

# PROTECCIÓN DE LA EROSIÓN EN CURVAS ABRUPTAS USANDO ENROCADO RIP-RAP

• César Adolfo Alvarado-Ancieta •  
*Ingeniero consultor e investigador hidráulico*

## Resumen

Para el diseño adecuado de obras de protección de márgenes en curvas, así como para la determinación del ancho requerido por navegación, se necesita una comprensión adecuada del flujo en curvas y de la topografía resultante en el fondo del cauce. Estos dos fenómenos son tópicos difíciles que experimentan los ingenieros de ríos, siendo la dificultad principal una descripción adecuada del flujo helicoidal y el producto de éste, es decir, su impacto sobre el cauce de los ríos. Las modificaciones de las formas en planta y de las formas de la sección transversal, en conjunto con las variaciones en la morfología del río debido a la sedimentación y la erosión, causan profundas fosas de erosión a lo largo de la curva cóncava de los ríos. En consecuencia, la margen externa en una curva podría colapsar durante una avenida, causando potencialmente daños substanciales a la propiedad e infraestructura ubicadas a lo largo de dichas márgenes. En las últimas décadas se ha mejorado de forma importante el entendimiento del proceso físico en curvas no cerradas, no abruptas. Sin embargo, en muchos ríos del mundo —incluyendo varios de los ríos del Perú (ver figura 1)— están presentes las curvas abruptas o cerradas, y el fenómeno físico en esta clase de curvas hasta ahora no ha sido investigado en profundidad. Las curvas en los ríos son consideradas cerradas o abruptas cuando la relación entre radio de curvatura,  $R$ , y el ancho,  $B$ , es inferior a tres.

**Palabras clave:** erosión, curvas abruptas, topografía del fondo del cauce, morfología de ríos, protección de márgenes, enrocado de protección, transporte de sedimentos, flujo helicoidal.

## Objetivo

El objetivo de la presente investigación, que se encuentra inspirado en las múltiples curvas abruptas de los ríos amazónicos del Perú (Alvarado-Ancieta y Ettmer, 2008), fue el estudio de: a) el flujo y la topografía del cauce en curvas cerradas o abruptas de ríos con un transporte predominante de material de fondo, y b) la influencia de las obras de protección de márgenes en la curva externa en un modelo experimental efectuado en laboratorio. Los objetivos del estudio incluyeron la determinación de la máxima erosión enfrente de la margen externa para las condiciones de equilibrio. Para reducir la complejidad del problema, se consideraron algunas restricciones al objetivo

de la investigación. En el canal se usó un ancho constante, se consideró que las márgenes no sufren erosión, que la curva es cerrada o abrupta ( $R/B = 1.5$ ) y, finalmente, que las condiciones límite son constantes en el tiempo. Los ensayos se ejecutaron bajo las condiciones de cauce móvil, fijo y parcialmente fijo, y no se efectuó el abastecimiento de sedimentos desde aguas arriba (producto de esto, que la erosión fuese estudiada en agua clara). Ambas clases de ensayos se ejecutaron con y sin obras de protección de margen. Los experimentos en una curva abrupta de laboratorio fueron realizados para proveer, tras los ensayos, adecuado material para el estudio de la erosión en curvas abruptas de ríos y, en el futuro, para su uso en un modelo matemático. La topografía de fondo fue medida

con bastante detalle y de la misma manera fue estudiada con minuciosidad la evolución de las diferentes secciones transversales topográficas en el tiempo. La erosión y formación de la barra de sedimentos se estudiaron haciéndolas adimensionales, usando para ello calados o tirantes normalizados. Otros aspectos estudiados incluyeron la pendiente transversal del fondo, la superficie de agua y los perfiles de niveles del cauce, la ubicación del talweg, y el transporte de sedimentos y formas de fondo. Con respecto a las características del flujo, se estudiaron los parámetros de flujo en curva, perfiles de velocidad e isotacas, la componente del flujo lateral y las celdas de circulación secundarias. Con respecto al estudio de la turbulencia del flujo, se consideró tratar éste posteriormente. Además, la investigación experimental se ejecutó de manera eficaz mediante la disposición de un velocímetro acústico doppler (ADV) tridimensional, además de uno bidimensional. Asimismo, la respuesta de la topografía de fondo medida en una curva abrupta de río se estudió usando el análisis de adaptación del flujo y del cauce de Struiksmá *et al.* (1985), y se concluyó que esta aproximación no es aplicable bajo las condiciones de ratios

muy bajos de transporte de sedimentos y altas condiciones de curvatura. Las aparentes condiciones tridimensionales de flujo en curvas abruptas son muy diferentes de las condiciones de flujo quasi-bidimensional, en las cuales estuvo basado el análisis de Struiksmá. Las pendientes transversales de fondo medidas resultaron aceptables bajo el cálculo del método de predicción de Odgaard (1984). En el modelo experimental, también se estudió la influencia de las obras de protección de margen a lo largo de la curva externa. Se estudiaron dos tipos de protección de margen, descritas aquí como protección de margen flexible una y protección de margen rígida la otra, habiendo sido ambas elaboradas de enrocado (rip-rap) o escollera. Es así que una protección de enrocado (simulando una protección en la naturaleza) fue modelada como una protección de margen flexible (ver figura 2), y una losa horizontal de escollera conectada a la curva externa fue concebida como una protección de margen rígida.

Durante los experimentos, la protección de escollera y la losa horizontal de escollera se colocaron en diferentes posiciones verticales con respecto al nivel del fondo en la curva. Se observó y analizó el impacto de las obras de



Figura 1. Río Ucayali. Izquierda, vista aérea (fuente: H&O, 2004). Derecha, vista por satélite (fuente: © Google Earth 2007).



Figura 2. Izquierda y centro, protección de margen flexible y rígida con rip-rap (o escollera), respectivamente, en el modelo experimental. Derecha, medición de velocidades con ADV tridimensional y bidimensional.

protección sobre la profundidad de erosión y sobre el patrón del flujo. Los ensayos con escollera de protección se complementaron con el análisis de la pendiente de la escollera formada después de la erosión a lo largo de la margen externa de la curva.

### Introducción

Desde la antigüedad, el hombre utiliza ríos y valles para su provecho, sin embargo la incompreensión limitada al comportamiento de los ríos trajo y trae aún como consecuencia desastres naturales. Es por ello que con el fin de realizar un eficiente uso de los ríos y sus potenciales, es necesario alcanzar un mejor conocimiento de los ríos. Desde el punto de vista geomorfológico se distinguen tres tipos de forma en planta o geometría del cauce de un río: a) recto, alargado o regular; b) meandriforme, meándrico, sinuoso o serpenteante, y c) trenzado, anastomósico, divagante o ramificado. Entre los mencionados, la meandriforme ha sido estudiada con mayor detalle. Un cauce recto se encuentra rara vez en la naturaleza debido a sus condiciones inherentes de inestabilidad. Un cauce ramificado no se encuentra en todos los ríos. Tramos meandriformes con infinidad de curvas y una larga sinuosidad (curva suave, definida como la relación pendiente del valle/pendiente del cauce) se presenta en ríos de lecho aluvial. El

flujo en un río de condiciones meandriformes es muy complejo. La principal característica del flujo en una curva es la aparición con rip-rap (escollera), debido a la curvatura, de una fuerza centrífuga en la dirección perpendicular al flujo principal. Debido a la interacción entre las diferencias de niveles de las superficies de agua a lo largo de una curva externa, que es mayor que en la curva interna, se producen corrientes secundarias que inducen diferencias en presiones y diferencias en las velocidades de las partículas del fondo y de la superficie. Con frecuencia, las corrientes secundarias máximas son halladas en un punto que se encuentra entre el punto de máxima curvatura y el próximo punto de inflexión hacia aguas abajo. Como consecuencia, las partículas de fluido cercanas a la superficie experimentan una mayor fuerza centrífuga y son empujadas hacia el margen exterior, mientras que las partículas cercanas al fondo, sometidas a menor fuerza centrífuga, se dirigen hacia el margen interior. Cerca de los márgenes aparecen velocidades verticales, descendentes en el exterior y ascendentes en el interior, que cierran la circulación transversal de flujo, conocido como flujo secundario o flujo helicoidal, cuyo nombre se asocia con la propagación en forma de hélice, a lo largo del cauce, del flujo secundario debido a la velocidad longitudinal.

En los ríos, el caudal, la topografía y la forma o geometría en planta están interre-

lacionadas, y por lo tanto afectadas por la erosión de las márgenes, que es un fenómeno complejo influenciado por muchos factores, como el caudal en el río, transporte de sedimentos, topografía del cauce, propiedades de las márgenes, etcétera. Sin embargo, las propiedades principales planimétricas de un río meandriforme son gobernadas por el caudal. Los ríos meándricos poseen una característica deformación del cauce en la curva externa o cóncava, dando origen a una fosa erosiva, mientras que en la curva interna o convexa se origina la formación de una barra o llanura de acumulación de sedimentos. De esta manera, el talweg, la línea que conecta todas las máximas profundidades, se dibuja de una margen hacia otra. Los cauces son de profundidad relativa cerca de la margen externa en las curvas y son relativamente profundas en los cruces.

La necesidad de minimizar los efectos de las avenidas o de los movimientos del cauce del río sobre poblaciones o áreas de especial interés conduce a la construcción de encauzamientos y protecciones de márgenes. Estas protecciones deben diseñarse teniendo en cuenta las características del tramo de río en el que se sitúen: la estructura del flujo y de las erosiones. Debe considerarse también que la presencia misma de la protección modifica las condiciones para las que ha sido diseñada. Es preciso, pues, tener en cuenta estas interacciones a la hora de realizar un correcto dimensionamiento de la protección de margen. La estabilidad de la protección se asegura con el dimensionamiento de una cota de cimentación, que garantice que ésta no va a quedar al descubierto o descalzada. El valor de la cota se debe fijar bajo criterios geotécnicos, en función del material del lecho, y bajo criterios hidráulicos, de máxima erosión prevista. Como mínimo, la cimentación debería estar por debajo de la máxima erosión esperada. Otra variable importante en el dimensionamiento de la protección es la cota de coronación. Si se produce un rebase, los servicios o infraestructuras protegidos por la obra se verán afectados, llegando incluso a

peligrar la estabilidad misma de la protección por socavación en el trasdós. Para el correcto dimensionamiento de la cota de coronación es importante conocer la sobre elevación que aparece en una curva. El grado de turbulencia del flujo es otro factor a tener en cuenta, ya que puede provocar inestabilidades en elementos puntuales de los revestimientos de materiales sueltos. Además, una mayor turbulencia incrementa la capacidad erosiva debido a la aparición de flujos secundarios.

### Curvas abruptas en ríos del Perú

Los ríos de la amazonia peruana, ríos aluviales y de pendiente suave, son meandriformes, y en ellos se presenta una profunda erosión en la margen externa (curva cóncava) de las curvas de los ríos, y es precisamente en aquellas zonas donde se ubican poblaciones o infraestructura básica de desarrollo, siendo el principal problema la protección contra inundaciones debido a erosión de las márgenes externas débilmente protegidas, tal como ocurre en los tramos de población a lo largo de los ríos Marañón, Ucayali y Amazonas (ver figura 3). Tricart (1977) atribuye los numerosos cortes de meandros "cutoffs" en los ríos de la cuenca amazónica a la cantidad de sedimentos en suspensión. Los sedimentos que se depositan en la curva cóncava son fácilmente erosionados, en especial mediante la socavación que ocurre durante época de crecientes o avenidas. Sin embargo, la acumulación de sedimentos en suspensión sobre la curva convexa es mínima. Los meandros migran y se distorsionan hasta que colapsan por nuevos cortes de meandros.

El incremento creciente de infraestructura portuaria, terrestre y de defensa contra inundaciones en la amazonia peruana (ver figura 4) crea problemas con la forma o geometría en planta de los ríos, lo que hace necesario una adecuada protección de márgenes, así como una estimación de la profundidad de erosión a lo largo de la curva externa, debido tanto a las condiciones naturales de los ríos como a la necesidad de dichas obras de protección, las

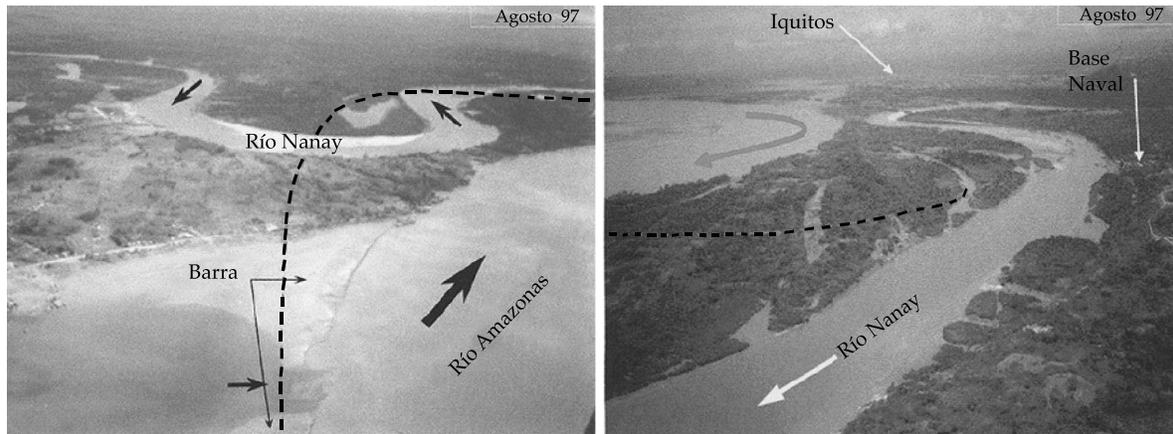


Figura 3. Confluencia del río Nanay con el Amazonas, Perú (1997). Obsérvese la característica meandriforme de ambos ríos, y la formación de la curva abrupta y posterior "cutoff" del río Nanay.



Figura 4. Izquierda, río Ucayali frente a Pucallpa, en curva abrupta (fuente: ©Google Earth, 2007). Derecha, incremento de infraestructura portuaria en Pucallpa, Perú (2004).

cuales imponen condiciones de borde para el diseño.

### Experimentos previos y comparación con la presente investigación

La información de la topografía del cauce en curvas de ríos es escasa, por esta razón se han llevado a cabo experimentos en laboratorio bajo condiciones controladas para estudiar de

forma cualitativa las condiciones en curvas. Experimentos relevantes se han efectuado en canales curvos y meándricos, como los desarrollados previamente por Yen (1967), Hooke (1970 y 1974), Suttmuller y Glerum (1980), Odgaard (1982), Struiksma (1985), Olesen (1987), Talmon (1992), Blanckaert y Graf (1999a y 1999b), y Blanckaert (2002). Los principales parámetros de los canales experimentales utilizados a la fecha han sido

tales como radio,  $R$ ; ancho del canal,  $B$ ; ángulo de la curva,  $\alpha$ ; tamaño medio de la partícula de sedimento,  $D_{50}$ ;  $R/B$  ratio; y el parámetro  $\lambda_s/\lambda_w$ ; este último determina la longitud de la onda del proceso de adaptación de la topografía del fondo del cauce e indica qué tan rápido se adapta, y se suaviza o aplana (en su banda de amortiguamiento) en el tiempo. Éste es un parámetro muy importante en el estudio de la formación de la barra de sedimentos en la curva interna. Los experimentos previos han sido ejecutados en canales curvos o meandriiformes, con un ángulo de curva,  $\alpha$ , variando entre 55 y 180°. Solamente unos cuantos experimentos se efectuaron con una relación  $R/B \leq 2.5$  o 3, y con un radio de curvatura en todos los casos mayor de 1.5 m, lo que significó una curva no abrupta. El tamaño medio característico utilizado en dichos experimentos varió entre 0.088 y 2.10 mm. En la figura 5 se presentan las características relativas al tamaño del material de fondo,  $D_{50}$ , versus la relación  $R/B$  utilizados

en experimentos previos y el actual (Alvarado-Ancieta, 2004), con punto rojo.

En la figura 6 se muestra la importancia del transporte de fondo y en suspensión distribuido sobre el calado, dependiendo de la relación entre la velocidad de tensión de corte (en el fondo) y la velocidad de caída de la partícula de sedimento,  $u_*'/w_s$ , y el tamaño del diámetro característico,  $D_{50}$ , de la arena. De acuerdo con Van Rijn (1993), para la presente investigación, la relación entre la tasa de sedimentos en suspensión y total,  $S_s/S_{total}$ , es de aproximadamente 0.1, lo que significa que el transporte de fondo es dominante, en comparación con experimentos previos, donde el transporte en suspensión era el dominante.

### Comparación de curvas abruptas con curvas suaves

Las curvas abruptas son diferentes que las curvas suaves (normales). De los experimentos

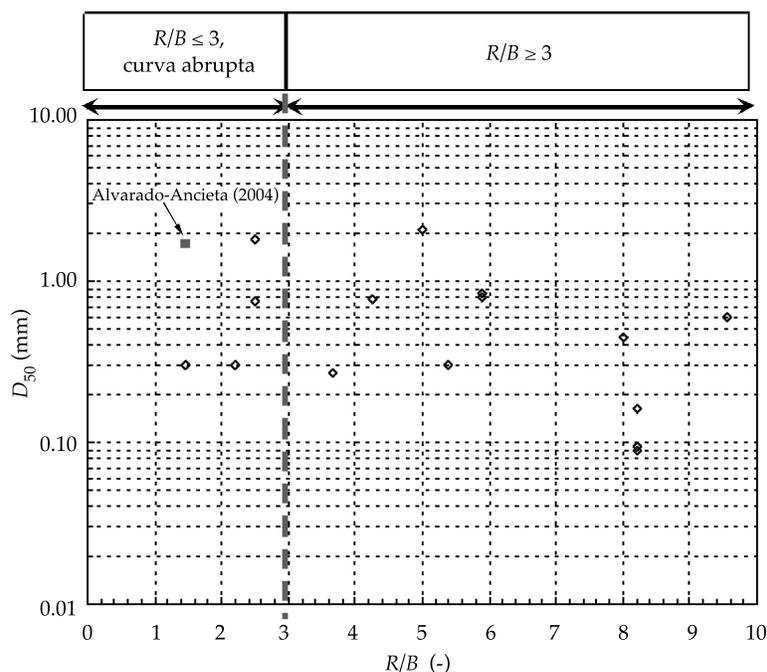


Figura 5. Tamaño característico del material de fondo,  $D_{50}$ , versus relación  $R/B$ , para experimentos previos y el actual (Alvarado-Ancieta, 2004) con cuadrado grande.

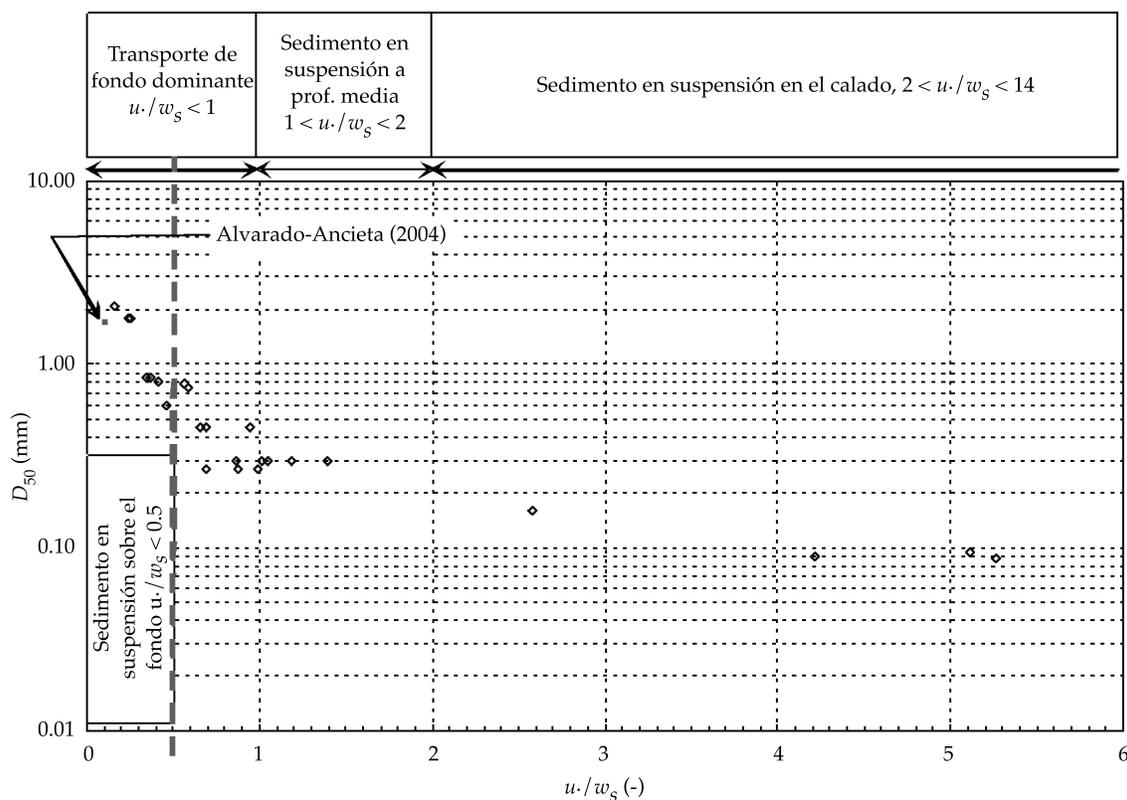


Figura 6. Rango de la carga de transporte de fondo y en suspensión, dependiendo de la relación  $u./w_s$ , y del tamaño característico de la partícula,  $D_{50}$ , de la arena para experimentos previos y el actual.

se tiene que para cauces horizontales, el caudal en curvas con una relación pequeña  $R/B$  de 2.5 tiende a transitar por la curva interna o convexa. En esta investigación se encontró que en las últimas etapas, el caudal tiende a transitar por la curva externa o cóncava. Al principio de todos los ensayos, el caudal inicialmente sigue la curva interna. Mediante este patrón inicial de flujo, el inicio de la curva interna es socavada y los sedimentos son transportados hacia aguas abajo, a lo largo de la curva interna, formando una barra de sedimentos.

Data registrada en una relación basada en calados máximos normalizados y relación  $R/B$  de experimentos previos (Talmon, 1992; Struiksma, 1985; Olesen, 1985; Yen, 1967; Hooke, 1974, 1970; Sutmuller y Glerum, 1980; Odgaard, 1982; Blanckaert y Graf, 1999a y 1999b), y de

esta investigación (ver figura 7) muestra que en curvas abruptas el calado máximo normalizado es aproximadamente superior a 2.0 (incremento en el valor), con una relación  $R/B$  menor a 3.0. En curvas suaves, el calado máximo normalizado es menor que 2.0 (detrimento en el valor), con una relación  $R/B$  superior a 3.0.

### Modelo experimental

El objetivo de la investigación es estudiar, a partir de datos experimentales, las características del flujo y la erosión en una curva cerrada. Una curva de fuerte curvatura es aquella cuya relación entre el radio de curvatura,  $R$ , y la anchura,  $B$ , es menor que 3. Para que los efectos de la curvatura se materialicen, el desarrollo de la curva debe

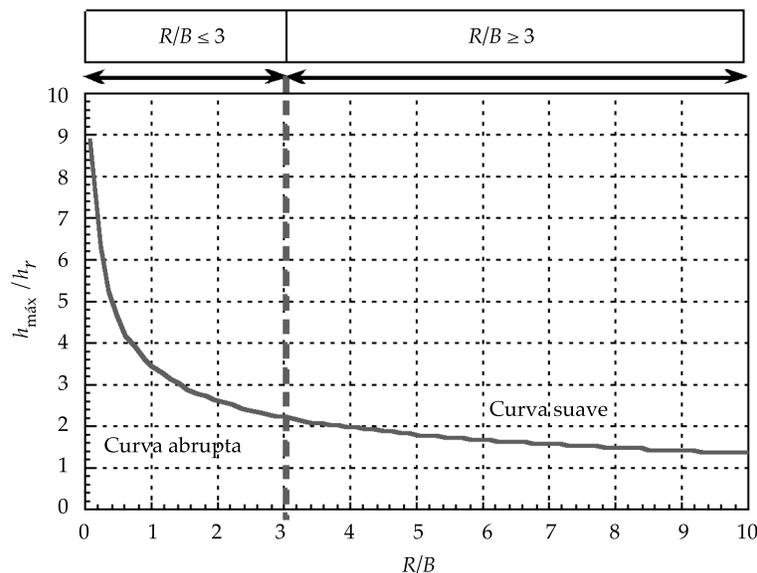


Figura 7. Calado normalizado máximo versus relación  $R/B$  para curvas abruptas y suaves (elaborado con data disponible de investigaciones previas y la actual).

ser lo suficientemente grande. La idea de desarrollo se cuantifica con el ángulo de la curva o con el parámetro de sinusidad. Las premisas básicas del trabajo experimental son que la relación  $R/B$  sea inferior a 3 y que el ángulo de desarrollo de la curva sea grande.

Si se cumplen estas condiciones, se considera que la curva es muy cerrada. Por las características de la instalación experimental (ver figura 8), y las posibilidades de estudio, las variables geométricas de la curva, una vez fijadas, permanecen constantes para todos los ensayos. Estas variables son el radio de curvatura,  $R$ ; la anchura del canal,  $B$ ; y el ángulo de la curva,  $\theta$ . Con un valor constante de la anchura del canal de un metro, calados menores a 0.20 m implican relaciones de  $B/h$  mayores que cinco. Se fija la anchura de la sección del modelo en un metro, para poder considerar que en la parte central de la sección se crea una zona independiente de las características de los respectivos márgenes. Con la anchura fijada, conseguir relaciones de  $R/B$  menores a tres implica que el radio debe

ser también inferior a tres. Dado el interés en estudiar curvas muy cerradas, se considera un radio de curvatura en el centro del canal de 1.5, inferior al de trabajos precedentes.

Para asegurar un desarrollo amplio de de la curva, se escoge un ángulo de  $186^\circ$ , valor fijado en parte por las posibilidades constructivas. La curva está unida en sus dos extremos a dos tramos rectos de igual anchura. El tramo recto de aguas arriba tiene una longitud de nueve metros, para asegurar una buena entrada de agua y el completo desarrollo de la capa límite turbulenta. El tramo de aguas abajo es de cinco metros, para garantizar que las condiciones locales de la salida del modelo no afecten al desarrollo de los fenómenos en la curva.

### Material de fondo

El material utilizado como fondo del canal es una arena de granulometría uniforme, ya que no es un objetivo de esta investigación estudiar la influencia de la distribución del material en el desarrollo de las erosiones. El material granu-

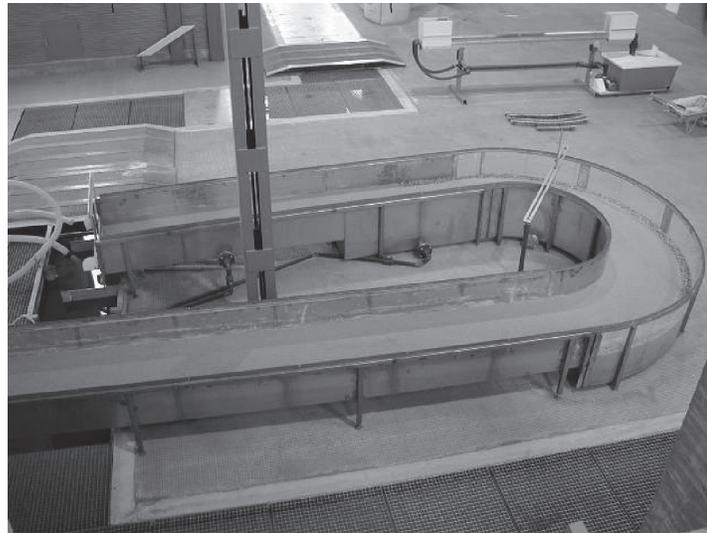
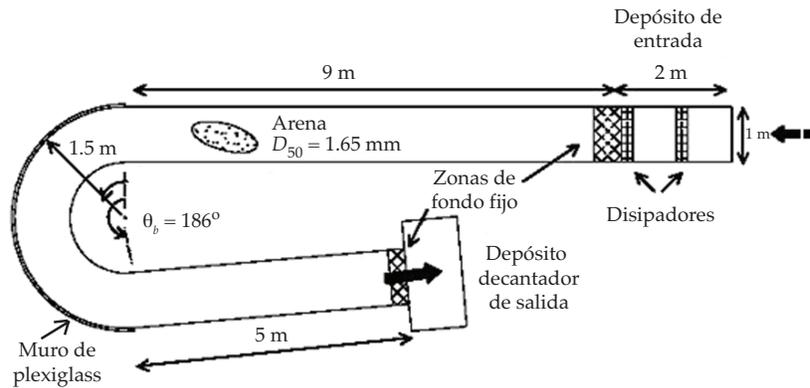


Figura 8. Vista general del modelo experimental.

lar utilizado es una arena silíceica de densidad de  $2\,650\text{ kg/m}^3$ . El tamaño de grano característico,  $D_{50} = 1.65$  mm, permite determinar el valor del parámetro de Shields de inicio de movimiento, que se sitúa en 0.036.

### Alcanzando el estado de equilibrio y la profundidad máxima de erosión

Inmediatamente tras el inicio de cada ensayo, un periodo inicial de erosión rápida es seguido por una etapa de equilibrio que se alcanza cuando la alteración del flujo producto de las fosas de erosión reduce la magnitud

de la tensión o esfuerzo de corte (en el fondo del cauce), de tal manera que la partícula de sedimento en el fondo no puede ser más movilizadora o removida de la fosa. Debido a la fluctuación de la turbulencia, la profundidad de la fosa erosiva variará aun hasta después de que se alcancen las condiciones de equilibrio. La diferencia entre ensayos de cauce vivo y agua clara es en particular referida al tiempo requerido para alcanzar el equilibrio, puesto que el primer tipo de ensayo es más rápido que el segundo. También hay una diferencia en la configuración del cauce en el estado de equilibrio, donde las formas de fondo para

ensayos en cauce vivo originan una oscilación de la erosión máxima alrededor de un estado de equilibrio dinámico (ver figura 9). Sin recirculación de sedimentos (ensayos de agua clara), el material del fondo del cauce es gradualmente erosionado y transportado hacia el tramo final del canal de ensayo, decreciendo en el tiempo el volumen de transporte de sedimentos. Al alcanzarse el estado de equilibrio, el transporte de las partículas ha cesado y el volumen de sedimentos permanece constante. Las condiciones de equilibrio son alcanzadas tal como se muestra en las figuras 9 y 10 del ensayo test 1, sin protección de margen.

### Simulación de la protección de margen en la curva externa (cóncava)

En esta investigación se estudió el efecto de la protección sobre la curva externa mediante una protección flexible y una protección rígida. La protección flexible fue concebida de enrocado, mientras que la protección rígida fue ideada mediante una losa horizontal cubierta de enrocado. El dimensionamiento de este enrocado fue preparado mediante los diversos métodos existentes para el diseño de escolleras. Se colocó una protección de enrocado flexible

sobre la margen externa, aplicando un ancho de protección,  $b = 10.5$  cm, y un espesor de capa inicial,  $e = 4.5$  cm. Posteriormente, este espesor fue reducido a uno de  $e = 3$  cm, con el objetivo de no introducir una nueva variable en la investigación, puesto que la losa horizontal tuvo un espesor de 3 cm.

Una capa más gruesa del enrocado de protección podría tener una mayor influencia que la deseada sobre la protección de margen externa. La protección de margen flexible fue implementada sin tener una conexión clásica a un talud por medio de dos puntos: conexión pie de talud-tope de talud; en otras palabras, sin una cara en talud expuesta. Bajo esta consideración, se adoptó una sección rectangular, con el objetivo de estudiar: a) el comportamiento del enrocado colocado como el descrito para la protección de la curva; b) como el talud de aguas arriba de la protección de margen que se forma de manera natural durante los ensayos; c) como cada pieza de la escollera tras la erosión y formación del talweg, que se desplaza de su posición original, cubriendo el talud que se va formando hacia la margen externa del talweg; d) el espaciamiento entre cada escollera, y e) como a pesar de que cada pieza de la escollera dista una distancia

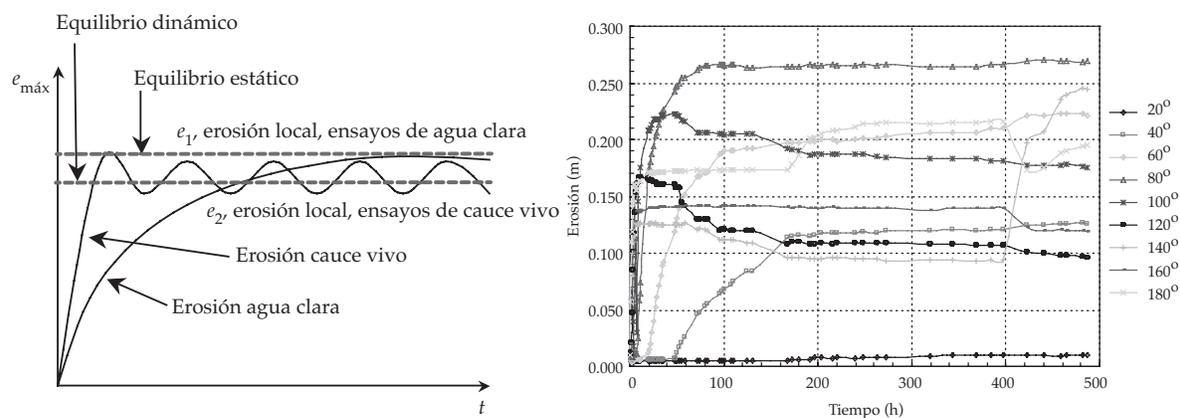


Figura 9. Izquierda, tiempo de equilibrio y máxima erosión en ensayos de agua clara y cauce vivo (abastecimiento de sedimentos) en ensayos de erosión local (Hoffmans y Verheij, 1997). Derecha, tiempo de equilibrio y profundidad máxima de erosión a lo largo de la curva abrupta en ensayos de agua clara sin protección de margen, ensayo test 1.

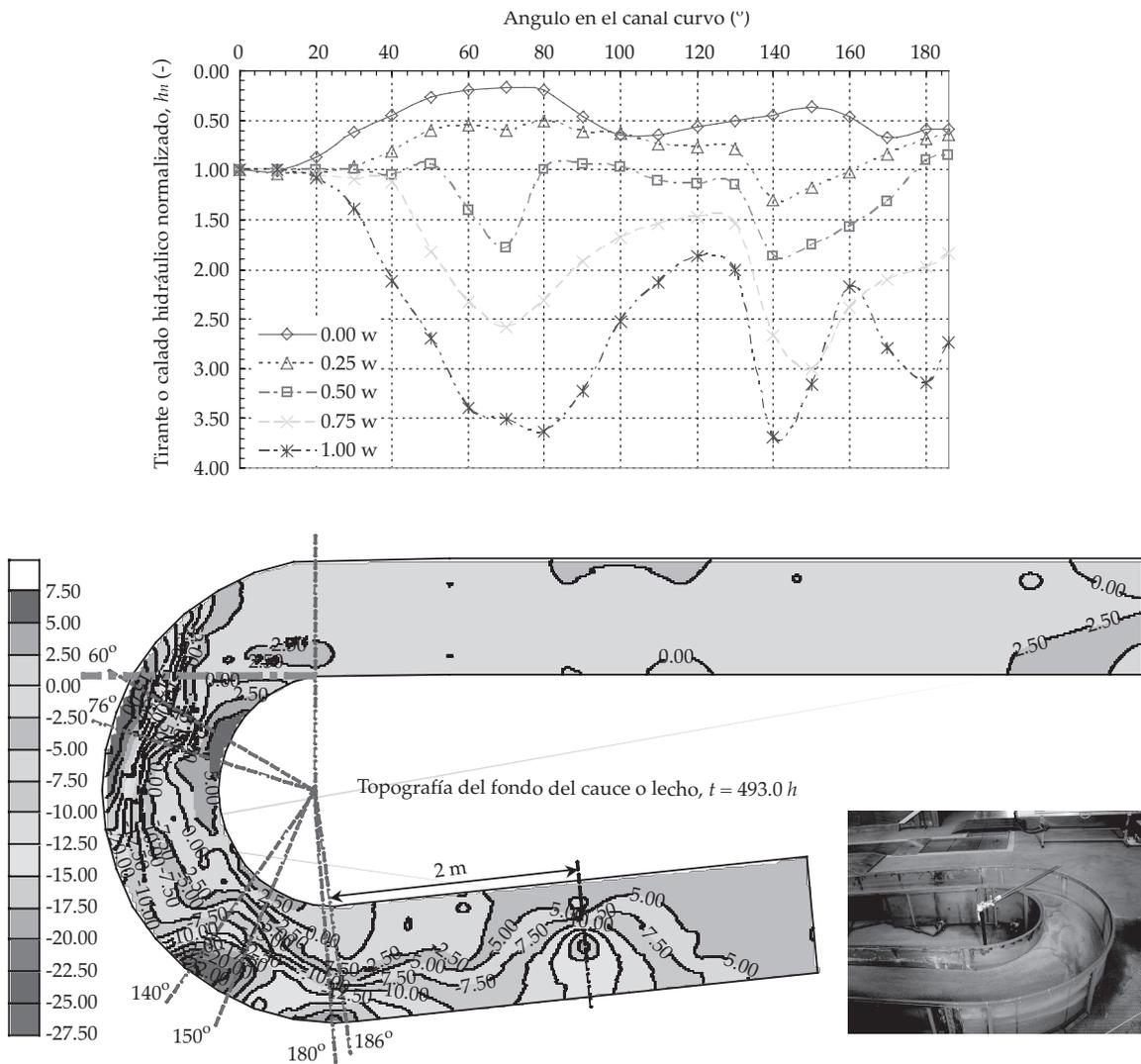


Figura 10. Descripción de la topografía de fondo del cauce o lecho, y profundidad máxima de erosión a lo largo de la curva abrupta en ensayos de agua clara sin protección de margen, ensayo test 1.

una de otra, éstas continúan protegiendo la margen externa de la curva. El enrocado de protección flexible es colocado a mano. El espesor total de la capa de la protección consistió de dos subcapas, una capa inferior de rocas de color naranja, con un diámetro medio de 0.50 cm debajo de la subcapa de enrocado de color natural de 4 cm de diámetro (ensayo preliminar test 6-1) y de 2.50 cm de diámetro (para los ensayos test 6-2, 6-3 y 6-7). La capa de rocas de color naranja de 0.50 cm de espesor fue concebida para trabajar como filtro, y

por ello estas rocas naranjadas tuvieron un diámetro  $D_{50}$  mucho menor que el de la capa superior. Sin embargo, debido al problema que suscita tener un tamaño  $D_{50}$  del material de filtro muy pequeño y que como consecuencia de los ensayos se mezcle con el material de fondo, arena, el tamaño  $D_{50}$  de la escollera de color naranja se incrementó y el requerimiento de tener un filtro no se tomó en cuenta.

Con respecto a la idea de una protección de margen rígida, su objetivo es simular la fundación de un muro de contención similar

al que se dispone en áreas urbanas, donde no se tiene suficiente espacio para una protección de margen, como se requiere para una protección de enrocado (ver figura 11). En el caso de una protección de margen rígida, ésta se hizo viable mediante una losa horizontal de espesor y ancho similar que la protección de margen flexible,  $e = 3$  cm y  $b = 10.5$  cm. La losa (ver figura 11) fue concebida de 3 cm de espesor y cubierta de rocas similares a la protección flexible. La losa estuvo hecha de PVC, y sus dimensiones fueron de 1 cm de espesor y 10 cm de ancho. La cara expuesta de la losa horizontal se cubrió con rocas de color naranja de menor dimensión, tal como lo descrito anteriormente para el caso del filtro. En la figura 12 se presenta la protección de margen utilizada en los ensayos tanto para una protección flexible como rígida. El ancho de la protección es de aproximadamente el 10% del ancho del canal experimental, y su elevación vertical corresponde a una profundidad de 0, 33 y 67% de la máxima profundidad de erosión con respecto a la elevación inicial del fondo del cauce.

El cuadro 1 resume las principales características de los diferentes ensayos con protección de margen, especificando espesor, elevación y tipo de protección.

## Campaña de ensayos

Durante la investigación se ejecutaron 13 ensayos. Estos ensayos fueron divididos en dos grupos: ensayos sin protección de margen (5) y ensayos con protección de margen (8). Posteriormente, estos últimos fueron subdivididos en ensayos con protección flexible (5) mediante enrocado o escollera, y ensayos con protección rígida (3) mediante una losa horizontal cubierta de escollera, tal como se detalló antes.

El primer ensayo fue de larga duración, concebido hasta alcanzar el equilibrio, con el objetivo de estudiar las características del flujo y la erosión en una curva abrupta. Después del primer ensayo, el objetivo de los subsiguientes con protección flexible y rígida fue el mismo. Los ensayos se ejecutaron en esta investigación sin suministro de sedimentos al canal, lo que significó que fueran del tipo erosivo en agua clara. Este tipo de ensayos son más atractivos desde el punto de vista que se evita las formaciones de fondo, y también para impedir problemas debido a recirculación y distribución de sedimentos en la entrada del canal experimental. Sin las formaciones de fondo se pretenden obtener formaciones de barra de sedimentos en la margen interna de la curva similares a las que se pueden apreciar

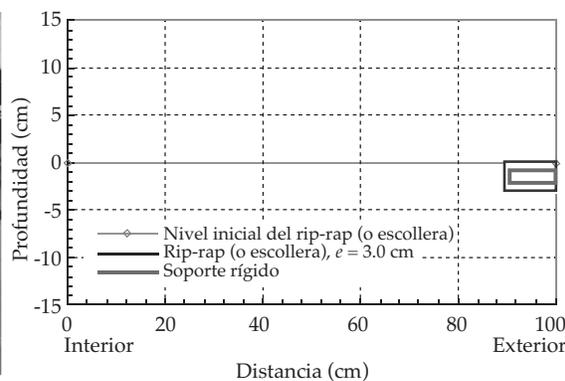


Figura 11. Izquierda, río Piura, Perú. Protección de margen mediante un muro de contención en zona urbana. Derecha, detalle del modelo de protección de margen rígida en la curva externa.

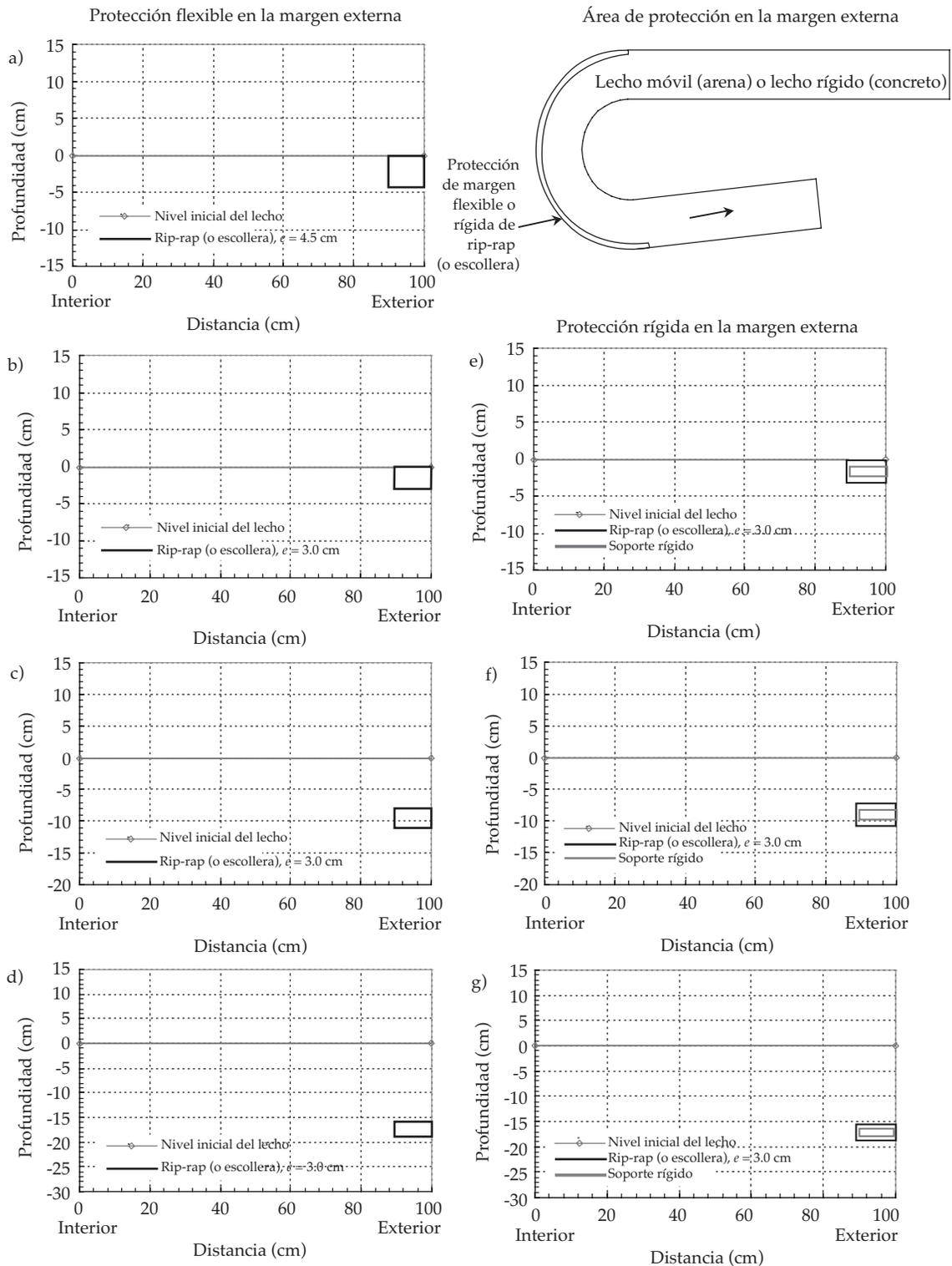


Figura 12. Modelo de protección en la curva externa: ensayos a) test 6-1, b) test 6-7, c) test 6-2, d) test 6-3, e) test 6-4, f) test 6-5 y g) test 6-6.

Cuadro 1. Data específica de los ensayos con protección de margen.

Ensayo test núm.	Caudal (L/s)	Tipo de protección de margen	Espesor (cm)	Elevación (%)	Tipo de lecho
5	41.5	Flexible	4.5	0	Fijo
6-1					Móvil
6-7					
6-2			3.0	33	
6-3		67			
6-4		Rígido	0		
6-5			33		
6-6			67		

en la naturaleza en los ríos en sus tramos intermedios. Sin embargo, es de notar que el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio en los ensayos de erosión en agua clara es mucho más largo que en los ensayos erosivos en cauce vivo. El concepto completo de esta aproximación es el estudio de la erosión en curvas como un fenómeno de erosión local. En Roca-Collel (2003) se concluyó que las condiciones de erosión en ensayos de agua clara y cauce vivo son prácticamente similares, debido a que las condiciones de flujo en la curva abrupta fueron más decisivas que otras condiciones, como el suministro continuo de sedimentos durante los ensayos. Los ensayos en cauce vivo muestran pequeñas escalas de formas de fondo que los ensayos de agua clara, pero las condiciones de fosas de erosión y profundidades máximas de erosión no difieren. Por ello, siendo el objetivo el estudio de la profundidad máxima de erosión en la curva cóncava, los ensayos se efectuaron sin suministro de sedimentos, es decir, ensayos de agua clara.

## Resultados

### *Presentación y comparación de resultados*

Aquí se presentan y comparan los más importantes tópicos observados durante los

ensayos, tales como topografía del cauce; formación de la barra de sedimentos; erosión; ubicación del talweg e influencia de la protección de margen, sección y pendiente transversal del fondo; pendiente de la protección de margen; tiempo necesario para alcanzar el equilibrio y erosión máxima; transporte de sedimentos; respuesta de la topografía del fondo; superficie del agua; flujo en curva, y distribución de la velocidad.

En el cuadro 2 se presentan los parámetros medidos más relevantes durante los ensayos.

### *Topografía del cauce*

La topografía del cauce es descrita como la deformación del fondo, producto de los cambios de la pendiente lateral del fondo, donde las principales características observadas durante los ensayos fueron la formación de la barra de sedimentos en la curva interna y la evolución de la fosa de erosión en la curva externa tanto en los ensayos sin protección como en los ensayos con protección flexible y con protección rígida.

La barra de sedimentos es formada a lo largo de curva interior en todos los ensayos con o sin protección de margen entre las secciones transversales de 20° y 186°, prolongándose hasta 1.00 m aguas abajo de la curva (ver figura 13).

Como parte de la oscilación amortiguada de la pendiente lateral del fondo y el asociado pico

Cuadro 2. Parámetros de los ensayos.

	Tests								
	1	6-1	6-7	6-2	6-3	6-4	6-5	6-6	
<b>Principales características y parámetros</b>									
Tiempo, $t$ (h)	493.0	104.9	130.8	124.4	101.3	129.5	106.0	154.3	
Tiempo, $t$ (día)	20.5	4.4	5.5	5.2	4.2	5.4	4.4	6.4	
Caudal, $Q$ (m <sup>3</sup> /s)	0.0415								
Ancho del canal, $B$ (m)	1.00								
Radio de la curva, $R$ (m)	1.50								
Ángulo de la curva, $\alpha^\circ$	186.00								
Tipo de ensayo	Agua clara								
Tipo del fondo del lecho	Móvil								
Pendiente inicial del fondo del lecho, $i$ (-)	0.000								
Protección de margen	no	si							
Tipo de protección de margen	-	Flexible (protección de enrocado rip-rap o escollera)				Rígida (losa horizontal de enrocado rip-rap o escollera)			
Material de protección de la margen	-	Enrocado rip-rap o escollera							
Característica del tamaño del enrocado, rip-rap, $D_{50}$ (cm)	-	2.45							
Espesor de la protección de margen, $e$ (cm)	-	4.5	3.0						
Ubicación de la protección de margen	-	A lo largo de la curva externa (de 0° a 186°) + 0.75 m aguas abajo							
Nivel de la protección de margen con respecto al nivel inicial del fondo del lecho (cm)	-	0.0	0.0	-7.8	-15.7	0	-7.8	-15.7	
Material del fondo del lecho	Arena								
<b>Transporte de sedimentos y parámetros hidráulicos</b>									
Diámetro de la partícula de arena, $D_{50}$ (mm)	1.65								
Diámetro de la partícula de arena, $D_{50}$ (m)	0.00165								
Diámetro de la partícula de arena, $D_{90}$ (mm)	2.20								
Diámetro de la partícula de arena, $D_{90}$ (m)	0.0022								
Tirante o calado hidráulico promedio en la sección transversal, $h$ (m)	0.144	0.113	0.118	0.128	0.129	0.137	0.129	0.130	
Pendiente promedio de la superficie del agua en la sección transversal $i$ (-)	0.0011	0.0008	0.0008	0.0008	0.0007	0.0008	0.0008	0.0008	
Velocidad del flujo, $u$ (m/s)	0.289	0.367	0.352	0.323	0.322	0.302	0.322	0.319	
Numero de Froude, $Fr$ (-)	0.243	0.349	0.327	0.288	0.286	0.260	0.286	0.282	
Coefficiente de Chézy, $C$ (m <sup>1/2</sup> /s)	22.98	38.66	36.23	31.87	33.82	28.84	31.67	31.26	
Esfuerzo cortante, $\tau$ (kg/m <sup>2</sup> )	0.158	0.090	0.094	0.103	0.090	0.110	0.103	0.104	
Esfuerzo cortante, $\tau$ (N/m <sup>2</sup> )	1.580	0.903	0.943	1.028	0.904	1.098	1.032	1.041	
Temperatura del agua, $T_w$ (°C)	12.0		24.0	12.0					
Densidad del agua, $\rho_{\text{agua}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000.00								
Densidad de la arena, $\rho_{\text{arena}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2650.00								
Densidad relativa, $\Delta$ (-)	1.650								
Parámetro de Shields, $\theta = \tau / (\rho_{\text{arena}} - \rho_{\text{agua}}) * g * D_{50}$ (-)	0.0592	0.0338	0.0353	0.0385	0.0338	0.0411	0.0386	0.0390	
Viscosidad, $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	0.000001								
Velocidad cortante en el fondo del lecho, $\mu^*$ (m/s)	0.0394	0.0298	0.0304	0.0318	0.0298	0.0328	0.0318	0.0320	
Numero de Reynolds, $Re = \mu^* D / \nu$ (-)	64.97	49.12	50.19	52.39	49.12	54.16	52.50	52.72	

Cuadro 2 (continuación). Parámetros de los ensayos.

		Tests							
		1	6-1	6-7	6-2	6-3	6-4	6-5	6-6
<b>Principales características y parámetros</b>									
Velocidad de caída de la partícula, $\omega_{arena}$ (m/s)		0.1850							
Distribución del sedimento suspendido con respecto a la profundidad, $\mu^* / \omega_{arena}$ (-)		0.2128	0.1609	0.1644	0.1716	0.1609	0.1774	0.1720	0.1727
$\delta = 11.6 * v / \mu$ (-)		0.00029	0.00039	0.00038	0.00037	0.00039	0.00035	0.00036	0.00036
Altura de la rugosidad efectiva - Nikuradse, $\kappa_{arena} = 3D_{90} + \delta$ (-)		0.00689	0.00699	0.00698	0.00697	0.00699	0.00695	0.00696	0.00696
Coeficiente de Chézy, C (m <sup>1/2</sup> /s)		43.16	41.18	41.52	42.21	42.22	42.74	42.24	42.31
<b>Parámetros del flujo en la curva</b>									
De aguas arriba hacia aguas abajo	1ª máxima profundidad de erosión en la curva, $h_{cmáx1}$ (m)	0.252	0.173	0.166	0.167	0.203	0.217	0.220	0.225
	Ubicación de la 1ª máxima profundidad de erosión, ángulo de la curva (°)	80	50	70	50	70	80	70	70
	2ª máxima profundidad de erosión en la curva, $h_{cmáx2}$ (m)	0.259	0.188	0.171	0.175	0.208	0.218	0.189	0.211
	Ubicación de la 2ª máxima profundidad de erosión, ángulo de la curva (°)	140	180	170	186	180	186	160	186
	3ª máxima profundidad de erosión en la curva, $h_{cmáx3}$ (m)	0.210	-	-	-	-	-	-	-
	Ubicación de la 3ª máxima profundidad de erosión, ángulo de la curva (°)	180	-	-	-	-	-	-	-
Máximo tirante o calado hidráulico en la curva, $h_{máx}$ (m)		0.347	0.236	0.229	0.259	0.284	0.301	0.296	0.306
Tirante o calado hidráulico promedio en la curva, $h_m$ (m)		0.137	0.113	0.117	0.116	0.123	0.134	0.126	0.120
Tirante o calado hidráulico promedio en el tramo aguas arriba de la curva, $h_{tramo\ aguas\ arriba}$ (m)		0.104	0.104	0.106	0.103	0.100	0.107	0.102	0.099
Tirante o calado hidráulico normalizado, $h_n = h_m / h_{tramo\ aguas\ arriba}$ (-)		1.318	1.090	1.100	1.131	1.227	1.252	1.238	1.219
Relación $B/h_m$ (-)		7.30	8.84	8.54	8.62	8.12	7.49	7.92	8.32

de profundidad, se localizaron dos picos en los ensayos: uno ubicado cerca de los 80° y otro a la altura de los 140° en la curva.

En los diferentes ensayos ejecutados, el pico de profundización se desarrolló en la curva externa y en el tramo recto de aguas abajo (ver figura 14). Como consecuencia del tipo de protección de margen utilizado y la posición o elevación de la misma con respecto al fondo del cauce, se logró en los ensayos con protección de margen flexible una desviación del talweg de aproximadamente 25 cm alejado de la curva externa, mientras que en los ensayos con protección de margen rígida no se obtuvo una

desviación del talweg, sino una socavación de la protección (ver figuras 15, 16 y 17). La figura 18 detalla el ensayo test 6-7.

### *Profundidad máxima de erosión*

En la figura 19 se presenta la profundidad máxima de erosión registrada en los ensayos para  $t = 100$  h.

En el ensayo test 1 (ensayo sin protección de margen) se registró la máxima profundidad de erosión, alcanzando los 25 cm. De hecho, durante todos los ensayos con protección de margen, las profundidades de erosión fueron

reducidas significativamente. La reducción de la profundidad de erosión es una función del espesor y elevación en la que se sitúa la protección de margen (ver cuadro 3).

### *Ubicación del talweg e influencia de la protección de margen*

El talweg en curvas se ubica en la curva externa o cóncava. En el ensayo test 1, sin protección de margen, el talweg se ubicó a lo largo de la curva externa. En los ensayos test 6-1, test 6-2, test 6-3 y test 6-7 con protección flexible con base en escollera y a lo largo de la curva externa, se logró que el talweg fuese desviado hacia el eje del canal. La desviación del talweg es de hecho la principal influencia de una protección de margen flexible. En los ensayos test 6-4, test 6-5 y test 6-6 con protección rígida con base en escollera y a lo largo de la curva externa, se produjo una socavación de la protección, tal como se aprecia en la figura 20, entre los ángulos 120 y 180°.

En el ensayo test 6-7 se alcanzó una desviación del talweg de aproximadamente

31.5 cm, medido desde la margen externa. En la figura 20 se presenta la ubicación del talweg para  $t = 100$  h. En el cuadro 4 y la figura 21 se presenta la desviación del talweg para  $t = 100$  h. Aparentemente, no se observaron mayores cambios en la ubicación final del talweg después de  $t = 100$  h para todos los ensayos con protección de margen.

### **Secciones transversales y pendiente transversal del fondo**

Del análisis efectuado de secciones transversales (ver figura 22), se observó la diferencia existente entre una protección de margen flexible y una rígida.

En una margen con protección flexible se forma un talud (ensayo test 6-7), el mismo que va evolucionando, y por dicha acción el talweg es desviado, afectando en la reducción de la erosión, en comparación con el ensayo test 1. En cambio, en el ensayo test 6-5, con protección rígida, la losa de escollera es socavada y no se logra la desviación del talweg de la margen externa al interior del canal.

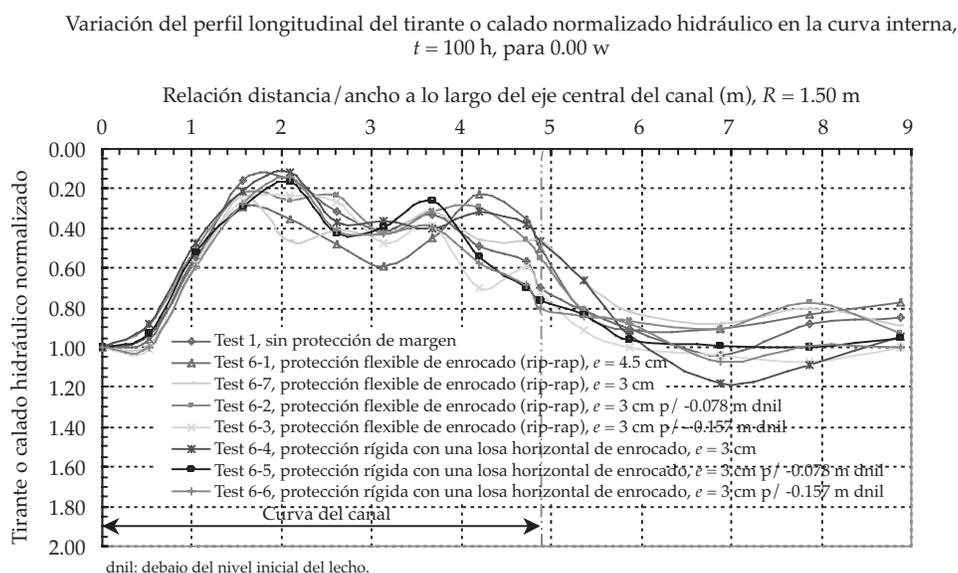


Figura 13. Perfil longitudinal del tirante o calado hidráulico normalizado en la curva interna para  $t = 100$  h.

Variación del perfil longitudinal del tirante o calado normalizado hidráulico en la curva interna,  $t = 100$  h, para  $1.00 w$

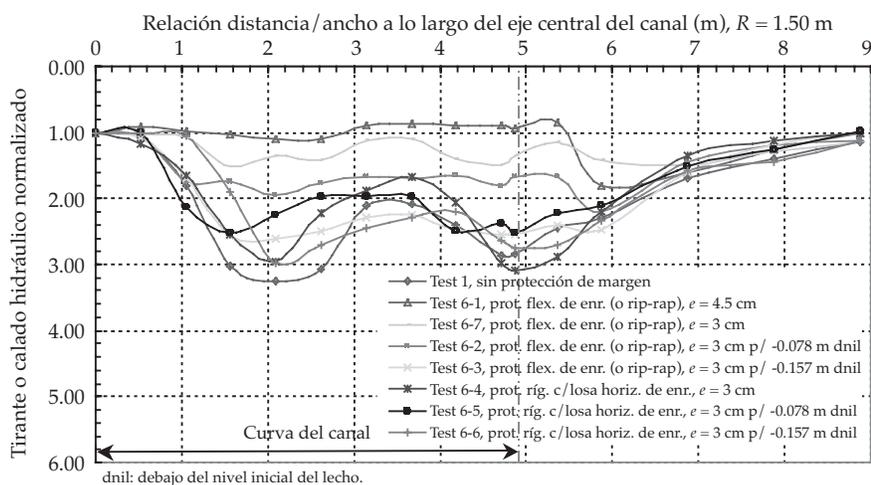


Figura 14. Perfil longitudinal del tirante o calado hidráulico normalizado en la curva externa para  $t = 100$  h.

Variación del perfil longitudinal del tirante o calado normalizado hidráulico en la curva interna,  $t = 100$  h, para  $0.75 w$

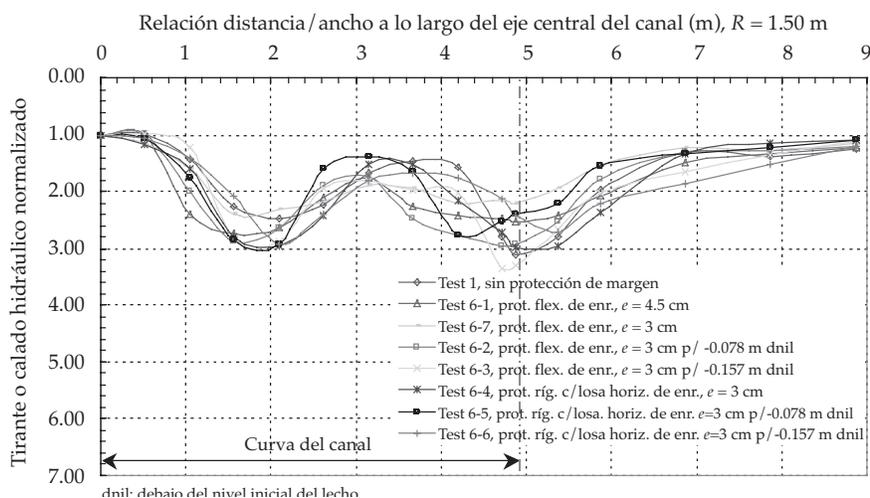


Figura 15. Perfil longitudinal del tirante o calado hidráulico normalizado en la curva a  $0.75 w$  para  $t = 100$  h.

### Talud de la protección de margen flexible

Se analizó el talud de la protección de margen flexible, obteniéndose que para los ensayos con protección al ras del nivel del cauce (test 6-7), el talud es mucho más suave que cuando la

protección se ubica a 7.8 cm (test 6-2) o 15.7 cm (test 6-7) de profundidad del ras del nivel del cauce.

También se analizó cuando la protección de margen es al ras del fondo, pero con un mayor espesor, es decir, una protección más pesada

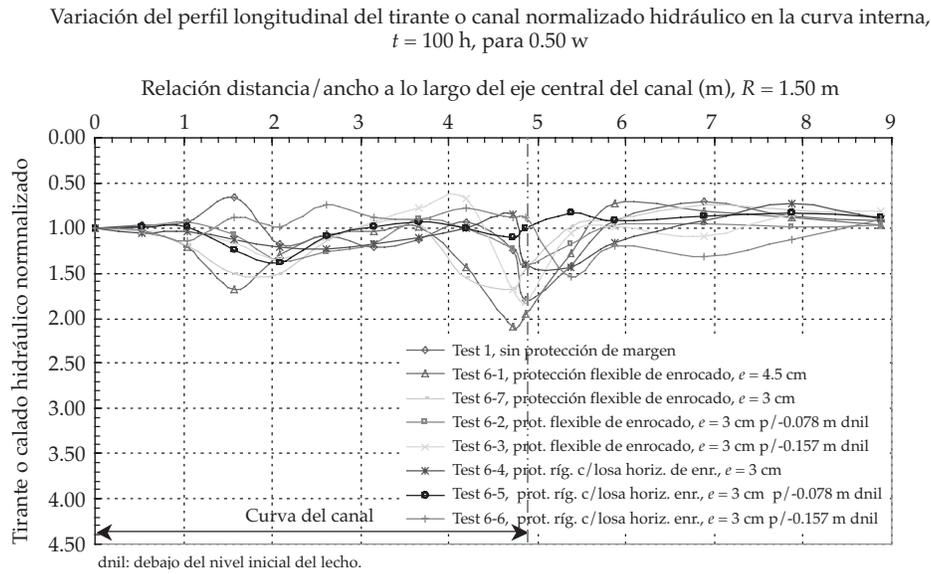


Figura 16. Perfil longitudinal del tirante o calado hidráulico normalizado en la curva a  $0.50 w$  para  $t = 100$  h.

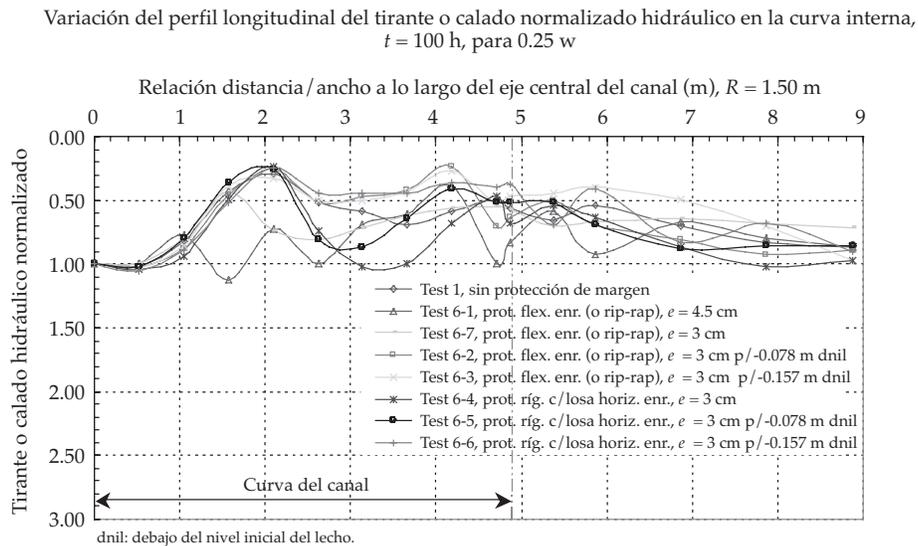


Figura 17. Perfil longitudinal del tirante o calado hidráulico normalizado en la curva a  $0.25 w$  para  $t = 100$  h.

(test 6-1). Los detalles se observan en las figuras 23 y 24.

**Tiempo de equilibrio y profundidad máxima de erosión**

La profundidad máxima de erosión fue alcanzada para  $t = 100$  h aproximadamente

en todos los ensayos (ver figura 25). Después dicha profundidad no se modificó.

**Transporte de sedimentos-parámetro de Shields**

El parámetro de Shields se encuentra relacionado con el tiempo de equilibrio, el cual



Variación del perfil longitudinal del tirante o calado normalizado hidráulico en la curva interna,  $t = 130.8$  h

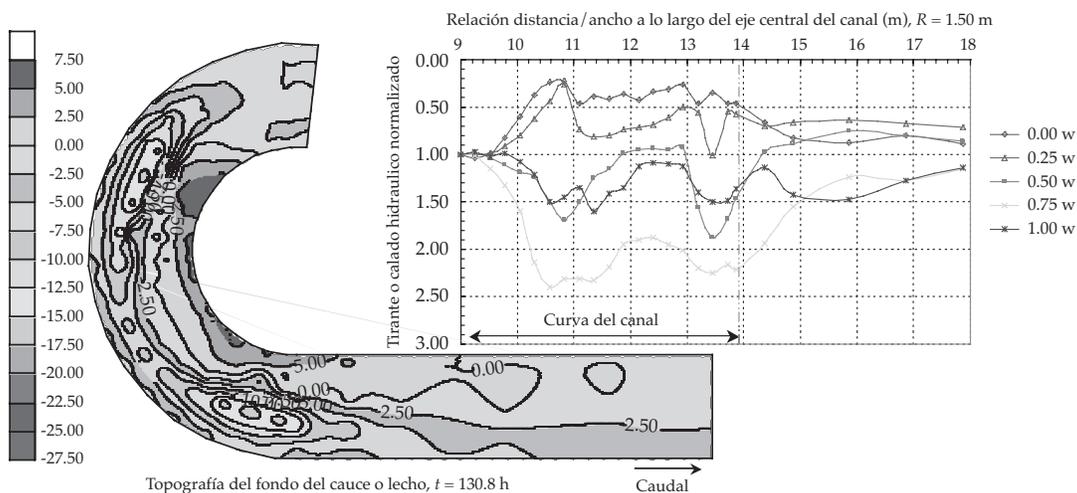
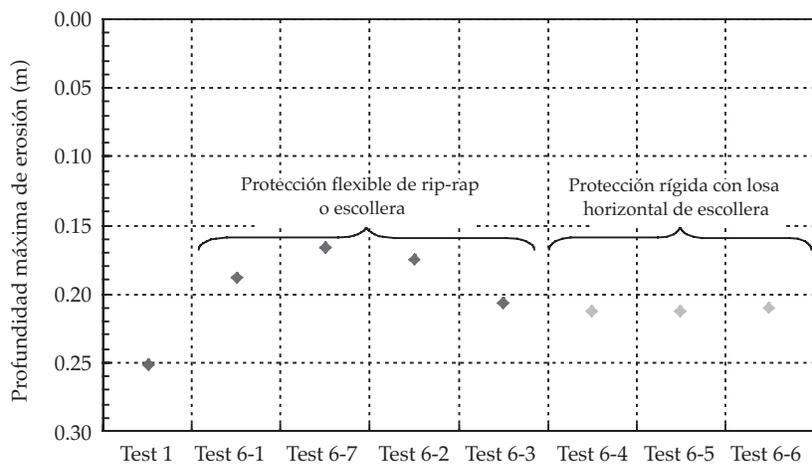


Figura 18. Arriba, vista fotográfica; abajo, descripción de la topografía de fondo y profundidad máxima de erosión a lo largo de la curva abrupta en ensayo de agua clara, con protección de margen flexible de escollera (ensayo test 6-7).



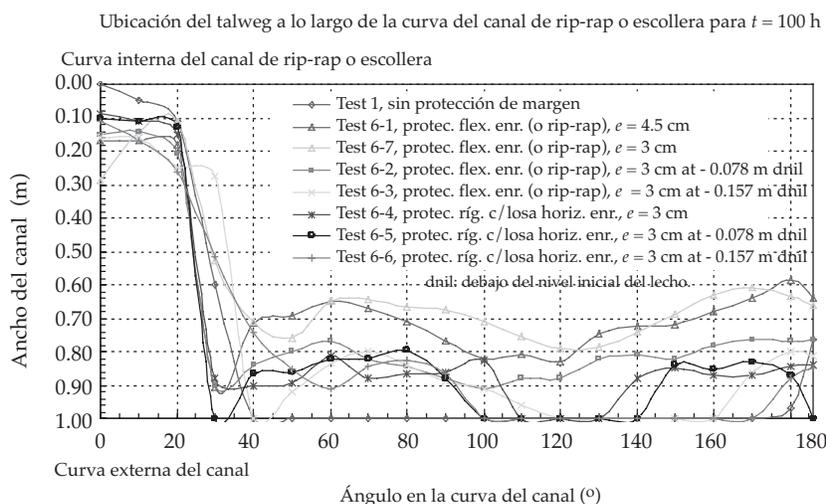
- Test 1, sin protección de margen
  - Test 6-1, prot. flex. enrocado (o rip-rap),  $e = 4.5$  cm
  - Test 6-7, prot. flex. enrocado (o rip-rap),  $e = 3$  cm
  - Test 6-2, prot. flex. enrocado (o rip-rap),  $e = 3$  cm p/-0.078 m dnll
  - Test 6-3, prot. flex. enrocado (o rip-rap),  $e = 3$  cm p/-0.157 m dnll
  - Test 6-4, prot. ríg. c/losa horiz. enr.,  $e = 3$  cm
  - Test 6-5, prot. ríg. c/losa horiz. enr.,  $e = 3$  cm p/-0.078 m dnll
  - Test 6-6, prot. ríg. c/losa horiz. enr.,  $e = 3$  cm p/-0.157 m dnll
- dnll: debajo del nivel inicial del lecho.

Figura 19. Profundidad máxima de erosión en los ensayos para  $t = 100$  h.

Cuadro 3. Porcentaje de reducción de la erosión mediante el uso de protección de margen a diferentes posiciones de elevación,  $t = 100$  h.

Ensayo test núm.	Protección de margen	Tipo de protección de margen	Espesor de la protección de margen (cm)	Elevación (m)	Elevación %	Erosión (m)	% Erosión	% Reducción de erosión
1	No	-	-	-	-	0.252	100.0	-
6-1	Sí	Flexible *	4.5	0.000	0.0	0.188	74.7	25.3
6-7		Rígida **	3.0			0.166	66.0	34.0
6-4			0.213			84.6	15.4	
6-2	Sí	Flexible	3.0	-0.078	33.0	0.175	69.7	30.3
6-5		Rígida				0.213	84.6	15.4
6-3	Sí	Flexible	3.0	-0.157	67.0	0.207	82.2	17.8
6-6		Rígida				0.210	83.5	16.5

\* Protección de margen flexible: protección de escollera; \*\* protección de margen rígida: losa horizontal de escollera.

Figura 20. Ubicación del talweg a lo largo de la curva externa para  $t = 100$  h.

quedó confirmado al final de los ensayos de protección de margen flexible, alcanzándose el valor de 0.036 (ver figura 26).

### Flujo en curvas

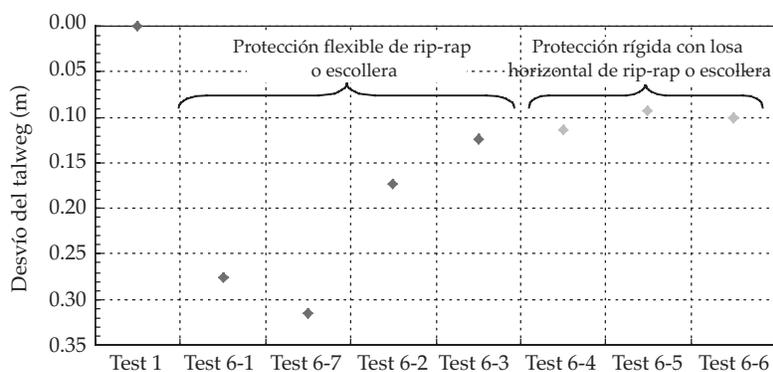
En curvas, el flujo es helicoidal. En los ensayos se observaron patrones típicos del flujo helicoidal (ver figura 27).

Los vectores de velocidad muestran las componentes del flujo lateral y no del helicoidal.

Los componentes de la velocidad lateral deben ser divididos en dos contribuciones: la parte relacionada con la redistribución del flujo lateral y el flujo helicoidal propiamente dicho.

Cuadro 4. Desvío promedio del thalweg mediante el uso de protección de margen a diferentes elevaciones,  $t = 100$  h.

Ensayo test núm.	Protección de margen	Tipo de protección de margen	Espesor de la protección de margen (cm)	Elevación (m)	Elevación %	Desvío promedio (m)
1	No	-	-	0.000	0.0	0.000
6-1	Sí	Flexible	4.5	0.000	0.0	0.276
6-7		Flexible	3.0			0.315
6-4		Rígida				0.113
6-2	Sí	Flexible	3.0	-0.078	33.0	0.173
6-5		Rígida				0.092
6-3	Sí	Flexible	3.0	-0.157	67.0	0.123
6-6		Rígida				0.101



Test 1, sin protección de margen  
 Test 6-1, prot. flex. enr. (o rip-rap),  $e = 4.5$  cm  
 Test 6-7, prot. flex. enr. (o rip-rap),  $e = 3$  cm  
 Test 6-2, prot. flex. enr. (o rip-rap),  $e = 3$  cm p/-0.078 m dnil  
 Test 6-3, prot. flex. enr. (o rip-rap),  $e = 3$  cm p/-0.157 m dnil  
 Test 6-4, prot. ríg. c/losa horiz. enr.,  $e = 3$  cm  
 Test 6-5, prot. ríg. c/losa horiz. enr.,  $e = 3$  cm at - 0.078 m dnil  
 Test 6-6, prot. ríg. c/losa horiz. enr.,  $e = 3$  cm at - 0.157 m dnil  
 dnil: debajo del nivel inicial del lecho.

Figura 21. Desvío promedio del thalweg.

### Distribución de la velocidad

En otros estudios de flujo en curvas (De Vriend, 1971), las velocidades en dirección aguas abajo ( $V_x$ ) se incrementan en dirección hacia la margen externa y el núcleo de velocidades máximas se localiza en la parte inferior de la

columna de agua junto a la margen externa. Esto se confirmó en los ensayos ejecutados.

El núcleo de máximas velocidades se ubica en un rango de relación de profundidad de entre 0.10 a 0.20  $z/h$ , lo que significa muy cerca del fondo del cauce, tal como se aprecia en las figuras 28 y 29.

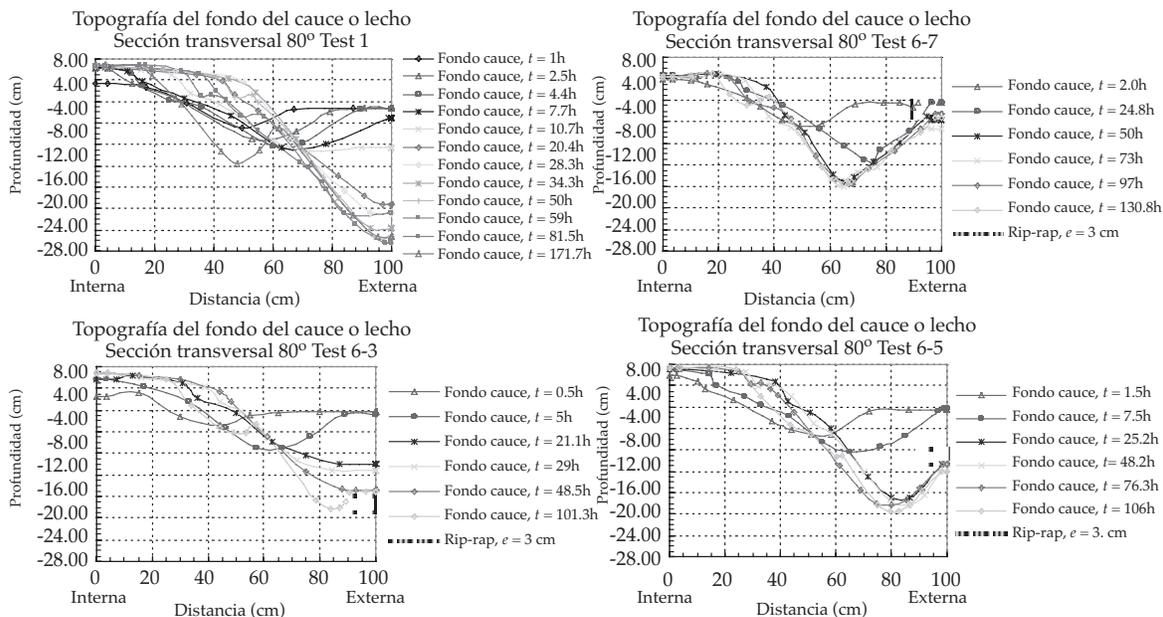


Figura 22. Comparación de la evolución de las secciones transversales del fondo del cauce o lecho para los ensayos test 1, test 6-7, test 6-3 y test 6-5.

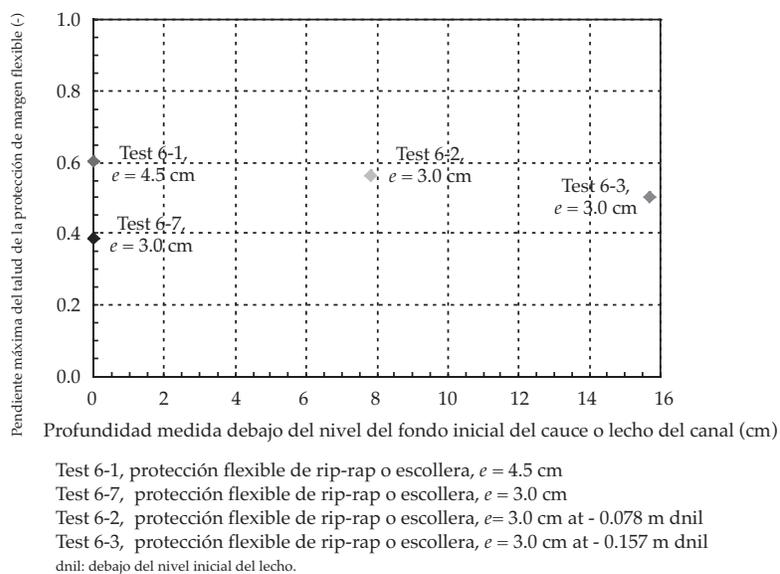


Figura 23. Talud máximo de la protección de margen flexible.

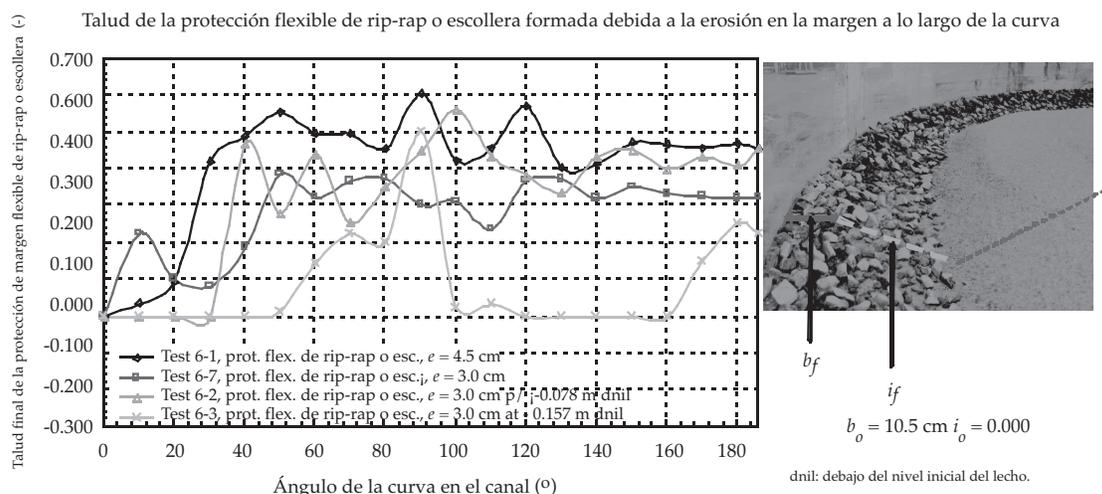


Figura 24. Variación del talud de la protección de margen flexible de rip-rap o escollera a lo largo de la curva externa.

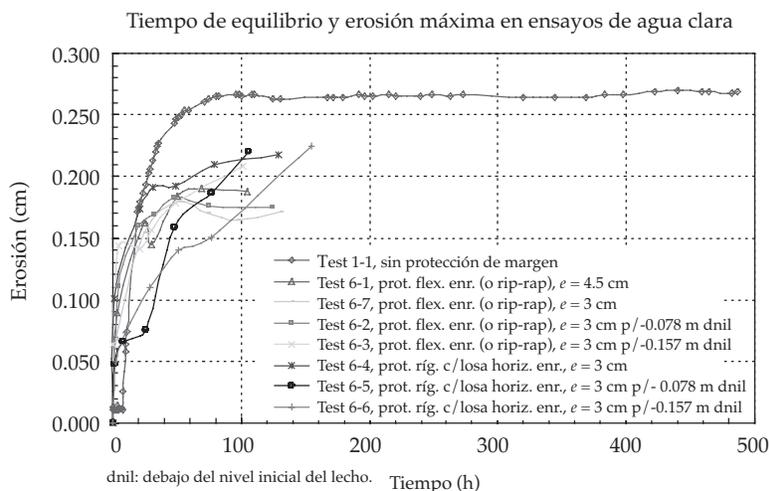


Figura 25. Tiempo de equilibrio y profundidad máxima de erosión en ensayos de agua clara.

Además, se ha confirmado que la distribución de velocidades en una curva no es más logarítmica.

**Profundidad máxima de erosión versus relación B/R para aplicación a condiciones de campo**

De los datos registrados en los ensayos se obtuvo las siguientes relaciones que permitieran establecer la profundidad máxima

de erosión en curvas abruptas mediante la derivación de la fórmula de Fargue (1907) (ver figura 30). Las fórmulas para la predicción de la profundidad máxima de erosión y su aplicación a condiciones de campo se presentan en las conclusiones.

**Conclusiones**

1. En una curva abrupta, las líneas de corriente no pueden seguir los límites curvilíneos y

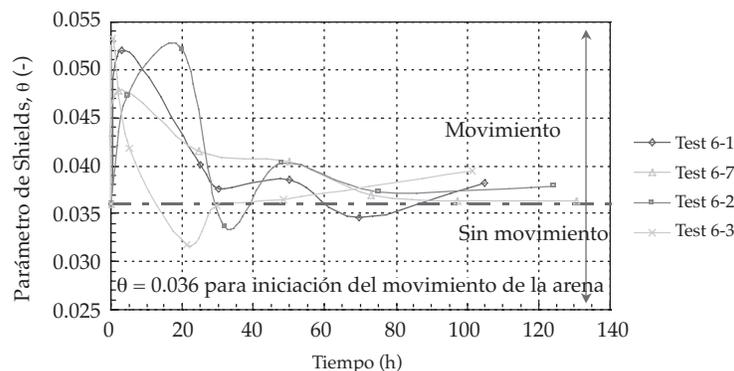


Figura 26. Variación del parámetro de Shields en los ensayos con protección de margen flexible de rip-rap o escollera.

por consiguiente ocurre un distanciamiento con respecto a estos límites debido al fenómeno del flujo secundario como el flujo turbulento. Éste inicia la deposición de sedimentos en las zonas de circulación más lenta que se observan notoriamente en la curva interna. Esta turbulencia forma un patrón de flujo curvo, similar a aquel que se produce en una curva menos abrupta. Por consecuencia, un patrón de flujo similar resulta en el flujo helicoidal, en el que las líneas de corriente sobre la superficie del agua y el fondo del cauce son direccionadas hacia la curva externa desde el centro de rotación y hacia el centro de rotación, respectivamente. En todos los ensayos se forma un área profunda desde el inicio de la curva a lo largo del margen interno hasta más abajo del final de la curva. Además, se forman dos barras de sedimentación, las cuales son el producto de la oscilación de la pendiente lateral del fondo del cauce. El asociado pico de profundidad "overdeepening" se presenta en dos regiones, las cuales fueron ubicadas entre los 20° antes del fin del primer y segundo cuadrantes de la curva. La socavación se desarrolla en la curva externa, al final de la curva, y se extiende en el tiempo en la dirección hacia aguas abajo. Al mismo tiempo, una fosa de erosión evoluciona en

la margen interna, al inicio de la curva, y se mueve en el transcurso del tiempo de aguas arriba hacia aguas abajo y hacia la curva externa, siendo esta socavación primero alcanzada por la erosión que se forma en la curva interna. Los dos puntos máximos de profundidades en la curva externa coinciden en ubicación con los puntos pico observados en la curva interna.

- En los ensayos sin protección de margen, la barra de formación de sedimentos y las fosas de erosión se desarrollan en dos fases. Se observaron dos áreas de inicio de movimiento de las partículas de arena en el fondo del cauce al inicio de los ensayos. Uno se ubicó en la margen interna al principio de la curva y el otro se localizó en la margen externa al final de la curva.
- El potencial de la técnica de protección de margen flexible fue demostrado con efectividad. La profundidad de erosión se ve reducida mediante la protección de margen. La reducción más significativa fue alcanzada mediante la aplicación de una protección flexible, mientras que con una protección rígida, el resultado fue inferior. El porcentaje de reducción de erosión en los ensayos con enrocado de protección o protección flexible fue el doble de la reducción obtenida para los ensayos con protección rígida. Además, la profundidad

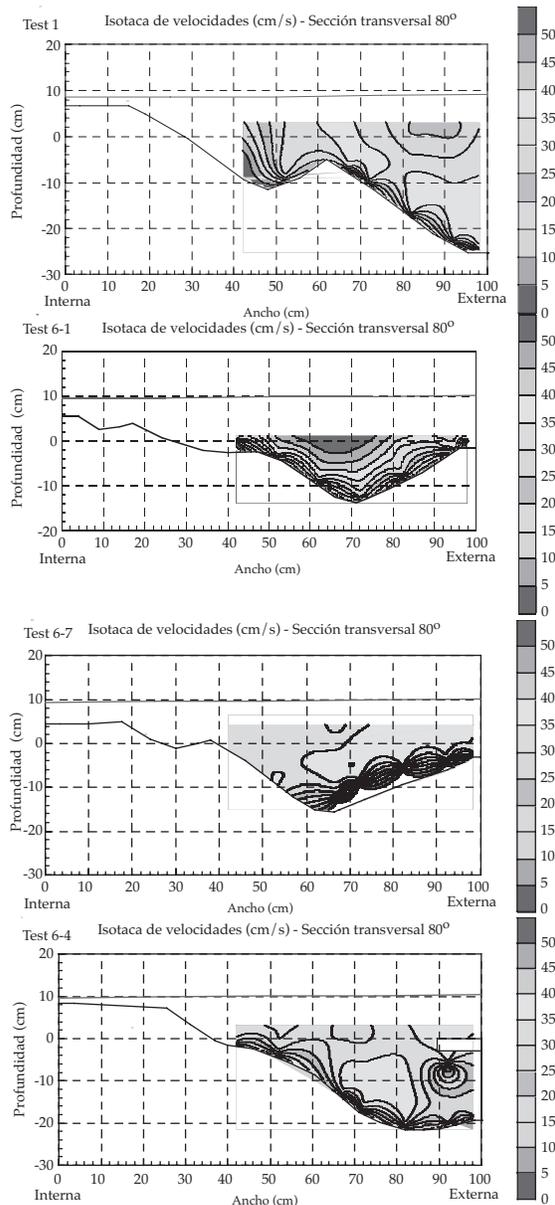
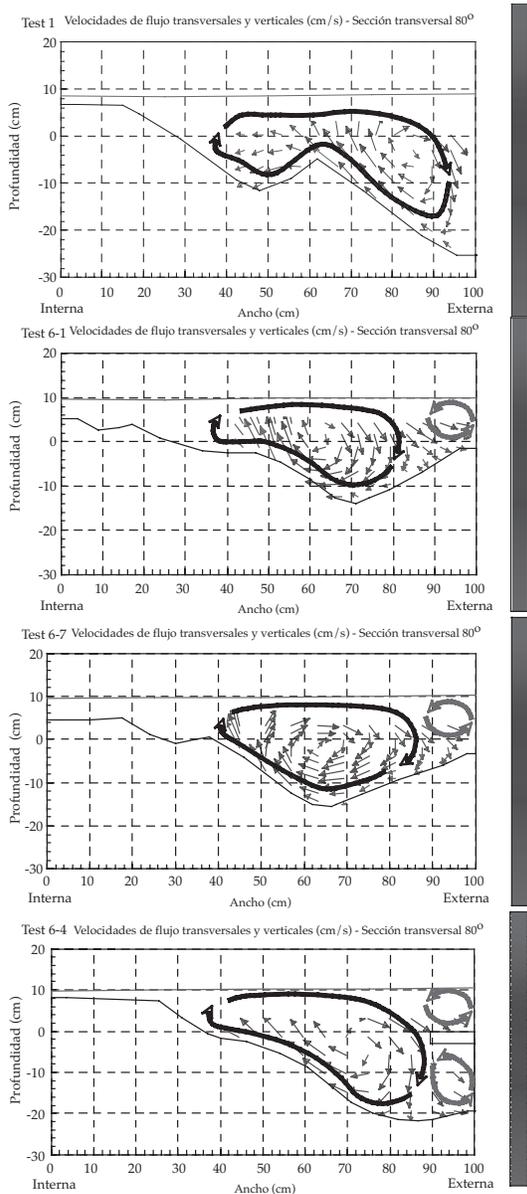


Figura 27. Componentes de la velocidad del flujo lateral ( $V_x$ ,  $V_y$ ) - ensayos test 1 (sin protección de margen), test 6-1, test 6-7 (protección de margen flexible de rip-rap o escollera) y test 6-4 (protección de margen rígida de rip-rap o escollera).

Figura 28. Isotaca de velocidades ( $V_x$ ) - ensayos test 1 (sin protección de margen), test 6-1 y test 6-7 (protección de margen flexible de rip-rap o escollera), y test 6-4 (protección de margen rígida de rip-rap o escollera).

de erosión se reduce de manera significativa cuando la protección es colocada al nivel del cauce original, que cuando es colocada a un nivel inferior.

4. Se efectuó una comparación entre las profundidades de erosión medidas y estimadas conforme varias fórmulas

empíricas, que parecen estimar la profundidad máxima de erosión en curvas abruptas, en vez de aplicar un promedio de la profundidad de erosión sobre el total de la longitud de la curva; por tal razón, estas fórmulas se sitúan sobre el lado de la seguridad. El uso de valores promedio

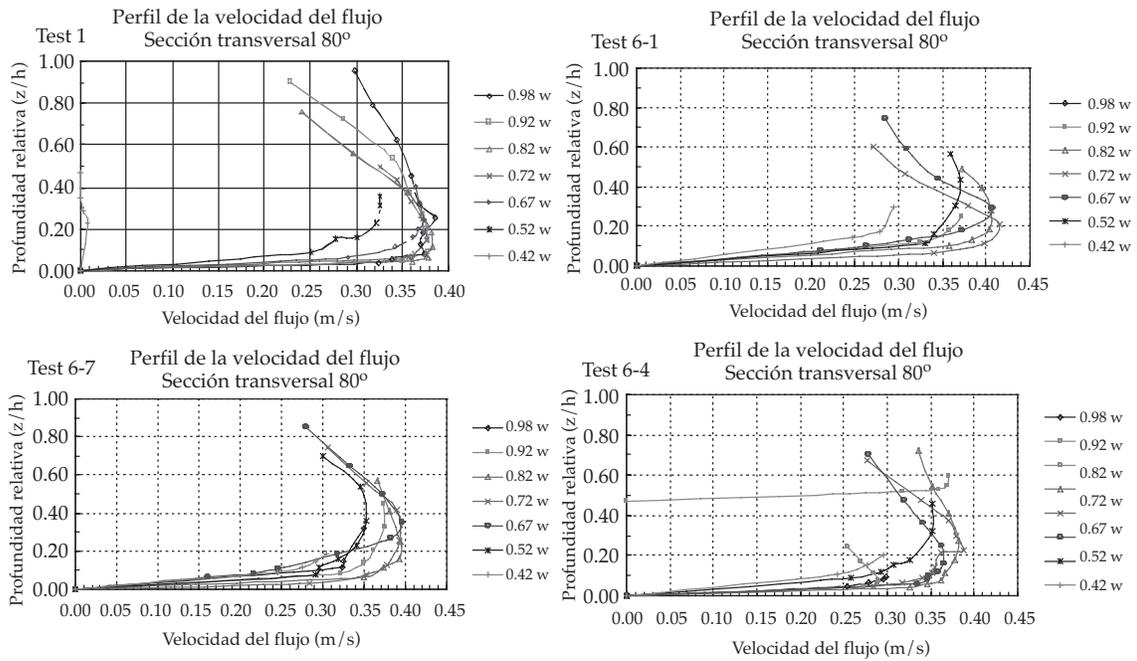


Figura 29. Perfil de la velocidad de flujo ( $V_z$ ) - ensayos test 1, test 6-1 y test 6-7 (protección de margen flexible de rip-rap o escollera), y test 6-4 (protección de margen rígida de rip-rap o escollera).

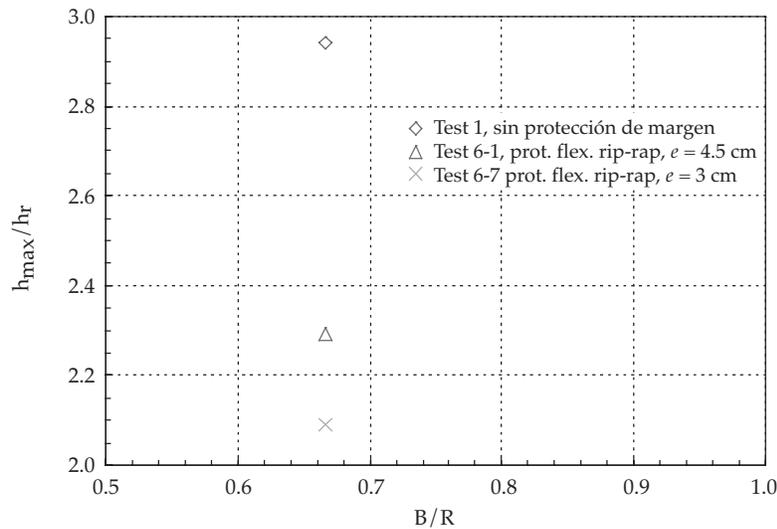


Figura 30. Relación de profundidad máxima de erosión *versus* relación B/R.

de profundidad de erosión podría resultar en una menor estimación de la misma en la curva externa, en particular cuando el ancho del cauce podría cambiar después de

que los trabajos de protección de margen se hayan implementado o construido.

5. Con base en los datos registrados, se han establecido para una curva abrupta dos

fórmulas de predicción de la profundidad máxima de erosión (de la derivación de la fórmula de Fargue, 1907):

$$\frac{h_{\text{máx}}}{h} = 1 + 3 \left( \frac{B}{R} \right) \dots\dots\dots$$
 curva abrupta sin protección de margen

$$\frac{h_{\text{máx}}}{h} = 1 + 2 \left( \frac{B}{R} \right) \dots\dots\dots$$
 curva abrupta con protección de margen flexible de rip-rap, enrocado o escollera

6. Estas dos fórmulas se consideran aplicables para la predicción de la profundidad máxima de erosión. Sin embargo, los ensayos efectuados, cuando son comparados con las condiciones de campo, se desvían de forma considerable en los ríos en la naturaleza. Primero, el número de Shields es mucho menor y, segundo, la relación de aspecto (relación ancho/ profundidad) es mucho menor. En efecto, estos experimentos son llevados a cabo en un modelo de distorsión alta. Esto implica que la formación de la barra de sedimentos no puede ser reproducida a escala. Otros aspectos que podrían estar sujetos al efecto de escala son, por ejemplo, la erosión en agua clara y la densidad del enrocado en el talud. Sin embargo, de la fórmula de predicción propuesta es posible la predicción de la profundidad máxima de erosión de los ríos en la naturaleza con base en un análisis del porcentaje de erosión. Las fórmulas de predicción propuestas han sido aplicadas en la contribución del temario "Morfología fluvial y erosión en curvas abruptas del río Ucayali, Perú" (Alvarado-Ancieta y Ettmer, 2008).
7. El análisis a la respuesta de la topografía del cauce con una barra de formación de sedimentos y pico de profundidad "over-deepening", como es estimado mediante la teoría de Struiksma *et al.* (1985), no sería aplicable bajo las condiciones con que fueron efectuados los ensayos, esto es, una baja tasa de transporte de sedimentos y curva muy abrupta. Queda claro que la

aproximación de Struiksma no es relevante en el caso de curvas abruptas. En curvas abruptas, el cambio del perfil vertical de velocidad es bastante importante. Las fosas de erosión son probablemente explicadas por la fuerte tensión de corte, la cual ocurre debido a la influencia del flujo secundario sobre el momento de transferencia y sobre el perfil vertical de velocidad (fuertes tensiones de corte sobre el fondo). Un análisis más exhaustivo basado en los niveles de turbulencia y el patrón de flujo durante los ensayos probablemente mostrará que las extremas condiciones de flujo tridimensionales son bastante diferentes de las condiciones de flujo bidimensionales como asumidas en el análisis de Struiksma. Las condiciones axisimétricas no son alcanzadas al final de la curva. Estas condiciones en el tramo de aguas abajo no permitieron estudiar ningún ondulado cuando se alcanzó el equilibrio.

8. La pendiente transversal del cauce fue más fuerte en los ensayos sin protección de margen que en los ensayos con protección. Se hizo una comparación mediante la fórmula de la pendiente transversal del fondo del cauce propuesta por Odgaard (1984), la cual dio buenos resultados. La expresión de Odgaard fue comparada con la fórmula propuesta por Van Bendegom (1947). Se prefirió la ecuación propuesta por Odgaard. Se observó una pendiente transversal del fondo más suave en los ensayos con protección flexible cuando se comparó con los ensayos con protección rígida.
9. El talud de la protección de margen es mucho más fuerte que la pendiente transversal del fondo debido a la rugosidad del enrocado "launching apron". La fijación del margen externo mediante una protección, la cual está siendo erosionada, induce a un fuerte talud en la sección transversal, por ende a una profundidad más grande al pie de la estructura. Sin embargo, la disposición de la protección flexible sin talud "launching

apron" induce a un talud fuerte en la protección de margen, pero no a una profundidad muy grande, comparada con los ensayos sin protección de margen. Para la desviación del fondo del cauce, talweg, la fórmula desarrollada por NEDECO (1959), considerando velocidad de desviación y la tasa de transporte de sedimentos (ver Jansen, 1979) es aparentemente no aplicable para la predicción final del talud. Esta fórmula se aplica sólo para un talud con protección de margen fija.

10. La velocidad del flujo es un importante parámetro en este experimento. Se enfocaron las tres componentes de la velocidad  $V_x$ ,  $V_y$  y  $V_z$ ; el rol que desempeñan las componentes  $V_y$  y  $V_z$  en el marco del flujo en curvas como éstas crean el momento de transferencia, el cual, al girar, produce una perturbación en el perfil logarítmico de la componente  $V_x$ . Los perfiles de velocidad medidos confirman lo establecido por De Vriend (1981). Las velocidades en dirección aguas abajo ( $V_x$ ) se incrementan desde el eje central hacia la margen externa, y la región de velocidad máxima es ubicada muy cerca del fondo del cauce y a cierta distancia de la margen externa debido a la distorsión producto de la cercanía del fondo del cauce. Además, los perfiles de velocidad en dirección aguas abajo no se ven incrementados de manera monótona hacia la superficie del agua, como en un flujo en canal abierto uniformemente constante, pero presenta valores máximos en la parte inferior de la columna de agua. En consecuencia, la distribución de la velocidad en una curva no es más logarítmica.
11. Se detectó un típico patrón de flujo helicoidal. Los resultados indicaron que el movimiento de la sección transversal contiene una celda principal de circulación, el clásico movimiento helicoidal (celda ubicada en la región central). Además, en los ensayos con protección flexible, se detectó una débil celda de rotación antihoraria (celda en la margen externa) en la esquina formada entre la margen externa y la superficie de agua. En los ensayos con protección de margen rígida se detectaron dos celdas de giración antihoraria sobre la margen externa: una similar al de la protección flexible y la otra debajo de la protección rígida de escollera. A esta última celda se le atribuye la socavación de la protección de margen rígida. No fue posible medir las velocidades encima y debajo de la protección rígida debido a las limitaciones del velocímetro acústico tridimensional con respecto a la profundidad del volumen bajo muestra para el registro de velocidades encima de la protección rígida y la disponibilidad de una adecuada ubicación del velocímetro acústico debajo de dicha protección. Para asegurar la existencia de las dos celdas en la margen externa descritas, se observaron los vórtices aguas abajo, lo cual proveyó la evidencia de la existencia de ambas celdas.
12. El dimensionamiento del enrocado de protección de la curva externa se efectuó considerando la velocidad del flujo en la cercanía de la roca. Se aplicaron las fórmulas propuestas por Pilarczyk (1990), Maynard (1993) y Julien (2002), las cuales consideran la sobre elevación del caudal en curvas; el incremento de la turbulencia ha demostrado estar en este caso sobre el lado seguro para el diseño de protección de escolleras. Además, en estos experimentos se demostró que la extensión de la longitud de las obras de protección de margen en la curva externa debe ser prolongada en 1.5 a 2 veces el ancho del cauce después del final de la curva externa. Sin embargo, en la ingeniería práctica de los ríos en la naturaleza, la extensión de la protección del margen debe ser adoptada tomando en cuenta la topografía del cauce existente y las condiciones de alineamiento del cauce del río. La longitud de la protección debe ser cuidadosamente traducida a las condiciones prototipo.

**Apéndice. Símbolos**

Los siguientes símbolos se han utilizado en esta publicación:

$B$	ancho del canal	(m)
$b$	ancho de la protección de margen	(m)
$C$	coeficiente de Chézy	( $m^{1/2}/s$ )
$D_{50}$	(1) diámetro medio de la arena, (2) tamaño medio del enrocado	(mm) <sup>1</sup> , (cm) <sup>2</sup>
$e$	espesor de la capa de protección de margen	(cm)
$F_r$	número de Froude	(-)
$g$	aceleración de la gravedad	( $m/s^2$ )
$h$	calado o tirante	(m)
$h_{ave}$	calado promedio de las secciones transversales en la curva	(m)
$h_{b\text{máx}}$	profundidad máxima de erosión en la curva	(m)
$h_{n\text{máx}}$	calado máximo en la curva	(m)
$h_n$	calado normalizado	(-)
$h_r$	calado promedio de las secciones transversales en el tramo recto de aguas arriba	(m)
$i$	pendiente longitudinal en el canal	(-)
$IP$	parámetro de interacción, $IP = \lambda_s/\lambda_w$	(-)
$l_d$	ubicación de la profundidad máxima de erosión medida desde la margen externa o de la curva cóncava	(cm)
$Q$	caudal, descarga	( $L/s$ ), ( $m^3/s$ )
$R$	radio de la curva	(m)
$R_e$	número de Reynolds	(-)
$S_s$	sedimento en suspensión	( $m^3/s$ )
$S_{total}$	carga total o transporte total de sedimentos	( $m^3/s$ )
$T, t$	tiempo	(h)
$T_w$	temperatura del agua	(°C)
$u$	velocidad del caudal	(m/s)
$u_*$	velocidad de tensión de corte (en el fondo)	(m/s)
$v_s$	velocidad en dirección del flujo	(m/s)
$v_n$	velocidad transversal	(m/s)
$v_z$	velocidad vertical	(m/s)
$V_x$	componente de la velocidad en dirección $x$	(m/s)
$V_y$	componente de la velocidad en dirección $y$	(m/s)
$V_z$	componente de la velocidad en dirección $z$	(m/s)
$w$	ancho del canal	(m)
$w_s$	velocidad de caída de la partícula de sedimento	(m/s)
$u_*/w_s$	relación de distribución del sedimento en suspensión sobre el calado	(-)
$\alpha$	ángulo de la curva	(°)
$\beta$	pendiente transversal del fondo	(-)
$\lambda_s$	longitud de adaptación para la morfología en 2D	(m)
$\lambda_w$	longitud de adaptación para el flujo en 2D	(m)
$\rho_w$	densidad del agua	( $kg/m^3$ )
$\rho_s$	densidad de la arena	( $kg/m^3$ )
$\theta$	parámetro de Shields	(-)
$\tau$	tensión de corte (en el fondo)	( $N/m^2$ )
$\nu$	viscosidad cinemática	( $m^2/s$ )
$\Delta$	densidad relativa	(-)

Recibido: 30/11/10

Aceptado: 20/08/12

## Referencias

- ALVARADO-ANCIETA, C.A. *Bed Topography and Scour in Sharp River Bends, and Influence of Bank Protection Works*. M.Sc. Dissertation - Thesis HE 179, Vol. 1 & 2. Delft, The Netherlands: International Institute for Infrastructure, Hydraulic and Environmental Engineering-IHE-Delft, 2004.
- ALVARADO-ANCIETA, C.A. and ETTMER, B. Morfología fluvial y erosión en curvas abruptas del río Ucayali, Perú. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XXIII, núm. 4, 2008, pp. 69-90.
- BLANCKAERT, K. and GRAF, W.H. Experiments on flow in open channel-bends. *Proc. 28<sup>th</sup> IAHR Congr. Techn.* Graz, Austria: University of Graz, 1999a.
- BLANCKAERT, K. and GRAF, W.H. Outer-bank cell of secondary circulation and boundary shear stress in open-channel bends. *Proc. 1<sup>st</sup> RCEM Symp.* Vol. I, Genova, Italy, 1999b, pp. 533-542.
- BLANCKAERT, K. *Analysis of coherent flow structures in a bend based on instantaneous-velocity profiling*. 3rd International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, EPFL, Lausanne, Switzerland, 2002.
- FARGUE, L. Les équations des lois empiriques de l'hydraulique fluviale. *Annales des Ponts et Chaussées*. Vol. 77, No. 3, 1907, pp. 121-138.
- HOFFMANS, G.J.C.M. and VERHEIJ, H.J. *Scour manual*. Rotterdam/Brookfield: A.A. Balkema Publisher, 1997.
- JANSEN, P. *Principles of river engineering. The non-tidal alluvial river*. Delft, The Netherlands: Delftse Uitgevers Maatschappij, Delft University of Technology, 1979.
- JULIEN, P.Y. *River mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- MAYNORD, S.T. *Corps rip rap design guidance for channel protection*. International Rip Rap Workshop, Fort Collins, 1993.
- NEDECO. *River studies and recommendations on improvement of Niger and Benue*. The Hague, The Netherlands: Netherlands Engineering Consultants, 1959.
- ODGAARD, A.J. Bed characteristics in alluvial channel bends. *J. Hydr. Engng.* ASCE. Vol. 108, No. HY12, 1982, pp. 1268-1281.
- ODGAARD, A.J. Flow and bed topography in alluvial channel bend. *J. Hydr. Engng.* ASCE. Vol. 110, No. 4, 1984, pp. 521-536.
- OLESEN, K.W. *Bed topography in shallow river bends*. Delft, The Netherlands: Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 1985.
- PILARCZYK, K.W. (editor). *Coastal Protection*. Rotterdam: A.A. Balkema Publisher, 1990.
- ROCA-COLLEL, M. *Erosión en una curva cerrada. Influencia de las protecciones de margen*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2003.
- STRUIKSMA, N., OLESEN, K.W., FLOKSTRA, C., and DE VRIEND, H.J. Bed deformation in curved alluvial channels. *J. Hydr. Res.* IAHR. Vol. 23, No. 1, 1985, pp. 57-79.
- SUTMULLER, A.M. and GLERUM, H.L. *Description and evaluation of measurements carried out in a bend flume with sand bed*. Report. No. 14710101. Delft, The Netherlands: Department of Civil Engineering, Delft Technical University, 1980.
- TALMON, A.M. *Bed topography of river bends with suspended sediment transport*. Doctoral thesis. Delft, The Netherlands: Faculty of Civil Engineering, Hydraulic and Geotechnical Engineering Division, Delft University of Technology, 1992.
- TRICART. *Ecodinámica*. Río de Janeiro: IBGE, Diretoria Técnica, SUPREN, 1977.
- VAN RIJN, L.C. *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries, Coastal Seas and Oceans*. Delft, The Netherlands: International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, IHE, 1993.
- YEN, C.L. *Bed configuration and characteristics of subcritical flow in a meandering channel*. PhD thesis. Iowa: University of Iowa, 1967.

## Abstract

ALVARADO-ANCIETA, C.A. *Protection of erosion in sharp bends using rockfill rip-rap. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 1, January-March, 2013, pp. 51-82.*

To adequately design protection works for banks with bends as well as to determine the width required for navigation, a proper understanding of the flow in bends and the resulting bed topography is required. This is one of the most difficult phenomena encountered by river engineers, the main difficulty being the description of the helical flow and its impact on the channel bed. Changes in the shapes of river plants and cross-sections along with variations in river morphology due to sedimentation and erosion cause deep scour holes along the outer bends of rivers. As a consequence, the outer bank of a bend may collapse during a flood, potentially causing substantial damage to property and infrastructure located along these outer banks. Over recent decades, the understanding of physical processes in slightly curved bends has improved substantially. Nevertheless, in many rivers around the world —including many of the rivers in Peru (figure 1)— sharp bends are present and the physical phenomena in this type of bends have not yet been explored in-depth. River bends are considered sharp when the ratio between the radius of curvature  $R$  and the width  $B$  is less than 3.

**Keywords:** erosion, sharp bends, bed topography, river morphology, bank protection, rockfill protection, sediment transport, helical flow.

## Dirección institucional del autor

M.Sc., Dipl.- Ing. César Adolfo Alvarado-Ancieta

Consultor privado en ingeniería de ríos, presas y centrales hidroeléctricas  
Schlösselfelderstrasse 16<sup>a</sup>  
90409 Nuremberg, Alemania  
cesalv@yahoo.com