

AJUSTES MORFOLÓGICO-SEDIMENTARIOS DEL RÍO BERMEJO EN TORNO AL PUENTE LAVALLE (CHACO ARGENTINO)

**Carlos G. Ramonell ⁽¹⁾, Mario L. Amsler ^{(1) (2)}, Oscar Orfeo ⁽³⁾, María D. Montagnini ⁽¹⁾ y
Melina Perez ⁽¹⁾**

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

⁽²⁾ Instituto Nacional de Limnología, UNL-Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

⁽³⁾ Centro de Ecología Aplicada del Litoral (CONICET)

C.C. 217 - (3000) Santa Fe, Argentina. Tel. (54) (342) 4575 233/ 44/ 46 - Interno 153. FAX (54) (342) 4575 224

E-mail: ramonell@fich1.unl.edu.ar, mamsler@fich1.unl.edu.ar, orfeo@arnet.com.ar, mdm@fich1.unl.edu.ar,

perezfortuna@yahoo.com.ar

RESUMEN

El Río Bermejo es uno de los ríos de llanura con mayor caudal sólido específico del mundo. Para los últimos 60 años, la tasa media máxima de corrimiento del cauce en el entorno de puente Lavalle fue de 600 m/año. El puente fue construido entre 1968 y 1976 en un tramo naturalmente rectificadado del río, cuya sinuosidad común es mayor que 1,7. En este escenario, el tramo recto aguas abajo del puente permaneció con tal patrón hasta nuestros días, alargándose de 4 km a 8 km en la década del '80, durante la cual ocurrieron las mayores crecidas en ese cuarto final del siglo. Aguas arriba del puente, el desarrollo de nuevos meandros provocó su destrucción parcial en diferentes oportunidades. Aquí se sugiere que el comportamiento opuesto del río a ambos lados del puente tiene su origen en un desequilibrio en el transporte de sedimentos: durante los períodos de aguas altas la obra actúa como una presa, provocando sedimentación en el tramo de aguas arriba, e incisión del lecho aguas abajo; durante los períodos de estiaje, la pendiente del tramo superior supera el límite necesario para el transporte de los sedimentos que a él ingresan, y la meandrificación es el mecanismo para disminuir el exceso de energía.

ABSTRACT

The Bermejo River is one of the lowland rivers with major specific solid discharges in the world. For the last 60 years, mean maximum rates of meander channel shift of 600 m/year were recorded around Lavalle Bridge. The bridge was built in a cut-off formed straight reach of the river, between 1968 and 1976. The reach downstream the bridge remained straight to nowadays, lengthening from 4 km to 8 km during the eighties, when large floods occurred. The meander growth at the upstream reach prompted the breaching of the bridge. We suggest that the opposite river behavior around the bridge could be related with a disequilibrium in the sediment transport. The bridge acts like a dam during the high water levels promoting sedimentation in the upstream reach, and channelized bed-lowering downstream. During low water stages, the upper reach slope would exceed the limit necessary to convey the water and sediment input; as result, meandering became the mechanism to decrease the energy excess.

INTRODUCCIÓN

El Bermejo es un río subtropical que fluye desde los Andes Subandinos hasta el Río Paraguay, atravesando el gran Chaco sudamericano (Figura 1). Es el más inestable de los grandes ríos de Argentina, con divagaciones del cauce de hasta 2500 m en los últimos 10 años. Además, es el principal contribuyente de sedimentos finos al sistema fluvial Paraná-de la Plata: en la última década del siglo XX, el Bermejo aportó casi el 90% de la carga de lavado transportada por el Río Paraná, es decir, unas 95×10^6 t/año.

Lo anterior lo distingue también como uno de los ríos de llanura con mayor caudal sólido específico del mundo: la concentración de sedimento suspendido durante las inundaciones

promedia las 15000 ppm en puente Lavalle, ubicado sobre la Ruta Nac. 95 a los 25° 40' S - 60° 10' O (Fig. 1).

En este contexto, aquí se presentan los resultados del estudio que realizaron los autores acerca de la geomorfología y sedimentología del río en ese área, que involucró trabajo de campo (captura de muestras de sedimentos, búsqueda de marcas geomorfológicas, mediciones hidráulicas e hidrológicas) y el análisis de datos históricos (procesamiento de mapas y fotografías aéreas de los últimos ca. 65 años, y tratamiento de aforos líquidos y sólidos desde 1968 hasta la actualidad).

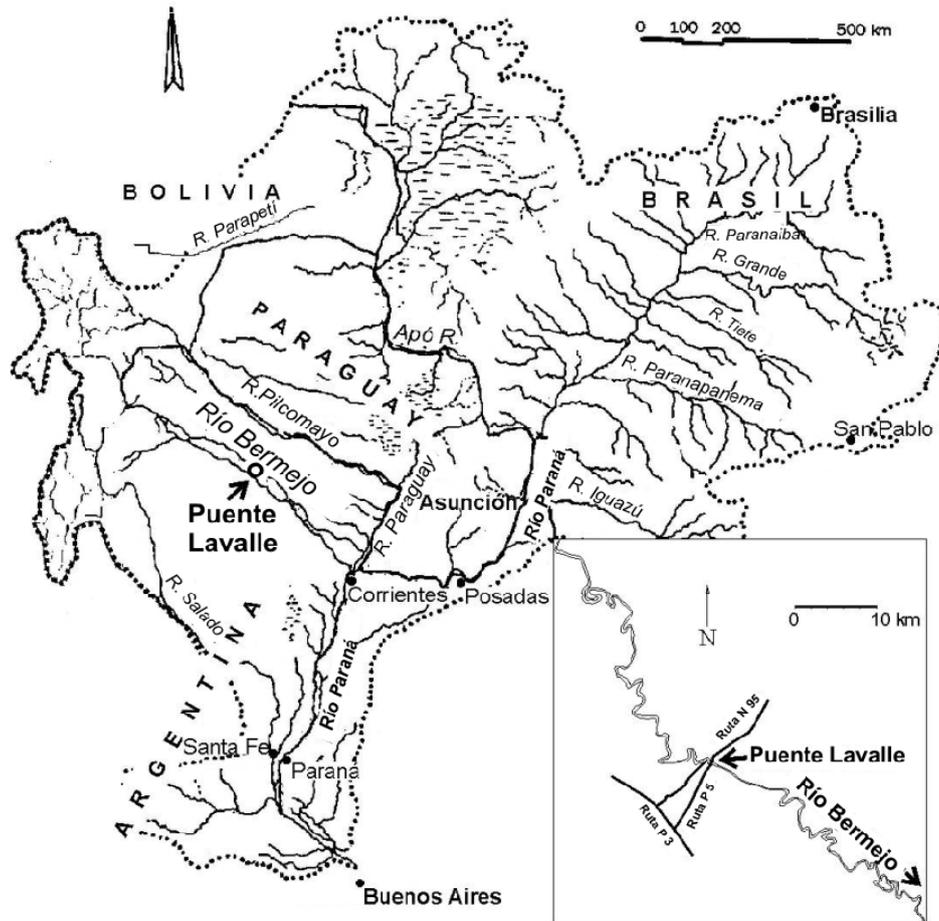


Figura1.- El Río Bermejo en el contexto de la cuenca fluvial del Río Paraná; el círculo indica la ubicación del puente Lavalle, en inmediaciones de la villa de Puerto Lavalle.

Se determinó que el comportamiento meándrico del cauce del Bermejo fue afectado por la construcción del puente Lavalle (1968-1976), de una manera no informada en la literatura temática concerniente a ríos meandriformes (v., e.g., Briaud et al., 2001). A modo de síntesis, los cambios condujeron a la coexistencia de un tramo meandriforme de alta sinuosidad aguas arriba del puente, con otro de patrón recto, encajado y de menor pendiente en el segmento inmediato de aguas abajo.

En la contribución se brindan datos específicos y una explicación conceptual cualitativa de tales modificaciones, como parte de una investigación en curso en la que se incluirán estas herramientas de análisis.

DESCRIPCIÓN MORFODINÁMICA GENERAL DEL RÍO BERMEJO

En Tabla 1 se han incluido datos físicos básicos del Río Bermejo. Es de destacar que durante aguas altas, al gran aporte de sedimentos en suspensión se le suma una abundante cantidad de detritos vegetales, principalmente troncos y ramas de *Tessaria intergrifolia* (“palo bobo”), un árbol ribereño muy común en esta parte del Chaco. De acuerdo a J.J. Neiff (com. pers.), en 5 años pueden crecer en la región 10000 árboles por hectárea de *T. intergrifolia*, a una tasa mensual de crecimiento de 1,4 m de altura en los primeros 5 meses de germinados.

Tabla 1.- Parámetros físicos del río Bermejo en la zona de Puente Lavalle.

Patrón	meandriforme
Ancho medio de la faja de meandros (km)	3,4
Pendiente (m/km)	ca. 0,2
Material del lecho	arena fina y muy fina
Material de la margen	limo suelto y arena muy fina
Ancho medio de cauce lleno (m)	240
Profundidad de cauce lleno (m)	ca. 6
Relación de anchos máximo/mínimo del cauce	4,6
Caudal medio (m ³ /s)	ca. 400
Caudal característico de inundación (m ³ /s)	ca. 1200
Caudal característico de aguas bajas (m ³ /s)	ca. 60
Concentración media de sedimento en suspensión en crecidas (ppm)	15000

En esta situación, la intensa dinámica morfológica del río Bermejo es consecuencia, básicamente, de la combinación de algunas de las propiedades presentadas en Tabla 1, como ser la erodabilidad del sedimento en el perímetro del cauce, la variabilidad estacional de caudales y la enorme tasa de transporte sedimentario. Un detalle de ello se brinda en lo que sigue.

Divagaciones del cauce

La Fig. 2 da una idea concreta acerca de las magnitudes de las divagaciones del thalweg y los cambios que provoca en una sección transversal del cauce.

Las modificaciones en la traza del río fueron estudiadas en un tramo de 65 km de longitud centrado en el puente Lavalle, mediante mapas históricos e imágenes satélite. Desde tales bases se delinearón las sucesivas posiciones del eje geométrico del cauce para 8 años a partir de 1945 (Fig. 3); a ello se le agregaron cinco trazas adicionales en una longitud de 10 km, surgidas del procesamiento de fotografías aéreas.

Todos los tipos de deriva de meandro fueron identificados en ambos tramos, i.e., expansión, traslación y rotación de meandros, conversión a meandros compuestos, y rectificaciones por desborde y tangencia. Además, también se observó el fenómeno menos informado de reactivación de meandros abandonados (Fig. 4).

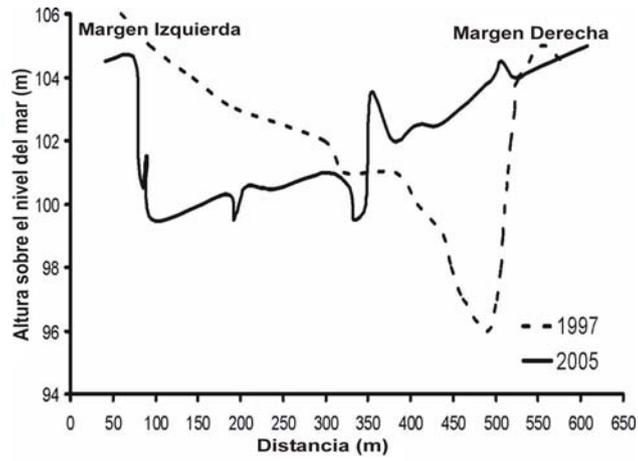


Figura 2.- Ejemplo de modificación de la sección del cauce en cercanías del puente Lavalle.

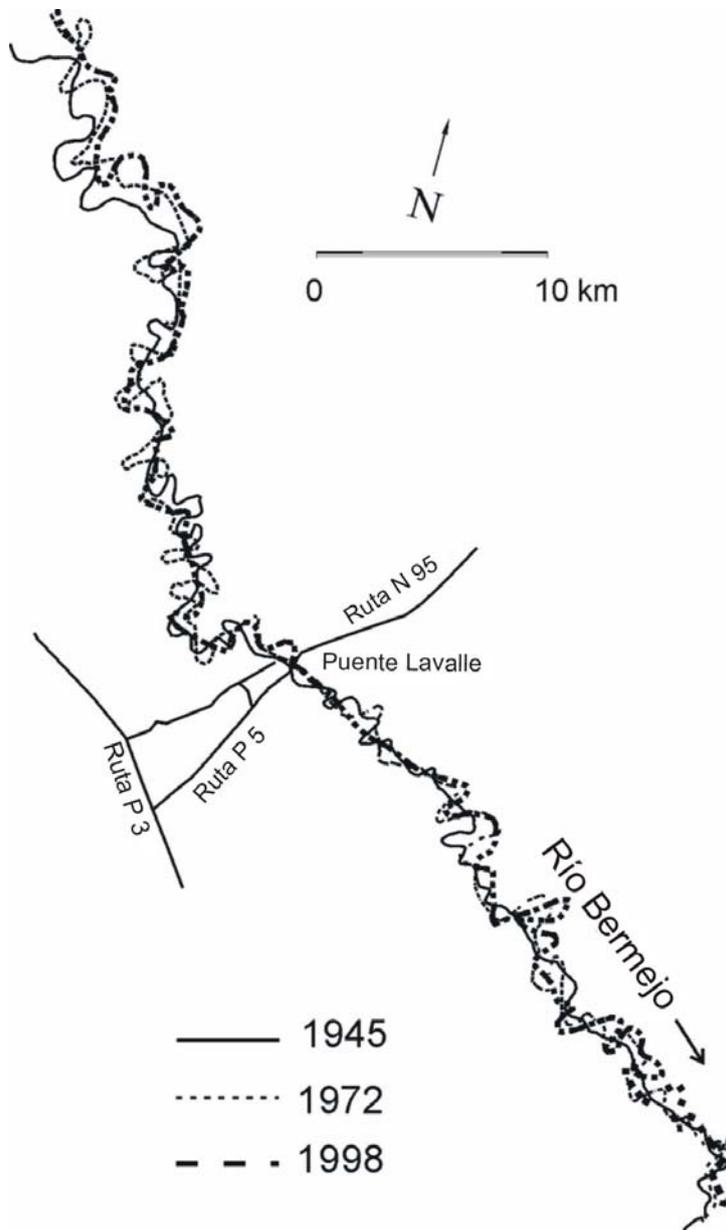


Figura 3.- Trazas del eje geométrico del cauce del Bermejo en 1945, 1972 y 1998 (similares registros utilizando imágenes satélites fueron obtenidos para 1989, 1993, 2000, 2002 y 2005).

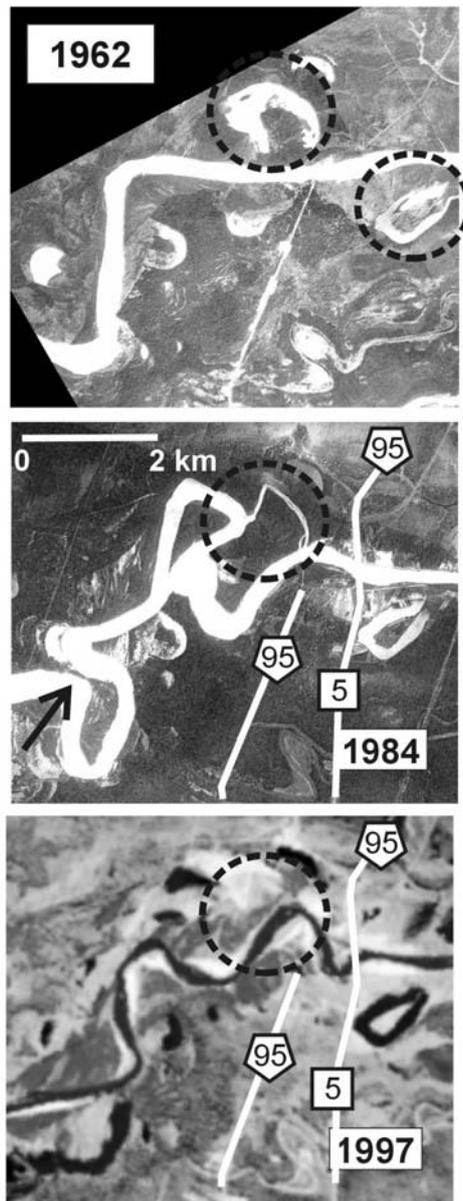


Figura 4.- Fotografías aéreas del área alrededor de puente Lavalle obtenidas entre 1962 y 1993. Los círculos en la foto de 1962 indican meandros abandonados durante la década de los '50; adviértase la reactivación de uno ellos como cauce activo, luego que un surco de desborde se desarrollara sobre su traza hacia 1984.

De la información así analizada, puede concluirse que los principales procesos de migración del cauce son consecuencia de la erosión en curvas, y del desarrollo de surcos de desborde en la planicie de inundación. Un mecanismo complementario a ellos sería la profundización, durante estadios de crecida, de surcos producidos por fluidización en la superficie de bancos de arena, en aguas bajas.

A lo largo de las márgenes suelen existir, puntualmente, depósitos antiguos de arcillas que actúan como puntos de control; parte de los meandros compuestos que existen en el área están relacionados a la presencia de estos depósitos cohesivos.

Como resultado de los mecanismos de divagación descritos, el Bermejo ha construido, en los últimos 60 años, una faja de migración de meandros de 1900 m de ancho promedio, variando

su sinuosidad entre un mínimo de 1,7 y un máximo de 2, en ese mismo tiempo. La tasa media máxima de desplazamiento del cauce en cercanías del puente Lavalley ha sido de 600 m/año.

Transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos en el área de Puerto Lavalley ha sido medido sólo durante cortos períodos. En APA (1997) se informa sobre diez mediciones disponibles: cuatro correspondientes a 1995 y seis a 1997. Debido a esta limitada cantidad de información se han utilizado las series más largas de datos obtenidos en la estación de aforos de El Colorado, ubicada 200 km aguas abajo de puente Lavalley; ello, con el fin de lograr un mayor conocimiento de las características del transporte de sedimentos en la zona de interés.

La estación de El Colorado integra el Sistema Nacional de Información Hídrica (SNRH, 2004), y cuenta con registros sistemáticos de información desde el año 1968; debe destacarse el hecho de que a partir de 1993, los resultados de las mediciones sedimentológicas se presentan separando la concentración medida de partículas finas (limo y arcilla, comúnmente denominada carga de lavado) y de la concentración de arenas en suspensión (arena fina y muy fina).

Sobre la base de esta información, en Alarcón y otros (2003) y FICH (2006), se ajustaron las clásicas curvas de transporte de sedimentos para carga de lavado y arena en suspensión en la estación El Colorado. Las relaciones resultantes fueron las siguientes:

Carga de lavado (limo y arcilla):

$$Q < 660 \text{ m}^3/\text{s} \\ G_w = 0,0655 Q^{2,406} \quad (r^2 = 0,9361) \quad (1)$$

$$Q > 660 \text{ m}^3/\text{s} \\ G_w = 71,055 Q^{1,3352} \quad (r^2 = 0,7467) \quad (2)$$

Arena en suspensión:

$$G_{ss} = 0,0278 Q^{2,22} \quad (r^2 = 0,8399) \quad (3)$$

donde:

Q: caudal líquido; en m^3/s .

G_{ss} : carga de arena en suspensión ($d > 0,0625 \text{ mm}$); en t/día.

G_w : carga de lavado ($d < 0,0625 \text{ mm}$); en t/día.

r^2 : coeficiente de determinación.

Se observa que para ambos tipos de sedimentos los ajustes son razonablemente buenos. Estas relaciones se utilizaron posteriormente para obtener valores de concentraciones medias para distintos valores de caudales típicos, cubriendo el rango más probable entre aguas bajas y altas del río Bermejo inferior. Los resultados se detallan en Tabla 2.

Se aprecia claramente la predominancia de la carga de lavado en el transporte en suspensión en el tramo citado. En FICH (2006) se compararon los escasos datos de concentración disponibles en Puerto Lavalley y la información en la estación El Colorado para los mismos caudales líquidos de Tabla 2, concluyendo que durante la ocurrencia de niveles de aguas altas las concentraciones de sedimentos en suspensión en ambos puntos son similares. En

condiciones hidrométricas de aguas bajas, en cambio, las concentraciones serían superiores en la zona de puente Lavalle, especialmente las de arenas en suspensión.

Tabla 2.- Concentraciones medias de arena, limo-arcilla y total en la estación de aforos de El Colorado.

Concentración (mg/l)	Q (m ³ /s)					
	50	100	400	800	1000	1500
C _{ss}	38	89	480	1120	1470	2410
C _w	185	490	3450	7730	8330	9540
C _T	223	579	3930	8850	9800	11950

donde:

C_{ss}: concentración media de arena en suspensión.

C_w: concentración media de carga de lavado.

C_T: concentración media total de sedimentos en suspensión.

Finalmente, aplicando las ecuaciones (1) y (2) con los datos de caudales diarios, se calculó el transporte de carga de lavado durante el período de máximos aportes de sedimentos para cada año de las últimas décadas. Durante tales períodos, que se extienden entre noviembre-diciembre y mayo-junio de cada año hidrológico, se produce prácticamente el transporte total anual de sedimentos del río Bermejo (Drago y Amsler, 1988). Los resultados se han resumido en Tabla 3.

Tabla 3.- Transporte de carga de lavado (G_w) en El Colorado. Período: 1970–2004.

Período	G _w (t × 10 ⁶)			
	Mínimo	Máximo	Valor medio	Acumulado
1970-'79	19,9	115,4	70,8	636,9
1980-'89	36,7	169,7	112,2	1009,9
1990-'99	49,2	150,2	94,8	853,3
2000-'04 ⁽¹⁾	76,5	126,3	99,8	499,0

⁽¹⁾ Sólo fueron considerados 5 años.

Se destaca que la década de los '80 fue la más significativa en cuanto a cantidades de transporte de sedimentos en el río Bermejo. Los transportes observados se mantuvieron en las décadas siguientes. Nótese que sólo durante los primeros 5 años de la década del 2000 ya se ha transportado cerca de la mitad de la descarga sólida de los años ochenta

AJUSTES MORFOLÓGICOS DEL CAUCE EN PROXIMIDADES DEL PUENTE LAVALLE

El puente Lavalle se construyó en un tramo recto del río, producto de sucesivos cortes naturales de meandro durante los años '50 (v. Figura 4, círculos en el registro de 1962). La obra finalizó en 1976, incluyendo dos terraplenes de aproximación, lo que dejó una luz de paso de 285 m. Esta debió ampliarse sucesiva y recientemente a 400 m, en respuesta a los daños ocasionados por las divagaciones de los meandros aguas arriba del puente.

Es de remarcar que el puente y los terraplenes asociados provocan una importante contracción respecto al ancho de la faja geomorfológica de meandros en el sitio, cuyo valor local es de casi 2 km.

En Figura 5 se presenta la evolución en planta del cauce alrededor del puente (véase también Figura 6): el tramo recto aguas abajo permaneció con una longitud estable de aproximadamente 4 km hasta la década de los '80, en la que se incrementó bruscamente a 8 km (Figura 7); fue en este período cuando se registraron las máximas crecidas (y consecuentemente las máximas tasas de transporte de sedimentos, v. Tabla 3) del último cuarto de siglo. Desde esa época y hasta la actualidad, el tramo recto ha permanecido sin mayores cambios (Figura 8).

Es de destacar que la pendiente media del lecho en el tramo sinuoso aguas arriba del puente es mayor que la del tramo recto inferior, como pudo medirse durante un período de estiaje (Figura 9).

Adicionalmente, se registró una significativa diferencia en las concentraciones de sedimento en suspensión a ambos lados de la obra durante el pasaje de una crecida: en dos mediciones cercanas espacialmente, realizadas casi en simultáneo, se obtuvieron valores de 7200 ppm y 5300 ppm aguas arriba y abajo del puente, respectivamente. Estos valores implican un decaimiento de la concentración, por sedimentación, de aproximadamente el 26% del material transportado en suspensión (en otras palabras, de un valor de ca. 9,4 t/s a ca. 6,9 t/s).

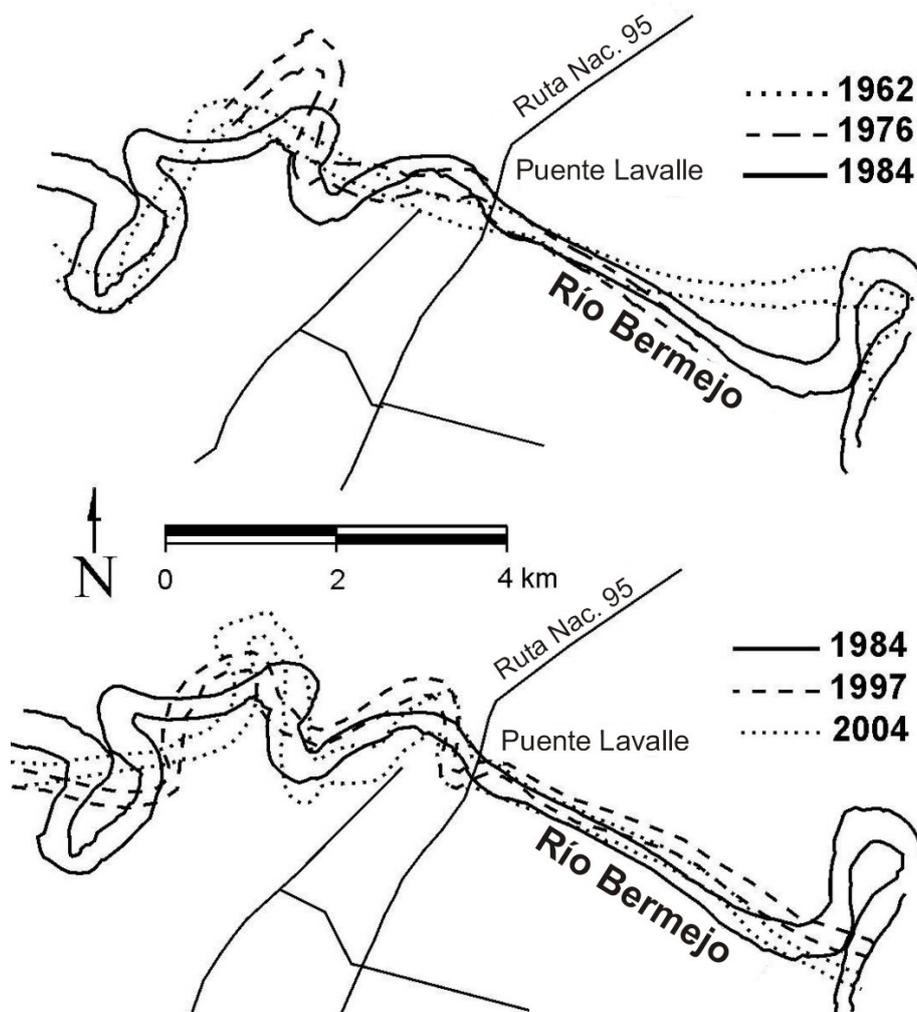


Figura 5.- Cambios de la traza en planta del cauce en el entorno inmediato al puente Lavalle, 1962 a 2004.

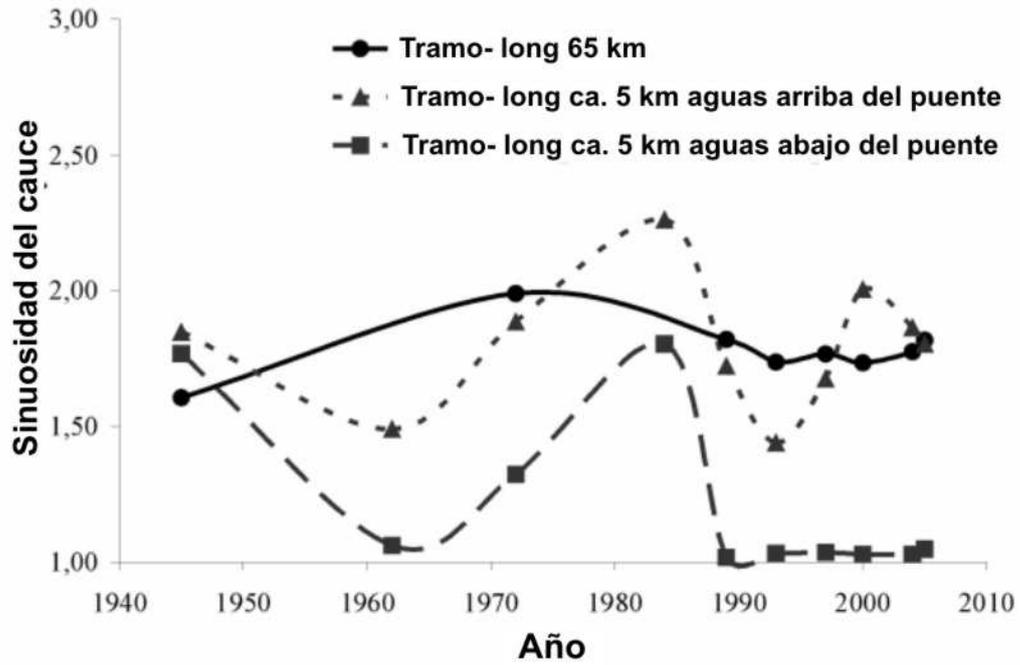


Figura 6.- Variaciones de la sinuosidad del río Bermejo en los tramos corto y largo considerados en este trabajo.

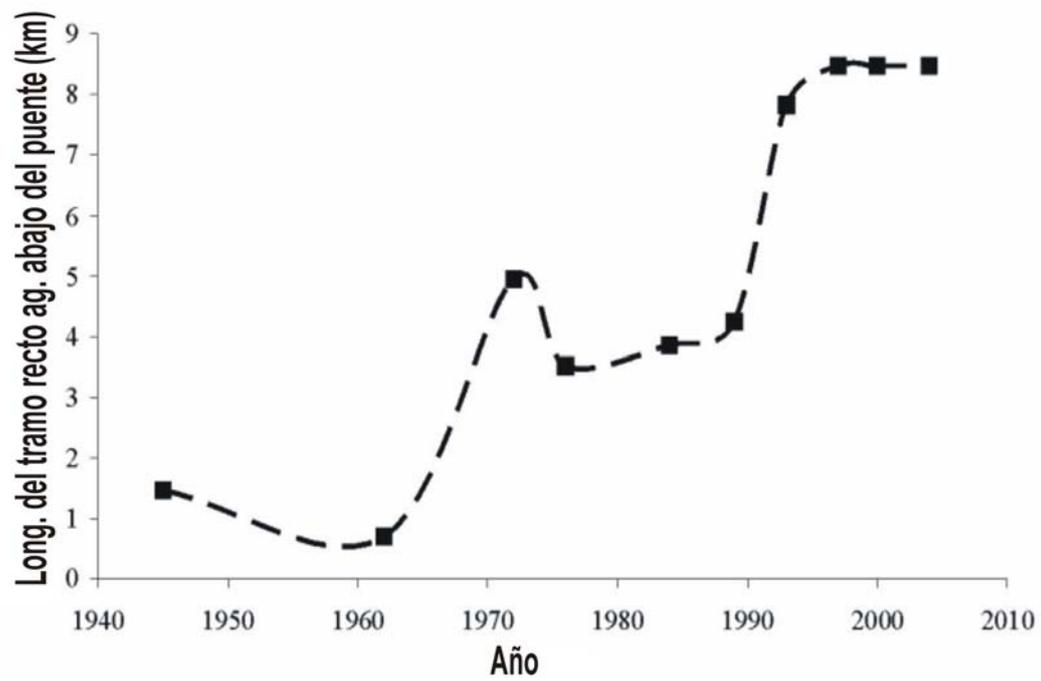


Figura 7.- Variaciones en la longitud del tramo recto aguas abajo del sitio de emplazamiento del puente Lavalle.

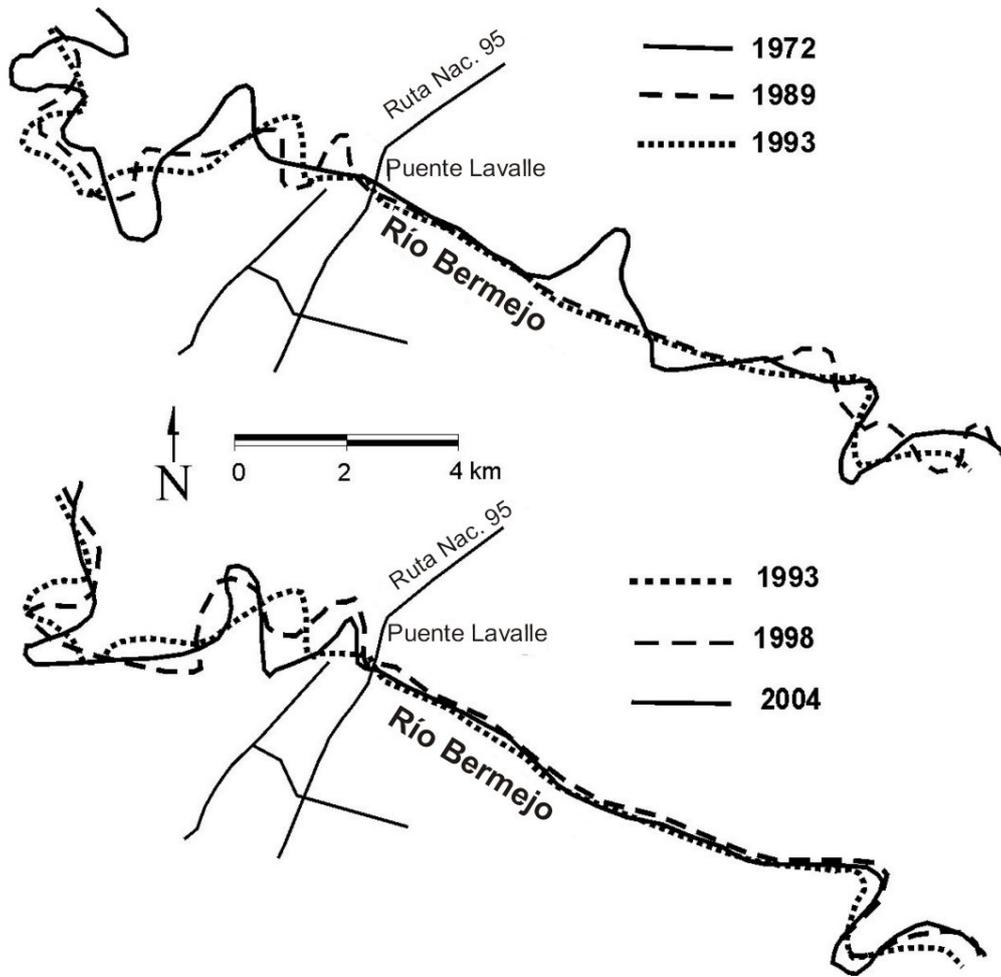


Figura 8.- Evolución del eje del cauce del Bermejo en el entorno de puente Lavalle, entre 1972-2004.

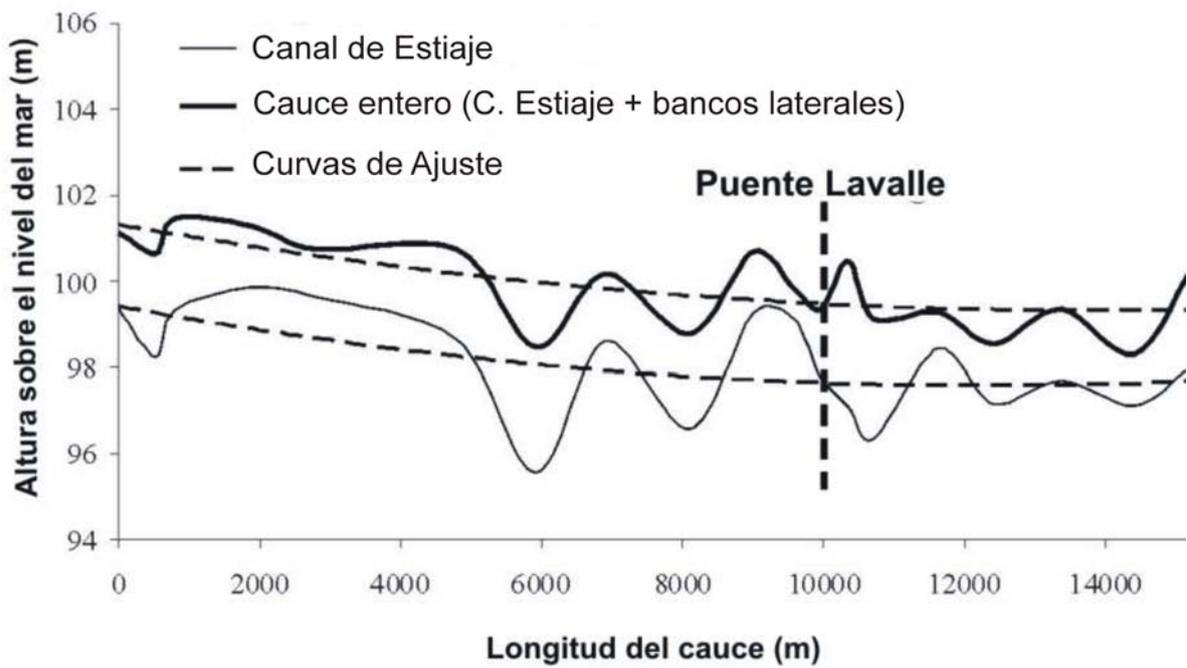


Figura 9.- Perfiles longitudinales del lecho relevados en aguas bajas.

MODELO CONCEPTUAL DE LOS AJUSTES MORFOLÓGICOS DEL CAUCE

La evolución del cauce aguas arriba del puente Laval, tal como se muestra en Figura 8, se ajusta aceptablemente bien a los resultados de los experimentos conducidos por Jin & Schumm (1986). De acuerdo a esos autores, la sinuosidad y amplitud de los meandros se incrementa con el tiempo aguas arriba de una constricción local. Este efecto de acumulación de los meandros en la zona de aproximación al puente le produjo severos daños a su estructura, y los efectos erosivos consecuentes determinaron los sucesivos incrementos de su longitud.

Contrariamente al proceso descrito de aguas arriba, la permanencia en tiempo, longitud y estabilidad del tramo recto aguas abajo del puente (Figuras 5 y 8), o las diferencias registradas en el transporte de sedimentos y la pendiente del fondo a ambos lados de la estructura (Figura 9), no han sido informadas en la literatura relacionada a ríos meandriformes.

Una explicación tentativa para este fenómeno parte de asumir que el puente y sus terraplenes de aproximación imponen una condición de desequilibrio en la interrelación que existe entre el transporte de sedimentos y la morfología local del curso, para condiciones hidrológicas contrastadas, esto es, de crecida y de aguas bajas.

Siguiendo esta línea de razonamiento, la contracción del puente actúa como una presa durante los estadios de crecida, provocando sedimentaciones aguas arriba y un proceso de encajamiento “canalizado” del cauce aguas abajo. Durante los estiajes, la pendiente del tramo superior superaría el valor crítico necesario para el transporte de sedimentos aportados desde aguas arriba, y la meandrificación del cauce sería el mecanismo natural para disipar la energía en exceso.

El efecto de embalse aguas arriba del puente durante las crecidas del Bermejo, posiblemente esté incrementado por la vegetación atrapada en las pilas, que contribuye a reducir considerablemente la sección de paso.

De acuerdo a lo propuesto, un aumento de la luz del puente en el futuro, bien como consecuencia de la erosión del río o por una decisión de manejo ingenieril, contribuiría a la inestabilidad en planta del tramo de aguas abajo, que tendería nuevamente a incrementar su sinuosidad con el desarrollo de nuevos meandros.

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{ss} :	concentración media de arena en suspensión
C_T :	concentración media total de sedimentos en suspensión
C_w :	concentración media de carga de lavado
Q :	caudal líquido; en m^3/s
G_{ss} :	carga de arena en suspensión ($d > 0,0625$ mm); en t/día
G_w :	carga de lavado ($d < 0,0625$ mm); en t/día
r^2 :	coeficiente de determinación

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

APA (Administración Provincial del Agua) (1997). “Acueducto Centro-Oeste Chaqueño. Estudios y recopilación de antecedentes”. Informe interno.

Briaud, J.L.; Hamn-Ching, Ch.; Edge, B.; Park, S. & Shah, A. (2001). “Guidelines for bridges over degrading and migrating streams. Part 1: Synthesis of existing knowledge”. Texas Transportation Institute, Report 2105-2 10, 194 pp.

Drago, E.C. & Amsler, M. (1988). “Suspended sediment at a cross section of the Middle Paraná River: concentration, granulometry and influence of the main tributaries”. *Sediment Budget (Proceedings of the Porto Alegre Symposium)*, IAHS Publ. No. 174, pp. 381-396. Porto Alegre, Brasil.

FICH (Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral) (2006). “Mediciones de campo y estudios hidromorfológicos de alternativas de ubicación y proyecto hidráulico del Acueducto Centro Oeste Chaqueño”. Convenio: Estudio Guitelman S.A. e Inglese Consultores S.A.-UNL. No publicado.

Jin, D. & Schumm, S.A. (1986). “A new technique for modelling river morphology”. In: K.S. Richards, Ed., *Proc. First Internat. Geomorphology Conf.* Wiley, Chichester.

SRHN (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación) (2004). Sistema Nacional de Información Hídrica. (www.obraspublicas.gov.ar/hidricos).