

MODELO BIDIMENSIONAL DE ALTO RENDIMIENTO BASADO EN PLATAFORMA GPU PARA SIMULACIÓN DE PROCESOS DE EROSIÓN Y DEPOSICIÓN EN RÍOS

Reinaldo García¹, Mario Morales², Pilar García-Navarro² e Ignacio Villanueva³

¹Hydronia e Hydronia Europe, USA.

²Grupo de Hidráulica Computacional, Universidad de Zaragoza, España.

³Consultor independiente Recursos Hídricos, España.

E-mail: regarcia@hydronia.com, pigar@unizar.es, ivillamadrid@gmail.com

Introducción

La aplicación de modelos bidimensionales para simular procesos de erosión y deposición en grandes tramos de ríos y a alta resolución ha sido hasta hace poco difícil debido a los prohibitivos tiempos de cálculo que pueden ser con frecuencia de días e incluso semanas. Esto se debe principalmente a la utilización de modelos que realizan los cálculos de manera secuencial y que no explotan el potencial de paralelización que ofrecen plataformas de hardware modernas. En el presente trabajo se presentan aplicaciones del modelo bidimensional de malla flexible RiverFlow2D en la confluencia de los ríos Irpavi y Ayumani de la ciudad de La Paz, Bolivia. El modelo resuelve las ecuaciones de aguas someras en dos dimensiones en las que se obtienen las dos componentes del vector velocidad y la profundidad en cada una de las celdas triangulares de la malla de cálculo. Igualmente el modelo resuelve la ecuación de Exner para múltiples fracciones de sedimentos permitiendo obtener las variaciones temporales y espaciales de la cota de fondo que ocurren en la malla. El código numérico se ha desarrollado de manera que los cálculos se distribuyen en miles de procesadores de tarjetas GPU (Graphic Processing Units) de manera que los tiempos de cálculo se ven disminuidos hasta dos órdenes de magnitud con respecto a corridas con cálculos secuenciales que se hagan utilizando un solo procesador. Las aplicaciones presentadas demuestran que el modelo es capaz de simular procesos erosivos en ríos de alta pendiente con mallas bidimensionales que constan de elementos que van desde 0.5 m hasta casi 3 m. Los tiempos de cálculo obtenidos indican que la utilización del código paralelizado en GPU puede ser hasta 40 veces más rápido que si se usa un solo procesador. En términos prácticos esto indica que corridas que requerirían hasta dos semanas pueden realizarse en pocas horas.

Modelo bidimensional RiverFlow2D

RiverFlow2D es el modelo bidimensional (Hydronia, 2016), desarrollado por la Universidad de Zaragoza en España y la empresa Hydronia. Es un modelo bidimensional para canales y ríos cuya principal característica es que utiliza para el cálculo mallas flexibles formadas por triángulos lo que permite que la malla se adapte a contornos irregulares y refinarse en zonas donde se requiere mayor detalle. El programa de cálculo resuelve las ecuaciones de la hidráulica con superficie libre en 2D mediante un método de volúmenes finitos que admite tratar flujos en régimen supercrítico y subcrítico. El modelo puede representar zonas inicialmente secas y mantiene la conservación del volumen y estabilidad numérica durante la ejecución.

Para la evaluación de la capacidad de transporte y los cambios en las cotas de fondo por erosión o sedimentación, se utilizó el módulo de transporte de sedimentos del modelo RiverFlow2D (ST). Este módulo se acopla con el modelo hidrodinámico de manera que en cada paso de tiempo se calculan las variables hidráulicas: profundidad y componentes de la velocidad, las cuales se utilizan a su vez para determinar la capacidad de arrastre de sedimentos. Luego se resuelve numéricamente en la malla de triángulos la ecuación de Exner:

$$\frac{\partial z_p}{\partial t} + \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} = 0 \quad [1]$$

donde z_p , q_{sx} y q_{sy} son las capacidades de arrastre de material en dirección x y y respectivamente. Debido a su amplia aceptación y validación en condiciones de transporte de sedimentos relativamente gruesos como los que existen en los Ríos Irpavi y Achumani, se seleccionó la fórmula de Mayer-Peter & Muller (1948) para el cálculo de la capacidad de arrastre:

$$\frac{|q_s|}{\sqrt{g(s-1)d_{50}^3}} = 8(\theta - \theta_c)^{3/2} \quad [2]$$

donde d_{50} es el diámetro medio del sedimento, s es la densidad relativa del material y θ_c es el parámetro de Shields.

Aplicación a la confluencia de los ríos Irpavi y Ayumani

Desde hace algunos años, existe una problemática en la confluencia del río Irpavi con el río Achumani donde en prácticamente cada época de lluvias, la zona se pone en riesgo por desbordes del río que frecuentemente afectan las vías vehiculares, a las personas y también a las viviendas y edificaciones del sector (SMGIR, 2016). Los desbordes parecen agravarse debido a la reducida capacidad de conducción de los cauces que a su vez se ve limitada por la alta sedimentación de material aluvial proveniente de las partes altas de las cuencas. De esta manera los sedimentos del río Achumani se depositan en la confluencia generando desbordamientos. Para solventar tal situación la Alcaldía de La Paz realizó el diseño hidráulico de unos canales y otras obras hidráulicas de control mediante los cuales se espera aumentar la capacidad de conducción y transporte de sedimentos de los dos ríos y así mitigar la amenaza de inundaciones.



Figura 1.- Confluencia de los Ríos Irpavi y Ayumani. El polígono indica la extensión de la zona simulada mediante el modelo 2D.

Las simulaciones incluyeron escenarios correspondientes a la situación actual y a la situación con las obras propuestas (ver Figura 2.) para 25, 50 y 100 años de período de retorno (Tr). Estas simulaciones permitieron verificar que en las condiciones actuales efectivamente se producen inundaciones y acumulación excesiva de sedimentos en la confluencia, mientras que con las obras propuestas se logra eliminar los desbordamientos del cauce y reducir la sedimentación.

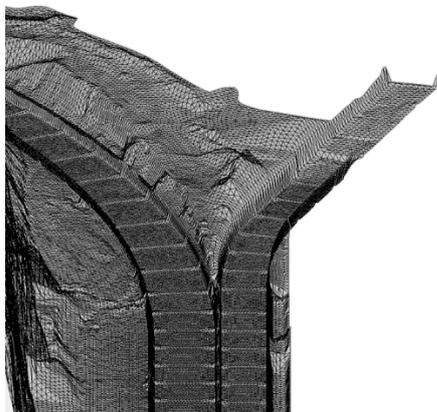


Figura 2.- Malla de cálculo del modelo 2D en la zona de la confluencia para la situación con las obras propuestas.

Las características de la malla de cálculo utilizada para las condiciones actuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.- Características de la malla de cálculo.

Parámetro	Valor
Número de celdas (triángulos)	83.266
Número de nodos	42.573
Área de la malla	0.143 km ²
Tamaño promedio de los elementos	1.85 m.
Elemento más pequeño	0.518 m.
Elemento más grande	2.56 m.
Mínima elevación	3.228 m.
Máxima elevación	3.321 m.

Aceleración de tiempos de cálculo con paralelización GPU

La Tabla 1 muestra los tiempos de cálculo utilizando la versión del modelo RiverFlow2D CPU utilizando un solo procesador y las versiones de GPU correspondientes a las ejecuciones de un hidrograma de Tr = 100 años utilizando la malla de 450.857 celdas. Las ejecuciones con 1 procesador se realizaron con el modelo RiverFlow2D no paralelizado en un procesador Intel I7 3.83 GHz que utilizaba solo un núcleo. Las ejecuciones de la GPU se realizaron con la GPU RiverFlow2D utilizando el mismo CPU, pero esta vez equipado con una tarjeta de GPU NVIDIA GTX 1080 Ti con 3.584 procesadores.

Tabla 1.- Comparación de tiempos de cálculo entre la versión del modelo 2D.

Número de celdas	CPU 1 procesador	GPU NVIDIA 1080 Ti	Aceleración
450.857	6.9 horas	15.9 min	26X

Conclusiones

En las simulaciones efectuadas para los hidrogramas de caudales extremos correspondientes a los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años se aprecia la ocurrencia de flujo supercrítico con altas velocidades lo cual tiene como consecuencia un gran arrastre de sedimentos y movimientos de fondo marcados tanto en el río Irpavi como en el río Achumani.

Para la situación post-obras, los diseños de muros propuestos son capaces de contener el caudal correspondiente al Tr = 100 años.

Los resultados de las simulaciones realizadas indican que la configuración de canales correspondiente al caso post-obras conduce a una mayor capacidad de arrastre de sedimentos en gran parte del canal del río Irpavi lo cual debiera contribuir a su auto limpieza y en consecuencia ayudaría a reducir las posibilidades de inundaciones al verse mermada la sedimentación en la confluencia. En los canales propuestos se aprecia que existirá bastante estabilidad del fondo con una leve tendencia a la erosión, lo cual contribuirá al mantenimiento de los cauces debido a que la capacidad de los canales diseñados es suficiente para movilizar los sedimentos hacia el tramo aguas abajo del puente de Calacoto.

Las simulaciones del modelo 2D utilizando paralelización GPU resultan ser entre 26 veces más rápidas que con la versión no paralelizada del modelo para las corridas realizadas con una malla de 450.857 celdas.

Referencias bibliográficas

- BID (Banco Interamericano de Desarrollo).** (2016). *Estudio Hidrodinámico del Río Irpavi en su Confluencia con el Río Achumani, La Paz, Bolivia. Informe Técnico No. 1: Análisis de la Situación Existente y Obras Propuestas. Cooperación Técnica BO1235.*
- Hydronia LLC** (2007). *Manual de Referencia del modelo RiverFlow2D.* España y USA.
- Meyer-Peter, E. and Muller, R.** (1948) *Formulas for Bed-load Transport. Proc. of the Second Meeting. IAHR, Stockholm, Sweden, pp. 39-64.*
- SMGIR, Gobierno Autónomo Municipal De La Paz, DPAR, UPEZ** (2016). *Estudio Técnico, Económico, Social y Ambiental de Cuenca del río Irpavi, entre Calle 1 de Irpavi y Puente de Ingreso a Calacoto.* La Paz, Bolivia.