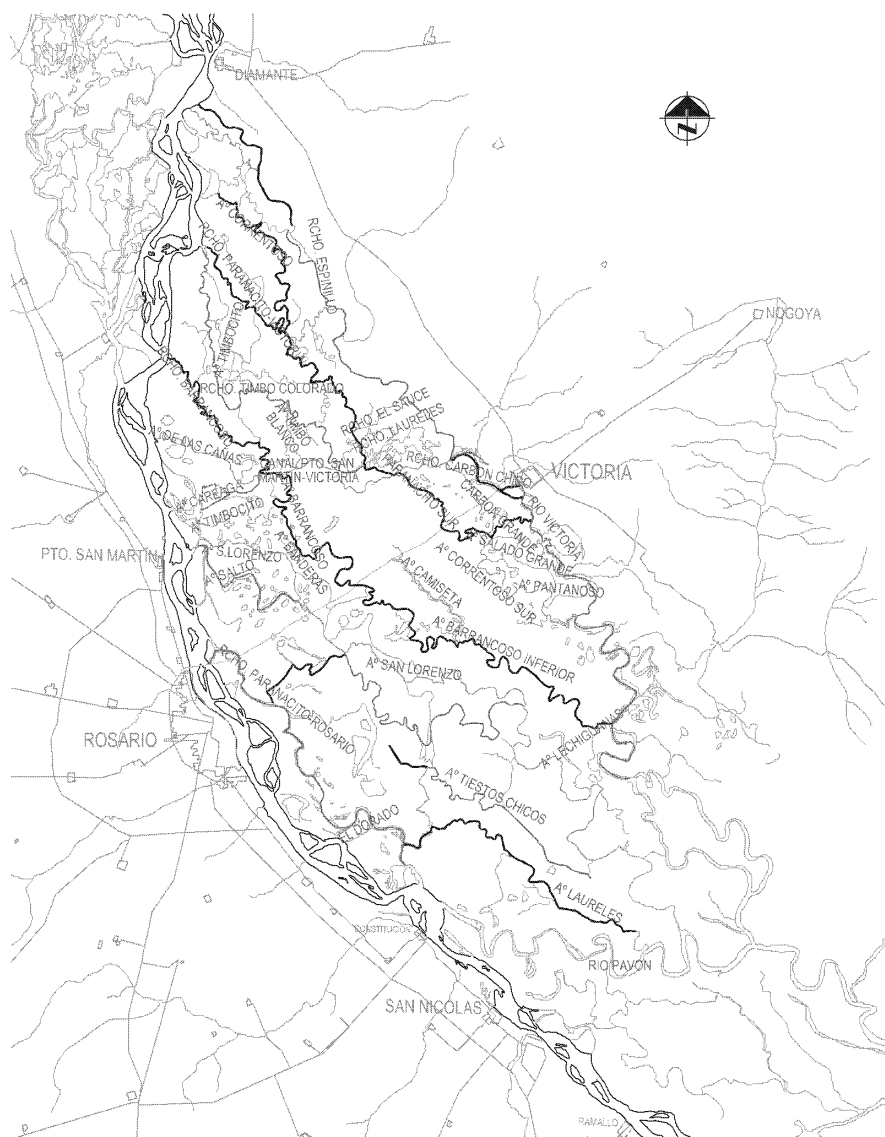


Figura 1. Área en estudio del Río Paraná, desde Diamante a Ramallo.

El régimen del Paraná es principalmente gobernado por los aportes provenientes de aguas arriba, los afluentes laterales incrementan en poco porcentaje el caudal total. La principal entrada de volumen de agua en la zona en estudio, es a través del cauce principal del río, y es éste el que recoge y distribuye el fluido en todo lo que conforma el valle de inundación.

En el tramo en estudio, el agua que ingresa a la planicie, lo hace a través de cursos de agua menores originarios en el cruce del cauce principal, presentándose dos principales escurrimientos: encauzado sobre la margen derecha y sobre el valle (a través de cursos, bajos y lagunas interconectados). Éstos se presentan separados por crestas angostas –denominadas albardones– que existen hasta aguas abajo de Rosario.

Interiormente por el valle, existe una red de cursos, de menores magnitudes que el cauce principal, pero de distintas y variadas jerarquías. Los mismos pueden ser permanentes o transitorios, tienen trazas zigzagueantes que se van moldeando y modificando a través del tiempo según la dinámica hídrica que se presente. La planicie en el tramo en estudio, cuenta por lo menos con una decena de cursos de agua interiores importantes, con escurrimiento predominantemente NO-SE, que son los que alimentan principalmente de flujo al valle. También aquí se pueden presentar en las márgenes de los mismos albardones menores, producto de las deposiciones de sedimentos en los desbordes. Algunos de los cursos de agua en sus recorridos unen sus trazas y forman uno nuevo aguas abajo, o por lo contrario, pueden presentarse bifurcaciones y dar origen a nuevos cursos. La mayoría de ellos, sobre aguas abajo del tramo estudiado, descargan sus aguas sobre el Río Pavón, curso de importancia que atraviesa el valle desde la margen santafecina a la entrerriana. Algunos otros cursos comienzan en el cauce principal para luego de un corto recorrido retornar al de origen, desarrollándose éstos en la zona cercana a los albardones divisorios de los dos escurrimientos generales antes citados.

A su vez el valle contiene grandes y variadas depresiones lagunares, así como bajos que surgen de cauces y curvas o meandros abandonados por sus cursos al moldear los mismos otros nuevos en su recorrido dinámico. Algunos pueden ser aislados, o ser el origen de cursos de agua menores.

En épocas de aguas bajas, el flujo es encauzado y se identifican lagunas que pueden conectarse con los mismos. El valle se “carga” de agua principalmente a través de los cursos que tienen origen en el cauce

principal, especialmente, para la zona en estudio, cuando éste cruza toda la planicie hacia la margen santafecina. Según Zapata (1999), el desborde de margen izquierda se produce en varias ubicaciones a lo largo del albardón, el agua desborda lateralmente en una especie de vertedero que se presenta en la depresión o ausencia del albardón, y así ingresa al valle, adquiriendo una dirección definida de penetración. Las ubicaciones de esos desbordes se corresponden con nacientes de arroyos y riachos de existencia permanente: Espinillo, Paranacito-Victoria, Barrancoso, Careaga, San Lorenzo, Paranacito-Rosario. Las trayectorias líquidas, en su mayor parte, se alinean con las direcciones medias de los cursos permanentes, aunque se producen algunas desviaciones bien definidas que no tienen contrapartida en aguas bajas: desde el Barrancoso hacia los Timbó (afluentes del Paranacito-Victoria), desde los Timbó hacia el área de drenaje que confluye a La Camiseta, desde el San Lorenzo al Barrancoso, etc. La mayor concentración de corrientes, a la altura de Rosario, se da en la zona comprendida entre el Paranacito-Victoria y la barranca entrerriana. Estos cursos más –en menor medida– las precipitaciones en la zona, son los que alimentan las lagunas.

El aporte del sistema del río Coronda, que penetra desde la margen derecha del cauce principal del Paraná, se concentra a la altura de Oliveros, y aguas abajo de Diamante se produce un desborde del cauce principal del Paraná, sobre margen derecha, que se reencauza antes de alcanzar Oliveros.

Durante las crecidas, los ingresos entre los albardones a los cursos se incrementan considerablemente, y –según sea la magnitud de la creciente– pueden llegar a desbordar los mismos, situación que da hasta aguas abajo de Rosario, en que ya los mismos no se presentan. Los cursos de agua aumentan su carga y también desbordan, comienzan a incrementar el volumen de agua de lagunas cercanas aledañas a los cursos y a interconectarse las depresiones, que al aumentar la cota del pelo de agua presente en ellas, pueden iniciar un escurrimiento interlagunar. Las que podían haber estado inicialmente aisladas, con la crecida, usualmente quedan formando parte de la red de escurrimiento a través del valle.

Al presentarse una crecida, el río sale de su cauce principal y pierde capacidad de transporte, formando en ambas márgenes los albardones. Los sedimentos del flujo que ingresa a la planicie aluvial, con el tiempo tienden a reducir el relieve local, ya que decantan al bajar la velocidad y por la vegetación

presente que los fija, así es como rellenan lagunas y pantanos, y también se depositan en albardones y otros relieves (Rocca et. al., 1973). El estudio de las crecidas es importante, ya que la magnitud de éstas y la permanencia están vinculadas a las modificaciones topográficas que se producen en el valle, al generarse cambios en los procesos de sedimentación (Asselman et. al., 1995).

Respecto a la vegetación que se presenta en el valle y su relación con la morfología y escurrimiento, la trama de lechos permanentes y temporarios, que divaga con niveles energéticos bajos, crea espacios donde se generan ecosistemas de evolución dependiente e influenciada por la dinámica que tiene la planicie. Sobre los albardones laterales del cauce principal, constituidos de granulometría más gruesa, se desarrolla vegetación arbórea y arbustiva. En cambio en el valle, donde se depositan los sedimentos más finos en las áreas más alejadas de los cauces, se generan ecosistemas más simples, de vegetación arbustiva, pajonales y pastizales. Los gradientes de vegetación que se presentan, entonces, tienen directa relación con la disposición sedimentaria, así como también con la permanencia del agua sobre estos terrenos aluvionales (Zapata, 1999).

Durante las crecidas, en el cauce principal, el nivel del pelo de agua lógicamente se eleva a lo largo de todo el tramo en cuestión, pudiendo anegar parte o por completo las islas y zonas bajas que forman parte del mismo. Según los desbordes que se presenten –en función de la situación– y el caudal que fluya, el pelo de agua va a tener distintas pendientes longitudinales.

El objeto del presente trabajo es analizar el comportamiento del río en grandes crecidas, a partir de registros limnimétricos y caudales sobre el cauce principal. Los que serán tenidos en cuenta, son aquellos anteriores a la Conexión física Rosario-Victoria, para independizar los resultados de esta obra significativa en el tramo estudiado. Se podrá vislumbrar sobre el comportamiento no uniforme del río, e intentar establecer dependencias de los registros de distintos factores que afectan a su comportamiento. Los resultados serán importantes para calibraciones de modelos aplicados en este tramo –como el de simulación de escurrimiento hidrodinámico cuasi-2D implementado y aplicado en García et al (2008)–, así como también de antecedente para ríos con configuraciones similares,

fundamentalmente en grandes crecidas, que son las que provocan cambios morfológicos importantes en los valles aluviales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recopilaron registros limnimétricos de las escalas de los puertos de: San Nicolás (SN) en el Km 353 de la vía navegable, Rosario (R) en el Km 416, Puerto San Martín (PSM) en el Km 448 y Diamante (D) en el Km 533, y caudales en Puerto San Martín (informados –ley H-Q– y aforados). Para ordenar el estudio de los registros, se plantean los siguientes tramos, que pueden visualizarse en la Figura 2 siguiente:

- Diamante-Puerto San Martín (D-PSM): es en donde el cauce principal cruza todo el valle de inundación, desde el comienzo en la costa entrerriana a la santafecina a la altura de Oliveros. El tramo es de 85 Km de longitud aproximadamente con orientación leve NE-SO, la planicie aluvial pasa de estar en la margen derecha aguas arriba de Diamante, a la izquierda aguas abajo de este tramo. Aquí se originan la mayoría de los cursos de agua interiores a la planicie. En todo el tramo existen albardones costeros de la margen izquierda, y la margen derecha está constituida también por albardones hasta que el cauce principal encuentra la costa santafecina, en donde pasa a ser barranca de gran altura.
- Puerto San Martín-Rosario (PSM-R): este tramo conserva las características anteriores, el cauce principal tiene sobre la margen izquierda albardones que lo separan del valle de inundación, donde además se originan varios cursos interiores a éste, y la margen derecha constituida por barranca. La longitud es de aproximadamente 32 Km, con orientación leve NO-SE.
- Rosario-San Nicolás (R-SN): el cauce principal sobre la margen derecha sigue siendo con barrancas, pero en dos oportunidades, la barranca no se presenta tan neta como lo hacía aguas arriba, a la altura de Villa Constitución y de San Nicolás se encuentra distante del mismo a través de isletas. La margen izquierda ya no cuenta con los albardones que dividían el cauce principal con la planicie y hay una interconexión de flujos más directa. El tramo es de 63 Km aproximadamente, sigue con orientación NO-SE.

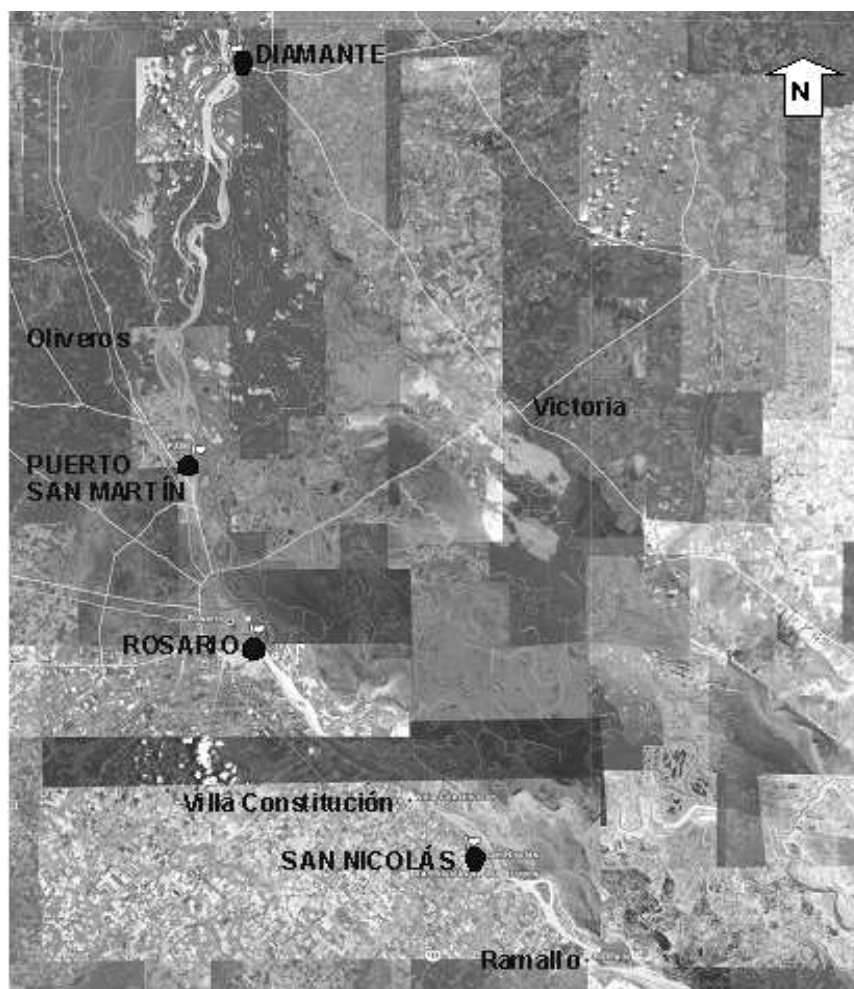


Figura 2. Tramos en estudio del cauce principal del Río Paraná.

Caudales

Los aforos de caudales sobre este tramo del Río Paraná no son habituales, de hecho, aunque la importancia del río probablemente lo justifique, no existe una sección de aforo permanente. Se han realizado aforos esporádicos en el cauce principal y muy ocasionalmente en el valle aluvial, sobre la transecta Rosario-Victoria. Los aforos para los que se cuentan con datos son los siguientes:

- Diamante: frente a la ciudad, se supone que sobre el cauce principal, de fechas 02/07/1920 (aguas medias) y 22/08/1925 (aguas bajas). Por la fecha de estos aforos no son considerados, ya que posiblemente la configuración del río en este lugar haya cambiado. Además son anteriores a los comienzos de la década del '70, donde se construyeron las grandes presas en el tramo superior del Paraná, que hacen a la serie de datos anteriores no homogénea.

- Puerto San Martín (PSM): frente a la ciudad del mismo nombre, sobre el cauce principal. Existen aforos realizados entre el 14/05/1980 y el 10/12/2009 (no se cuenta con aforos de los años 1990; 1991 y 1992). Los datos oficiales de los valores de caudales, los otorga la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH), que se obtienen a partir de una ley H-Q propia. La misma está evaluada a partir de los registros existentes de alturas locales, y responde a una ley definida hasta el 31/08/2000, a partir de allí se evidencia la aplicación de otra ley H-Q para calcular los caudales en la sección de PSM. La relación entre alturas registradas y caudales utilizada se puede visualizar en la Figura 3 inferior, conjuntamente con los valores de los aforos realizados. Éstos últimos tienen dispersión respecto a las curvas de las leyes H-Q, difieren en aproximadamente un metro de los que podría llegar a ser el caudal; o para una misma lectura de la escala, el caudal podría variar en

aproximadamente 5000 m³/s, pero si se traza una línea de tendencia logarítmica, ésta se aproxima

bastante bien a la curva H-Q utilizada hasta septiembre del 2000.

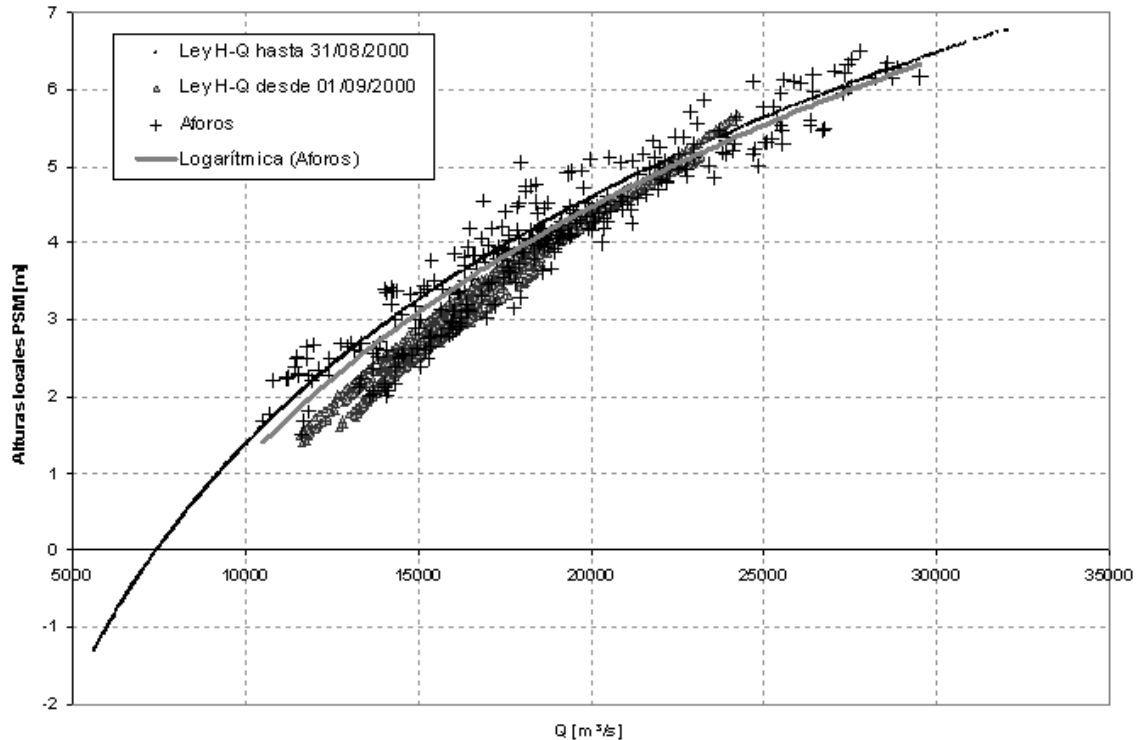


Figura 3. Gráfica H-Q de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación y Aforos, en el cauce principal frente a Puerto San Martín.

A partir de los registros de alturas y los caudales aforados entre 14/05/1980 y 22/04/1997, se puede obtener una ecuación polinómica de 6° grado para vincular las alturas locales de Puerto San Martín y el caudal del cauce principal frente a esa misma localidad:

$$Q = 0,296H^6 - 5,502H^5 + 42,969H^4 - 159,417H^3 + 421,176H^2 + 2512,421H + 4730,817 \quad (1)$$

Siendo:

Q: caudal en la sección del cauce principal frente a Puerto San Martín, en m³/s,

H: altura local en PSM, en m.

Para los posteriores análisis se tomarán los caudales que se informan oficialmente, ya que la curva H-Q presenta un ajuste aceptable de los valores aforados.

El régimen hidrológico del río en este tramo del Paraná Inferior se presenta usualmente con dos crecidas anuales, una que corresponde a los aportes del Alto Paraná entre los meses de marzo, abril y mayo,

y otra debida a las crecidas desfasadas del río Paraguay (repunte del pejerrey por la presencia del Pantanal) y/o a las crecidas cortas y abruptas del río Iguazú, que se dan a partir de julio.

El rango de caudales registrado, para el cauce principal del Río Paraná frente a Puerto San Martín, es de 7000 a 32500 m³/s aproximadamente. El módulo del río se considera de aproximadamente 17500 m³/s (para el período 1970-2008, el módulo resulta de 17586 m³/s). Particularmente, cuando se presenta la situación de caudales mayores a 25000 m³/s se evidencia anegamiento de gran parte del valle, ya que en varios lugares desde Diamante a Rosario se superan las cotas de los albardones costeros que separan el cauce principal de la planicie. Por lo tanto, la presencia de agua en el valle ya no sólo es a través de los cursos interiores, que pueden llegar incluso a tener desbordes al aumentar sus tirantes, sino que además, hay ingreso de agua en forma de desborde del cauce principal. A partir de este valor singular de caudales, la dinámica general de la zona en estudio tiene modificaciones. La misma se puede apreciar esquemáticamente en la Figura 4 a continuación.

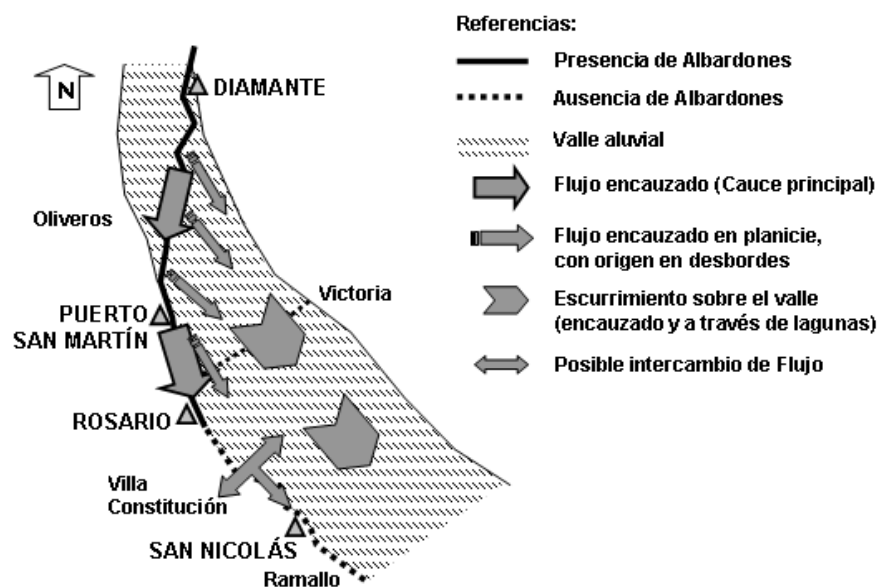


Figura 4. Esquema de la dinámica general de escurrimiento de la zona en estudio.

Desde la zona aguas abajo de Rosario, el cauce principal ya deja de tener la presencia de albardones que encaucen netamente el agua en éste, y puede haber un intercambio más franco de flujo entre aquél y el valle aluvial. Dependiendo de los niveles de agua presente según la situación, la planicie puede descargar sobre el cauce principal recargándolo y aumentado su tirante, o bien suceder exactamente lo contrario.

Con los caudales considerados (los que otorga la SSRH) y los registros limnimétricos para cada año hidrológico analizado, se van a exponer las pendientes longitudinales de los distintos tramos. A priori, se puede esperar que las pendientes tengan similares variaciones, con respecto al caudal sobre el cauce principal. Los resultados esperables son que las pendientes sean cada vez menores hacia aguas abajo, contemporáneamente en los tramos analizados. Se verá más adelante que no se puede asegurar esta suposición, ya que para diferentes crecidas, el río tiene distintos comportamientos, especialmente en el tramo aguas abajo, por la particularidad de la configuración topográfica presente.

Las crecidas analizadas fueron las de los años 1982-1983; 1992; 1997-1998, que fueron tres eventos extraordinarios (aquellas en que los máximos anuales superaron los 30000 m³/s), siendo las de mayor relevancia en el período a analizar. Para éste, se tomaron en cuenta aquellos años posteriores al co-

mienzo de la década del '70, ya que se presenta un cambio en la tendencia central de las series (Paoli et al., 2000), período éste, en el que la cuenca Del Plata experimentó marcados cambios en el uso del suelo, en especial deforestación, y que además comenzaron a operar una serie de presas en el propio Río Paraná, que podrían formar parte de las causas de mayores escurrimientos, que hacen que la serie homogénea a analizar a partir de dicha fecha.

Adicionalmente, se analiza el tramo en el período anterior al 2003, en que finaliza la construcción de la Conexión física Rosario-Victoria, para independizar los resultados de esta obra significativa en el tramo estudiado. La presencia de la misma podría traer aparejado una serie de cambios en los procesos morfológicos naturales del río, que podrían provocar una redistribución de los caudales en una zona de influencia aguas arriba y aguas abajo de ella (FICH, 2004). Es de importancia si aquí existiesen cambios, ya que hacia aguas abajo es donde se puede presentar intercambio de flujo entre valle y cauce principal.

En la Figura 5 se grafican los caudales obtenidos de la SSRH para las crecidas a considerar. Se indica allí mismo los períodos en que los aumentos y/o disminuciones de caudales fueron de consideración, para asociarlos posteriormente a los registros de alturas limnimétricas.

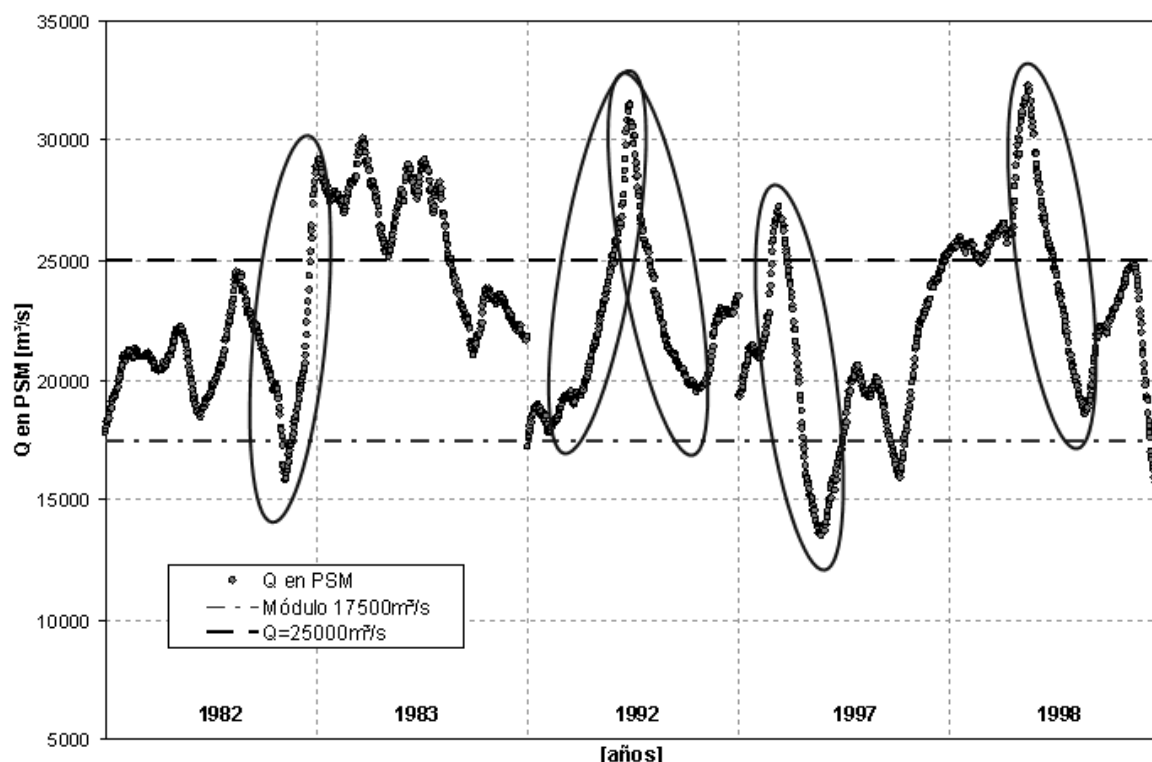


Figura 5. Hidrogramas anuales en la sección del cauce principal frente a PSM, correspondiente a las crecidas de 1982-1983; 1992 y 1997-1998.

Los años hidrológicos 1982-1983 se los puede analizar en conjunto, ambos conforman la crecida del Río Paraná que tuvo mayor permanencia de agua altas. Lo particular de ésta es el cambio considerable de la rugosidad frente al escurrimiento, ya que la vegetación presente muere o se ve afectada luego de un cierto tiempo con presencia de agua. En 1982, si bien los caudales registrados están por encima del módulo del río ($17500 \text{ m}^3/\text{s}$), al final del primer año se experimenta un descenso rápido (casi $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ en 14 días) e inmediatamente se produce un incremento considerable (aumento de casi $13300 \text{ m}^3/\text{s}$ en menos de 3 meses, tasa promedio de $229,25 \text{ m}^3/\text{s}/\text{día}$), que hace que más de la primera mitad de 1983 tenga caudales por encima de los $25000 \text{ m}^3/\text{s}$, implicando el anegamiento de la mayoría del valle, para luego disminuir en la segunda mitad de dicho año, manteniendo los caudales superiores al módulo.

En 1992 lo que sucede en el río puede denominarse como crecida rápida. En el principio del año los caudales que se computaban estaban dentro del rango de aguas medias, pero cerca de mitad de año se produce una crecida con un rápido incremento de caudales (casi $12000 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2 meses y

medio, tasa de crecimiento de $148,4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{día}$), para luego volver a disminuir en aproximadamente igual proporción ($100,6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{día}$) a los mismos valores cercanos al módulo. El período en que se superan los $25000 \text{ m}^3/\text{s}$ y vuelve a disminuir, es de casi 2 meses, que comprándolo con el tiempo que permanece el agua encima de ese valor en 1982-83 (8 meses aproximadamente), la crecida es denominada de tipo rápida. Nuevamente casi al final del año se produce un leve aumento del caudal, pero no llega a ser significativo.

Los años continuos hidrológicos 1997-1998 se caracterizaron por ser de aguas altas, en particular el '97 fue de aguas medias-altas al principio, con una crecida rápida que llega a los $27200 \text{ m}^3/\text{s}$ y con marcados crecimiento ($7700 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2 meses, tasa de $120,3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{día}$) y descenso ($13500 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2,5 meses, tasa de $179,7 \text{ m}^3/\text{s}/\text{día}$) de caudales. Luego se da la mayor crecida en registros históricos de niveles de agua del Paraná en el '98, cuando el caudal sobre el cauce principal fue de $32283 \text{ m}^3/\text{s}$. El escenario para el comienzo de este año particular fue con bastante presencia de agua, que ha influenciado en gran medida a que se registren los máximos niveles. Los caudales en esta crecida se

mantuvieron por encima de los 25000 m³/s algo más de 6 meses, pero siendo éstos de importancia, el período fue menor a 2 meses. El descenso que se produce luego del pico de la crecida es muy marcado, ya que desciende en 100 días (3,3 meses) aproximadamente 14000 m³/s, tasa de decrecimiento de 133,6 m³/s/día.

Alturas limnimétricas

En la Figura 6 siguiente se pueden visualizar los registros limnimétricos en cada escala estudiada (todas las cotas del pelo de agua fueron llevadas a cotas del IGN para su comparación), para los años de las crecidas citadas.

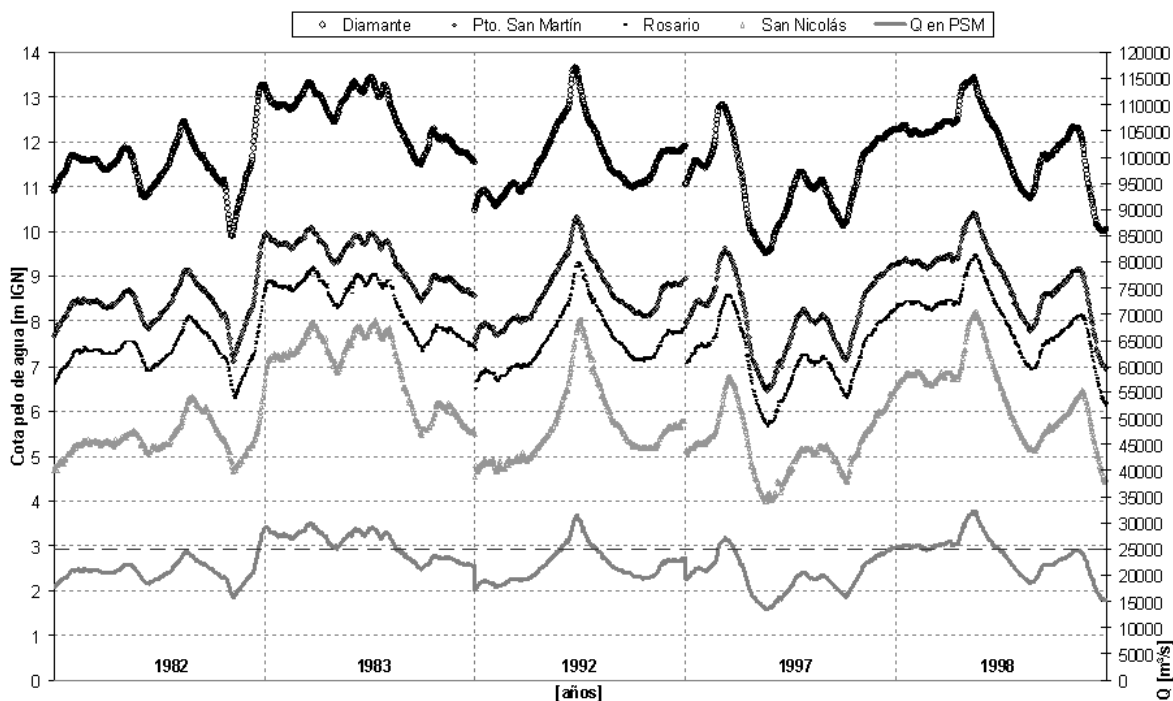


Figura 6. Registros limnimétricos y caudales del cauce principal del Río Paraná, en las escalas de: Diamante, Pto. San Martín, Rosario y San Nicolás; para las crecidas de 1982-83; 1992 y 1997-98.

Como puede apreciarse, los rangos de variación del pelo de agua para cada escala, en forma aproximada fue de 4 metros, que en cada caso fueron los siguientes:

- Diamante: de cota 9,53 mIGN a 13,56m IGN
- Pto. San Martín: de cota 6,46 mIGN a 10,43 mIGN
- Rosario: de cota 5,66 mIGN a 9,48 mIGN
- San Nicolás: de cota 3,99 mIGN a 8,22 mIGN

Se observa que las máximas alturas se producen en general en el año 1998, y las segundas en 1992. Si bien el valor de 1992 es el segundo ocurrido en la historia registrada, su permanencia y volumen es mucho menor de los que se producen en la crecida de 1983, que es lo que le da relevancia a la misma. En el caso de 1998, hay un prolongado período de crecida moderada estacionaria, seguidas de un pico cuya magnitud excede varios de los registros históri-

cos; no obstante, los caudales fluviales no han sido tan extremos como en crecidas anteriores. Esto se evidencia, por ejemplo, en que los niveles máximos registrados durante la crecida de 1998 en Diamante no son los máximos históricos, como sucede en Rosario, sino que se ubican en el cuarto lugar en la serie, detrás de las crecidas de 1992, 1983 y 1905. Estas diferencias se asignan al diferente desarrollo de la vegetación sobre el valle de inundación y al albardón del cauce principal del Paraná, que producen una resistencia hidráulica distinta (Seraman & asociados S.A., 1999).

El área en estudio forma parte del Paraná Inferior, donde suele citarse que aguas abajo de Ramallo hay influencia de la marea del Océano Atlántico. Para estimar si la misma afecta a nuestra zona, se contrastan las distintas alturas limnimétricas registradas, las cuales se representan en la Figura 7.

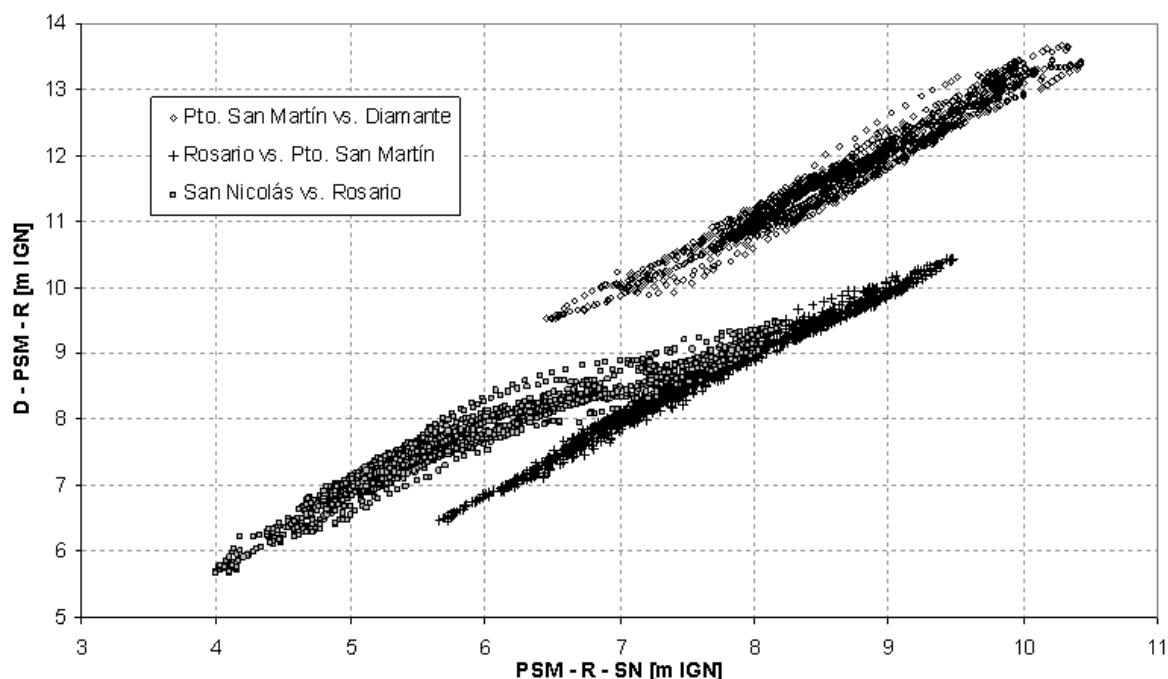


Figura 7. Registros limnimétricos confrontados de a pares contiguos, de las escalas de Diamante, Pto. San Martín, Rosario y San Nicolás, de los años 1982-1983-1992-1997-1998.

Las gráficas tienen tendencia mayoritariamente recta, representan las relaciones cuasi lineales entre los distintos registros contiguos. El contraste entre las alturas de San Nicolás y Rosario es el que presenta mayor divergencia de la recta, con dispersión menor a un metro. Por las relaciones que aquí se muestran, no habría influencia notable de la marea. La correlación entre las alturas de Diamante y Pto. San Martín, a partir de determinado valor, comienza a tener mayor dispersión, que puede vincularse con el hecho que para aguas altas del Paraná, el aporte del Río Coronda, que tiene lugar aguas arriba de Pto. San Martín en el Km 460 de la vía navegable, puede incrementarse.

Pendientes limnimétricas

A partir de los registros en las escalas de los puertos mencionados y para los años de las crecidas citadas, se calculan las pendientes limnimétricas de los tramos definidos con las longitudes que indican la ubicación de cada escala en la vía navegable. Las pendientes, en general, se encuentran en el rango de $1,6 \times 10^{-5}$ a $4,3 \times 10^{-5}$ aproximadamente. Dentro de la zona en estudio, para la definición de cotas de obras de toma sobre el cauce principal del río (frente a Timbúes y a Figuera), se han indicado como referentes pendientes longitudinales mínimas de $2,0 \times 10^{-5}$ y máximas del orden $4,0 \times 10^{-5}$ para el tramo

aguas arriba de PSM y de $3,6 \times 10^{-5}$ para aguas abajo de Rosario (Rentería et. al., 2009), cuyos rangos quedan contenidos en el que aquí resulta, siendo los extremos cercanos a los valores citados.

A continuación se presenta en la Figura 8 las gráficas de las pendientes calculadas en cada tramo (D-PSM, PSM-R y R-SN), para las distintas crecidas.

Para el tramo D-PSM, las pendientes han variado en el entorno de $2,96$ a $4,33 \times 10^{-5}$, estando la mayoría de los registros dentro de los $3,25$ a $4,00 \times 10^{-5}$. Se han registrado algunas pendientes que escapan de dicho rango más acotado, pero son valores puntualizados para los cuales los caudales tuvieron ascensos y/o descensos abruptos en un corto tiempo. No se evidencian grandes variaciones de la pendiente con los cambios de caudales en crecidas, y usualmente tienen la misma tendencia de crecimiento/descenso que éstos.

En el tramo PSM-R, las pendientes registradas varían dentro de un rango más amplio que el anterior, de $2,19$ a $4,19 \times 10^{-5}$, siendo la mayor densidad de registros ubicados entre los valores $2,60$ a $3,60 \times 10^{-5}$. Aquí las pendientes que escapan por fuera de este rango más limitado son de mayor frecuencia, pero nuevamente coinciden con caudales muy bajos o aumento repentino de los mismos.

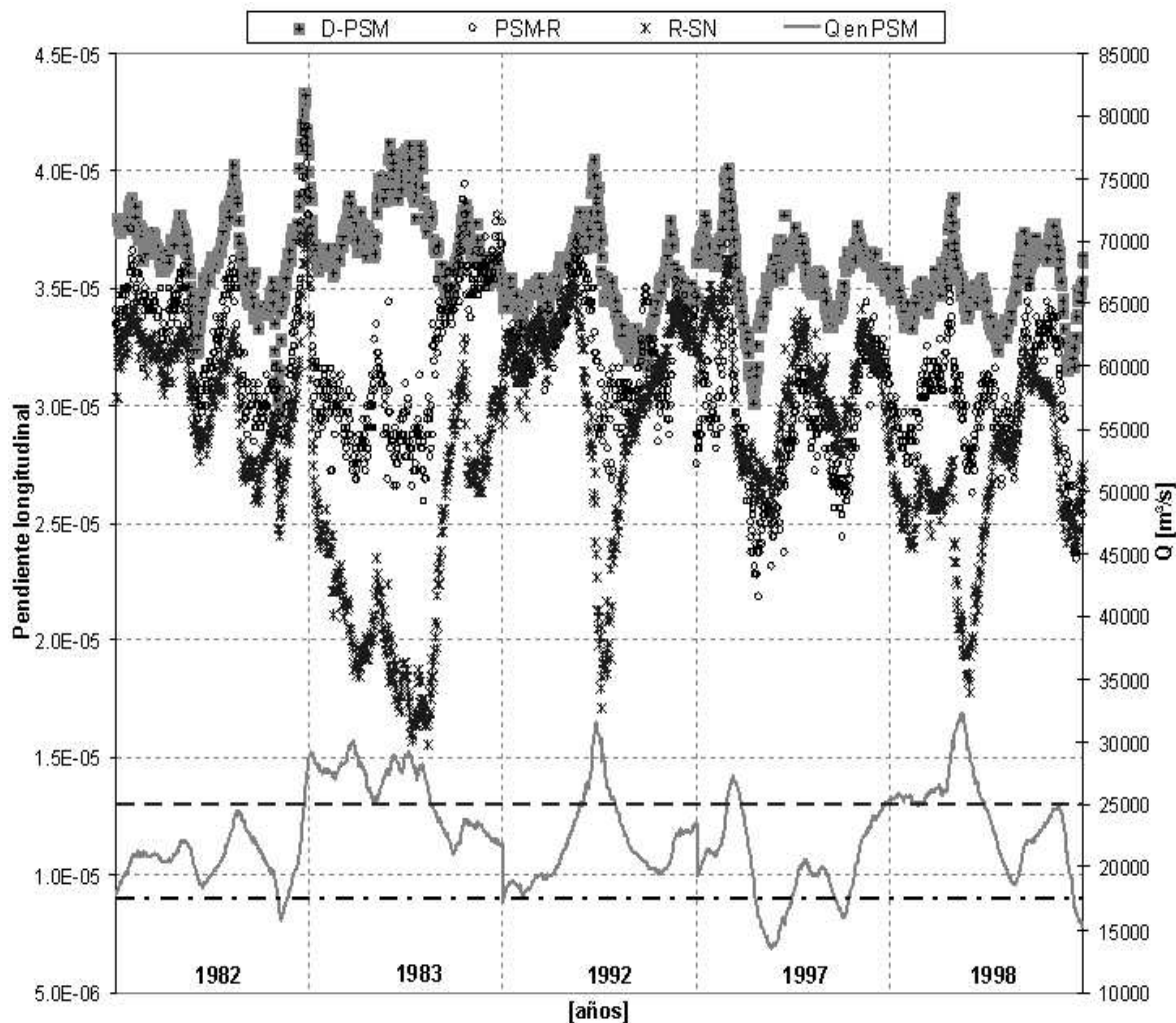


Figura 8. Gráficas de pendientes longitudinales en los tramos D-PSM, PSM-R y R-SN y caudales en PSM, para las crecidas de 1982-1983; 1992 y 1997-1998.

En el tramo R-SN, las pendientes longitudinales registradas varían de $1,56$ a $3,75 \times 10^{-5}$, siendo un rango más estrecho —con la mayoría de los registros— de $1,75$ a $3,50 \times 10^{-5}$, que al no ser mucho menor se pone de manifiesto mayor variabilidad de los valores. Casi no hay registros por fuera de los rangos definidos, únicamente en casos extremos de las crecidas (picos y final del '83).

Por los rangos expresados anteriormente, se cumple con lo previsto que hacia aguas abajo en el curso principal, las pendientes longitudinales son cada vez menores. Se evidencia también mayor variabilidad en el mismo sentido, manifestando hacia aguas arriba que el curso es mucho más definido; hacia aguas abajo, hay mayor cantidad de factores que afectan el nivel del agua sobre el cauce principal, lo que podría provocar los rangos más amplios en las pendientes.

Análisis por Crecidas

A partir de las pendientes limnimétricas calculadas, se analizará cada crecida por separado, para evaluar las singularidades presentes.

Crecida 1982-1983

La misma se caracterizó por aguas altas en el Río Paraná y de una importante permanencia. Se puede apreciar en detalle en la Figura 9 a continuación. Ésta es singular por el período en que reside el agua en el valle, produciendo un cambio considerable en la rugosidad frente al escurrimiento, ya que la vegetación presente muere o se ve afectada luego de un tiempo considerable de estar sumergida, como fueron los casi 8 meses que duraron los caudales sobre $25000 \text{ m}^3/\text{s}$.

En cuanto a las pendientes, se ve una relativa estabilidad aguas arriba (D-PSM), y que acompañan las variaciones de caudales, especialmente en 1982. En primera mitad de 1983, es notable la dispersión entre las tres pendientes analizadas, existe una fuerte disminución de la de aguas abajo (R-SN), y que se refleja –en menor medida– en la

pendiente de PSM-R. Esto puede deberse a que al estar el valle con importante volumen de agua –que ingresó desde finales de 1982–, se produce un regreso desde la planicie al cauce principal, aguas abajo de Rosario, cuando los bordos ya no condicionan la interconexión hidráulica entre cauce principal y valle aluvial.

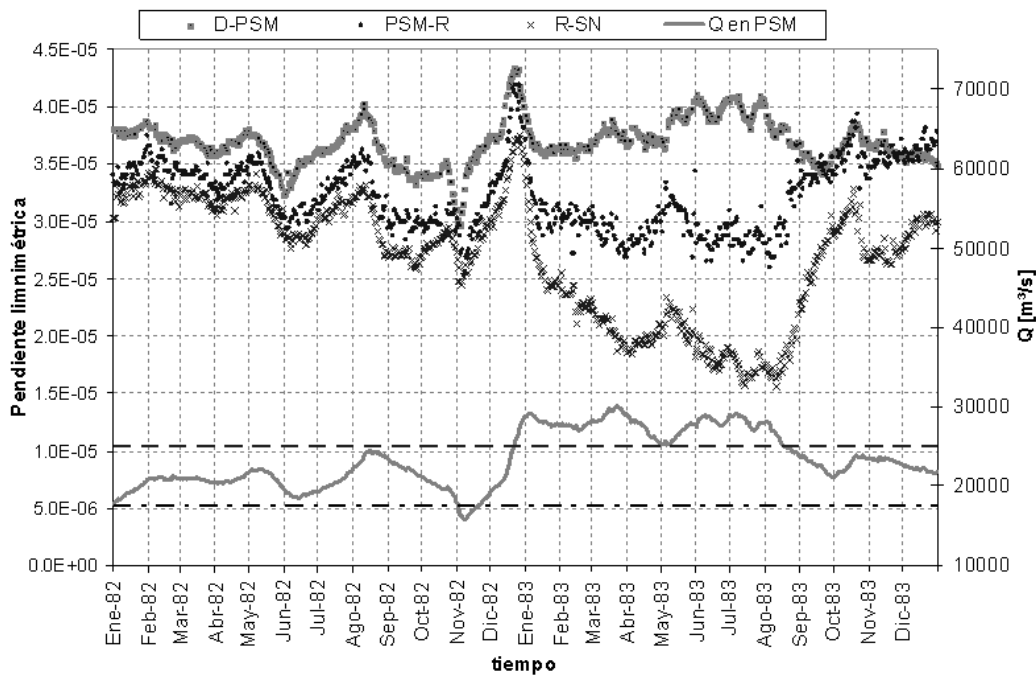


Figura 9. Gráficas de pendientes longitudinales en los tramos D-PSM, PSM-R y R-SN y caudales en PSM, para la crecida de 1982-1983.

Así, aguas abajo de Rosario, los niveles se incrementan en la escala de San Nicolás por tener una doble concurrencia de agua –desde el valle y cauce principal– y dan como resultado pendientes longitudinales muy bajas para esta situación, la cual se esquematiza en la Figura 10. Al finalizar la crecida y cuando disminuyen los caudales sobre comienzos de agosto del '83, se tienden a reestablecer las pendientes habituales, siendo notable la recuperación de la de R-SN cuando el caudal baja de los 25000 m³/s.

Crecida 1992

En cuanto a esta crecida, ver Figura 11, las pendientes de D-PSM no tienen mayores variaciones, elevándose ligeramente durante la crecida y nuevamente al final del año con el aumento leve de caudales. Las pendientes PSM-R responden a la crecida primero con aumento y luego un rápido descenso a partir de superar los caudales el valor singular de 25000 m³/s; posteriormente ya pasado el pico de la crecida y con caudales en descenso lento, se presenta una elevación puntual de las pendientes que parece no responder a la

variación de los caudales presentes. Con el leve ascenso de los mismos sobre fin de año también aumentan estas pendientes, pero no de forma considerable.

Es de destacar el comportamiento disímil de la pendiente R-SN, ya que antes del pico de la crecida, al superar el caudal los 25000 m³/s, ésta cae en forma abrupta, a valores muy bajos durante el pico, luego presenta oscilación y al descender los caudales –en especial de 25000 m³/s– asciende hasta igualar a las de los otros tramos. Esta disparidad entre las pendientes puede llegar a responder a que al aumentar los caudales, el tramo aguas abajo no responda rápidamente en el sistema y tenga una inercia hídrica al escurrimiento que hace que se acumule agua en este tramo, hasta tanto se logre una adecuada evacuación aguas abajo del lugar estudiado. Puede ser además que se repita lo supuesto durante la crecida de 1982-83, que al existir una interconexión franca entre el valle y curso principal aguas abajo de Rosario, parte del flujo retorne desde la planicie, incrementando considerablemente los registros de niveles de agua en esta zona.

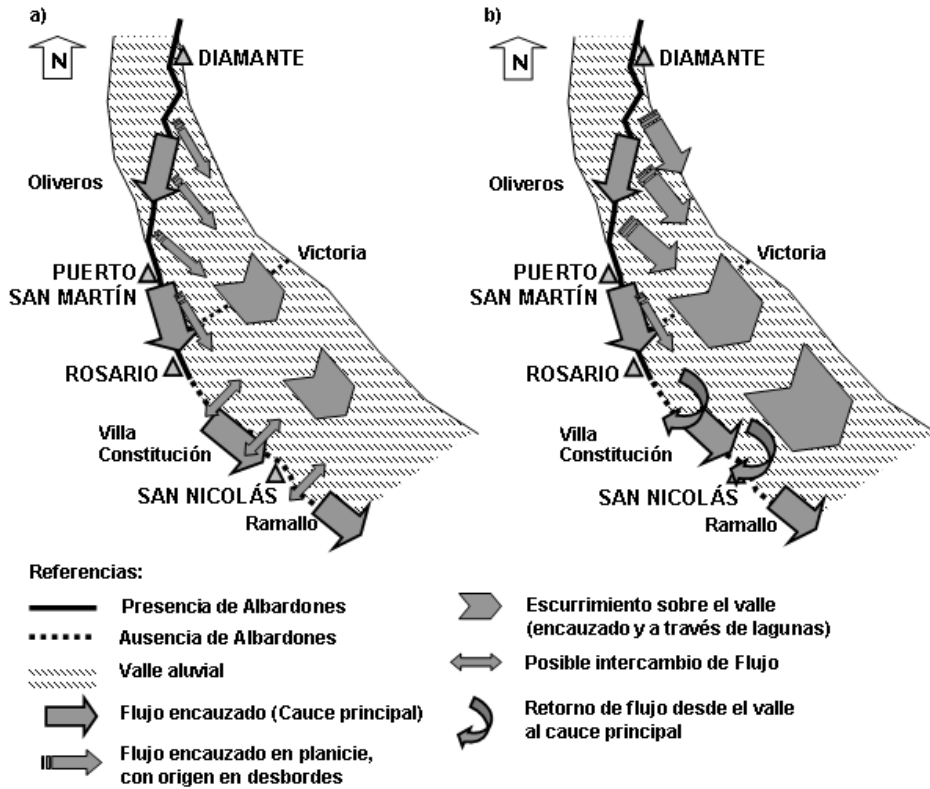


Figura 10. Esquemas de la dinámica general de la zona en estudio a) escurrimientos en aguas medias, b) escurrimientos en crecida importante.

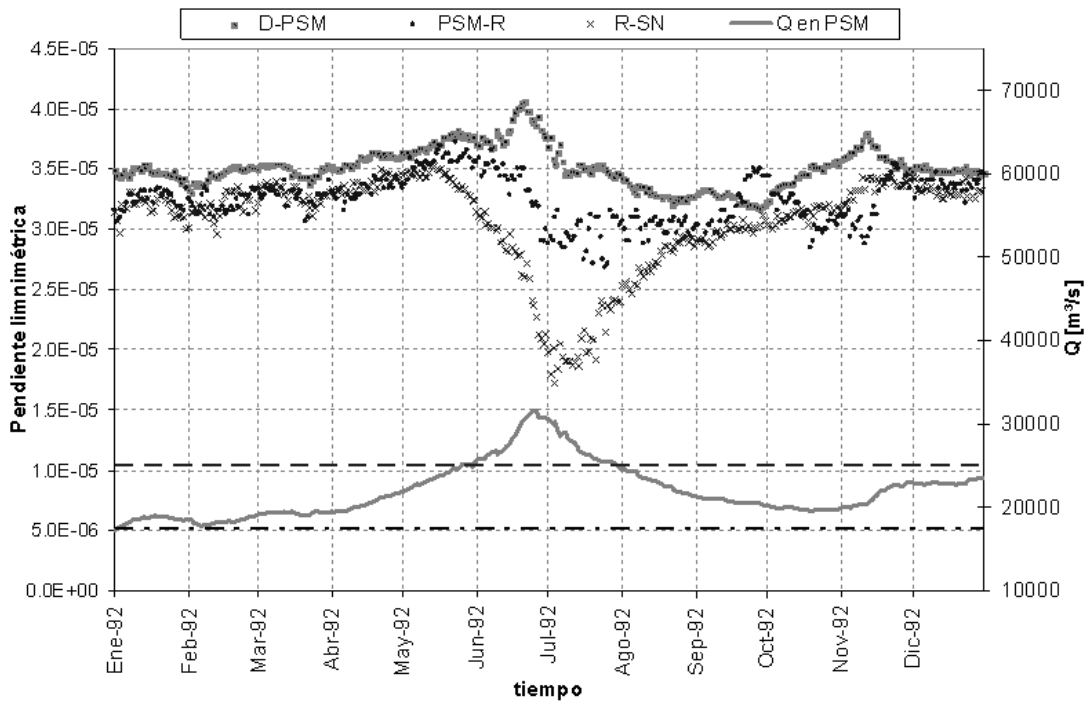


Figura 11. Gráficas de pendientes longitudinales en los tramos D-PSM, PSM-R y R-SN y caudales en PSM, para la crecida de 1992.

Crecida 1997-1998

Los años hidrológicos 1997-1998 se caracterizaron por ser de aguas altas, ver Figura 12, en particular el '97 fue

de aguas medias-altas, con la clásica crecida en marzo y luego al año siguiente se da la mayor crecida en registros de niveles de agua históricos del Paraná en Rosario.

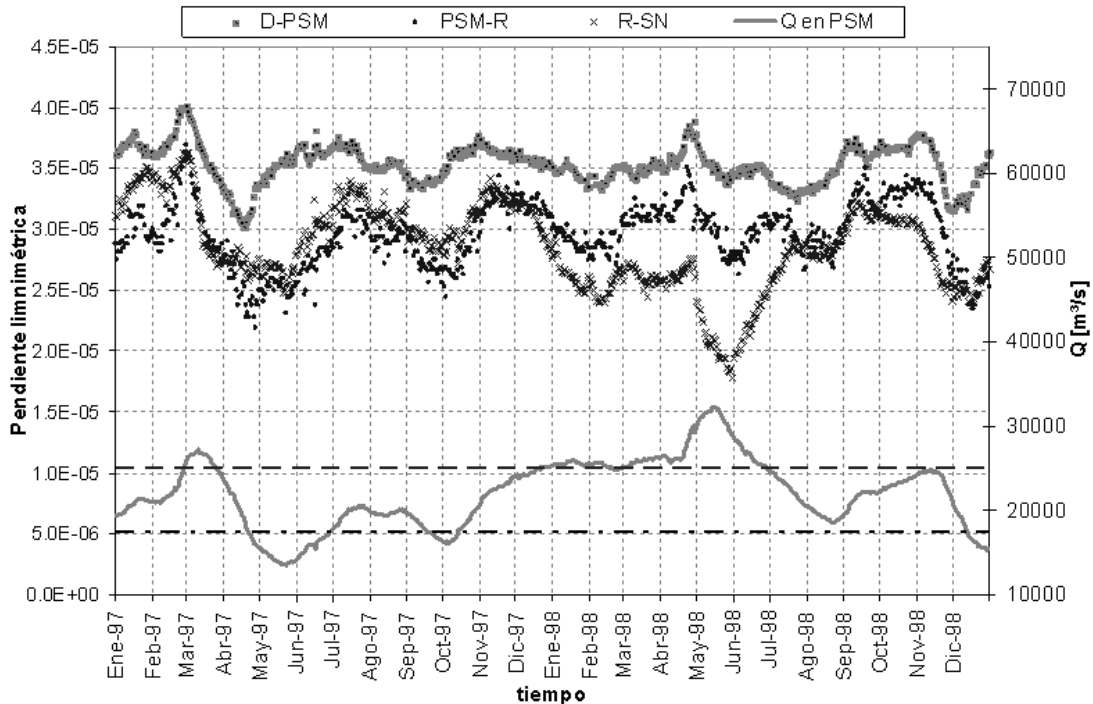


Figura 12. Gráficas de pendientes longitudinales en los tramos D-PSM, PSM-R y R-SN y caudales en PSM, para la crecida de 1997-1998.

En 1997 las pendientes de los tramos estudiados acompañan bastante bien las variaciones de caudales registrados, notando como singular que la pendiente de R-SN resulta levemente por encima de la de PSM-R. Hacia fines de 1997 el caudal comienza su crecimiento y llega a mantenerse casi por 4 meses en el valor de 25000 m³/s, donde se manifiesta un decrecimiento en las pendientes de los tramos aguas abajo PSM-R y R-SN; posteriormente comienza un nuevo incremento hasta el pico de la crecida, donde se superan ampliamente los 25000 m³/s y las pendientes caen abruptamente, especialmente la de R-SN.

Se vuelve a repetir lo visto para las crecidas anteriores, las pendientes hacia aguas abajo decaen, más pronunciadamente cuando el gradiente de caudales se incrementa en forma notable. La pendiente de D-PSM tiene variaciones (siempre acompañando a las

de los caudales), pero no tan significativas. Una vez pasado el pico, al bajar el caudal hasta valores cercanos al módulo del río, las pendientes se restituyen a las usuales; y en la crecida tardía en ese mismo año al final, se tiende a repetir la situación anterior, pero con la particularidad que la pendiente de PSM-R tiene un mayor descenso, y la de D-PSM se eleva casi al final del año (aún cuando los caudales siguieron disminuyendo).

A modo de ilustración, se presentan en la Figura 13 siguiente, combinaciones de imágenes satelitales (obtenidas de la página del U. S. Geological Survey), inmediatamente posteriores a las crecidas que se analizan, donde se refleja la gran proporción de zona anegada sobre el valle. Las distintas calidades en las imágenes responden a la evolución en el correr de los años de las imágenes multiespectrales que brindan los satélites.

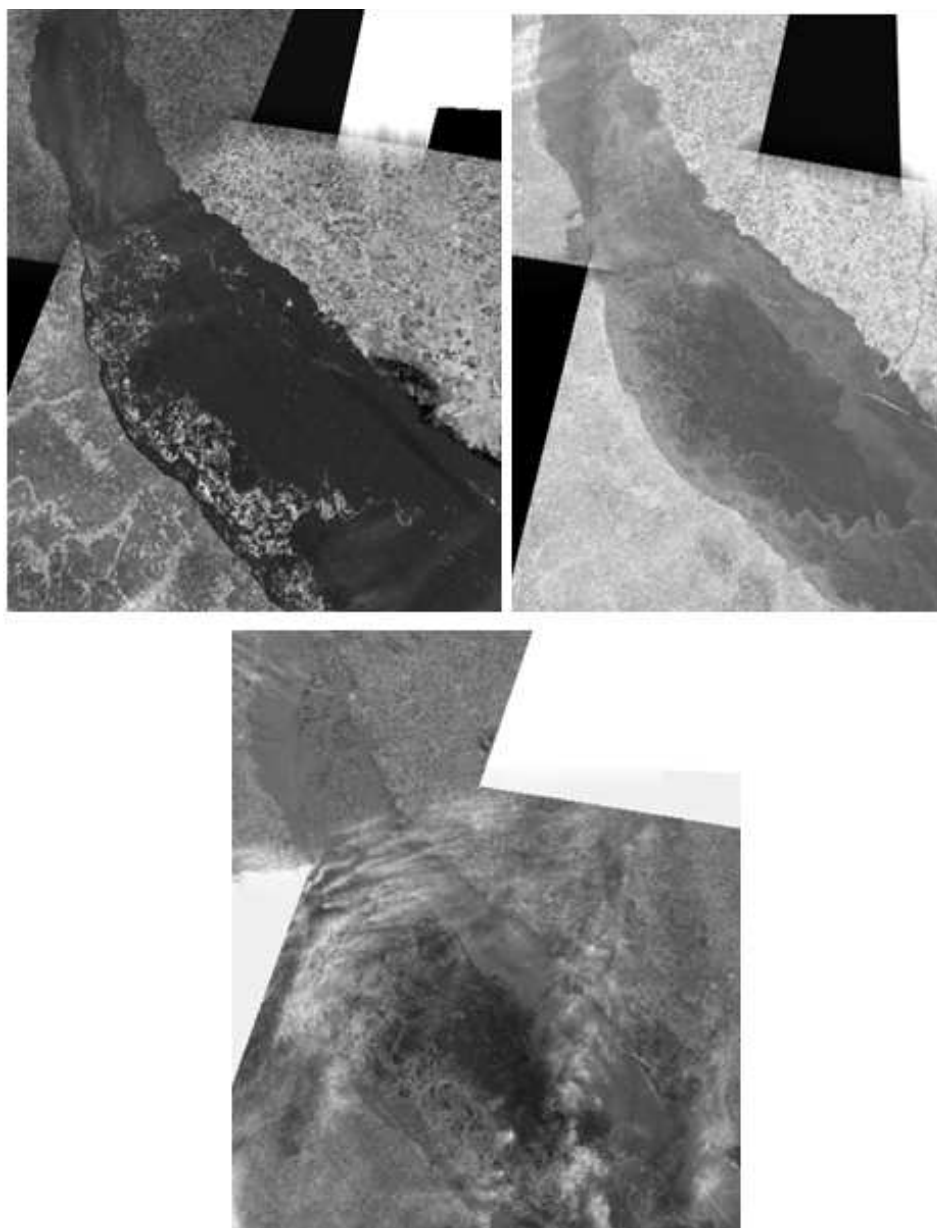


Figura 13. Imágenes Landsat TM combinadas, bandas 4-3-2. Superior Izquierda: 226-083 (22/07/1983) y 227-082 (29/07/1983); Superior Derecha: 226-083 (23/08/1992) y 227-082 (14/08/1992); Inferior: 226-083 (08/08/1998) y 227-082 (30/07/1998).

RESULTADOS

Para analizar algún tipo de vinculación entre las pendientes limnimétricas que se presentan en los distintos tramos y los caudales sobre el cauce principal, se realiza una gráfica integral que contraste ambos parámetros, Figura 14 siguiente.

Se puede observar que en aguas medias, las pendientes limnimétricas sobre el cauce principal siguen la misma tendencia de crecimiento que los

caudales. Las pendientes presentes en el tramo D-PSM son medianamente uniformes, no parece haber una fuerte dependencia entre las mismas y los caudales, con una dispersión un tanto más amplia en aguas medias-altas.

Las pendientes PSM-R tienen una variación similar a las de R-SN respecto a los caudales, hasta el módulo del río acompañan la tendencia de crecimiento, pero disminuyen cuando se presentan caudales elevados –en especial mayores de 25000

m³/s-, dando una variación en forma de V, con pico cercano al módulo. Este comportamiento es más pronunciado para el tramo R-SN, registrándose

para caudales altos valores muy bajos de pendientes longitudinales (con bastante diferencia de los del tramo aguas arriba).

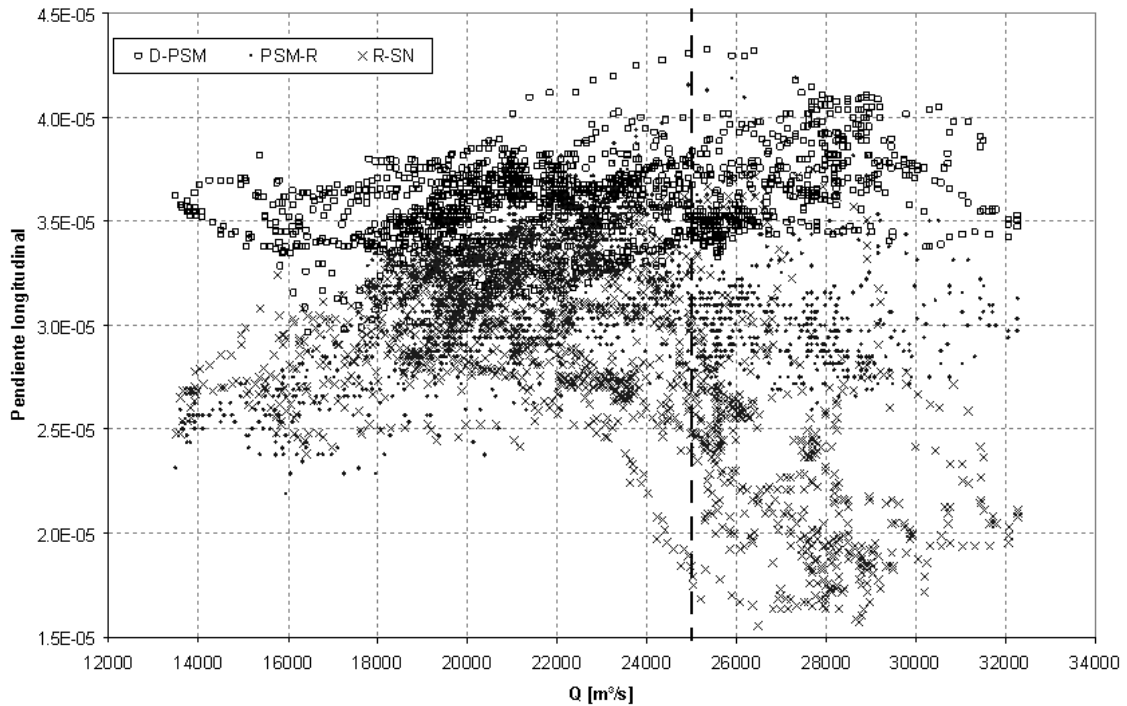


Figura 14. Gráficas de pendientes longitudinales en los tramos D-PSM, PSM-R y R-SN versus caudales en PSM, para las crecidas de 1982-83; 1992 y 1997-98.

Las pendientes longitudinales dependen principalmente de la configuración integral cauce principal-planicie. Cuando los caudales aumentan y son menores a 25000 m³/s (flujo encauzado), se incrementan los tirantes y pendientes en el cauce. En cambio, cuando el caudal aumenta superando dicho valor, el tirante en Rosario crece, pero más rápidamente se incrementa en San Nicolás por el retorno de flujo al cauce principal desde el valle, donde ya no se presenta la separación física neta (albardones) del flujo, causando pendientes longi-

tudinales menores. Con caudales máximos, esta situación es más evidente.

Un esquema de lo recientemente expresado se presenta en la Tabla 1. Debajo en la Figura 15 se muestra la combinación de dos imágenes satelitales Landsat procesadas digitalmente, para la crecida de 1998, que reflejan las líneas generales de escurrimiento, especialmente sobre el valle, junto a un zoom de la posible zona donde se produce el retorno del flujo desde el valle al cauce principal.

Tabla 1. Variaciones en los parámetros más significativos durante una crecida, en la zona de estudio del Río Paraná.

Q en Cauce Principal en PSM	Características del Flujo sobre CP	Intercambio de Flujo CP-PI	Condición de Tirantes			Condición de Pendientes longitudinales		
			Pto. San Martín	Rosario	San Nicolás	D-PSM	PSM-R	R-SN
< 25000m ³ /s	encauzado	NO	↑	↑	↑	---	↑	↑
> 25000m ³ /s	retorno de flujo desde PI	SI	↑	↑	↑↑	↑	↓	↓↓

Referencias: CP: Cauce Principal
 PI: Planicie de Inundación
 ↑: aumento
 ↑↑: aumento de mayor incremento
 ↓: disminución
 ↓↓: disminución de mayor intensidad
 ---: sin variación significativa

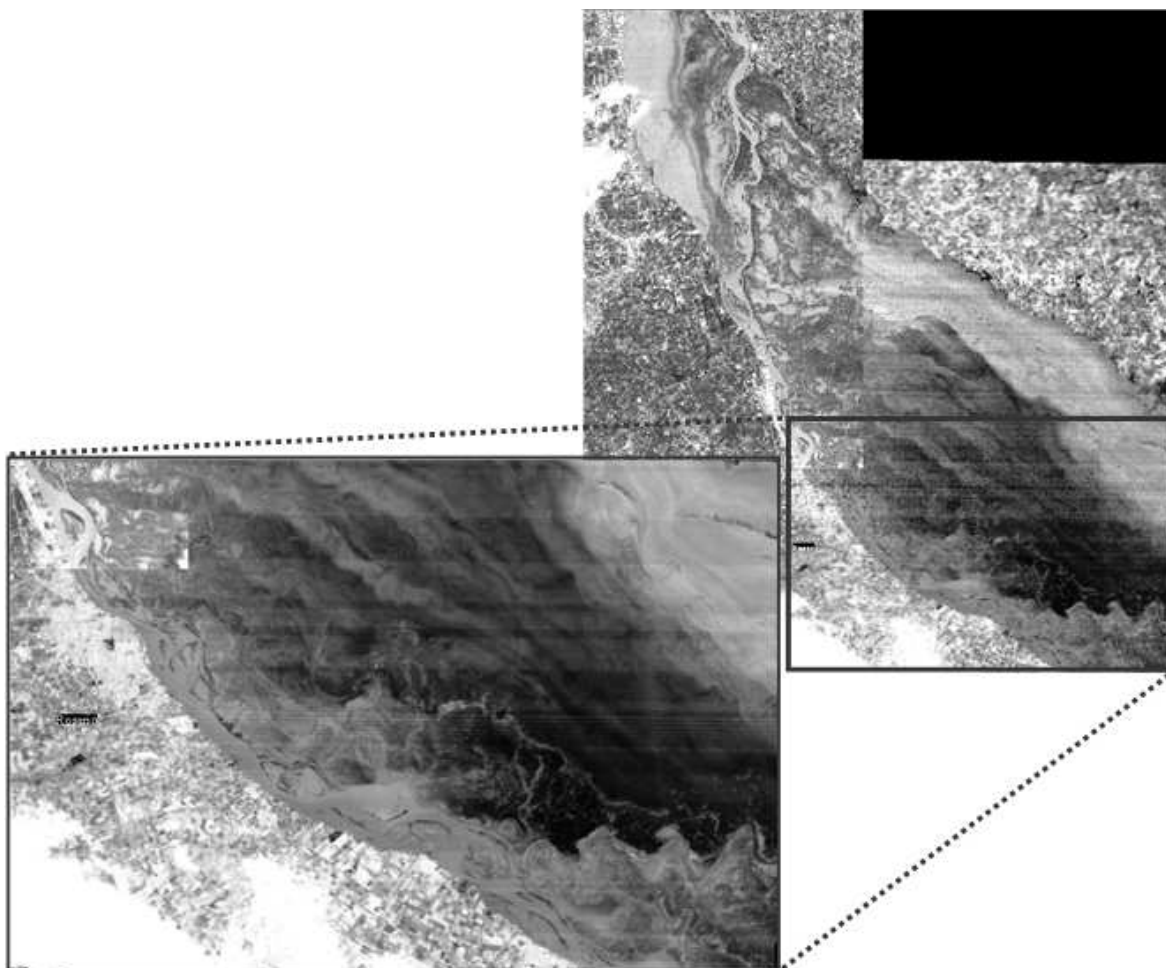


Figura 15.- Combinación de Imágenes Landsat TM 227-082 (05/06/1998) y 226-083 (04/05/1998) procesadas digitalmente, para visualización de trayectorias líquidas.

Para visualizar en conjunto la relación presente entre caudales, cotas del pelo de agua y pendientes longitudinales sobre el cauce principal, se estudian estos valores de la serie 1970-2007 y se presenta la Figura 16. En la misma se contrastan las pendientes longitudinales PSM-R y los caudales informados por la SSRH en PSM, en función de las cotas del pelo de agua presentes en cada día, en la escala de PSM. Se exponen conjuntamente los valores de aforos disponibles (períodos 1980-1989 y 1993-2007) frente a PSM.

De acuerdo a lo anteriormente expresado y de lo expuesto en esta gráfica, no se presenta una pendiente claramente definida para un mismo tirante y caudal, de los cuales se ha visto que los aforos responden con bastante aproximación al valor que surge de la curva H-Q definida. Para un valor determinado de altura de agua, las pendientes que se presentan están dentro de un rango aproximado de $1,00 \times 10^{-5}$; y

cuando las alturas son mayores, la variación llega a ser de $1,5 \times 10^{-5}$. De esta comparación se puede concluir que al intentar considerar un caudal sobre el cauce principal, con cierto valor de rugosidad y un tirante, la pendiente longitudinal consecuente –teniendo en cuenta flujo uniforme– sería de un valor determinado, no habiendo en la realidad una relación biunívoca. Esto hace suponer que los cálculos que puedan llegar a realizarse utilizando la ecuación de continuidad y de flujo uniforme, que muy a menudo se supone en corrientes naturales (Chow, 1959), son simplemente estimativas.

En resumen, no puede establecerse una vinculación directa entre caudales y pendientes registradas, dada la dependencia de las condiciones topográficas locales y de la situación hídrica sobre el valle de inundación, que condicionan la descarga del sistema. Además la topografía dependerá del momento en que se

la analice, pues las condiciones antecedentes de ésta influyen en la misma y en el escurrimiento del flujo.

Hay que recordar que este análisis se realiza con los registros existentes sobre el cauce principal, del que

se cuenta con mayor cantidad de datos, en el tramo estudiado. No existen registros –ni de lectura de escalas, ni de caudales– fidedignos y de una cantidad significativa sobre los cursos interiores y/o lagunas del valle de inundación.

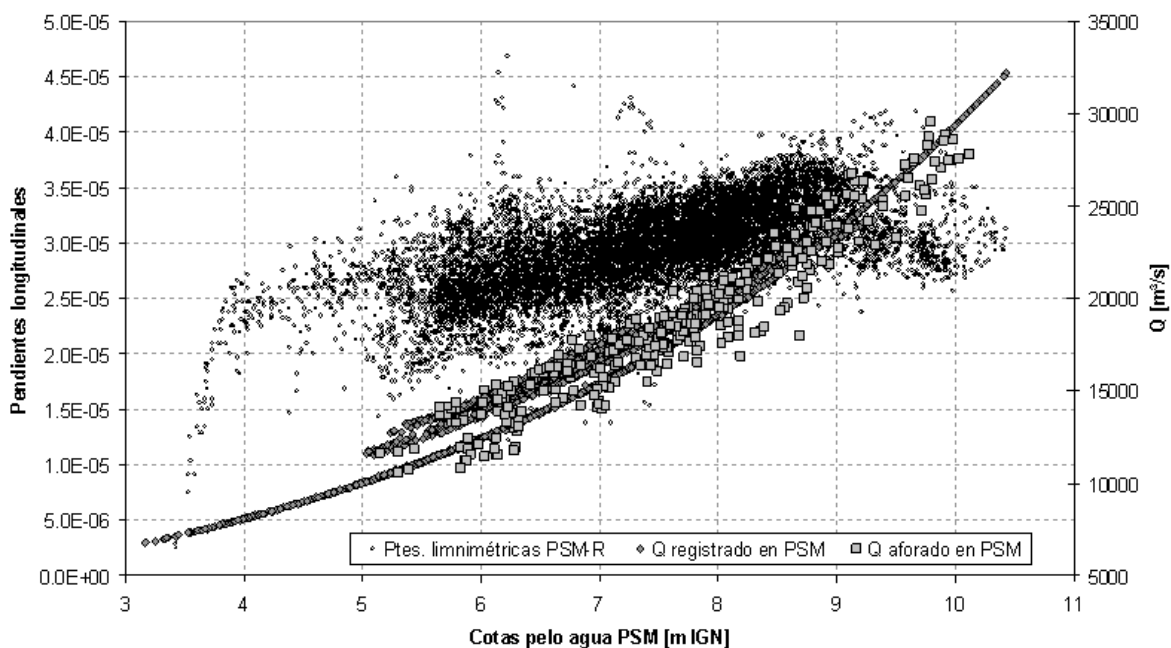


Figura 16. Gráficas de pendientes longitudinales en el tramo PSM-R, caudales registrados y aforados en PSM versus cotas del pelo de agua en PSM, periodo 1970-2007.

CONCLUSIONES

Se han analizado los registros de alturas limnimétricas y caudales de un tramo importante del Río Paraná, desde el Km 325 al 533 de la vía navegable. Los registros de las escalas analizadas fueron los de los puertos de: Diamante, Puerto San Martín, Rosario y San Nicolás. Los caudales calculados y aforados corresponden al cauce principal a la altura de Puerto San Martín.

Se han contrastado los caudales aforados y los calculados a través de una relación H-Q establecida en el PSM por la SSRH, dando resultados satisfactorios la curva planteada.

Las pendientes longitudinales sobre el cauce principal, a partir de los registros en las escalas de los puertos, se encuentran en el rango de $1,60 \times 10^{-5}$ a $4,30 \times 10^{-5}$ aproximadamente, según el tramo y fecha considerados. De lo analizado se ha visto que las pendientes longitudinales dependen en gran medida de la configuración topográfica integral cauce-planicie y del caudal presente en las crecidas, ya que si éste es en aumento, pero inferior a $25000 \text{ m}^3/\text{s}$, el flujo se man-

tiene encauzado en el cauce principal y no establece intercambios francos con el volumen que escurre por el valle, las pendientes mantienen igual tendencia de variación que el caudal, y se aproximan a las pendientes del fondo del curso de agua.

Si en cambio, el caudal supera los $25000 \text{ m}^3/\text{s}$, aguas abajo de Rosario se pueden producir retornos importantes desde el valle al cauce principal, elevando el pelo de agua en mayor proporción aguas abajo, ocasionando pendientes menores que aguas arriba por la situación local en la configuración presente. Cuando los caudales son elevados y de alta permanencia, esta situación es más evidente.

Se concluye que los aumentos de caudales no producen necesariamente incremento de tirantes, según sean las pendientes presentes, dependientes de la topográfica y la situación hídrica aguas abajo que condiciona la descarga del sistema, y según también de las condiciones antecedentes.

Este estudio es importante para establecer el tipo de relaciones entre alturas y caudales que puede llegar a

presentarse en los lugares citados, especialmente para la calibración de modelos aplicados en este tramo. También es un antecedente para el análisis de otros grandes ríos de llanura con configuraciones similares de cauce-planicie.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chow, V. T. (1959). Open channel hydraulics. McGraw-Hill, New York.

FICH (2004). “Estudios Hidráulicos y Morfológicos Zona Isla La Invernada. Río Paraná”. Subsecretaría de Puertos y Vías Navegables. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

García, M.; Basile, P.; Riccardi, G.; Stenta, H. (2008) “Modelación hidrodinámica cuasi-2D a gran escala espacial de un tramo del Río Paraná”. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica 2008, Cartagena de Indias, Colombia.

Paoli, C.; Schreider, M. (2000) El río Paraná en su tramo medio. Tomo 1. UNL editora. ISBN 987-508-120-5. Santa Fe, Argentina.

Rentería, J. P.; García, M.; Forestieri, C.; Avellaneda, D.; Orsolini, H.; Aguiar, R. (2009) “Estudio estadístico de niveles en el sistema Río

Paraná para el diseño de obra de toma de acueductos”. Congreso Nacional del Agua 2009, Trelew, Chubut, Argentina.

Rocca, E.; Vasallo, M. R.; Lopresti, A. (1973) Referencias hidrogeológica del Río Paraná frente a Rosario y su relación con la historia del pótamo. Publicaciones Universitarias, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

Serman & asociados S. A. (1999) “Estudio de la distribución y las luces de los puentes en la planicie inundable”. Informe de Puentes del Litoral S.A., Convenio Gobierno Nacional – Provincias de Santa Fe y Entre Ríos para la obra Conexión Física Rosario-Victoria. Argentina.

U.S. Geological Survey, página de Internet: <http://edcsns17.cr.usgs.gov/NewEarthExplorer>

Zapata, C. (1999) “Estudio de la dinámica hídrica del Río Paraná en la transecta Rosario-Victoria”. Informe de Puentes del Litoral S.A., Convenio Gobierno Nacional – Provincias de Santa Fe y Entre Ríos para la obra Conexión Física Rosario-Victoria. Argentina.

Artículo recibido el 10/2010 y aprobado para su publicación el 12/2010.