

## ESTUDIO DEL RÍO BERMEJO EN LA ZONA DE PUENTE LAVALLE

José Daniel Brea<sup>(1)</sup>, Pablo Spalletti<sup>(1)</sup>, Marcelo García<sup>(2)</sup>, Carlos Ramonell<sup>(3)</sup>

(1) Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua (INA), Argentina

E-mail: dbrea@ina.gov.ar - pspallet@ina.gov.ar

(2) University of Illinois, Urbana, USA E-mail: mhgarci@uiuc.edu

(3) Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Santa Fe. E-mail ramonell@fich1.unl.edu.ar

### INTRODUCCIÓN

El río Bermejo en su tramo inferior presenta una notable actividad fluviomorfológica, que ha sido motivo de numerosos estudios y trabajos de investigación (Brea, Spalletti,, 2009). Proyectar una obra de infraestructura en este río (por ejemplo, un puente), requiere la ejecución de estudios básicos que, en alguna medida, exceden los tradicionales para este tipo de emprendimientos.

Se presentan los estudios realizados para analizar el comportamiento morfológico en planta del río Bermejo Inferior y su impacto en la infraestructura, con una aplicación directa al caso del puente de Puerto Lavalle, continuamente afectado por procesos erosivos en ambas márgenes, a causa de la evolución de los meandros del río en la zona. Los estudios de base consistieron en un análisis multitemporal de imágenes satelitales, un estudio geomorfológico, y la aplicación de un modelo de evolución de meandros.

### Estudios de base

El *estudio multitemporal de imágenes* permitió conocer la conformación del cauce del río Bermejo en la zona para distintas épocas. El trabajo fue realizado a partir de una serie histórica de imágenes satelitales y fotografías aéreas que cubrieron el período de 1962 a 2005. En la siguiente Figura N° 1 se muestra la zona en estudio. El material de base permitió identificar la disposición en planimetría de los meandros del Río Bermejo, en una longitud de río ligeramente superior a los 10 km aguas arriba del Puente Lavalle y 20 km aguas abajo del mismo.

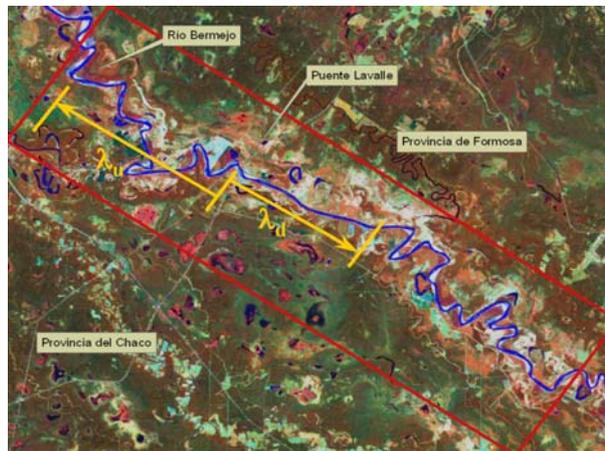


Figura 1.- Área de estudio.

El *estudio geomorfológico* apuntó, entre otros temas, a la descripción de las divagaciones recientes del cauce. A partir del tratamiento de imágenes aéreas y cartas topográficas, se analizaron los cambios de posición de la planta del río Bermejo a dos niveles de detalle, zonal y localizado, de acuerdo a la escala y cobertura espacial que permitían esas bases cartográficas. El examen zonal de las divagaciones del cauce consideró las sucesivas posiciones de su eje geométrico en una longitud recta del río de 65 km. En la Figura N° 2 se muestra la envolvente de todos los ejes de cauce considerados en el estudio zonal.

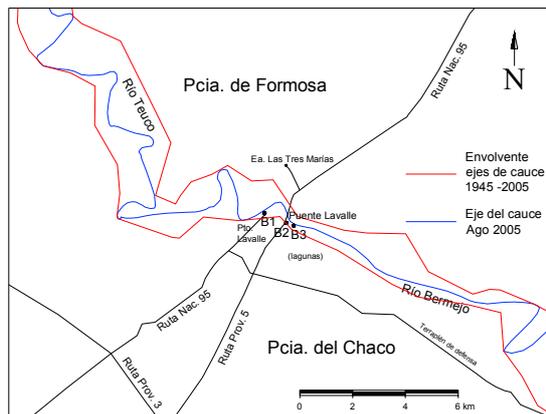


Figura 2.- Envoltorio de posiciones de ejes del cauce del río.

En cuanto al estudio local de las migraciones del cauce, en la Figura N° 3, se muestra como ejemplo el gráfico con las posiciones de las márgenes fluviales entre los años 1962 y 1984.

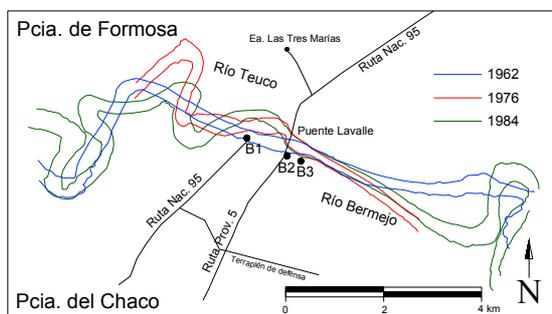


Figura 3.- Comparativo posiciones márgenes, 1962–1976 –1984.

También en el marco del estudio, sumando mediciones desde los registros cartográficos utilizados se, obtuvieron valores de las longitudes del río con las que ha permanecido con patrón recto aguas abajo del Puente Lavalle, en los últimos 60 años, las que se presentan en el siguiente cuadro.

Año	Longitud (km)
1945	1,47
“1955”	0,7 (?)
1962	4,95
1972	3,52
1976	3,86
1984	4,25
1989	7,82
1993 a 2005	8,47

La persistencia, e incluso el incremento en longitud de semejante tramo recto en el contexto del patrón y morfodinámica meandriforme típicos del Bermejo, permiten asociar ambas características a alguna forma de control morfológico ejercido por el Puente Lavalle, desde su construcción entre los años 1968 y 1976.

Con una luz original de 285 m, esa obra significó una reducción de casi 60 % respecto del ancho modelado por las divagaciones recientes del río en el sector, y de un 85 %, si se considera el valor medio de tal parámetro en los 65 km de longitud involucrados en el examen

zonal.

La estabilidad del sector recto en el sitio de emplazamiento del Puente Lavalle es de tipo relativa, ya que desde mediados de los '90 a la actualidad se registran allí amplias oscilaciones en planta del cauce, con cambios de ubicación del canal de estiaje/talweg del río desde una margen a otra. Estos desplazamientos y fenómenos de desbordes asociados produjeron erosiones que afectaron la obra de cruce vial, determinando la ampliación hormigonada del Puente Lavalle en ambos extremos, primero, y la inevitable extensión con un puente Bailey del lado chaqueño, en el verano de 2004. La luz actual del cruce es cercana a los 400 m.

En la Figura 4 se presenta la faja de divagación de meandros del río Bermejo, a partir de la interpretación geomorfológica de de las imágenes utilizadas. Interesa destacar que, en el sitio donde se encuentra el puente, la faja se angosta localmente a unos 2000 m, o sea, más de la mitad de lo que posee en sus entornos de aguas arriba y abajo.

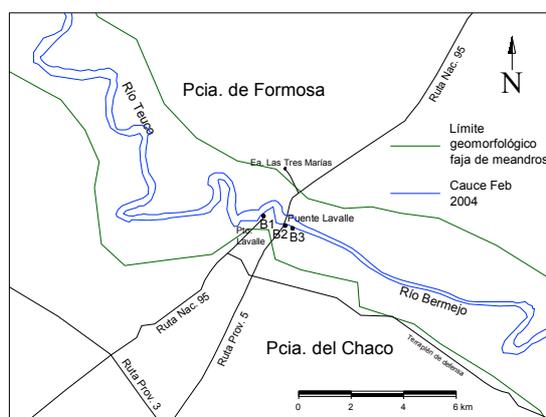


Figura 4.- Faja de divagación de meandros.

### Estudio de divagación de meandros. Modelo RVR Meander

Se utilizó el modelo matemático RVR Meander (Abad y García, 2006), que ha sido desarrollado para caracterizar y analizar la migración de meandros en ríos, lo que permite conocer la tasa de desplazamiento transversal y longitudinal del cauce entre otros parámetros. El análisis de migraciones permite simular el desplazamiento del río a través del tiempo, basado en un modelo hidrodinámico simplificado acoplado con un modelo de erosión de márgenes.

La morfología de ríos envuelve diferentes fenómenos físicos (hidrodinámica y transporte de sedimentos, entre otros) que se encuentran en constante interacción. Como consecuencia de la misma, procesos tales como migración lateral de ríos debido a la erosión de las márgenes, ensanchamiento del cauce, degradación y agradación del lecho, evolución de las formas de fondo, variaciones en las concentraciones de sedimentos suspendidos, influencia de la planicie de inundación, entre otros, suceden a lo largo de la vida de un río.. En el caso particular de modelos matemáticos para analizar la migración de meandros, Sun et al (1996), Seminara et al. (2001) y Lancaster y Bras (2002) presentaron simulaciones donde la planicie de inundación, efecto de perturbaciones morfológicas hacia aguas arriba y abajo e implementación estocástica de corte de meandros, fueron incorporadas. Para una revisión de procesos geomorfológicos en ríos meandrosos, el lector puede referirse a Bridge (2003), Seminara (2006) y Odgaard (2006).

La utilización de modelos hidrodinámicos para predecir la migración de ríos meandrosos, es

usualmente compleja debido a las características hidrodinámicas (como ser flujo helicoidal, distribución no homogénea de los esfuerzos de corte en el fondo, influencia de las curvaturas locales en los niveles de intensidad turbulenta) las cuales también originan diferentes patrones en el transporte de sedimentos, donde la tasa de erosión y deposición en el lecho y en los bancos, producen una respuesta cíclica hacia la hidrodinámica del sistema. Debido a ello, barras alternadas, dunas, puntos de barra, y otros patrones se observan en ríos de baja pendiente. La modelación computacional (Computational Fluid Dynamics: CFD) se ha incrementado en las ultimas décadas, sin embargo su aplicación para resolver problemas ingenieriles se ha basado en dominios localizados (Abad et al. 2006).

El modelo matemático RVR Meander (Abad y García, 2006) ha sido desarrollado para caracterizar y analizar la migración de meandros en ríos, lo que permite conocer la tasa de desplazamiento transversal y longitudinal del cauce entre otros parámetros. El análisis de migraciones permite simular el desplazamiento del río a través del tiempo, basado en un modelo hidrodinámico simplificado acoplado con un modelo de erosión de márgenes.

La Figura 5 muestra la configuración de los parámetros adoptados en el modelo. La sinuosidad ( $S$ ) y la tasa de migración ( $\dot{S}$ ) son calculadas como  $S = \frac{L_A}{L_v}$  y  $\dot{S} = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1}$  respectivamente. La Figura 5 muestra el área trabajada o área de migración para el intervalo de tiempo.

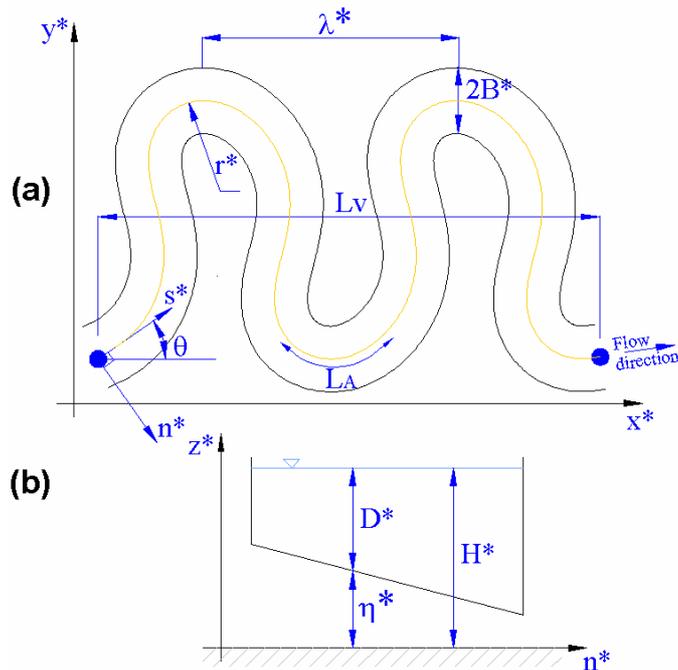


Figura 5.- Configuración de parámetros (a) planta, (b) sección transversal.

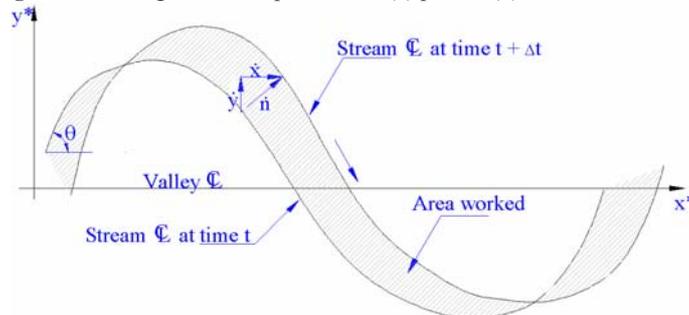
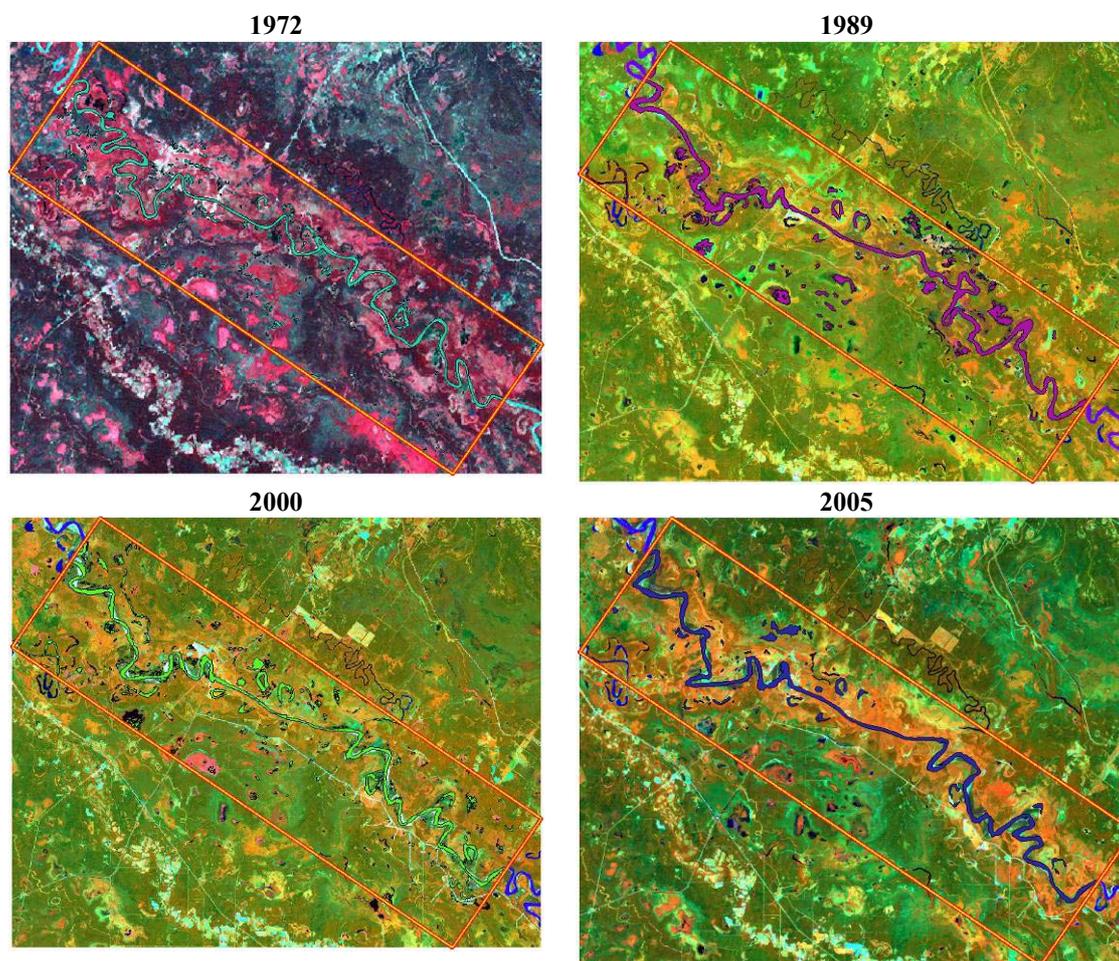


Figura 6.- Definición de componentes en la migración lateral

## Aplicación al caso de Puente Lavalle, río Bermejo

El estudio se concentró en el análisis de los procesos morfológicos a mediana escala temporal relativos a la evolución del río Bermejo, y de la influencia del puente localizado en Puerto Lavalle en la migración de meandros. Se utilizó para la implementación del modelo toda la información básica disponible.

El puente actúa como punto de fijación local del cauce, apreciándose dos longitudes características de influencia: una aguas arriba del puente, de longitud  $\lambda_u$ , que representa la región en donde, por efecto de la condición de fijación de la estructura, la libre migración de los meandros es restringida cerca del puente, con cambios en la curvatura y orientación de los meandros; y otra aguas abajo del puente, de longitud  $\lambda_d$ , que representa la región donde las migraciones laterales de los meandros preexistentes han sido casi completamente eliminadas. En la Figura 1 pueden apreciarse las longitudes características mencionadas.



**Figura 7 .-** Evolución temporal de meandros en el río Bermejo

En la Figura 7 muestra la evolución del río Bermejo en la zona de interés, para cuatro fechas características. A partir de la digitalización del talweg del río para las distintas fechas, y tras su posterior post-procesamiento mediante los correspondientes módulos del modelo, se procedió a realizar el análisis estadístico de la evolución del río. En la Figura 8 se presenta el análisis de las curvaturas en función de las progresivas en el tramo de río localizado aguas arriba del puente, el que se emplaza en correspondencia con la progresiva 63700 metros.

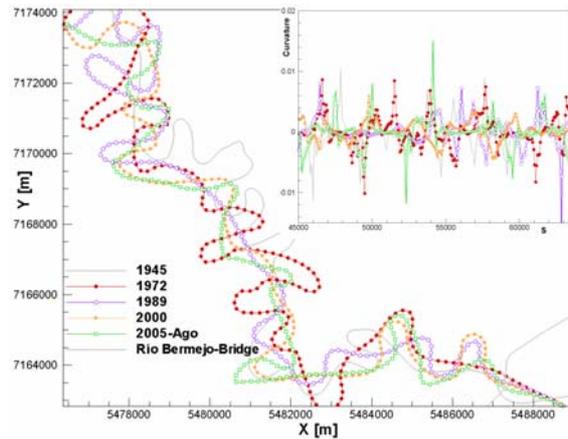


Figura 8.- Curvaturas aguas arriba del puente

La evolución temporal de la sinuosidad en la zona aguas arriba del puente, se presenta en la Figura 9.

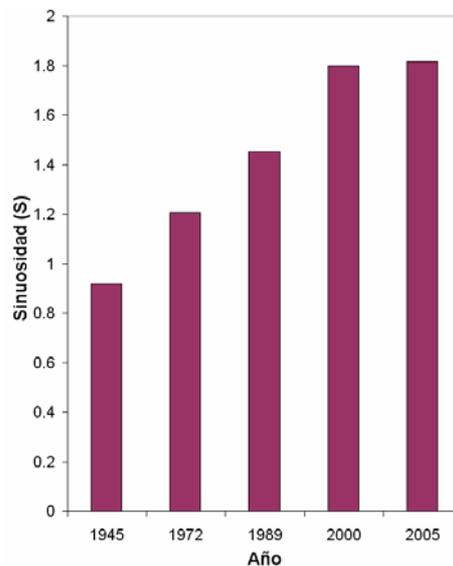


Figura 9.- Evolución temporal de las curvaturas de los meandros aguas arriba del puente

Como ya se expresara, el puente funciona como un elemento de fijación, condicionando la migración lateral del cauce. Este control impide que los meandros migren hacia aguas abajo en correspondencia con el puente, pero la inercia del sistema hace que a una cierta distancia el río continúe con su evolución natural provocando una suerte de apilamiento de los meandros, que progresivamente van incrementando su curvatura. Este proceso se desarrolla hasta que la curvatura es tal que ante el pasaje de una crecida se produce el corte de uno de los meandros, momento en el cual comienza a desarrollarse un nuevo ciclo.

Aguas abajo del puente se desarrolla un proceso inverso: en un tramo extenso del río no se observan migraciones laterales. Este comportamiento, ya identificado en el estudio geomorfológico, se aprecia con claridad en la Figura 10, que muestra el análisis de las curvaturas en función de las progresivas en el tramo de río en cuestión, y donde se distingue un segmento del orden de los 10 kilómetros sin desarrollo de meandros, siendo el único sector de río con gran estabilidad en los últimos 20 años.

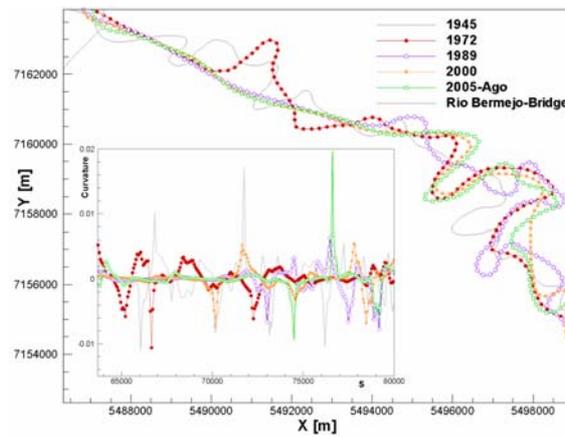


Figura 10.- Análisis de las curvaturas en función de la progresiva – Aguas abajo del puente

El modelo de migración se implementó desde la sección del puente, hasta una longitud de río de aproximadamente 20 kilómetros, tomando como extremo final una sección localizada aguas abajo del primer corte de meandro registrado. De esta manera un primer análisis se extendió desde el año 1993 hasta el año 1997, y un segundo entre los años 1998 y 2005, habiéndose producido entre las fechas de los registros de 1997 y 1998 el citado corte del meandro.

La Figura 11 muestra el resultado para una corrida desde el año 1993 hasta 1997. En la Figura 11 se presentan los resultados para el primer intervalo, apreciándose el buen ajuste entre la predicción y la situación real. En la Figura 12 se muestran los resultados del modelo de migración de meandros entre los años 1998 y 2005, pudiéndose apreciar nuevamente una buena concordancia entre predicción y la situación real, aunque en la zona cercana al corte del meandro hay ciertas discrepancias, posiblemente atribuibles a que el modelo sólo puede analizar el desarrollo de procesos continuos en el tiempo, y no cambios abruptos como los que se verifican en el desarrollo de cortes.

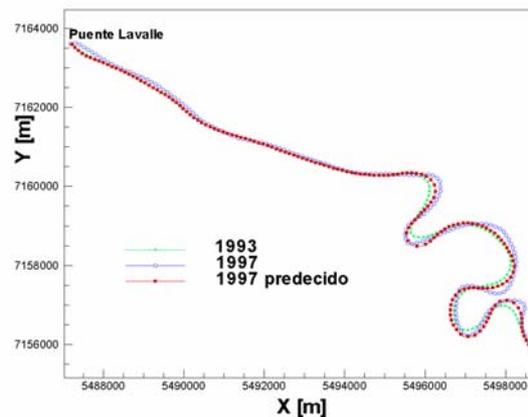


Figura 11.- Migración de meandros aguas abajo 1993-1997

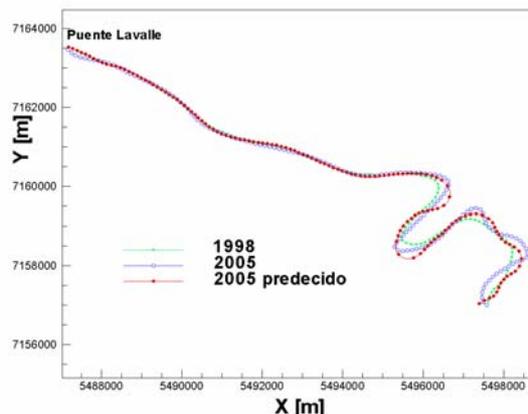


Figura 12.- Migración de meandros aguas abajo 1998-2005

## Conclusiones

El modelo de evolución de meandros presentado resulta una herramienta de predicción para estudiar las tendencias evolutivas en ríos de características semejantes a las del Bermejo inferior.

Los estudios han permitido definir las dos longitudes características de influencia, estando la zona de aguas arriba del puente caracterizada por aumentos de la sinuosidad del tramo, como consecuencia de las limitaciones que el puente impone a la libre migración de los meandros, mientras que aguas abajo el río adquiere una disposición sin curvas pronunciadas en una longitud del orden de los 10 km, siendo el único tramo que en los últimos 20 años presenta una condición de estabilidad en su configuración planimétrica.

Los desarrollos presentados, son relevantes para la caracterización de ríos del tipo del estudiado, y para el estudio de los procesos morfológicos que se desarrollan ante la presencia de estructuras transversales a la corriente, en ríos con meandros.

De un modo más general, debe decirse que el proyecto y construcción de obras en ríos con gran actividad fluviomorfológica, como el Bermejo en su tramo inferior, requiere especial atención, debiendo realizarse estudios específicos que permitan diseñar obras que cumplan con los objetivos buscados, en las mejores condiciones técnicas y ambientales. Soluciones de problemáticas complejas como las planteadas, con concepciones simples, que no contemplan toda la física de las variables en juego, seguramente darán lugar a obras con alto grado de riesgo, que no cumplan con los fines buscados

## Referencias Bibliográficas

**Abad J. D., García, (2006).** *RVR Meander: A toolbox for remeandering of channelized streams.* F Computers & Geosciences, 32: 92-101.

**Brea J. D., Spalletti,P.; (2009).** *Los Sedimentos del Río Bermejo.* PEA. Organización de Estados Americanos (OEA) (en prensa).

**Bridge, J. S. (2003).** *Rivers and Floodplains.* Blackwell Publishing

**Lancaster, S. T. and Bras, R. L., (2002).** *A simple model of river meandering and its comparison to natural channels.* Hydrological Processes, 16: 1-26.

**Odgaard, J.A., (2006).** *River meandering and channel stability.* Capítulo 8, en Sedimentation Engineering, editor, Marcelo H. Garcia, ASCE.

**Seminara, G., (2006).** *Meanders*. Journal of Fluid Mechanics, 554: 271-297.

**Sun, T., Meakin P., Jossang T. and Schwarz, K., (1996).** *A simulation model for meandering*. Water Resources Research, 32 (9): 2937-2954.