

# EROSIÓN DE LECHOS NO COHESIVOS CON DATOS OBTENIDOS DE PERFILADORES DOPPLER

Carlos A. Ercole<sup>(1)</sup>; Graciela V. Zucarelli<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>EVARSA, Avellaneda 3180 - 3000 Santa Fe, Argentina

<sup>(2)</sup>Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, El Pozo, 3000 Santa Fe, Argentina  
[caercole@evarsa.com.ar](mailto:caercole@evarsa.com.ar) [zuca@fich1.unl.edu.ar](mailto:zuca@fich1.unl.edu.ar)

## Introducción

Uno de los métodos más aplicados para la estimación de la erosión en lechos no cohesivos, se basa en ensayos provenientes de laboratorios. Dichos ensayos se realizan en canales uniformes colocando en el fondo material arenoso con un tamaño de grano específico. Como resultado de los mismos se obtiene la velocidad media en el canal cuando comienza la erosión y el tirante es de 1 m.

Para el traslado de dicha metodología a canales naturales se asume la conocida ley de distribución potencial de velocidades. Sin embargo, las condiciones del escurrimiento en los cursos naturales no siempre sigue esta distribución a lo largo de una sección transversal al flujo, ya sea por variaciones en la profundidad o porque el flujo no es unidimensional. Frecuentemente, éste último es el caso que se presenta en obras cuyo potencial de erosión se desea investigar.

Una forma de aproximar las condiciones del flujo en el campo a las condiciones de laboratorio, consiste en determinar tubos de corriente con una fracción del caudal total en cada uno de ellos. Para construir estos tubos se considera que la velocidad del agua es la misma en cualquier punto de una vertical (flujo bidimensional) y es la media de las velocidades medidas sobre dicha vertical. En consecuencia, los tubos quedan materializados por líneas de corriente en su vista en planta y superficies cilíndricas de recta generatriz vertical siguiendo como directriz dichas líneas de corriente.

Si se seccionan los tubos de corriente mediante planos verticales aproximadamente perpendiculares a ambas líneas de corriente, habrá en ellos un flujo muy similar al del canal experimental, sobre todo si se fracciona de manera que se pueda considerar profundidad uniforme e igual a la media de ese tramo. Finalmente se considera una distribución potencial de la velocidad en este canal ideal para extrapolar los resultados del canal experimental. Haciendo la hipótesis adicional de que las líneas de corriente no variarán para caudales mayores al usado para su determinación y que conservan en consecuencia la misma fracción del caudal total, se pueden extrapolar los resultados a condiciones potencialmente más erosivas, con el fin de realizar pronósticos.

En este trabajo se muestra una metodología para construir líneas de corriente con el empleo de perfiladores acústicos que usan el Efecto Doppler. Mediante los mismos se obtienen simultáneamente, para puntos que siguen la trayectoria de la nave sobre la cual se monta, la posición del punto, la velocidad media sobre la vertical y la profundidad del agua. Luego de su tratamiento, con estos datos se obtiene la red de líneas de corriente.

## Metodología

Las fórmulas usadas para calcular la erosión dividen el flujo en franjas de ancho pequeño, de manera tal que puede considerarse una velocidad y una profundidad

homogéneas, con una sección de flujo rectangular y con el vector velocidad perpendicular a este rectángulo. Una forma de obtener estas franjas consiste en trazar una red de escurrimiento bidimensional con líneas de corriente y líneas equipotenciales. Las segundas son perfiles a través de los cuales fluye el agua en forma ortogonal en cada franja y las franjas quedan delimitadas por dos líneas de corriente contiguas, separando; por definición de línea de corriente, el flujo en tubos de caudal constante.

Para el trazado de las líneas de corriente se adopta como hipótesis que la velocidad del agua es la misma en cualquier punto de una vertical cualquiera que une el fondo del cauce con el pelo de agua. Esta hipótesis es la misma que se adopta en los modelos bidimensionales. Las velocidades del agua medidas por el perfilador están igualmente espaciadas sobre verticales de medición y su promedio da la velocidad media medida sobre la vertical.

Para este caso, las velocidades medias se distribuyen sobre una grilla regular con un espaciado de 1 m. En coincidencia con la grilla de velocidades, existe otra grilla que proporciona la cota del fondo en cada vértice. Utilizando el dato de velocidad y la cota de fondo en cada punto de la grilla se pueden construir los vértices de las poligonales que conforman las líneas de corriente.

Dadas las líneas de corriente, se trazan los perfiles ortogonales a las mismas sobre un plano AutoCAD. Visto en planta, cada perfil consiste en una poligonal con segmentos que unen dos líneas de corriente consecutivas formando un ángulo casi recto con ambas.

A los efectos del cálculo del potencial de erosión se utiliza el concepto de "profundidad de comienzo de erosión". Este concepto proviene de la observación de que, en corrientes de aguas con lecho de material no cohesivo, existe una relación de equilibrio entre la granulometría de ese material y las velocidades de la corriente. Esto se debe a que la corriente produce un esfuerzo de corte sobre el lecho que tiene potencialidad de movilizar el material contenido en el lecho con diámetro menor al diámetro de equilibrio.

Para este caso, se adoptaron dos fórmulas que corresponden a los desarrollos propuestos por Rossinsky (Onipchenko, 2000).

La primera de las fórmulas, parte de la hipótesis que el caudal y la cota del pelo de agua permanecen constantes para la sección de estudio durante el proceso erosivo. En consecuencia, al producirse una erosión, se profundiza el cauce y disminuye la velocidad hasta alcanzar la situación de equilibrio entre la velocidad y el tamaño del grano.

La segunda fórmula permite trasladar los resultados de modelos experimentales al prototipo que se estudia. En estos ensayos, realizados en un canal regular, con un tirante de 1 m, se determinó el valor de la velocidad que inicia el transporte del material de fondo para distintos diámetros de partícula. Si el tirante de equilibrio es mayor que el tirante actual, estas fórmulas permiten predecir el comienzo de un proceso erosivo. Los tubos de corriente

proporcionan información de una fracción del flujo en condiciones tales que puede considerarse como un canal de sección rectangular, de manera tal que los flujos se aproximan a las condiciones experimentales. La primera fórmula de Rossinsky tiene la siguiente expresión:

$$V_e * H_e * b = V_m * H_m * b \quad [1]$$

donde  $V_e$  es la velocidad en el punto de equilibrio, perfil erosionado;  $H_e$  es el tirante de agua en equilibrio;  $b$  es el ancho del tubo de corriente;  $V_m$  es la velocidad en el tubo de corriente, calculado a partir de las mediciones con perfilador Doppler y  $H_m$  es el tirante medio en el tubo de corriente.

Por otra parte, asumiendo una distribución de velocidades según la ecuación de Manning (Chow, 1994), la segunda fórmula de Rossinsky se expresa como:

$$V_e = V_{01} * H_e^{0.2} \quad [2]$$

donde  $V_{01}$  es la velocidad media en el canal experimental de 1 m de tirante que produce inicio de la erosión, para el material de fondo analizado, para cada diámetro de material. Combinando las ecuaciones (1) y (2) se pueden calcular  $H_e$  y  $V_e$ , que son el tirante que puede alcanzarse y la velocidad de equilibrio en cada tubo de corriente. Si  $H_e$  es mayor que  $H_m$ , se verificará un proceso erosivo para el tubo en análisis.

## Aplicación

En la ciudad de Concepción del Uruguay, provincia de Entre Ríos, se está construyendo un sistema de defensa contra inundaciones. La ciudad está emplazada en las márgenes del Riacho Itapé, que constituye un brazo del Río Uruguay. En ciertos lugares las defensas son paralelas a la costa y se extienden hasta unos pocos metros de la misma. Este trabajo se llevó a cabo para determinar la erodabilidad de las márgenes y eventuales necesidades de protección.

Para el relevamiento de la morfología de fondo y las velocidades se empleó un ADCP (Perfilador de Corriente Acústico Doppler) y posicionadores satelitales GPS. Como procedimiento práctico se posicionó la costa y los puntos de interés a través de GPS diferencial, llevándose esta información a un archivo AutoCAD, donde se preestablecieron las trayectorias sobre las cuales se tomarían las mediciones a efectos de lograr una masa de datos homogéneamente distribuida sobre el área de estudio.

En base a estas trayectorias y utilizando el Programa Guía (Ercole, 2000), se muestra en la pantalla de una PC que está a bordo, el recorrido en tiempo real de la embarcación sobre el plano previo y se efectúa el relevamiento según lo planificado.

Por definición, en un flujo bidimensional las líneas de corriente separan flujos de igual caudal. Se adoptó una división tal que entre cada par de líneas circula el 5% del caudal total.

La erosión potencial se calculó sobre 4 perfiles ortogonales a las líneas de corriente. La ortogonalidad de los perfiles permite tomar cada tubo de corriente como si la velocidad fuese normal al perfil, dividiendo el flujo en franjas tales que cada una de ellas cumpliría con leyes de similitud con el canal experimental de 1 m de tirante.

Con un programa desarrollado por Ercole (2004), se calcula el área de cada tubo de corriente, siguiendo las intersecciones del perfil con la grilla que expresa el fondo. Considerando que el caudal del tubo es conocido, se calcula su velocidad y tirante medios, teniendo en cuenta que el ancho de la franja de flujo es la longitud del segmento de perfil entre 2 líneas de corriente.

Para extrapolar los resultados a otras situaciones, se formuló la hipótesis de que las líneas de corriente no cambian para crecidas de mayor magnitud. Como crecidas de cálculo se consideraron: (i) la que tiene un tiempo de permanencia del 30%, con una cota de escala de 2.81 m y un caudal de 8 070 m<sup>3</sup>/s en todo el sistema, calculado con curva de descarga y (ii) la crecida de proyecto, de cota de escala 10.44 m y un pico del orden de los 35 350 m<sup>3</sup>/s en todo el sistema, calculado con la curva de descarga.

## Conclusiones

Se analizó la situación morfológica y de flujo en la zona de las obras de defensa en la ciudad de Concepción del Uruguay, dividiendo a la corriente en tubos que contienen el 5% del caudal total. La velocidad media del agua en estos tubos, en las condiciones extrapoladas del relevamiento, oscila entre 0.4 y 2 m/s.

Se ha analizado el diámetro de partículas de las muestras de fondo obtenidas, encontrándose como representativo un diámetro de 0.17 mm. El análisis de erosión límite por Rossinsky no muestra inestabilidad en ninguno de los cuatro perfiles analizados sobre la zona de obras para las condiciones actuales, salvo algunas muy ligeras a más de 60 m de la costa (la progresiva 0 de los perfiles coincide con la costa en el día del levantamiento). Resulta muy similar la situación para la permanencia del 30%, o sea que la costa no se afecta para el 70 % de los estados del río. Para la crecida de proyecto, toda la zona estudiada resulta erosionada.

## Bibliografía

- Chow; V. T.** (1994). "Hidrología aplicada". McGraw-Hill. Colombia.
- Ercole; C. A.** (2000). "Software Guía". Inédito.
- Ercole; C. A.** (2004). "Software LC". Inédito.
- Onipchenko G.** (2000). "Estudios de la erosión en suelos cohesivos y suelos rocosos". Moscú, Rusia