

# SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL RÍO MADRE DE DIOS

Magaly Cusipuma<sup>1,2</sup>, Julio M. Kuroiwa<sup>3,4</sup> y Luis F. Castro<sup>5,6</sup>

<sup>1</sup> Investigadora Junior en Laboratorio Nacional de Hidráulica –LNH. Lima, Perú.

<sup>2</sup> Tesista. EAP de Mecánica de Fluidos. Facultad de Ciencias Físicas. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

<sup>3</sup> Director. Laboratorio Nacional de Hidráulica. Universidad Nacional de Ingeniería.

<sup>4</sup> Docente Principal. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

<sup>5</sup> Investigador. Laboratorio Nacional de Hidráulica Universidad Nacional de Ingeniería.

<sup>6</sup> Jefe de Prácticas. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

E-mail: ayuquemagaly@gmail.com, jkuroiwa@uni.edu.pe, lfcastro@uni.edu.pe

## Resumen

Se construyó un modelo físico con lecho móvil del tramo curvo de un río meándrico, en el que la relación R/B es igual a 2. Las velocidades fueron medidas con un velocímetro Vectrino II (ADV) de la marca Nortek AS, que permite medir el campo de velocidades en 3 dimensiones. Las simulaciones experimentales se complementaron con unas simulaciones numéricas en el código abierto, Open TELEMAC-MASCARET para analizar el flujo secundario que se presenta en el tramo curvo ocasionado por el flujo helicoidal que muestra con un incremento de la velocidad y tirante en la margen externa. Se implementaron tanto las opciones con corrección de flujo secundario y sin corrección. Las comparaciones entre ambas mostraron que, en este caso, es necesario incluir la corrección por flujo secundario para modelar de manera más precisa los patrones de flujo en casos como éste.

**Palabras claves:** Flujo secundario, elementos finitos, modelo de turbulencia, transporte de sedimentos.

## Introducción y antecedentes

Conocer la morfología de un río meándrico es fundamental para plantear soluciones técnicas adecuadas en el diseño y construcción de obras fluviales. En ese contexto, el comportamiento morfológico se puede estudiar en un modelo físico a escala reducida, o implementando un modelo numérico hidrodinámico y de transporte de sedimentos. Estos estudios, que casi siempre son complementarios, ayudan a entender, reproducir y predecir los procesos físicos que ocurren en un río. De esta manera, constituyen herramientas muy valiosas para el diseño de obras fluviales.

El modelamiento físico o numérico de transporte de sedimentos, de por sí, es difícil aún para canales artificiales prismáticos y, con mayor razón, lo es para ríos (canales naturales). Si un río presenta curvatura, el modelamiento en el tramo curvo presenta mayor dificultad debido a la configuración tridimensional y a la generación de flujo helicoidal, fenómeno estudiado, entre otros, por Abad et al (2008).

El problema de la migración lateral de los ríos, se debe a la presencia de flujos secundarios en la sección del tramo curvo. Las corrientes secundarias superficiales, y las que se encuentran cerca del lecho, generan el fenómeno de socavación en el banco externo y sedimentación en el banco interno. Este es un fenómeno de naturaleza tridimensional, donde se presentan flujos helicoidales que empiezan cuando el agua entra en el tramo con curvatura del canal.

El río Madre de Dios, en el SE peruano, lleva una alta carga de sedimentos en suspensión y las tasas de migración lateral del canal es aproximadamente 6 m año<sup>-1</sup> generando fenómenos de socavación lateral en su margen derecha. El informe de INDECI (2006) indica que, en el tramo curvo cerca de la ciudad de Puerto Maldonado, cuya longitud es aproximadamente 1540 metros, se está generando el colapso

de la ribera dejando desprotegido el talud. Este fenómeno afecta a los inmuebles, sistemas de abastecimiento de agua y desagüe de la ciudad de Puerto Maldonado, y, de no haberse tomado medidas correctivas, hubiera puesto en riesgo más de 100 metros de la Carretera Interoceánica. La erosión lateral ha formado bancos de gran altura y con taludes muy empinados. La verticalidad de los taludes hace que el banco sea más inestable ante una rápida variación del caudal. El material de la margen derecha está constituido por limos y arcillas, materiales muy erosionables que se desprenden cuando el río aumenta su caudal y nivel y los esfuerzos cortantes exceden los esfuerzos resistentes de la matriz del suelo.

## Modelo numérico

El modelo hidrodinámico (Telemac-2D) se basa en la solución de las ecuaciones promediadas en la profundidad (SWE) (Hervouet et al, 2007). Las ecuaciones que describe la conservación de la masa y momentum en la dirección x e y son:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + U \cdot \nabla h = 0 \dots \dots \dots [1]$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + U \cdot \nabla u \\ & = F_x - g \frac{\partial Z_s}{\partial x} \\ & + \frac{1}{h} \nabla (h v_t \nabla u) \dots \dots \dots [2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + U \cdot \nabla v \\ & = F_y - g \frac{\partial Z_s}{\partial y} \\ & + \frac{1}{h} \nabla (h v_t \nabla v) \dots \dots \dots [3] \end{aligned}$$

Dónde:  $U$  es el vector velocidad,  $u$  y  $v$  en las direcciones  $x$  e  $y$  respectivamente,  $\nabla$  es el operador divergencia que actúa sobre un campo vectorial o el operador gradiente cuando actúa sobre una variable,  $h$  es la profundidad del agua,  $v_t$  es la difusión efectiva (suma de la turbulencia y la difusividad molecular),  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $Z_s$  es la elevación de la superficie de agua,  $t$  es el tiempo y  $F_x$  y  $F_y$  y fuerzas externas como la fricción del lecho en las direcciones  $x$  e  $y$  respectivamente, el cual es parametrizada utilizando la ley de Nikuradse. Una descripción completa del programa Telemac-Mascaret se presenta en EDF (2014).

## Modelo físico

Se construyó un modelo físico de lecho móvil que representa el tramo La Pastora del río Madre de Dios a escala 1/60. El modelo físico tiene una longitud de 50 m, un ancho medio,  $B$ ,

de 6.9 m, un radio de curvatura,  $R$ , de 13.8 m y un tirante máximo,  $y$ , de 0.25 m. Por lo tanto, la relación  $R/B$  es 2. Cuatro bombas sumergibles permiten probar caudales de hasta 550 L/s que son transportados al modelo a través de tuberías de PVC de 356 mm (14"). La experiencia en el modelo experimental duró 24 horas, donde se recolectó la velocidad, tirante y batimetría que se emplean para calibrar y validar el modelo numérico. La velocidad fue registrada mediante un Velocímetro Acústico Doppler (ADV, siglas en inglés) tipo perfilador marca Nortek, modelo Vectrino.

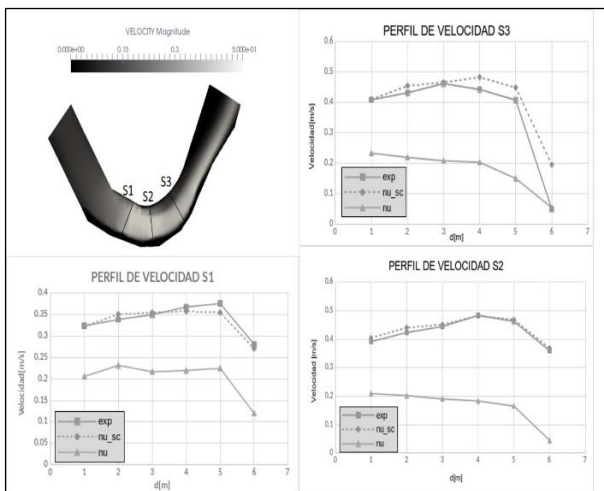
## Metodología

En este trabajo se realizó simulaciones con el módulo TELEMAC-2D (activando la opción "secondary current") y SISYPHE del sistema Open TELEMAC MASCARET donde se usó el modelo hidráulico del Río Madre de Dios que fue construido en el Laboratorio Nacional de Hidráulica a una escala 1/60 con el objetivo de analizar el comportamiento de flujo helicoidal que ocurre en el tramo curvo y que afecta a la cantidad de tasa de erosión en la margen derecha.

Se construyó una malla triangular no estructurada con 12345 elementos y 4578 nodos, con un tamaño medio del elemento de 0.3 m. Las condiciones de contorno que se impusieron son:  $Q = 0.490 \text{ m}^3/\text{s}$  en el límite aguas arriba y el tirante inicial aguas abajo. Como condición inicial de profundidad de agua cero. La rugosidad que se prescribió fue de Manning 0.020. Se realizó simulaciones numéricas para tiempo total de 500 minutos con una Workstation de 16 pc que es igual a la duración del experimento realizado en el modelo experimental.

## Resultados

Se obtuvieron resultados del módulo hidrodinámico TELEMAC-2D; donde se muestra el incremento de la velocidad en el modelo numérico y experimental el tramo curvo, desde la Sección 1 hasta la Sección 3. El patrón de flujo en este tramo se caracteriza por ser tridimensional. Cuando no se aplica la corrección por flujo secundario, los valores de velocidades medidos en las secciones 1, 2 y 3 (en línea sólida color gris) son subestimados y difieren en aproximadamente 36% en la sección  $S_1$  con respecto a los valores medidos por el ADV, como se muestra en la Figura 1. Cuando se aplica la corrección por flujo secundario, los valores estimados por el modelo se acercan a los medidos en el modelo físico en las 3 secciones.



**Figura 1.-** Se muestra la comparación entre las velocidades medidas en 6 puntos (que son numerados de derecha a izquierda) de cada sección transversal ( $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ ) y las que se obtuvieron en el modelo numérico, con y sin corrección de flujo secundario.

**Tabla 1.-** Datos de la velocidad experimental (exp), velocidad numérica teniendo en cuenta la corrección de flujo secundario ( $\nu_{sc}$ ), y velocidad sin considerar la corrección ( $\nu$ ) en la Sección  $S_1$ .

Puntos	exp [m/s]	$\nu_{sc}$ [m/s]	$\nu$ [m/s]	Error% exp- $\nu_{sc}$	Error% exp- $\nu$
1	0.324	0.323	0.206	0.42	36.35
2	0.339	0.351	0.232	3.41	31.72
3	0.35	0.355	0.217	1.2	38.05
4	0.368	0.358	0.22	2.69	40.17
5	0.376	0.355	0.225	5.74	40.05
6	0.281	0.271	0.12	3.85	57.29

En la **Tabla 1** se muestra los datos de velocidad de la sección transversal  $S_1$ , donde el error porcentual al considerar la corrección de flujo secundario es significativamente menor que cuando no se toma en cuenta este efecto.

## Conclusiones y recomendaciones

En un modelo físico de lecho móvil se representó el tramo curvo de un río meándrico en el cual se tomaron velocidades con un velocímetro perfilador de tipo ADV. Luego se implementó el modelo de código abierto, Open TELEMAC-MASCARET para simular los flujos que pasan a través de este tramo. Cuando el modelo incorporó la corrección por flujos secundarios, se consiguió una adecuada representación del campo de velocidades, disminuyendo los errores de manera significativa. Por lo tanto, es necesario incorporar la corrección de flujos secundarios para mantener la no-uniformidad del campo de velocidades en la vertical en modelos de profundidad promediada. Además, el efecto de flujos helicoidales podría afectar a la estimación de la tasa y dirección del transporte de sedimentos, y por lo tanto en el cálculo de la morfodinámica.

## Referencias bibliográficas

- Abad, J.D., Buscaglia, G. y Garcia, M.H. (2008) 2D stream hydrodynamics, sediment transport and bed morphology for engineering applications. *Hydrological Processes* 22, 1443-1459.
- EDF (2014). The open TELEMAC-MASCARET modeling system website. <http://www.opentelemac.org/>.
- Instituto Nacional de Defensa Civil, INDECI (2006) Mapa de Peligros de la Ciudad de Puerto Maldonado. Proyecto INDECI-PNUD PER 02/051 Ciudades Sostenibles. Instituto Nacional de Defensa Civil. Lima, Peru.
- Hervouet, J. M. (2007). *Hydrodynamics of Free Surface Flows, Modelling with the Finite Element Method*. John Wiley & Sons Ltd.

## Agradecimientos y reconocimientos

Los autores agradecen el apoyo de los Dres. Dr. Pablo Tassi y Riadh Ata, del Laboratorio Saint Venant, EDF, Francia en el desarrollo de las simulaciones numéricas. Asimismo, este documento presenta parte de los estudios que fueron financiados mediante el Contrato N° 358-PNICP-PIAP-2014, firmado entre la Universidad Nacional de Ingeniería y el Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad del Ministerio de la Producción, INNOVATE PERU. Del mismo modo, la fase numérica se desarrolló utilizando los recursos computacionales de Tipon Clúster HPC del LNH-UNI financiado por mediante el Contrato N° 257-EC-INNOVATEPERU-2016, firmado por la UNI, la Universidad Nacional del Santa e INNOVATE PERU. El Vicerrectorado de Investigación de la UNI proporcionó recursos a través del proyecto de Investigación Formativa FIC-F-18.