

# ANÁLISIS DE FORMAS DE FONDO SIMULADAS EN UN RÍO DE AGUAS POCO PROFUNDAS

Santiago Ochoa<sup>1</sup>, Teresa Reyna<sup>2</sup>, Marcelo García<sup>3</sup>, Horacio Herrero<sup>4</sup>,  
Ana Heredia<sup>5</sup> y José Manuel Díaz<sup>6</sup>

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.  
E-mail: saog2105@hotmail.com, teresamaria.reyna@gmail.com, cgarcia2mjc@gmail.com, hsherrero@yahoo.com.ar,  
aheredil@hotmail.com, jmdiazlozada@gmail.com

## Introducción

La solución numérica de las variables de flujo y transporte de sedimentos en canales, ríos y áreas costeras son todavía un desafío para las ramas de investigación relacionadas a la ingeniería hidráulica; esto debido a la importancia física de los procesos de erosión y deposición de partículas en un flujo natural.

Dentro del contexto de aplicar técnicas matemáticas y numéricas para describir y analizar el comportamiento hidráulico de cauces naturales, se planteó el desafío de la simulación de la hidrodinámica tridimensional con procesos de transporte de sedimentos en un tramo de río en la provincia de Córdoba, Argentina. El estudio se centra en el tramo medio del río Tercero o Ctalamochita ubicado en la localidad de Villa María al sur-este de la provincia.

## Objetivos y antecedentes

El objetivo principal de esta investigación, es realizar un análisis estadístico de las dimensiones dominantes de las formas de fondo simuladas en un modelo hidrodinámico tridimensional acoplado con procesos de transporte de partículas; la simulación numérica de las variables será aplicada a un río de aguas poco profundas y con pendiente de fondo correspondiente a la de un cauce de planicie, como lo es el río Tercero en su paso por la ciudad de Villa María. El modelo SSIIM será aplicado para calcular las variables de flujo y transporte de sedimentos en el dominio seleccionado; SSIIM es una herramienta de mecánica de fluidos computacional para la simulación de variables de flujo tridimensional y transporte de sedimentos en flujos con superficie libre. El software es de libre distribución y tiene algunas librerías en código abierto para el desarrollo de metodologías de cálculo.

La densidad espacial y temporal de los resultados simulados de la morfología fluvial, permiten plantear como innovación de este trabajo el de emplear metodologías de análisis espectral en base a la transformada discreta de Fourier y curvas wavelets tipo Morlet para describir las escalas dominantes de las señales de formas de fondo estimadas. Identificar las escalas dominantes de formas de fondo mediante las técnicas de análisis espectral permitirá establecer la variabilidad espacial de la morfología fluvial y cuantificar la influencia de las distintas escalas de formas de fondo en el campo de flujo y en la resistencia que ejercen las fronteras sólidas sobre la corriente. Como hipótesis se plantea que en un cauce de aguas poco profundas, los procesos hidrodinámicos relacionados con las formas de fondo tendrían características tridimensionales, razón por la que también se justifica el uso de un modelo tridimensional para simular los procesos hidrodinámicos en el dominio seleccionado.

## Materiales y métodos

### Simulación Numérica

El esquema de cálculo seleccionado es el basado en el modelo SSIIM (Sediment Simulation In Intakes with Multiblock

Option). SSIIM es una herramienta de mecánica de fluidos computacional para la simulación de variables de flujo tridimensional y transporte de sedimentos en flujos con superficie libre. El software es de libre distribución y tiene algunas librerías en código abierto para el desarrollo de metodologías de cálculo (Olsen, 2014).

El modelo SSIIM calcula las variables del flujo con las ecuaciones tridimensionales de Navier Stokes promediadas por Reynolds, que son resueltas con un modelo de cierre de la turbulencia K-ε. Las velocidades de flujo resultantes pueden ser usadas para resolver la ecuación de advección-difusión de la concentración para diferentes tamaños de sedimentos en el flujo. Los cambios en el fondo del flujo son calculados en base a la ecuación de balance de masa, tomando en cuenta la formulación dada por van Rijn (1984) para estimar las variables del transporte de partículas de fondo.

### Transformada de Fourier

La transformada de Fourier descompone la señal en elementos senoidales, cubriendo el rango de frecuencias que equivalen a la señal original (Torrence y Compo, 1998). La transformada de Fourier discreta, de una secuencia  $x_n$  es dada por:

$$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-2\pi i k n / N} \quad [1]$$

Donde en la ecuación [1],  $k$  es el índice de la frecuencia y  $N$  es el periodo de la serie ajustada. La imprecisión e ineficiencia de la transformada de Fourier, en el análisis del comportamiento de series no lineales con distintas frecuencias dominantes a lo largo del dominio, viene dada por la imposición del análisis de una sola frecuencia independiente a lo largo de la serie. En estos casos, es recomendable el análisis a partir de transformaciones con wavelets, que toman en cuenta la dependencia de varias frecuencias dominantes a lo largo de la serie (Catano-Lopera et al., 2009).

### Análisis Discreto con Wavelets

La transformada discreta en base a funciones Wavelets, se define como una convolución del producto de las transformadas de Fourier (Torrence y Compo, 1998):

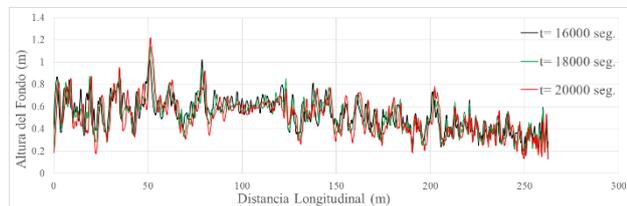
$$WT_{n(a)} = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{x}_k \hat{\varphi}(a\omega_k) e^{i\omega_k n \delta x} \quad [2]$$

Donde en la ecuación [2],  $WT_{n(a)}$  es la transformada discreta a partir de wavelets con escalas  $a$  y frecuencia angular  $\omega_k$ .  $\hat{\varphi}$  se define por la función de la familia de wavelets seleccionada para el análisis,  $n$  es el índice de ubicación espacial y  $\delta x$  el intervalo de los datos de la serie. A partir del análisis de frecuencias dominantes del espectro de energía de transformaciones wavelets, se pueden identificar las escalas dominantes de las señales de formas de fondo de un lecho fluvial (Gutierrez et al., 2013).

## Resultados

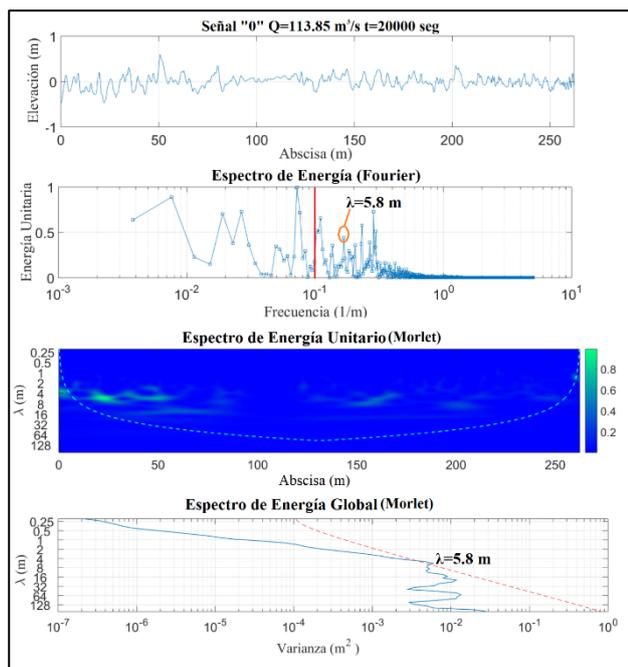
Se implementó el dominio del flujo del río Tercero para ser simulado con el modelo tridimensional SSIIM, que se basa en la

solución de las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds y que puede estimar las formas de fondo en base a la solución de la ecuación de balance de masa tomando en cuenta la formulación de van Rijn (1984). A continuación en la Figura 1 se presentan las señales longitudinales correspondientes a los tiempos de 16000, 18000 y 20000 segundos de la morfología fluvial en el medio de la sección a lo largo del tramo del río Tercero simulado, para el evento de  $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ :



**Figura 1.-** Proyección de un corte longitudinal de la morfología fluvial del río Tercero,  $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ .

En la Figura 1 se observan los resultados de señales longitudinales de las formas de fondo a partir de 16000 segundos, en que se estima haber llegado a un estado de régimen de las dimensiones de las formas de fondo en el tramo del río Tercero estudiado. A continuación en la Figura 2 se presenta el análisis de frecuencias con la transformada discreta de Fourier y con curvas wavelets tipo Morlet, sobre la señal unidimensional de morfología fluvial en la parte central del tramo analizado para un evento de  $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ :

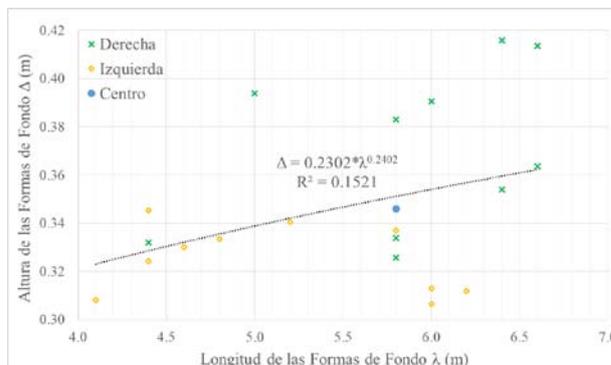


**Figura 2.-** Análisis de frecuencias con la transformada discreta de Fourier y curvas wavelets tipo Morlet, señal "0"  $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Como se puede ver en la Figura 2, con el espectro de energía dado por la transformada discreta de Fourier se dificulta observar con claridad la frecuencia media atribuida a las formas de fondo tipo dunas, esto se debe tanto a la fuga de energía por las dimensiones de baja frecuencia atribuidas a curvaturas longitudinales del río Tercero que no se consideran en el espectro de formas de fondo (a la izquierda de la línea roja sólida) y a la variabilidad de frecuencias de las formas de fondo tipo dunas de diferentes dimensiones. Si se normaliza sobre la varianza el espectro de energía global obtenido con la transformación wavelet con la curva tipo Morlet en cada longitud característica de la señal se puede obtener el espectro de energía global, donde la línea punteada color rojo representa el intervalo de confianza correspondiente al 95% de la función wavelet

considerada y la longitud dominante se obtiene en el máximo valor sobre el intervalo de confianza considerado.

De manera similar a lo presentado en la Figura 2, se realizaron análisis de frecuencias en 20 señales longitudinales de formas de fondo a la izquierda y a la derecha de la señal central "0", con separación aproximada de 1 metro de distancia, para el evento de  $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ . A continuación en la Figura 3 se presentan los resultados de las dimensiones dominantes obtenidas con el análisis de frecuencias de las 21 señales analizadas:



**Figura 3.-** Relación de las dimensiones geométricas de formas de fondo del río Tercero obtenidas con el análisis espectral,  $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La Figura 3 muestra que las formas de fondo con mayor magnitud se forman en el lado derecho, lo que es consistente con la pequeña curvatura del tramo analizado. También en la Figura 3 se puede observar que las variables geométricas de las formas de fondo tipo dunas, a pesar de tener el mismo orden de magnitud, tienen una dispersión importante con un coeficiente de correlación cuadrático  $R^2$  menor a 0.2, lo que hace suponer que se cumple la hipótesis de la tridimensionalidad de las formas de fondo en el tramo analizado.

## Conclusiones

Con el análisis de frecuencias dominantes de las señales de morfología fluvial simuladas en el flujo del río Tercero, basado en la aplicación de la transformada discreta de Fourier y de funciones wavelets tipo Morlet; se destaca que las formas de fondo con mayor magnitud se han desarrollado en el lado derecho del tramo, lo que es consistente con la curvatura que presenta.

También, se determinó que existe un comportamiento tridimensional en la distribución espacial de la geometría de las formas de fondo a lo largo del tramo analizado.

## Referencias

- Catano-Lopera, Y., Abad, J. D., García, M. H. (2009). "Characterization of Bedform Morphology Generated Under Combined Flows and Currents Using Wavelet Analysis", *Ocean Engineering*, Vol. 36, pp. 617–632.
- Gutierrez, R. R., Abad, J. D., Parsons, D. R., Best, J. L. (2013). "Discrimination of Bed Form Scales Using Robust Spline Filters and Wavelet Transforms: Methods and Application to Synthetic Signals and Bed Forms of the Río Parana, Argentina", *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 118, No. 3, pp. 1400–1418.
- Olsen, N. R. B. (2014). "A Three-Dimensional Numerical Model for Simulation of Sediment Movements in Water Intakes with Multiblock Option", *User's Manual. Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology*.
- Torrence, C., Compo, G. P. (1998). "A Practical Guide to Wavelet Analysis", *American Meteorological Society*, Vol. 79, pp. 61–78.
- van Rijn, L. (1984). "Sediment Transport Part i: Bed Load Transport", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 10, pp.1431–1456.