

**XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018**

**ADECUACIÓN HIDRÁULICA DE UN TERRAPLÉN FERROVIARIO PARA  
UN EVENTO DE ALTA RECURRENCIA**

*Alejandro R. RUBERTO, Jorge V. PILAR y Marcelo J. M. GÓMEZ*

*Grupo de investigación del Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Av. Las Heras 727. (H3500COI) Resistencia, Chaco, Argentina  
Correo-e: aleruberto44@yahoo.com.ar; jvpilar@gmail.com y mgichaco@yahoo.com.ar.*

**RESUMEN:**

Se presenta un trabajo que aporta al entendimiento del comportamiento hidráulico del río Tapenagá en una sección del terraplén ferroviario ubicado entre las localidades de Charadai y Cote Lai en la provincia del Chaco, Argentina, de la cual fue posible reconstituir la máxima creciente conocida.

Para ello se realizó una modelación hidrológica – hidráulica del sistema hídrico en esa sección y se simuló su comportamiento durante la creciente extraordinaria de 1986 de 254m<sup>3</sup>/s de caudal máximo, con buena precisión, siendo que en esa oportunidad el agua superó el coronamiento del terraplén ferroviario.

Se verificó, también, el efecto hidráulico de la construcción, posterior a 1986, de un canal que desagua aguas arriba del mencionado terraplén, con caudal de diseño de 28m<sup>3</sup>/s.

El modelo calibrado permitió realizar propuestas de adecuación hidráulica del terraplén ferroviario, para evitar su anegamiento y disminuir las velocidades de escurrimiento, potencialmente erosivas. Concretamente, se sugirió la ampliación de la luz del puente sobre el río Tapenagá pasando de una luz inicial de 20m a otra de 40m en el cauce principal y su zona de desborde.

**ABSTRACT:**

This paper contributes to understanding of the hydraulic behaviour of Tapenagá River in a railroad embankment, located between Charadai and Cot Lai localities, at Tapenagá Department, in Chaco province, Argentina, is presented, from which it was possible to reconstruct the known flood maximum.

An hydrologic-hydraulic modelling was done at that section and its behaviour was simulated during the extraordinary flood of 1986 of 8,969.93cfs with a very good precision. In that opportunity the water exceeded the railroad embankment.

Was also verified the hydraulic effect of the construction, after 1986, of a canal that feeds upstream of said embankment, with design flow 988.8cfs.

According to this study our proposal is to enlarge the light of the railroad bridge, to avoid the flood and minimize erosion velocities at the embankment going of 65.62 foot to 131.23 in the principal channel and it's overflow zone.

**PALABRAS CLAVES:** adecuación hidráulica, río Tapenagá, Sistema Hidrológico No Típico, modelación.

**KEYWORDS:** hydraulic adequacy, Tapenagá River, Non Hydrological Typical System, modeling.

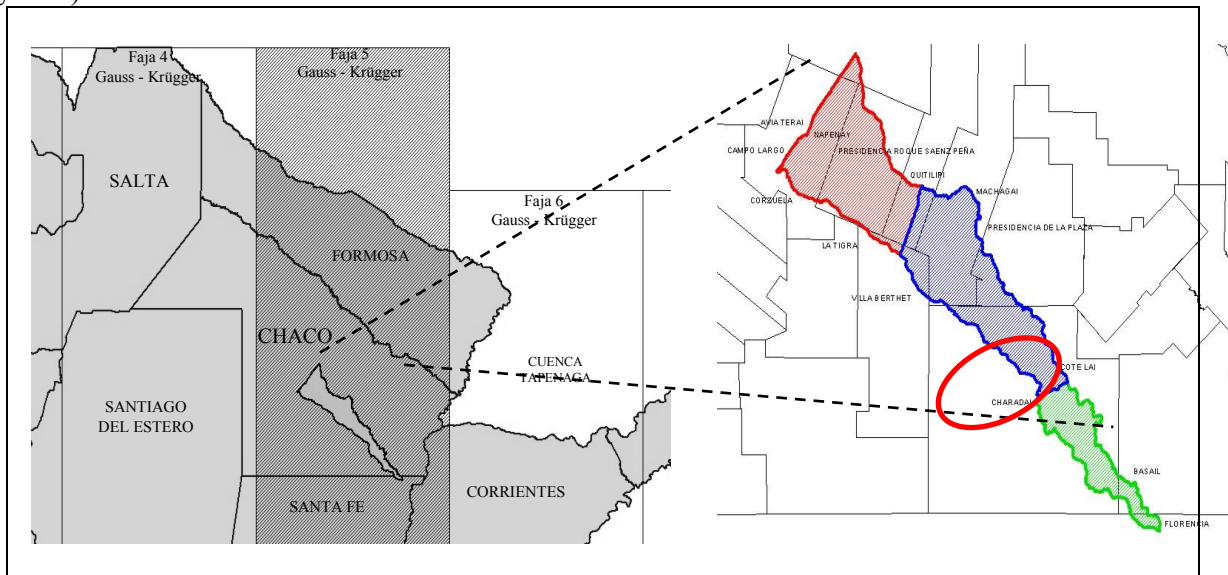
## INTRODUCCIÓN

El Tapenagá es un río que escurre por una llanura con baja energía de relieve, lo que configura un clásico “Sistema Hidrológico No Típico” (SHNT) (Fertonani et al., 1983) y su cuenca baja se desarrolla al sur de la provincia del Chaco con una pequeña parte de ella ingresando en la provincia de Santa Fe.

Su cuenca no cuenta con una red de estaciones de aforo por lo que no hay registros históricos suficientemente extensos, ni confiables (Ruberto et al., 2013).

Para el presente trabajo se estudió un tramo de terraplén ferroviario del ex FFCC Belgrano, ubicado entre las estaciones de Charadai y Cote Lai, en las localidades homónimas, todas dentro del Departamento Tapenagá, Chaco.

El área de aporte de este SHNT hasta el terraplén ferroviario, es del orden de 3.930km<sup>2</sup>, provenientes de las subcuencas media y alta, siendo el uso del suelo predominantemente pecuario (figura 1).



**Figura 1.-** Ubicación de la zona de estudio (fuente: Valiente, 2004).

En la figura 2 se presenta un esquema de la hidrodinámica superficial en la zona del cruce del terraplén ferroviario sobre el cauce del río Tapenagá y obras complementarias. En ese esquema se indican curvas de nivel, en cotas IGN.

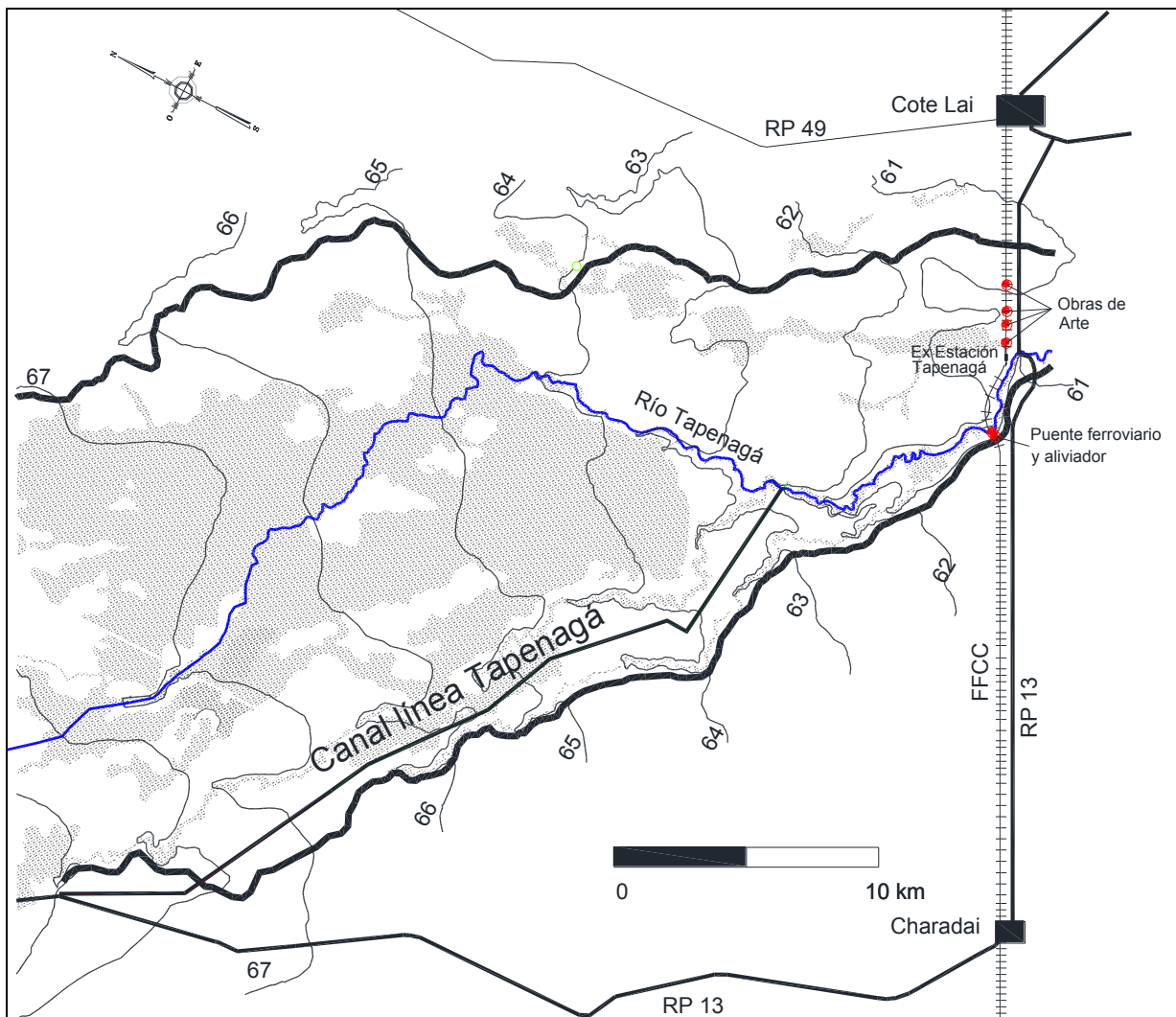
El terraplén del ferrocarril atraviesa el valle de la cuenca del río en un ancho de poco más de 8.000m. Sobre dicho terraplén se ubica un puente principal de 20m de luz, más un aliviadero de 5,7m de extensión. Además, existen otras cuatro obras de arte sobre margen izquierda, en una zona de bañados.

Las características geométricas de las obras de arte mencionadas se presentan en la tabla 1:

**Tabla 1.-** Características geométricas de las obras de arte.

Progresiva (km)	Luz (m)	H (m)	Cota dintel (IGN)	Cota riel (IGN)	Cota terreno natural (IGN)	Observaciones
476,945	5,70	2,40	62,47	63,32	61,50	Aliviador
477,018	19,40	3,50	62,34	63,30	59,75	río Tapenagá
480,636	9,80	2,20	61,16	62,25	60,25	Bañado
482,521	3,80	1,20	61,68	62,25	60,85	Bañado
483,120	3,60	1,20	61,78	62,37	61,13	Bañado
483,622	3,90	1,00	61,71	62,30	61,17	Bañado

Aguas arriba del terraplén ferroviario, a una distancia de 10km, actualmente descarga el canal principal del “Tramo I” del proyecto Línea Tapenagá de los Bajos Submeridionales, cuyo caudal de diseño es 28m<sup>3</sup>/s (figura 2).



**Figura 2.-** Cruce del terraplén ferroviario y el río Tapenagá (fuente: elaboración propia).

En 1986, previo a la construcción del canal antes mencionado, ocurrió una creciente extraordinaria (máxima observada hasta el presente), durante la cual el nivel del agua superó el del riel ferroviario en aproximadamente 20cm a la altura de la ex estación Tapenagá, según datos recabados en el ex FFCC General Belgrano (Alegre et al., 2001).

Por tal motivo, se hizo necesario conocer el comportamiento hidrológico - hidráulico del sistema, para el nuevo escenario, que incluye la descarga del canal antes mencionado.

## OBJETIVOS

La construcción de los canales de la Línea Tapenagá, especialmente su canal principal, potenciaría situaciones críticas como la observada en el río Tapenagá en 1986, que según los estudios estadísticos realizados para este trabajo presenta una recurrencia del orden de 30 años, según caudal (Alegre, et al., 2001).

Por tal motivo se realizó la adecuación hidráulica, incluyendo la descarga del canal principal del proyecto canalización de la Línea Tapenagá, para el entendimiento del comportamiento hidrológico-hidráulico del escenario con las obras de arte en el terraplén ferroviario.

## METODOLOGÍA

### Modelación del sistema

Primeramente, se analizaron estadísticamente los registros hidrométricos existentes, para asignar recurrencias a distintos eventos. Se adoptó la distribución Pearson III que presentó el menor error cuadrático medio de frecuencia y de la variable (Alegre et al., 2001).

Según esos estudios estadísticos, la recurrencia de la inundación de 1986 fue de 30 años, según caudal, además se determinó el caudal de 50 años de tiempo de recurrencia, compatible con los requerimientos de adecuación hidráulica de la infraestructura afectada (Alegre, et al., 2001).

Para la modelación y simulaciones hidrológicas e hidráulicas se utilizó el programa HEC-RAS (River Analysis System), desarrollado por el U.S. Army Corp of Engineers.

El HEC-RAS es de uso libre y gratuito y permite realizar cálculos hidráulicos unidimensionales en redes de canales, tanto en régimen permanente como impermanente. En este trabajo las simulaciones se realizaron en régimen permanente y subcrítico.

Ese programa necesita como datos de entrada información topográfica y geométrica de la red de canales, las características hidráulicas de los mismos, además del caudal que escurre en régimen permanente. Admite la posibilidad de interponer puentes, alcantarillas, vertederos y otras obras de arte, aisladas o agrupadas.

Se utilizaron datos provenientes de relevamientos topobatimétricos, mediciones in situ de las obras de arte y altimetrías del terraplén.

Se simularon por separado el puente principal con su aliviador y las cuatro obras de arte localizadas en margen izquierdo como otro subsistema (figura 2). La igualdad del nivel del pelo de agua en ambos subsistemas fue la condición de borde utilizada en las simulaciones.

### Contexto de calibración

Para calibrar la modelación se utilizó la crecida del 15 de abril de 1986, máxima registrada en esa sección. En dicha crecida se registró un nivel, aguas abajo del terraplén, de 61,75m IGN y se aforó un caudal de 83,8m<sup>3</sup>/s (APA), luego de producido el caudal pico.

La cota de máxima creciente del mismo evento sobrepasó el nivel del riel 20cm en promedio, en el sector de la ex Estación Tapanagá, siendo la cota alcanzada de 62,30m IGN.

En ese evento, aguas abajo del terraplén ferroviario, se formó un espejo de agua que funcionó como un embalse, pero manteniendo el escurrimiento, estimándose su nivel en cota 61,90m IGN, que se adoptó como condición de contorno.

Conocidas las cotas aguas arriba y aguas abajo del terraplén del ferrocarril para el evento en cuestión y con los perfiles correspondientes al puente ferroviario y su alcantarilla aliviadora de 5,7m de luz, se estimó el caudal que podría haber escurrido por esa sección y que compatibilizara las condiciones de borde mencionadas. El caudal obtenido fue 240m<sup>3</sup>/s, repartidos de la siguiente manera: 225,7m<sup>3</sup>/s para el puente principal y 14,3m<sup>3</sup>/s para la alcantarilla aliviadora.

Según la simulación realizada, la cota del pelo de agua no llegó a tocar el fondo de las vigas del puente (a cota 62,34m IGN), lo que coincide con lo ocurrido en esa oportunidad.

Simultáneamente, para la misma condición de borde de aguas arriba y tomando como condición de borde de aguas abajo una cota de 61,75m IGN, se simuló el comportamiento de las cuatro obras de arte ubicadas hacia la margen izquierda del valle (en una zona de bañados), obteniéndose como caudal escurrido 73m<sup>3</sup>/s, repartidos de la siguiente manera: 53,2m<sup>3</sup>/s en la obra de arte de progresiva kilométrica 480,636, con velocidad media a la salida de 1,37m/s; 6,4m<sup>3</sup>/s en la siguiente; 6,5m<sup>3</sup>/s la otra y 6,9m<sup>3</sup>/s la restante; en las tres últimas las velocidades calculadas fueron inferiores a 1m/s.

Como la velocidad máxima estimada por la simulación para la sección del puente principal fue de 2,78m/s, y dado que debería considerarse como una situación real la descarga del canal de la Línea Tapanagá de Bajos Submeridionales, de 28m<sup>3</sup>/s (caudal de proyecto), la situación crítica observada en 1986 empeoraría. Por tal motivo, se verificó el efecto que tendría la ampliación del puente principal, duplicando su luz de 20m a dos luces de 20m cada una, separadas por una pila central.

## RESULTADOS

### - En relación al evento de 1986

Para tener una idea de los beneficios que se obtendrían con la ampliación de la luz del puente a 40m de longitud, se simuló el escurrimiento de la crecida de 1986 para la misma. Se determinó que, en caso de repetirse dicho evento el nuevo caudal sería de  $254,5\text{m}^3/\text{s}$  y el escurrimiento se daría de la siguiente forma:  $244\text{m}^3/\text{s}$  por el puente principal y  $10,5\text{m}^3/\text{s}$  por su aliviador. Las velocidades medias en ambas secciones serían  $1,49$  y  $0,76\text{m}/\text{s}$ , respectivamente.

Por la batería de las cuatro obras de arte ubicadas en margen izquierda escurrirían  $58,5\text{m}^3/\text{s}$ , según la siguiente distribución:  $43,5$ ;  $4,8$ ;  $4,9$  y  $5,3\text{m}^3/\text{s}$ . La velocidad máxima para la obra de arte de  $9,8\text{m}$  de luz se reduciría de  $1,37\text{m}/\text{s}$  a  $1,19\text{m}/\text{s}$  y las que se tendrían en las otras tres, superarían levemente los  $0,80\text{m}/\text{s}$ .

Con respecto al nivel del agua, disminuiría aguas arriba del terraplén, de  $62,3$  a  $62,1\text{m}$  IGN, con lo cual no ocurriría anegamiento del riel, considerando la ampliación del puente principal a  $40\text{m}$  de luz.

Finalmente, se simuló y verificó el comportamiento del puente con luz ampliada teniendo en cuenta la crecida de 1986, incrementada con la descarga del canal de Línea Tapanagá ( $28\text{m}^3/\text{s}$ ), totalizando un caudal de  $279\text{m}^3/\text{s}$  escurriendo por el puente principal y su aliviador.

Para esta situación se obtuvo que por el puente principal escurrirían  $268,5\text{m}^3/\text{s}$  y por el aliviador  $10,5\text{m}^3/\text{s}$ , con velocidades medias de  $1,63\text{m}/\text{s}$  y  $0,74\text{m}/\text{s}$ , respectivamente. La cota que alcanzaría el agua en el borde de aguas arriba del terraplén ferroviario sería  $62,16\text{m}$  IGN, que produciría un leve anegamiento del mismo (solo  $3\text{cm}$ ).

En esa misma situación, el sistema de obras de arte de margen izquierda erogaría  $58,5\text{m}^3/\text{s}$  según el siguiente detalle:  $43,53$ ;  $4,76$ ;  $4,95$  y  $5,26\text{m}^3/\text{s}$ , todas (salvo la alcantarilla 1) con velocidades no superiores a  $0,83\text{m}/\text{s}$ .

Es de destacar el efecto “llamador” de la ampliación de la luz del puente principal, aliviando las obras de arte de margen izquierda, concentrando el flujo hacia el cauce principal del río y disminuyendo las velocidades en todas las obras de arte, inclusive en el propio puente.

### - En relación a un evento de 50 años de tiempo de recurrencia

Se simuló el efecto que tendría una crecida con un caudal de  $293,7\text{m}^3/\text{s}$ , correspondiente a una recurrencia de 50 años, teniendo en cuenta la luz ampliada del puente principal.

Ese efecto es la elevación del pelo de agua en el borde de aguas arriba del terraplén ferroviario a  $62,3\text{m}$  IGN, inferior a la cota del fondo de viga del puente principal, que es  $62,34\text{m}$  IGN. La velocidad de escurrimiento en el puente principal sería  $1,65\text{m}/\text{s}$ .

Por su parte, el caudal que escurriría por las obras de arte de margen izquierda, compatible con la cota de aguas arriba  $62,30\text{m}$  IGN, sería  $69\text{m}^3/\text{s}$ . La velocidad en la obra de arte de  $9,80\text{m}$  de luz sería  $1,27\text{m}/\text{s}$ , mientras que en las otras tres no se superaría  $1\text{m}/\text{s}$ .

Se simuló, además, el efecto que produciría la ocurrencia simultánea de ese mismo evento de 50 años de recurrencia, más la descarga del caudal de diseño del canal de la Línea Paraná del Proyecto de Bajos Submeridionales.

Para esta última situación, la cota que alcanzaría el agua en el borde de aguas arriba del terraplén ferroviario sería  $62,33\text{m}$  IGN, inferior a los  $62,34\text{m}$  IGN del fondo de viga del puente principal. El caudal que escurriría por el río sería  $285\text{m}^3/\text{s}$  ( $274,4\text{m}^3/\text{s}$  por el puente principal y  $10,6\text{m}^3/\text{s}$  por el aliviadero lateral), mientras que por las obras de arte de margen izquierda escurrirían, en total,  $71,50\text{m}^3/\text{s}$ .

Las máximas velocidades se darían en el puente principal ( $2,05\text{m}/\text{s}$ ) y en la obra de arte de  $9,80\text{m}$  de luz ( $1,31\text{m}/\text{s}$ ); las velocidades en las otras alcantarillas serían inferiores a  $1\text{m}/\text{s}$ .

### - Resumen de resultados

En las siguientes tablas se presentan los resultados de las simulaciones realizadas, según el siguiente detalle:



En tabla 2 la situación original de las obras de arte, para el evento de 1986; en tabla 3 a todas las obras de arte más el puente principal con luz ampliada para el evento de 1986 y para ese evento, más la descarga del canal de la Línea Tapenagá y en tabla 4 todas las obras de arte, más el puente con luz ampliada para un caudal de 50 años de tiempo de recurrencia y para dicho caudal, más la descarga del canal de la Línea Tapenagá.

**Tabla 2.- Situación original.**

		Aliviador	Puente	Alcant. 1	Alcant. 2	Alcant. 3	Alcant. 4
	Progresivas del FFCC (km)	476,945	477,018	480,636	482,521	483,120	483,622
Evento del 15 de abril de 1986	Cota aguas arriba (m, IGN)	62,30					
	Cota aguas abajo (m, IGN)	61,90		61,75			
	Caudal parcial (m <sup>3</sup> /s)	14,26	225,74	53,19	6,39	6,53	6,90
	Caudal total (m <sup>3</sup> /s)	313,01					
	Velocidad media (m/s)	0,96	2,78	1,37	0,75	0,80	0,93

**Tabla 3.- Situación con puente sobre río Tapenagá con luz ampliada.**

		Aliviador	Puente	Alcant. 1	Alcant. 2	Alcant. 3	Alcant. 4
	Progresivas del FFCC (km)	476,945	477,018	480,636	482,521	483,120	483,622
Evento de abril de 1986	Cota aguas arriba (m IGN)	62,11					
	Cota aguas abajo (m IGN)	61,90		61,75			
	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	10,48	244,02	43,53	4,76	4,95	5,26
	Velocidad media (m/s)	0,76	1,49	1,19	0,63	0,69	0,81
Evento de abril de 1986, más la descarga del canal	Cota aguas arriba (m, IGN)	62,16					
	Cota aguas abajo (m, IGN)	61,90		61,75			
	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	10,48	268,52	45,99	5,10	5,29	5,62
	Velocidad media (m/s)	0,74	1,63	1,24	0,66	0,72	0,83

**Tabla 4.- Situación con puente con luz ampliada, caudal de 50 años de tiempo de recurrencia y para dicho caudal más la descarga del canal de la Línea Tapenagá.**

		Aliviador	Puente	Alcant. 1	Alcant. 2	Alcant. 3	Alcant. 4
	Progresivas del FFCC (km)	476,945	477,018	480,636	482,521	483,120	483,622
Q <sub>50</sub> = 293,70 (m <sup>3</sup> /s)	Cota aguas arriba (m IGN)	62,30					
	Cota aguas abajo (m IGN)	62,05		61,90			
	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	11,05	282,65	49,44	6,28	6,43	6,85
	Velocidad media (m/s)	0,74	1,65	1,27	0,74	0,80	0,92
Q <sub>50</sub> más la descarga de canal	Cota aguas arriba (m IGN) IGM)	62,33					
	Cota aguas abajo (m IGN)	62,05		61,90			
	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	10,63	274,38	51,17	6,53	6,68	7,11
	Velocidad media (m/s)	0,86	2,05	1,31	0,76	0,81	0,94

### Otras intervenciones evaluadas

Para reducir la cota que alcanzaría el agua en el borde aguas arriba del terraplén ferroviario, para un evento similar al de 1986, se evaluaron, además de la ampliación de la luz del puente de 20 a 40m, ya descripta, el efecto que tendría ampliar esta luz a 60 y 80m. Los resultados de estos aumentos de luz se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5.- Diferentes luces evaluadas.**

Luz	Cota aguas arriba (m IGN)	Caudal (m <sup>3</sup> /s) (*)	Velocidad media en el puente principal (m/s)	Sección mojada del puente principal (m <sup>2</sup> )	Caudal en el puente principal (m <sup>3</sup> /s)
Actual: 20m	62,30	240,0	3,16	71,5	225,7
40m	62,11	254,5	1,83	133,6	244,0
60m	62,06	258,5	1,41	177,6	249,8
80m	62,04	260,5	1,22	207,7	252,8

(\*) El caudal corresponde a lo erogado por el puente principal y su aliviadero de 5,7m.

Se puede observar que desde el punto de vista hidráulico cualquier incremento de la luz del puente principal por sobre los 40m tendrá un efecto prácticamente inocuo pues dicho incremento de luz se comportará hidráulicamente como aliviador por estar saliéndose del cauce principal del río.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### En relación al evento de 1986

Se consiguió simular el funcionamiento del sistema para la creciente extraordinaria y de alta recurrencia de 1986, con el pico máximo registrado de 61,75m IGN, con buena precisión.

Se comprobó y verificó, para ese evento, que ampliando la luz del puente de 20m a 40m (quedarían dos luces de 20m), el efecto sería la disminución de la cota aguas arriba del terraplén ferroviario, con lo cual se evitaría que el nivel de agua supere al de los rieles.

Se verificó, también, que con el puente con 40m de luz, más el aporte de los 28m<sup>3</sup>/s del canal del proyecto Línea Tapenagá de los Bajos Submeridionales, la cota del agua en el borde de aguas arriba del terraplén ferroviario aumentaría 5cm, alcanzando cota 62,16m IGN, con lo cual se estaría 3cm por arriba de la cota mínima del riel.

Tomando como referencia el evento de 1986, el aumento de la luz del puente principal traería como consecuencia la disminución de las velocidades de 2,78 a 1,49m/s. Para las cuatro obras de arte de margen izquierdo no se observarían velocidades superiores a 1,19m/s.

### En relación al evento con caudal de 50 años de tiempo de recurrencia

La cota que alcanzaría el agua en el borde de aguas arriba del terraplén ferroviario, para el caso que la luz del puente principal sea ampliada a 40m, sería 62,30m IGN, inferior en 4cm a la cota del fondo de viga del puente actual (62,34m IGN).

El efecto que provocaría el agregado de la descarga del canal de la Línea Tapenagá sería la elevación de esa cota a 62,33m, todavía por debajo de la cota del fondo de viga del puente principal.

Se propone el levantamiento de la rasante del riel a cota 62,63m IGN, valor que surge de sumar 0,30m a los 62,33m de la crecida con caudal de 50 años de tiempo de recurrencia incrementada con la descarga del canal de la Línea Tapenagá.

No se recomienda una ampliación de la luz del puente principal a más de 40m, pues se verificó que mayores ampliaciones no introducirían mejoras en el nivel del pelo de agua ni en las velocidades de escurrimiento.

### Agradecimientos

A la memoria del Ingeniero Mario A. Alegre que nos encomendó y alentó en la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

**Alegre, Mario; Ruberto, A.; Pilar, J.** (2001). "Adecuación hidráulica del cruce ferroviario sobre el río Tapenagá – Chaco". Trabajo de consultoría para la Administración Provincial del Agua del Chaco, Resistencia, Argentina.

**APA - Administración Provincial del Agua, provincia del Chaco. Anales varios. Datos de aforos de**

*la cuenca del río Tapenagá de diversos años. Resistencia, Chaco, Argentina.*

- Fertonani, Miguel y Prendes, H.** (1983). “Hidrología en áreas de llanura. Aspectos conceptuales teóricos y metodológicos”. Olavarría, Argentina. p.120 a 156. Actas del Coloquio de Hidrología de Grandes Llanuras. Olavarría. ISBN: 950-9416-00-2.
- Ruberto, Alejandro; Depettris, C., Pilar, J.; Ramos, R.; Mentasti, C.** (2013). “Coeficientes de ajuste de hidrogramas sintéticos en ríos de llanura – método de Snyder – río Tapenagá – Chaco”. XXIV Congreso Nacional del Agua 2013. San Juan, Argentina. ISSN: 1853-7685.
- Valiente, Miguel** (2004). “Evaluación de áreas de riesgo – Chaco”. Trabajo de consultoría para el Proyecto de saneamiento hídrico y desarrollo productivo de la línea Tapenagá. Ministerio de la Producción, provincia del Chaco.