

Influencia de la altura de un muro guía en las erosiones resultantes junto a estribos de puentes

María Agustina Spais¹ y María Luisa Possi¹

¹ Laboratorio de Hidráulica. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral

E-mail: agus_01_12@hotmail.com; mlpossi@gmail.com.

RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los primeros resultados obtenidos en una serie de experimentos de laboratorio realizados con el fin de analizar la incidencia que tiene sobre las erosiones resultantes junto a un estribo de puente para variar la altura de un muro de aproximación adosado al mismo. En los ensayos se representaron muros, con una geometría en planta fija, pero con diferentes alturas, logrados a partir de la superposición vertical de dispositivos de tipo geotubos. Los resultados encontrados permitieron evaluar el comportamiento de las erosiones y el campo superficial del flujo en las inmediaciones de la obra en su conjunto, esto es, estribo más muro guía.

Se realizó un ensayo de referencia (ER, estribo sin protección) y cinco ensayos que contemplaron diversas alturas de muro. Para evaluar el comportamiento de las erosiones se realizó un relevamiento del lecho para cada caso y mediante un software computacional se determinaron no solo las posiciones de las máximas profundidades y su magnitud sino también los volúmenes removidos. Para el análisis del campo superficial de velocidades se utilizó la técnica de LSPTV (velocidad por seguimiento de partículas de gran escala).

PALABRAS CLAVES: Estribo, Muro guía, Erosión local, Geotubos.

INTRODUCCION

Los mayores daños en las estructuras de puentes, y aún su destrucción total o parcial, ocurren en temporada de crecida de los ríos. Si bien en el mundo se ha progresado mucho en el estudio de los mecanismos de erosión en puentes, la realidad muestra que las obras aún siguen fallando, debido precisamente a procesos erosivos. Estos procesos son el producto de la contracción de las líneas de corriente en la sección del puente, dando como resultado un incremento de velocidades y tensiones de corte sobre el lecho en las proximidades del extremo del estribo. Como consecuencia, se produce rápidamente una hoya de erosión que crece en profundidad. Los descensos del lecho junto al estribo son acompañados por deslizamientos del material del fondo ubicado en el contorno anterior de la hoya, generando un aumento de su extensión. El sedimento depositado es retirado por la acción de vórtices; el equilibrio se alcanza cuando la cantidad de sedimento que sale de la hoya iguala al aporte desde aguas arriba.

Existen distintas metodologías que tienen el propósito de mitigar o reducir las erosiones esperables junto a dichas estructuras. Algunas de ellas tienen la función de resistir la acción de la corriente a partir de la colocación de distintos tipos de revestimientos del lecho (Melville & Coleman, 2000) (Cardoso & Fael, 2009) (Korkut et al, 2007) (Melville et al, 2006) (Reynares et al, 2014) y otras, buscan el mismo objetivo alterando la configuración del flujo que desencadena los procesos erosivos (Fathi et al, 2011) (Radice & Lauva, 2012). En las últimas décadas, gracias a los desarrollos y avances logrados en el campo de los geotextiles, los geotubos surgen como una alternativa a considerar en diversas obras de ingeniería fluvial y marítima, constituyéndose en una solución económica, duradera, de fácil instalación y altamente flexibles. Ha sido probada e instalada en numerosos proyectos para la construcción de núcleos de estructuras como escolleras, diques, espigones y estructuras sumergidas.

En el presente trabajo se muestran los resultados alcanzados en una secuencia experimental en la que se evaluó la respuesta del lecho en las inmediaciones de un estribo de puente, cuando se coloca un muro de encauzamiento del flujo aguas arriba del mismo. En los ensayos se representaron muros de diferentes alturas, logrados a partir de la superposición vertical de diversos dispositivos tipo geotubos.

Se ha evaluado el comportamiento de las erosiones, el campo superficial del flujo en las inmediaciones de la obra en su conjunto, esto es estribo más muro guía y la velocidad media en la sección de estrechamiento.

OBJETIVO

Evaluar la respuesta erosiva del flujo en las inmediaciones de un estribo de puente de forma prismática cuando se construye como medida de protección un muro que interfiere en la configuración del flujo de aproximación al mismo. En particular se pretende analizar el efecto que tienen sobre las erosiones resultantes, la

altura del muro que se considere, en este caso construido siguiendo una trayectoria definida sobre un cuarto de elipse.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos fueron realizados en un canal de sección rectangular de 60 m de largo, 1.48 m de ancho y 1.00 m de profundidad (Figura 1), de paredes de vidrio, perteneciente al Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral (UNL), Santa Fe, Argentina.

El canal posee un lecho erosionable de 20 m de longitud y 0.40 m de espesor, constituido de arena uniforme con un diámetro medio de 0.001 m y desvío estándar de 1.25. A los 12 m de iniciado el tramo con fondo móvil, se encuentra representado un estribo prismático con paredes de vidrio vertical, de 0.3 m de longitud y 0.12 m de espesor (Figura 2).

Los dispositivos utilizados para la representación de los muros guía fueron contruidos con bolsas de tela rellenas con la misma arena que posee el resto del canal. De este modo se conformaron geotubos con un ancho promedio de 10 cm y una altura aproximada de 4 cm. El muro conformado contempló un posicionamiento de manera tal que se genere una geometría de un cuarto de elipse, desarrollado sobre la margen izquierda desde aguas arriba hasta el extremo del estribo, con su semieje menor coincidente con la longitud del mismo (Figura 3).

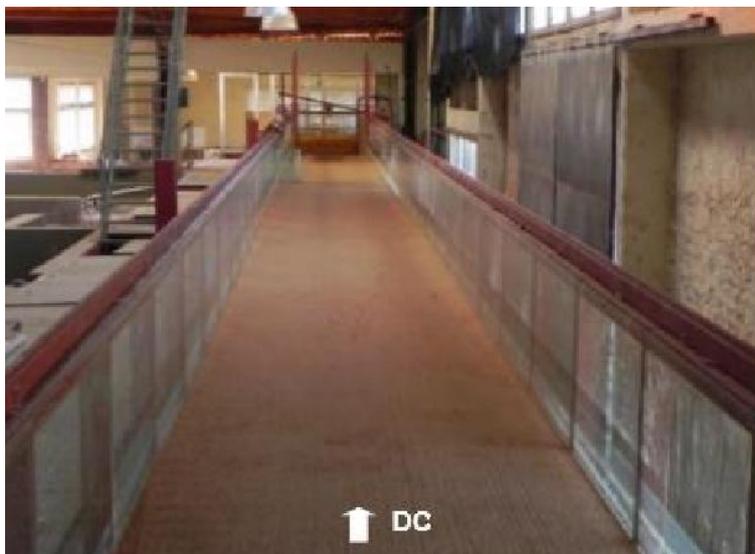


Figura 1.- Vista canal de ensayo.



Figura 2.- Estribo representado.



Figura 3.- Estribo y muro guía conformado por geotubos representados.

La secuencia experimental contempló la concreción de un ensayo de referencia (ER, estribo solo sin protección), y una serie de experimentos en los que se representaron muros de diferentes alturas, constituidos por 1, 2, 3, 4 o 5 geotubos sobrepuestos, uno encima del otro, de modo tal de poder analizar la influencia que tiene la sumergencia del muro sobre las erosiones locales resultantes. La finalidad de realizar un ensayo de referencia fue para poder utilizarlo como patrón para comparar sus resultados con las magnitudes obtenidas en los distintos ensayos: volumen, erosión máxima, posición de la hoya y campo superficial de velocidades.

Todos los ensayos tuvieron una duración de 48 horas, un caudal constante de 83 l/s y un tirante en el flujo de aproximación de 19 cm. La relación entre la velocidad de corte del escurrimiento (u_*) y la velocidad de corte

crítica del material que compone el lecho (u_{*cr}), fue menor que uno, por lo que los procesos de erosión local por estribo se dieron en condiciones de agua clara.

Antes de comenzar cada ensayo, se debió alisar el lecho del canal, buscando reproducir las mismas condiciones iniciales. Al inicio, y previo a la finalización de cada experimento, se realizó la medición del campo superficial de velocidades, mediante la técnica de velocimetría por seguimiento de partículas (PTV, por sus siglas en inglés), (Patalano et al, 2015). El sistema de PTV utiliza un marco de referencia Lagrangiano, y permite caracterizar el campo de velocidades superficiales basándose en la determinación del desplazamiento de partículas trazadoras, identificadas y rastreadas individualmente. Para implementar la misma se filmó la superficie del escurrimiento, sembrada con partículas que tienen una densidad levemente inferior a la del agua, de modo tal de asegurar su flotabilidad. Las filmaciones se realizaron con una cámara digital Nikon Coolpix P100 ubicada de manera cenital en una pasarela distante a 2.40 m respecto de las paredes del canal. Las partículas utilizadas fueron esferas de telgopor lastradas (Figura 4).

Finalizado cada ensayo, con el canal drenado, se efectuó un registro fotográfico y un relevamiento de detalle del lecho resultante, con un distanciómetro láser marca Leica DISTO A5. La información obtenida en cada uno de los relevamientos fue analizada con el programa Golden Surfer 8.

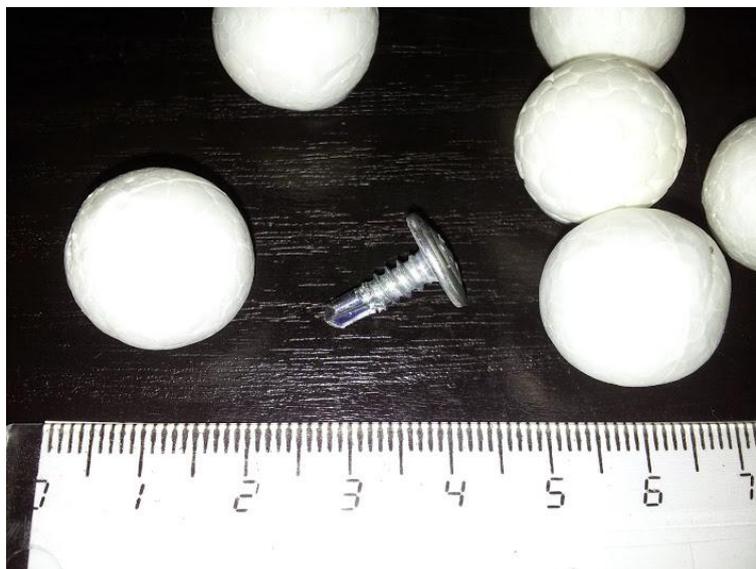


Figura 4.- Trazadores utilizados para caracterizar el campo de velocidad superficial.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, en la Tabla 1, se presenta una síntesis de los resultados alcanzados por los distintos ensayos. En la misma se indica, en las tres primeras columnas: el nombre del ensayo realizado, la cantidad de geotubos y la altura del muro. En las columnas cuatro, cinco y seis se presenta, para cada experimento, el porcentaje de obstrucción del tirante (relación entre la altura del muro constituido con geotubos HG y la profundi-

dad de escurrimiento H), la máxima profundidad de erosión observada en el estribo y la reducción de la misma respecto de la registrada en el ensayo de referencia (Figura 5) respectivamente. De forma análoga, en las columnas siete y ocho se exhiben el volumen de sedimentos total removido para cada configuración de muro ensayada y la correspondiente reducción respecto de la situación de referencia (ER).

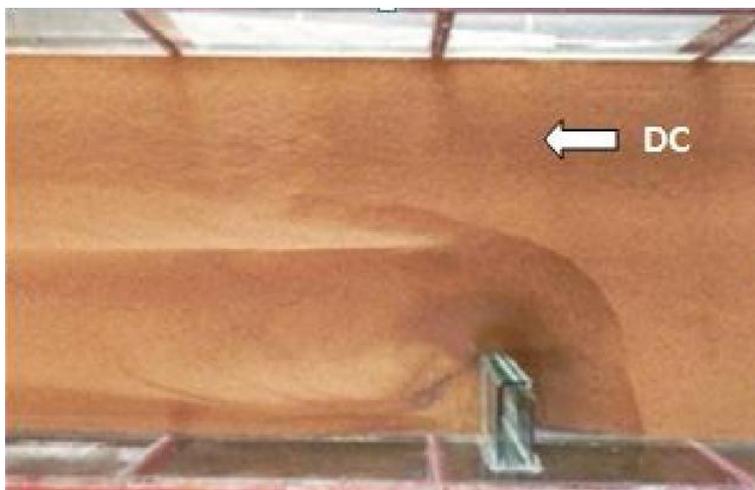


Figura 5.- Ensayo de referencia (ER).

Tabla 1: Resumen de los resultados alcanzados.

Ensayo	Cantidad Geotubos [Nº]	Altura del Muro (HG) [cm]	% de obstrucción del tirante (HG/H)	Máx. Prof. Erosión ye (cm)	Reducción de Erosión (%)	Volumen Erosionado Vol. (cm ³)	Reducción de Volumen (%)
ER	0	0.0	0.0	24.2	0	57794	0
G1	1	4.4	23.0	21.2	12.5	44069	23.7
G2	2	8.0	42.0	19.5	19.5	30816	46.7
G3	3	12.9	68.0	15.8	34.9	27457	52.5
G4	4	16.6	87.0	7.7	72.2	14585	74.8
G5	5	20.9	100.0	6.1	93.6	11796	79.6

En la Figura 6 representa para cada ensayo realizado los valores de reducción de profundidad de erosión máxima (en porcentaje) como una función del tirante obstruido (expresado también en porcentaje). Por otro lado, en la Figura 7 se representa la reducción del volumen de sedimentos removidos en las inmediaciones del estribo, como consecuencia del desarrollo de erosiones en relación a dicho volumen pero cuando el estribo se encontró desprotegido, como una función de la obstrucción del tirante. Para la evaluación de los mismos se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ Reducción de erosión} = \frac{(y_{eREF} - y_e)}{y_{eREF}} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\% \text{ Reducción de volumen} = \frac{(Vol_{REF} - Vol)}{Vol_{REF}} \cdot 100 \quad (2)$$

Donde “ y_{eREF} ”: máxima erosión del ensayo de referencia, “ y_e ”: máxima erosión en cada ensayo, “ Vol_{REF} ”: volumen del ensayo de referencia y “ Vol ”: volumen erosionado correspondiente. En ambas figuras en el eje de abscisas se consignaron los porcentajes de obstrucción del tirante.

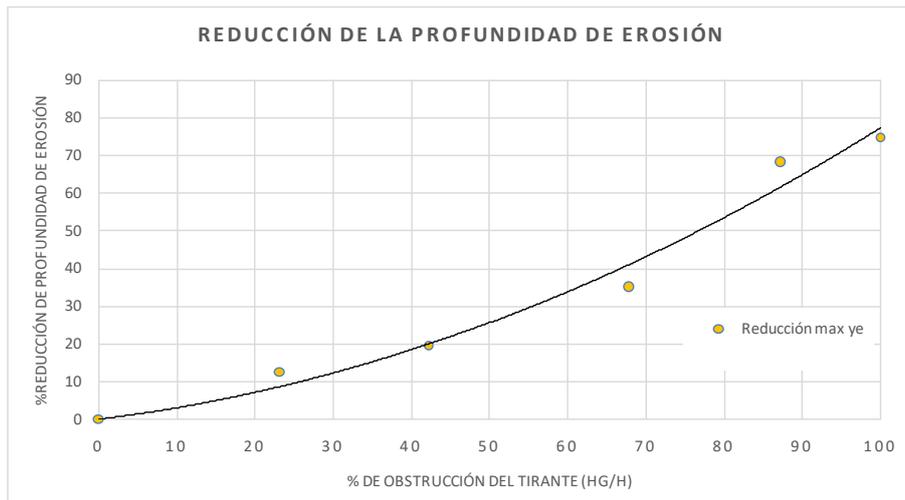


Figura 6.- Relación entre la reducción de erosión máxima y el porcentaje de obstrucción del tirante.

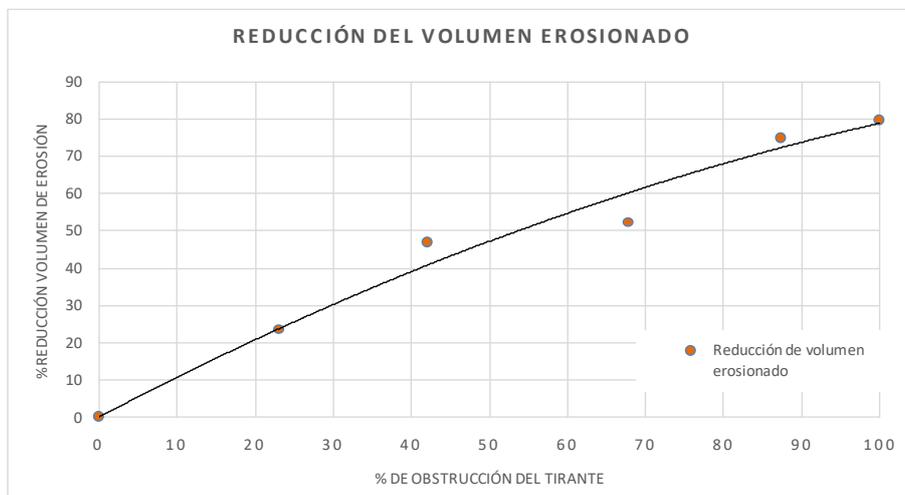


Figura 7.- Relación entre la reducción de volumen y el porcentaje de obstrucción del tirante.

Se demuestra que en la medida que se incrementó la obstrucción del tirante, el muro se comportó de un modo más eficiente en la reducción de las erosiones. Tanto la máxima profundidad de erosión como el volumen removido alcanzaron valores próximos al 80 % cuando el muro guía emergió por sobre la superficie del escurrimiento; además, para ambos casos, reducciones importantes se pueden lograr aun cuando el muro guía tiene un cierto grado de sumergencia. Un ejemplo de lo antes mencionado es cuando se tiene una

obstrucción del tirante de aproximadamente 70% (G3), donde se logran reducciones de la erosión de un 35% y de un 52% de volumen de sedimentos removidos.

Se observa también, un comportamiento diferenciado de la tasa de crecimiento en la reducción de las erosiones y los volúmenes respecto de la altura del muro: las tendencias de los datos correspondientes a las configuraciones contempladas en el presente estudio muestran que el volumen de sedimentos removidos se reduce con mayor rapidez que la máxima profundidad de socavación relevada en la medida que se obstruye una mayor proporción del tirante del escurrimiento con el muro representado.

La información derivada de cada uno de los relevamientos del lecho conformado al final de cada experimento fue procesada mediante el programa computacional Golden Surfer 8. Los resultados pueden verse en la Figura 8.

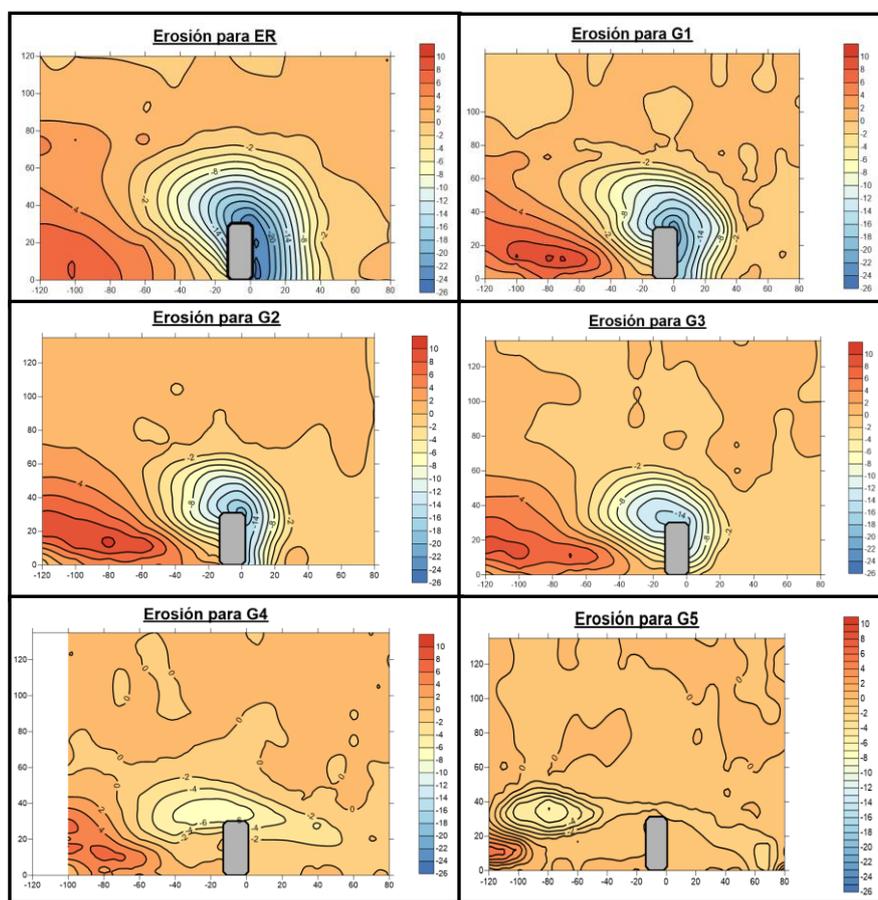


Figura 8.- Configuración del lecho erosionado en los diferentes ensayos realizados

Los lechos resultantes muestran que cuando se presentaron muros con 1, 2 y 3 geotubos (G1, G2 y G3 respectivamente), las máximas profundidades de erosión se localizaron en la sección de emplazamiento del estribo, específicamente junto al vértice de aguas arriba del estribo, tal como sucedió cuando éste se representó solo (ER). Mientras que, en los experimentos G4 y G5 las máximas erosiones se desplazaron

hacia aguas abajo de la sección del puente, con una forma del sector erosionado que se aparta de la típica hoya de erosión local junto al estribo aislado. Cuando el análisis se focaliza en las erosiones relevadas en la sección de emplazamiento del estribo, que es la estructura que se desea proteger, se encontró una reducción máxima de la erosión en dicho sitio de 94% aproximadamente.

Mediante la técnica de seguimiento de partículas fue posible caracterizar el campo superficial de velocidades al inicio y al cabo de 48 hs de desarrollo del proceso erosivo. A modo de ejemplo, en la Figura 9 se han representado las distribuciones transversales de velocidades superficiales iniciales, en la sección de emplazamiento del estribo, para los experimentos G1, G3 y G5 constituidos por 1, 3 y 5 geotubos respectivamente. Se observa que, en la medida que se incrementó la altura del muro guía, los vectores de velocidad superficial se dispusieron de manera más ordenada en la sección estrechada, mostrando una clara correspondencia con la morfología final del lecho, esto es, en la medida que el muro guía obstruyó una mayor proporción del tirante, las erosiones junto al estribo fueron menos significativas.

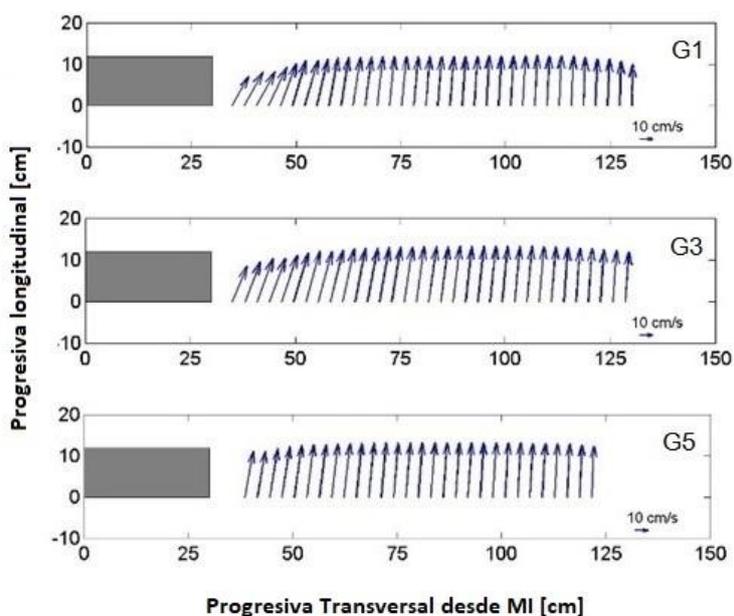


Figura 9.- Distribución transversal inicial de velocidades superficiales en la sección de emplazamiento del estribo.

Si bien el muro guía completo ordena el flujo en la aproximación al estribo, los resultados encontrados en G5 demuestran el desarrollo de erosiones en un sector ubicado aguas abajo de la sección del estribo, en una porción acotada de la sección transversal, entre los 20 y 50 cm desde la margen izquierda. El análisis de las velocidades medidas en ese sitio no demuestra valores por encima de los máximos existentes en el flujo principal, a las que pudiera responsabilizarse por completo de los mecanismos allí actuantes. Se considera que son necesarios estudios más detallados del campo tridimensional del flujo que permitan comprender de manera más acabada el proceso físico que da lugar a estas erosiones.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha evaluado el comportamiento de muros guía como medida de protección contra la erosión local junto a estribos de puentes. Los diferentes muros ensayados difieren entre sí sólo en la altura de coronamiento, la cual se logró apilando un número variable de geotubos rellenos con material suelto.

Los resultados mostraron que en la medida que se incrementó la altura del muro, las estructuras de protección resultaron más eficientes, logrando reducciones de la profundidad de erosión del 94% en la sección del puente. Además, para dicha configuración, el volumen de sedimento removido se redujo en un 80%.

Muros de menor altura condujeron a importantes reducciones de la máxima erosión, por ejemplo para una obstrucción del tirante próxima al 70% las erosiones disminuyeron un 40% aproximadamente.

En lo que respecta al campo superficial de velocidades, en la medida que se incrementó la altura del muro guía, los vectores de velocidad superficial se dispusieron de manera más ordenada en la sección estrechada, mostrando una clara correspondencia con la morfología final del lecho, esto es, en la medida que el muro guía obstruyó una mayor proporción del tirante, las erosiones junto al estribo fueron menos significativas.

REFERENCIAS

Cardoso, A., & Fael, C. M. (2009). *Protecting vertical-wall abutments with riprap mattresses*. Journal of Hydraulic Engineering.

Fathi, A.; Zarrati, A.R.; Salamatian, S.A. (2011). *Scour depth at bridge abutments protected with a guide wall* (Vols. 38: 1347-1354. doi: 10.1139/L11-096). Canadian Journal of Civil Engineering.

Korkut, R.; Martinez E.J.; Morales R.; Ettema R.; Barkdoll B. (2007). *Geobag performance as scour countermeasure for bridge abutments*. Journal of Hydraulic Engineering.

Melville, B. W., & Coleman, S. (2000). *Bridge Scour*. Water Resources Publications, LLC.

Melville, B.W.; Ballegooy, S.; Coleman, S.; Barkdoll, B. (2006). *Countermeasure toe protection at spill-through abutments* (Vol. 132). Journal of Hydraulic Engineering.

Patalano, A.; García, C.M.; Scacchi, G. (2015). *Implementación de la técnica de PTV a gran escala (LSPTV) para caracterizar flujos a superficie libre en modelos físicos*. La Plata, Argentina: IV Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica.

Radice, A., & Lauva, O. (2012). *On Flow-Altering countermeasures for scour at vertical-wall abutments* (Vol. 59). Hydro-Engineering and Environmental Mechanics.

Reynares, M.; Schreider, M.; Scacchi, G. (2014). *Dimensiones en planta de una protección de estribo y erosiones resultantes* (ISSN 0187-8336 ed., Vol. V). Santa Fe: Tecnología y Ciencias del Agua.