

## OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE PROTECCIONES COLOCADAS JUNTO A ESTRIBOS DE PUENTES ALIVIADORES

### THE OPTIMIZATION OF THE REVETMENTS DESIGN PLACED AROUND ABUTMENTS OF RELIEF BRIDGES

Ramiro J. Pighini<sup>1</sup>, Marcela L. Reynares<sup>1</sup> y Graciela B. Scacchi<sup>1</sup>

#### Resumen

El presente trabajo tiene como objeto determinar, mediante experiencias de laboratorio, la incidencia de las dimensiones y geometría en planta de una protección flexible sobre el sector erosionado en las inmediaciones de un estribo de pared vertical, y evaluar las mínimas dimensiones del revestimiento a fin de asegurar la estabilidad de la obra. Los ensayos fueron realizados en un canal de grandes dimensiones ubicado en la Nave I del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral (Santa Fe, Argentina). Los experimentos fueron realizados en condiciones de agua clara y manteniendo constante los parámetros hidráulicos. Los resultados muestran que bajo diferentes geometrías de la protección, la máxima profundidad de erosión se mantuvo semejante a la situación de referencia. Sin embargo, la reducción del área del revestimiento deja zonas del lecho muy expuestas a los procesos erosivos, desestabilizando la protección y dejándola suspendida de su anclaje. Por este motivo es necesario incorporar al estudio un análisis de estabilidad geotécnica del sistema lecho erosionado-protección.

**Palabras clave:** Estribo, Protecciones, Erosión local, Puente aliviador.

#### Abstract

An experimental study of scour processes related to vertical-wall abutments protected with blocks mats placed in a river flood plain is reported. The purpose of the study was to determine the influence of apron width related to the maximum scour depth, the shape and volume of the scour hole. The experiments were conducted on a wide channel placed in FICH Hydraulics Laboratory of the Universidad Nacional del Litoral (Santa Fe, Argentina). Laboratory tests were carried out under clear-water flow conditions and the same flow conditions. The results show that for different concrete block matting geometries, the maximum scour depths are similar to the situation without protection. However, reducing the area of the revetment could be generated the instability protection. It is therefore necessary to incorporate the study of geotechnical stability analysis of eroded bed – protection system.

**Key Words:** Abutment, Protection, Local Scour, Relief Bridge

#### INTRODUCCIÓN

Los puentes aliviadores son aquellos emplazados en valles de inundación, distantes del cauce principal y cuyo comportamiento es independiente del mismo. Los procesos de erosión local que se generan junto a los estribos de estos puentes, pueden ser controlados mediante la colocación de protecciones al pie de dichas estructuras. Esta herramienta ingenieril ha tenido una amplia aceptación en la región del litoral argentino. Sin embargo, la presencia de la protección no evita la formación de la hoya de erosión sino que la aleja del estribo (Melville et al., 2006a y b; Morales et al., 2008; Cardoso et al., 2009 y Reynares et al., 2010). Resulta así necesario optimizar las dimensiones en planta de revestimiento para minimizar los

costos de proyecto asegurando al mismo tiempo la integridad del puente. El presente estudio enfoca su análisis en estribos largos, característica principal de los puentes que se construyen en grandes llanuras de inundación como la del río Paraná. El trabajo tiene como objeto determinar, mediante experiencias de laboratorio, la incidencia que las dimensiones y geometría en planta de una protección flexible tienen sobre el sector erosionado en las inmediaciones de un estribo de pared vertical, con el objetivo final de evaluar las dimensiones mínimas que debiera tener el revestimiento de manera que asegure la estabilidad del estribo ante la ocurrencia de los procesos de erosión.

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH)-Universidad Nacional del Litoral (UNL), Santa Fe, Argentina. Ciudad Universitaria. Paraje "El Pozo". S3000. Santa Fe. Argentina. E-mail: ramiropighini@hotmail.com

## METODOLOGÍA. DISEÑO EXPERIMENTAL

Los ensayos fueron realizados en un canal de grandes dimensiones, ubicado en la Nave I del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral (Santa Fe, Argentina). El mismo posee 18.50 m de largo, 7.65 m de ancho y 0.93 m de profundidad (Figura 1). El agua ingresa al canal por un sector a fondo fijo de 3.50 m de longitud al que le sigue un sector a fondo móvil de 11.00 m de largo y un ancho coincidente con el del canal. El sector a fondo móvil se encuentra conformado por un manto de 0.60 m de espesor, de arena uniforme de 1 mm de diámetro medio ( $\sigma_g = 1.3$ ) y un peso específico de 2650 kg/m<sup>3</sup>. En los tramos rígidos se ha adherido una delgada capa de material granular de similares características a las del sector a lecho móvil, para mantener constante la rugosidad superficial en todo el recorrido del flujo. El tramo final se conforma por otro sector fijo de iguales dimensiones que el primero.

A 8.50 m aguas abajo de la sección de entrada se produce un cierre parcial de 3.65 m de extensión (L) y 0.12 m de espesor, con origen en la margen derecha, materializando así un estribo prismático de pared vertical. El tirante de agua en todos los ensayos (h) fue de 0.12 m. De esta manera, la relación L/h fue constante y mayor a 25 en todos los casos, asegurando la condición de estribo largo.

En su margen izquierda existe un muro longitudinal móvil para modificar el ancho de la sección, manteniendo fija la longitud del estribo. El ancho de la sección de paso será denominado como brecha (B) y estará refiriendo al semiancho del puente. La pared móvil, opuesta al estribo, se constituye en un eje de simetría, no sólo desde el punto de vista geométrico sino también en cuanto al fenómeno en estudio, lo que permitió trabajar con un solo estribo.

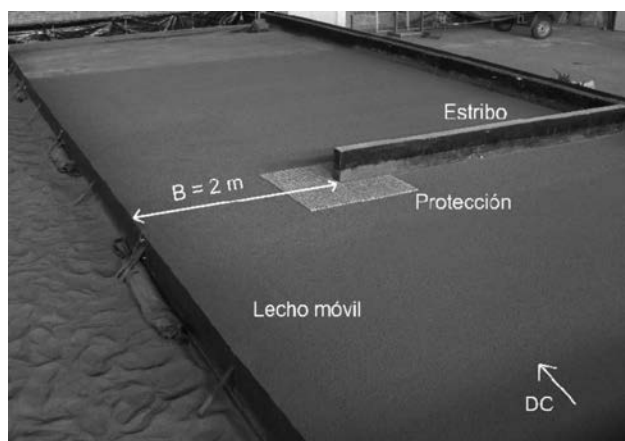


Figura 1. Canal de ensayos.

Las protecciones utilizadas fueron facilitadas por una empresa dedicada al diseño y construcción de revestimientos flexibles. Se entregaron como mantas de 1.00 m por 0.50 m compuestas por prismas de base

tronco piramidal cuadrada, con lados de 0.026 m y un espesor de 0.012 m adheridos a una tela permeable (Figura 2). Los mismos se encuentran separados entre sí por una distancia media de 3mm.

Las protecciones fueron ancladas al lecho para prevenir deslizamientos. Un croquis general de la geometría en planta de las protecciones se puede observar en la Figura 2. Donde:

- W: es el ancho de la protección;
- $W_{R1}$ : es el remate lateral en la cara de aguas arriba;
- $W_{R2}$ : es el remate lateral en la cara de aguas abajo;
- $W_1$ : es el remate longitudinal hacia aguas arriba;
- $W_2$ : es el remate longitudinal hacia aguas abajo.
- DC: Dirección de la corriente.

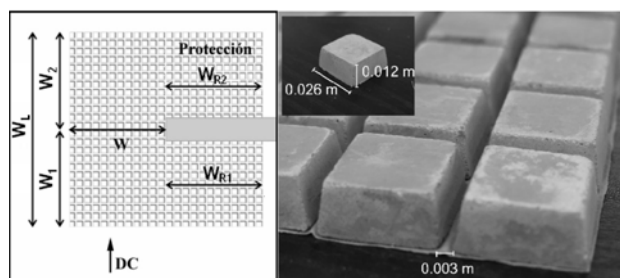


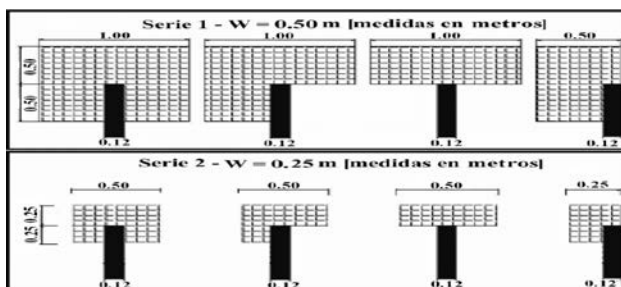
Figura 2. Esquema y detalle de la protección.

Durante toda la experimentación el ancho de la brecha fue de 2.00 m, el caudal de ensayo fue constante e igual a 72 l/s, definido de manera tal que se verificó un caudal específico medio de 0.036m<sup>2</sup>/s en la sección estrecha. Todos los ensayos fueron realizados bajo condiciones de agua clara y la duración de los mismos fue de 24 horas, tiempo considerado suficiente para lograr una profundidad de erosión local, próxima al 80% del valor final de equilibrio (Schreider et al, 1998).

Una vez finalizado cada experimento, se desagotó lentamente el canal mediante drenes ubicados en el fondo de manera de no afectar la configuración final del lecho y se realizó un relevamiento de detalle del mismo, mediante un distanciómetro laser posicionado sobre un carro porta instrumental. La topografía fue acompañada de un exhaustivo registro fotográfico tanto al inicio como al final.

Los ensayos fueron organizados en dos series, la primera de ellas se caracterizó por poseer un ancho de protección (W) de 0.50 m, mientras que en la segunda el "W" fue de 0.25 m. Adicionalmente se realizó un ensayo patrón, en el cual el estribo fue considerado sin protección alguna, de modo tal de utilizar los resultados que de él se deriven como referencia a

la hora de analizar los restantes ensayos realizados. En el primer ensayo de cada una de las series experimentales se colocaron mantas cuyas geometrías en planta fue cuadrada envolviendo por completo al estribo, mientras que en los ensayos posteriores ésta se modificó disminuyendo su área, en un 25% en cada caso. En efecto, en el segundo ensayo se prescindió del sector ubicado en la cara de aguas abajo del estribo y en el experimento siguiente se quitó el remate de revestimiento ubicado en la cara de aguas arriba. Se entiende por remate, al sector de la protección que limita inmediatamente con las caras, tanto de aguas arriba como de aguas abajo, del estribo. Finalmente, en ambas series se ensayó una configuración que solo contempla la colocación de protección en el sector de aguas arriba del estribo, con una extensión  $W_1$  en el sentido del escurrimiento y una ancho de  $W_R + W$ , un esquema detallado se puede observar en la figura 3.



**Figura 3.** Esquema de la secuencia de ensayos realizada.

En la Tabla 1 se resumen las dimensiones utilizadas en cada uno de los experimentos.

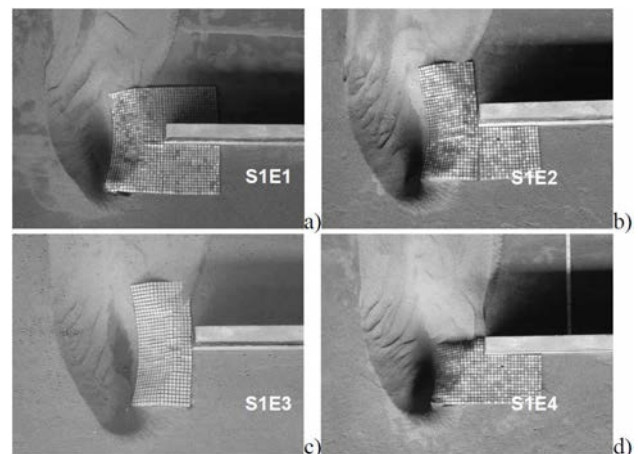
**Tabla 1.** Dimensiones de las protecciones.

Ensayo	W [m]	$W_1$ [m]	$W_2$ [m]	$W_{R1}$ [m]	$W_{R2}$ [m]
Referencia	-	-	-	-	-
SERIE 1	S1E1	0,50	0,50	0,50	0,50
	S1E2	0,50	0,50	0,50	0,00
	S1E3	0,50	0,50	0,50	0,00
	S1E4	0,50	0,50	0,00	0,50
SERIE 2	S2E1	0,25	0,25	0,25	0,25
	S2E2	0,25	0,25	0,25	0,00
	S2E3	0,25	0,25	0,25	0,00
	S2E4	0,25	0,25	0,00	0,25

Mediante dichos esquemas se pretende analizar la influencia que tienen las diferentes geometrías en planta de una protección, en el lecho resultante, en las inmediaciones de un estribo prismático de pared vertical.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados alcanzados en ambas series de ensayos muestran cómo la geometría de las hoyas de erosión se encuentra estrechamente relacionada con las dimensiones y disposición del revestimiento. En los casos en los que la protección tuvo una extensión de 0.50 m, el sector erosionado se desarrolló en el lateral de la protección, alejado del estribo. La hoya se extendió en todo el largo de la protección ( $W_L$ ). En la figura 4 se presentan imágenes del lecho resultante una vez finalizado cada ensayo de la serie 1. En la misma se puede observar cómo las hoyas de erosión poseen prácticamente la misma geometría, con anchos y largos semejantes, ubicadas en el mismo lugar de la sección transversal del canal. Claramente, la protección trabaja correctamente, alejando el sector erosionado del estribo mismo. Sólo cuando la protección se dispuso de manera transversal al estribo (Figura 4c) se produjeron importantes profundizaciones en las cercanías del mismo. Sin embargo, las máximas profundidades se ubicaron a 0.50 m del extremo del estribo.



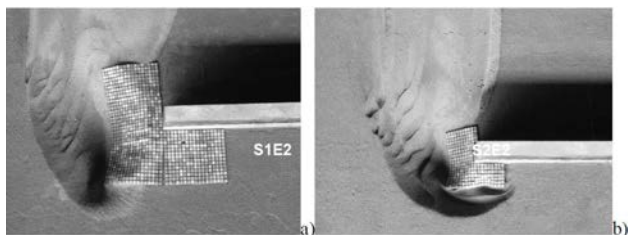
**Figura 4.** Comparación de las hoyas resultantes en la Serie 1

Los resultados alcanzados estarían indicando que existen sectores del revestimiento que podrían considerarse "prescindibles". En efecto, si la protección se encuentra correctamente anclada al lecho, tanto los remates de aguas arriba como de aguas abajo ( $W_1$  y  $W_2$ , respectivamente) podrían no colocarse, y la protección seguiría trabajando correctamente, alejando las erosiones del estribo.

Sin embargo en la segunda serie de ensayos, en la cual la protección tuvo un ancho de 0.25 m, el sector erosionado se desarrolló envolviendo al estribo y su correspondiente protección, acercando las máximas profundidades al mismo.

En la figura 5 se muestra una comparación de resultados entre los ensayos S1E2 y S2E2, pudiéndose observar un comportamiento diferenciado entre ambos experimentos, que poseen una misma geometría pero anchos diferentes.

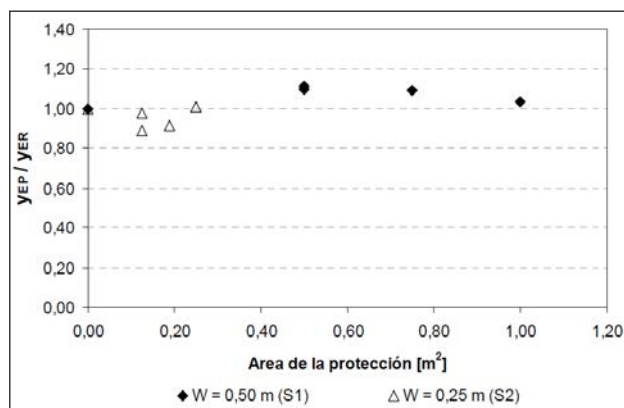




**Figura 5** - Comparación de las hoyas S1E2 ( $W = 0.50$  m) y S2E2 ( $W = 0.25$  m)

Tal como se observa en la figura 5, la forma de la hoya de erosión cambia sustancialmente en función de “W”. En efecto, en la Serie 1 la hoya se desarrolla en el lateral de la protección, mientras que en la Serie 2 envuelve al estribo y su protección, generando importantes deformaciones en el sector de aguas arriba del revestimiento (Figura 5b).

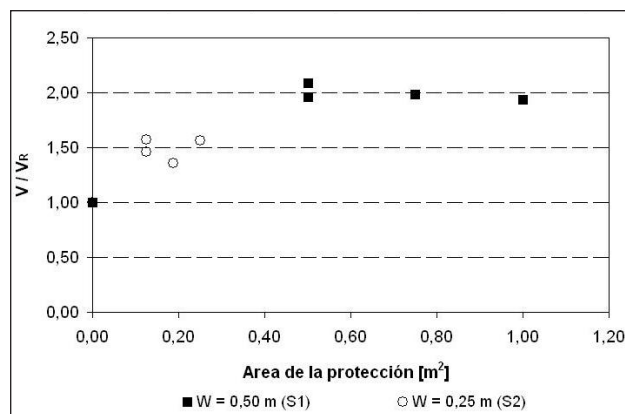
En todos los experimentos, las máximas profundidades de erosión tuvieron magnitudes semejantes a la observada en el ensayo patrón. Esto fue representado en la figura 6, donde se ha graficado la erosión adimensional versus el área de la protección utilizada en cada ensayo. La máxima erosión observada en cada experimento ( $y_{EP}$ ) fue adimensionalizada con la máxima socavación obtenida en el ensayo patrón ( $y_E$ ). En la figura se puede observar cómo las máximas profundidades no difieren significativamente respecto del valor de referencia a pesar de aumentar considerablemente el área de protección utilizada.



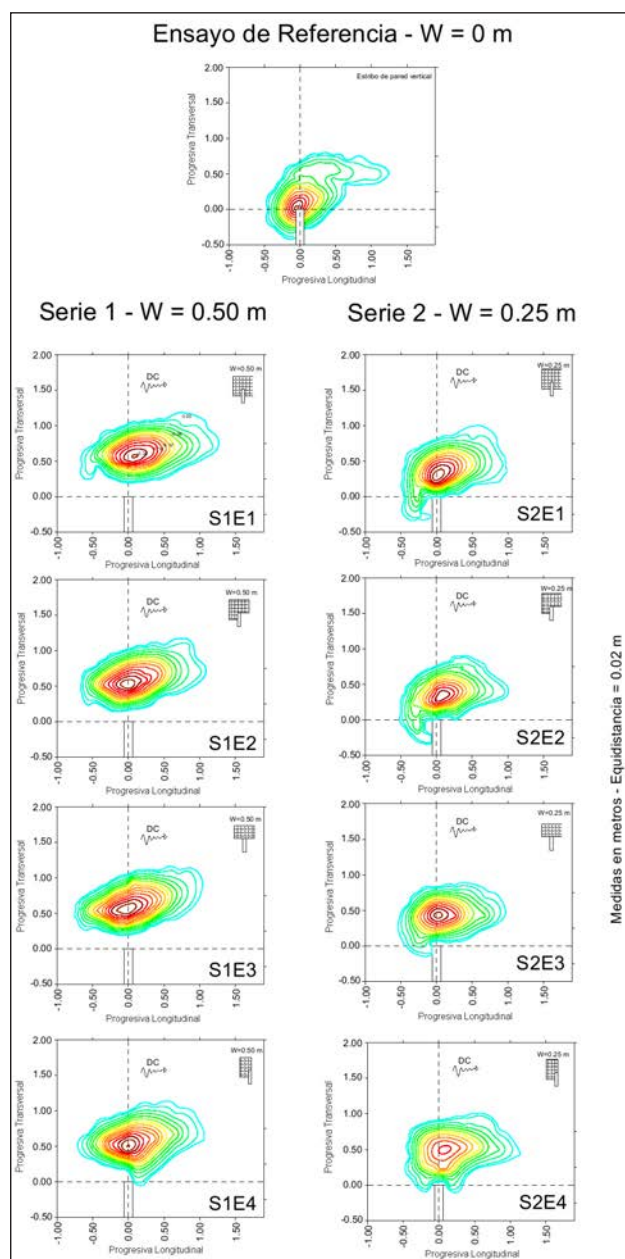
**Figura 6** - Erosión adimensional vs área de la protección.

Las hoyas de erosión generadas tuvieron una forma más alargada, acompañando la extensión de la protección en el sentido del escurrimiento, con profundidades semejantes por lo que el volumen de sedimento removido se incrementó significativamente. Esto puede observarse en la figura 7 en la cual se representó el volumen adimensional, como el cociente entre el volumen observado en cada experimento ( $V$ ) y el correspondiente al medido en el ensayo de referencia ( $V_R$ ), respecto de la superficie de revestimiento. La figura muestra cómo el volumen de la hoya se incrementa un 50 % en la

serie 1, mientras que duplica su magnitud cuando el revestimiento tuvo un ancho  $W = 0.50$  m (Serie 2).



**Figura 7** - Volumen adimensional vs área de la protección.



**Figura 8** - Relevamientos de detalles de las Series 1 y 2 de experimentos.

Las máximas profundidades de erosión han mantenido no solo su magnitud sino también su ubicación respecto del extremo del estribo a lo largo de toda la experimentación. Con el objetivo de visualizar de mejor manera la posición y geometría que han adquirido las hoyas de socavación, es que se confeccionó la figura 8. En la misma se puede observar un desplazamiento de las máximas profundidades de erosión proporcional al ancho de la protección y una semejanza entre las geometrías que adquirieron las mismas.

En la figura 8 se puede ver cómo las hoyas de erosión copian su forma en los distintos experimentos y las máximas profundidades se desplazan en la propia sección de emplazamiento del estribo de manera proporcional al ancho de protección considerado (W). Al comparar los resultados respecto del ensayo de referencia, se puede apreciar cómo las hoyas tienen un mayor desarrollo en el sentido del escurrimiento, y por lo tanto, un incremento del volumen de sedimento removido.

## CONCLUSIONES

Los resultados alcanzados muestran que las máximas profundidades de erosión mantienen su valor semejante a la situación de referencia, pero desplazan su ubicación de manera proporcional al ancho del revestimiento considerado. Sin embargo, siempre se desarrollan en la sección transversal correspondiente al emplazamiento del estribo.

Para un mismo ancho de protección "W" los valores del área, volumen y forma de las hoyas de erosión se conservan, empero incrementan significativamente su magnitud respecto de la situación de referencia.

Para un mismo ancho de protección considerado (W), reducciones de hasta el 50% en la superficie del revestimiento generan hoyas de erosión semejantes. Desde el punto de vista de la erosión, produciría los mismos resultados colocar una protección del lecho cuadrada que envuelva a todo el estribo, a suprimir los remates ubicados en las caras de aguas arriba y aguas abajo del estribo.

Resulta importante destacar que, para determinadas geometrías como las ensayadas en los experimentos S1E4 y S2E4, la reducción del área del revestimiento deja zonas del lecho en las proximidades de la obra muy expuestas a los procesos erosivos, desestabilizando la protección y dejándola colgada de

su anclaje. Por este motivo es necesario incorporar al estudio, el análisis de estabilidad geotécnica del sistema lecho erosionado-protección en los ensayos realizados.

A fin de establecer una configuración óptima, se puede mencionar que la protección del ensayo S1E3 es la que satisface de manera más económica la integridad del estribo, ya que reduce a la mitad el material empleado en relación a la protección cuadrada y aleja la hoya de erosión de la obra, asegurando su estabilidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Melville, B.W; van Ballegooy, S; Coleman S.E. y Barkdoll B. (2006a) "Countermeasure Toe Protection at Spill-Through Abutments". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 3, March, A.S.C.E., pp 235-245.

Melville, B.W; van Ballegooy, S; Coleman S.E. y Barkdoll B. (2006b) "Scour Countermeasures for Wing-Wall Abutments". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 6, June, A.S.C.E., pp 563-574.

Morales, R; Ettema, R; y Barkdoll, B (2008) "Large-Scale Flume Tests of Riprap-Apron Performance at a Bridge Abutment on a Floodplain" *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 134, No. 6, June, A.S.C.E., pp 800-809.

Reynares M.; Schreider M. y Scacchi G. (2010) "Máximas profundidades y geometría de la hoya de erosión junto a un estribo protegido de un puente aliviador". XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica – Punta del Este – Uruguay.

Schreider, M., Zanardi, L., Scacchi, G., Franco, F. (1998) "Erosión por contracción y por estribo en puentes aliviadores en valle de inundación". *Revista Ingeniería del agua*. Vol. 5. N° 2. pp 23-34. Madrid, España.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Litoral quien financió, por medio de los Cursos de Acción para la Investigación (CAI+D), el Proyecto de Investigación en el marco del cual se desarrolló este trabajo. A la empresa CORIPA S.A. por el suministro de las mantas de bloques de concreto, confeccionadas especialmente para este dispositivo experimental.