

MODELO NUMÉRICO PARA SIMULACIÓN DE FLUJOS TORRENCIALES AGUAS ARRIBA DE PRESAS DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS

Jean Carlos Rincón, José Luis López y Reinaldo García

Departamento de Hidráulica, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado
 Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela
 E-mail: jrcincon@ucla.edu.ve - E-mail: jllopez@imf.ing.ucv.ve - E-mail: regarcia@hydronia.com

Introducción

Las altas pendientes longitudinales de los cauces torrenciales, aunadas con los grandes elementos de rugosidad (peñones) existentes en el lecho, generan flujos supercríticos o cercanos al régimen crítico los cuales se caracterizan por presentar gran turbulencia acompañada de inestabilidades en la superficie del agua. El control de los flujos torrenciales requiere frecuentemente de la construcción de presas para reducir los procesos erosivos del lecho o para la retención de los grandes volúmenes de sedimentos arrastrados por las corrientes. Las presas elevan el nivel de la superficie del agua, reducen la velocidad del flujo y generan remansos en los tramos inmediatos aguas arriba del dique induciendo a la sedimentación del material grueso arrastrado.

En este trabajo se desarrolla un modelo numérico de fondo móvil basado en el uso del esquema de MacCormack-TVD (García y Kahawita, 1986; García et al., 1992) para simular el flujo torrencial en canales de alta pendiente en presencia de presas abiertas o cerradas. El modelo resuelve simultáneamente las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento para la fase líquida y la fase sólida de un flujo no permanente en un canal unidimensional. El modelo se aplica para evaluar la respuesta morfodinámica a problemas de agradación y degradación del lecho causada por variaciones en las condiciones de contorno en casos donde se producen cambios en el régimen de flujo, y los resultados se validan con soluciones analíticas y experimentales en el laboratorio.

Ecuaciones Básicas

Las ecuaciones básicas para un flujo unidimensional no permanente en canales de fondo móvil son las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento para el agua y la de continuidad para el sedimento. En forma conservativa estas ecuaciones pueden ser escritas en forma matricial como:

$$\mathbf{U}_t + \mathbf{F}_x + \mathbf{S} = 0 \quad [1]$$

donde,

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} A \\ VA \\ z \end{pmatrix}; \mathbf{F} = \begin{pmatrix} VA \\ V^2 A + gAy \\ \frac{1}{1-\lambda_p} q_b \end{pmatrix}; \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ -gA(S_0 - S_f) \\ 0 \end{pmatrix} \quad [2]$$

En donde A es el área de flujo, V es la velocidad, y es la profundidad, S_0 es la pendiente de fondo, S_f es la pendiente de fricción, q_b es el caudal sólido, λ_p es la porosidad, z es la cota de fondo. El método de MacCormack se usa para resolver simultáneamente, en cada paso de tiempo, las ecuaciones gobernantes (1) en un modelo tipo acoplado. Las ecuaciones diferenciales se transforman en ecuaciones algebraicas usando el esquema de tres pasos de MacCormack-TVD.

Paso Predictor:

$$\mathbf{U}_i^* = \mathbf{U}_i^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{F}_i^k - \mathbf{F}_{i-1}^k) - \mathbf{S}_i^k \Delta t \quad [3]$$

Paso Corrector:

$$\mathbf{U}_i^{**} = \mathbf{U}_i^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{F}_{i+1}^* - \mathbf{F}_i^*) - \mathbf{S}_i^* \Delta t \quad [4]$$

$$\mathbf{U}_i^{k+1} = \frac{1}{2} (\mathbf{U}_i^* + \mathbf{U}_i^{**}) \quad [5]$$

Paso TVD:

$$Q_{TVD_i}^{k+1} = Q_i^{k+1} + \frac{\Delta t}{\Delta x} (DCM_{i+1}^{k+1} - DCM_i^{k+1}) \quad [6]$$

$$A_{TVD_i}^{k+1} = A_i^{k+1} + \frac{\Delta t}{\Delta x} (DC_{i+1}^{k+1} - DC_i^{k+1}) \quad [7]$$

en donde DCM y DC son los factores de corrección por TDV (García et al. 1992). Para la estabilidad del esquema, es necesario que el número de Courant, Cn, sea menor o igual a uno.

Como ecuaciones complementarias del modelo se utilizan la ecuación de fricción de Aguirre Pe y Fuentes (1990) y la ecuación de transporte de Schoklistch.

Condiciones de Contorno

Las condiciones de contorno aguas arriba están constituidas por los hidrogramas de caudal líquido y caudal sólido, mientras que las condiciones de contorno aguas abajo se establecen con las ecuaciones que regulan el flujo sobre una presa cerrada, una presa abierta ranurada o una presa abierta de ventana.

Si la presa es cerrada, la profundidad en el extremo aguas abajo de la presa es calculada asumiendo descarga a través de un vertedero de cresta delgada. Si la presa es abierta ranurada, la ranura se asume como una contracción y la profundidad en el extremo aguas abajo se obtiene aplicando energía y conservación de la masa entre el último nodo y una sección en la ranura, suponiendo que en esta última prevalecen condiciones críticas de flujo.

Si la presa es abierta de ventana se pueden presentar tres casos: el primer caso es cuando el nivel del agua es menor que la altura de la ventana, en esta situación la descarga se comporta como una presa abierta de tipo ranurada y el cálculo se hace como en el ítem anterior. El siguiente caso es cuando el nivel del agua es mayor que la altura de la ventana pero menor que la cresta del vertedero; en este escenario la profundidad en el extremo aguas abajo de la presa es calculada asumiendo descarga de fondo. El último caso es cuando el nivel del agua sobrepasa la cresta del vertedero y se produce descarga simultánea de fondo y por vertedero.

El modelo numérico ha sido desarrollado en Fortran 90 y está compuesto por un programa principal y diecinueve subrutinas, que resuelven simultáneamente las ecuaciones dadas por (2) acopladas con las ecuaciones de fricción, transporte sólido, y las condiciones de contorno.

Aplicaciones del Modelo

Se analizan diferentes casos para validar el modelo y evaluar la respuesta morfodinámica a cambios en las condiciones de contorno.

Caso 1: Ubicación del resalto hidráulico en flujo permanente. Este caso se analiza para verificar si el modelo es capaz de calcular flujos a través de un resalto hidráulico y ubicar la posición del mismo en un canal de pendiente fuerte.

Caso 2: Agradación debido a sobrecarga de sedimentos. Se analiza el caso de un canal inicialmente en equilibrio al cual se le impone como condición de contorno aguas arriba una carga de sedimentos por encima de su capacidad de transporte. La idea es verificar si el modelo es capaz de alcanzar una nueva condición de equilibrio como respuesta al incremento en el aporte de sedimentos. La comprobación se hace vía analítica, ya que al conocer la carga de sedimentos entrando al canal, se puede calcular la nueva pendiente de equilibrio a partir de una ecuación para régimen uniforme (ecuación de Manning), de la ecuación de continuidad y de la ecuación de transporte sólido. En la figura 1 se muestran los resultados obtenidos.

Caso 3: Degradación debido a déficit de sedimentos. En este caso se determina la respuesta morfodinámica del cauce a un aporte de sedimentos por debajo de su capacidad de transporte.

Caso 4: Descarga permanente a un embalse a través de un canal con pendiente supercrítica. Se analiza la respuesta morfodinámica a la presencia de un control aguas abajo ejemplarizado por un nivel de agua constante por encima de la profundidad normal del canal, tal como pudiera ser el caso del remanso producido por el embalse de una presa o de un lago. El objetivo es generar una nueva condición de equilibrio a partir de mantener constantes el caudal líquido y el caudal sólido entrando al sistema.

Caso 5: Agradación aguas arriba de una presa cerrada en flujo no-permanente. En este caso se analiza la respuesta morfológica del cauce al paso de una creciente por un tramo aguas arriba de una presa cerrada.

Caso 6: Agradación aguas arriba de una presa ranurada en flujo no-permanente. En este caso se investiga el proceso de agradación aguas arriba de una presa abierta del tipo ranurada, sometida al paso de una creciente.

Comparación con Resultados de Laboratorio

El modelo numérico se compara con resultados de experiencias realizadas en el laboratorio en un canal de 12 m de largo, 0,30 m de ancho y 0,30 m de altura, de pendiente variable y sección rectangular, en donde se coloca una presa cerrada de 0,15 m de altura en el extremo aguas abajo. Las paredes son de madera y vidrio, y en el fondo se ha fijado un material gravoso de 1,7 cm de tamaño medio. El caudal de agua es recirculado y el sedimento (arena fina de $D_{50} = 0,75$ mm) se alimenta a una tasa constante con una tolva ubicada en el extremo aguas arriba. Los perfiles del agua y del fondo se monitorean con una cámara de video y un sistema de adquisición de datos. El ensayo se efectúa para un caudal constante de 2,9 lt/s y un aporte sólido constante de 12,6 gr/s, en un canal de pendiente fuerte igual a 7,5%. La condición inicial se establece con un flujo de agua sin sedimentos, hasta alcanzar rápidamente el estado permanente, con un resalto hidráulico muy suave (ondulado) en el sitio donde el perfil S1 intercepta al perfil

en régimen uniforme. Se miden los niveles del agua y se verifica la presencia de un régimen ligeramente supercrítico en el flujo de aproximación. La condición de contorno aguas abajo para el modelo numérico consiste en los niveles medidos de la superficie libre en el sitio de presa. La Figura 1 muestra una comparación entre perfiles medidos y calculados del lecho para diferentes fórmulas de transporte (Schoklitsch, Engelund-Hansen y Meyer-Peter y Muller) en el tiempo $t = 9,5$ min.

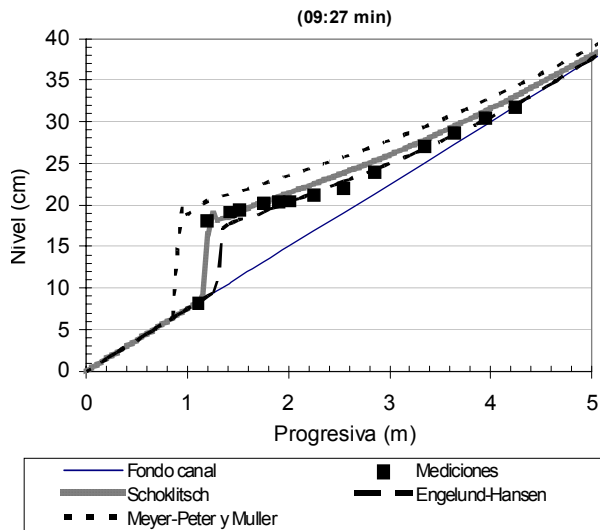


Figura 1.- Comparación entre perfiles medidos y calculados del lecho para diferentes fórmulas de transporte en $t = 9,5$ min.

Conclusiones

Se ha desarrollado un modelo numérico que permite evaluar y predecir el comportamiento hidráulico y morfológico de canales de pendiente fuerte y su interacción con presas abiertas o cerradas reguladoras del transporte sólido y de los perfiles del lecho. Las experiencias numéricas realizadas muestran que el modelo permite calcular transiciones del flujo subcrítico a supercrítico y viceversa, ubicando automáticamente la localización del resalto hidráulico. El modelo ha sido aplicado también para generar las condiciones finales de equilibrio morfodinámico en cauces sujetos a procesos de agradación y degradación del lecho con cambios en el régimen de flujo, y los resultados han sido validados mediante comparación con soluciones analíticas. Se realizaron ensayos experimentales en un canal de laboratorio para monitorear el desplazamiento de un delta de sedimentos generado aguas arriba de una presa cerrada. Los resultados numéricos se comparan satisfactoriamente con las mediciones de laboratorio.

Referencias Bibliográficas

- Aguirre Pe, J. y Fuentes, R. (1990), "Resistance to Flow in Steep Rough Streams", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 116(11), November, 1374-1387.
- García, R. y Kahawita, R. A. (1986), Numerical Solution of the St. Venant Equations with MacCormack Finite Difference Scheme, *International Journal Numerical Methods in Fluids* (6): 259-274.
- García, P., Alcrudo, F. y Savirón, J. (1992), "1-D Open-Channel Flow Simulation Using TVD-McCormack Écheme", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 10: 1359-1372.