

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**DESCUBRIENDO LA INFLUENCIA DE PEQUEÑAS ESCALAS EN LA PREDICCIÓN
DEL TRANSPORTE DE FONDO A TRAVÉS DE SIMULACIONES LAGRANGIANAS**

CRISTIÁN ESCAURIAZA M.¹
CHRISTIAN GONZÁLEZ M.²
WERNHER BREVIS V.³

RESUMEN

La dinámica del transporte de sedimentos cercano al fondo tiene consecuencias importantes para muchos procesos fluviales en un amplio rango de escalas espaciales y temporales. El movimiento colectivo de partículas se predice comúnmente utilizando fórmulas empíricas que son función de las propiedades globales del sedimento y el flujo, y que no consideran la interacción del sedimento con la turbulencia. Investigaciones recientes han demostrado que para escalas pequeñas, el transporte de fondo es controlado por interacciones no lineales de las partículas con la capa límite turbulenta. En esta investigación buscamos mejorar la predicción del transporte global a partir del análisis de modelos numéricos que resuelven las escalas más pequeñas del movimiento, evaluando su impacto a escalas más grandes. Realizamos simulaciones numéricas directas (DNS) acopladas a un modelo Lagrangiano de partículas para capturar los detalles de la dinámica de los sedimentos. A partir de estas simulaciones, usamos los resultados para proponer una formulación estocástica del transporte, que permite describir el impacto de las fluctuaciones en escalas temporales y espaciales más grandes en función del parámetro de Shields. Este enfoque proporciona una nueva perspectiva sobre la predicción del transporte de fondo, basada en los conocimientos proporcionados por las simulaciones de alta resolución.

¹Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile– cescauri@ing.puc.cl

²Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile– crgonza1@uc.cl

³Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile– wbrevis@ing.puc.cl

1. INTRODUCCIÓN

La dinámica de las partículas de sedimentos que se mueven en contacto cercano con el lecho tiene implicaciones muy importantes en múltiples procesos físicos y ecológicos que ocurren en ambientes fluviales. El análisis del movimiento colectivo de partículas se lleva a cabo típicamente desde una perspectiva Euleriana, utilizando fórmulas basadas en relaciones empíricas que estiman el transporte de sedimentos cercano al fondo en función de las propiedades globales del flujo y del sedimento.

Sin embargo, estas expresiones analíticas no logran predecir correctamente el flujo de sedimentos ni capturar la complejidad de la dinámica del transporte a escalas pequeñas, que es gobernada por interacciones no lineales de los granos de sedimento con la capa límite turbulenta. Las colisiones de partículas y las fluctuaciones turbulentas a bajos esfuerzos de corte producen transporte global intermitente, que ha sido caracterizado por propiedades estadísticas de los eventos frecuentes y localizados de transporte de diferentes magnitudes a través del espectro multifractal. (Escauriaza y Sotiropoulos 2011, González et al. 2017).

En el futuro, la integración de escalas del transporte de fondo, las investigaciones sobre la aparición de patrones sedimentarios en el lecho y el estudio de la resistencia al flujo requerirán una respuesta a dos preguntas importantes: (1) ¿Influye la dinámica del movimiento de sedimentos a pequeñas escalas en el flujo observado en escalas temporales y espaciales más grandes?; y (2) ¿Podemos mejorar la predicción de las fórmulas de transporte de fondo utilizando simulaciones de alta resolución?

Para mejorar nuestra comprensión de la dinámica de los procesos de transporte de fondo, realizamos simulaciones Lagrangianas que logran capturar los detalles del movimiento de partículas de sedimento, y utilizamos los resultados para estudiar el impacto en el transporte de fondo a escalas espaciales y temporales más grandes, en función del parámetro de Shields.

En las secciones siguientes realizamos un resumen del modelo numérico de alta resolución para simular el transporte de partículas y después analizamos el impacto de la dinámica a pequeñas escalas en el flujo global del transporte de fondo. Finalmente, proponemos un modelo estocástico para el dominio completo que nos permite encontrar las propiedades estadísticas del transporte, en casos donde las fluctuaciones tienen efecto en la escala global.

2. MODELO LAGRANGIANO DE TRANSPORTE DE FONDO

Para estudiar el transporte de fondo en detalle, realizamos simulaciones numéricas directas (*Direct Numerical Simulations* — DNS) del flujo turbulento en un canal rectangular con condiciones de borde laterales periódicas, utilizando el modelo desarrollado por González et al. (2017). El modelo numérico resuelve las ecuaciones Navier-Stokes en tres dimensiones y se encuentra acoplado de manera bidireccional a un modelo de elementos discretos (*Discrete Element Method*— DEM) para representar a las partículas. Las ecuaciones siguientes (1) a (4), muestran el sistema de ecuaciones que se resuelve de forma acoplada:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{1}{\rho_f} F_i + \frac{f_i}{\rho_f}, \quad (2)$$

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = v_{pi} \quad (3)$$

$$\rho_p \forall_p \frac{dv_{pi}}{dt} = (\rho_p - \rho_f) \forall_p g_i + F_i + F^{col} \quad (4)$$

Las ecuaciones (1) y (2) corresponden a la conservación de la masa y cantidad de movimiento del fluido, cuya solución entrega la distribución de presión P y el campo de velocidad u_i . Las ecuaciones (3) y (4) definen la trayectoria y conservación de cantidad de movimiento de cada partícula, que permite encontrar la posición y velocidad instantánea, x_{pi} y v_{pi} , respectivamente. Este modelo de partículas calcula también las colisiones entre granos de sedimento utilizando un enfoque puntual, los parámetros utilizados se muestran en la tabla 1 (ver González et al., 2017, para más detalles).

Tabla 1. Parámetros empleados en las simulaciones DNS-DEM.

Parámetro	Valor
Número de Reynolds (Re)	3632
Número de Froude (Fr)	0.15
Escala de Velocidad	0.091 m/s
Velocidad de Fricción u^*	0.0081– 0.0089 m/s
Diámetro de los sedimentos	0.8 mm
Coefficiente de Restitución	0.01
Tasa de Poisson	0.45
Módulo de Young	2.5×10^7 Pa
Coefficiente de Fricción	0.6

Realizamos simulaciones en el dominio que se muestra en la Fig. 1(a) para seis diferentes parámetros de Shields τ_* , manteniendo constante el número de Reynolds de las partículas, $Re_{*p} = 7.0$, con el propósito de retener las propiedades estadísticas del forzamiento ejercido por la turbulencia sobre los granos de sedimento, como se muestra en la Fig. 1(b).

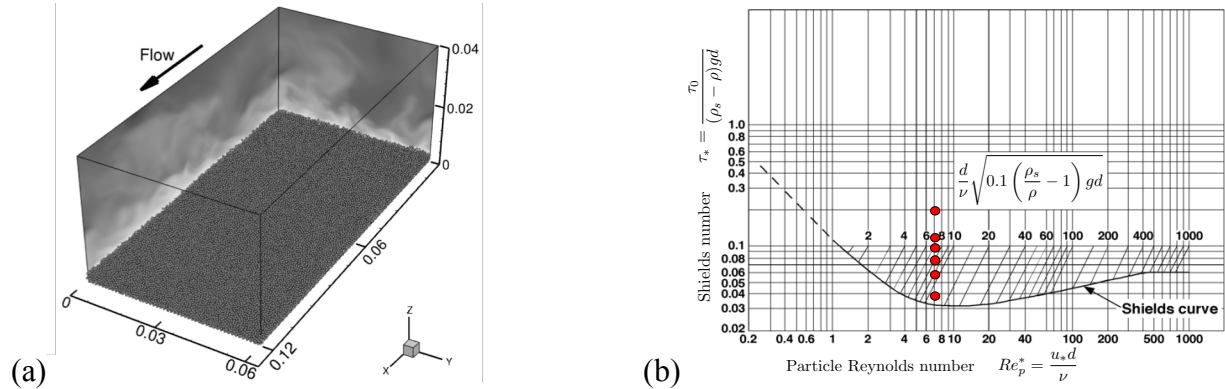


Figura 1. (a) Dominio computacional de las simulaciones con 50000 partículas. (b) Casos simulados en relación con el diagrama de Shields.

3. MODELO DEL DOMINIO COMPLETO

Los resultados de DNS se utilizan para calcular la evolución del transporte de fondo en el tiempo, integrando la masa de sedimento que pasa a través de una sección del dominio computacional. Como se muestra en la Fig. 2, para escalas de tiempo cortas, las fluctuaciones del transporte de partículas producen una variabilidad significativa en el transporte de fondo adimensional estandarizado. En escalas de tiempo más largas, los casos con parámetros de Shields mayores convergen a un flujo constante y se promedian los efectos de la intermitencia. Lo mismo ocurre para el caso con el parámetro de Shields más pequeño.

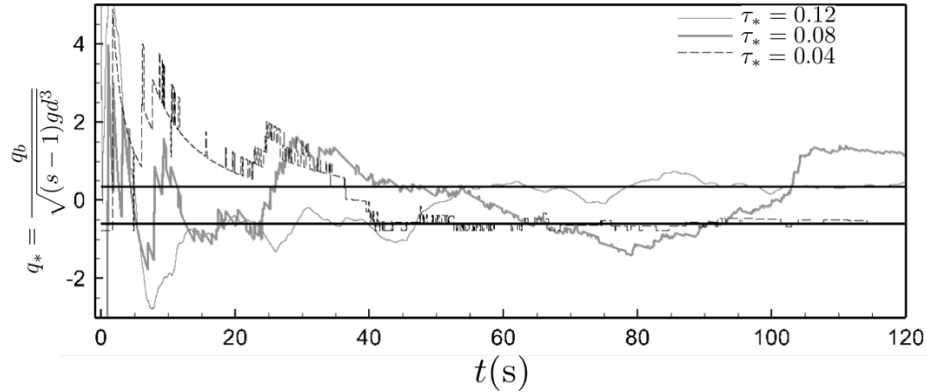


Figura 2. Transporte de fondo estandarizado en función del tiempo de observación muestra que el caso intermedio mantiene una variación para todo el rango simulado.

Para casos intermedios, sin embargo, la variabilidad persiste y las fluctuaciones se propagan a través de las escalas. Una ley de transporte basada en un exponente 3/2 sobre-predice el flujo de sedimentos en los casos que muestran esta irregularidad controlada por fluctuaciones, como se muestra en la Fig. 3.

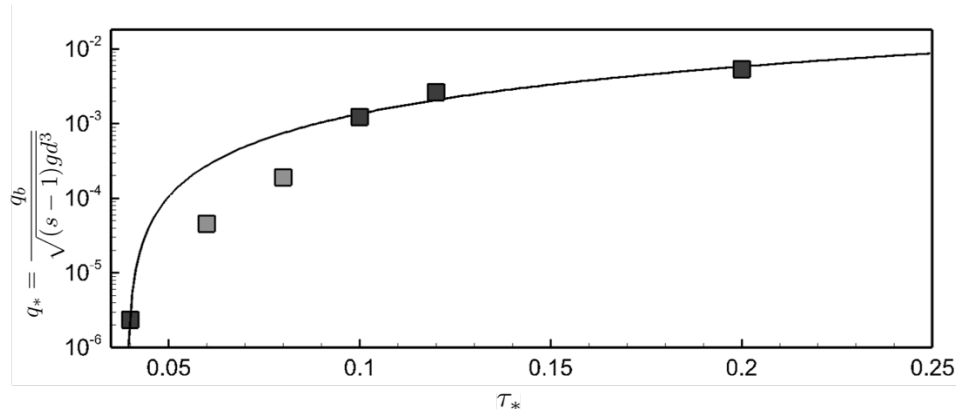


Figura 3. Los resultados muestran que una fórmula de transporte de fondo con un exponente 3/2 sobrevalora transporte simulado en los casos en que las fluctuaciones controlan el flujo.

Las series de tiempo de la Fig. 2 representan entonces la respuesta del sistema completo a la dinámica conjunta del flujo de agua y sedimentos. Adoptando un enfoque global que considera el dominio computacional como un volumen de control, la aplicación de la conservación de la

cantidad de movimiento para el dominio nos permite derivar una ecuación dinámica del transporte de fondo promediado espacialmente, que puede utilizarse para representar los casos con fluctuaciones:

$$\frac{\partial q_*}{\partial t} = \alpha (\tau_* + \beta) \quad (5)$$

donde q_* y τ_* , corresponden al transporte adimensional y al parámetro de Shields, respectivamente, y α y β son parámetros del sistema.

Como existe una variación temporal del número de Shields, que depende de la variación espacial y temporal de la dinámica de la turbulencia sobre el lecho, simplificamos el modelo usando valores promedio del esfuerzo de corte, pero agregando una variable aleatoria que representa el efecto de las fluctuaciones en el equilibrio dinámico del sistema completo como un ruido aditivo:

$$\dot{q}_* = f(q_*, t) + \xi(t) \quad (6)$$

Esta ecuación es no-lineal, que puede de manera simple representarse a partir de y sus parámetros se calculan usando el método de máxima verosimilitud con un filtro de Kalman extendido (Kristensen et al., 2004). La relación más simple permite suponer una expansión cuadrática para la ecuación (6):

$$\dot{q}_*(t) = -aq_*(t) + bq_*^2(t) + \sqrt{D}\eta(t) \quad (7)$$

A partir de este modelo simplificado podemos simular series de tiempo que son estadísticamente idénticas a los resultados del transporte de fondo obtenido de las simulaciones Lagrangianas, como se muestra en la Fig. 4.

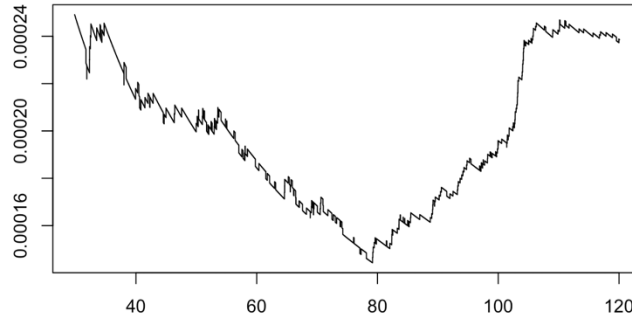


Figura 4. Predicción del transporte estandarizado en el tiempo para $\tau_*=0.08$ usando el modelo de una ecuación diferencial estocástica no-lineal (7), cuyos parámetros se han ajustado a los datos de la simulación DNS-DEM.

4. CONCLUSIONES

En esta investigación empleamos simulaciones DNS Lagrangianas para estudiar los efectos de los procesos a pequeña escala en el flujo global del transporte de fondo. Los resultados muestran que hay una ventana crítica, para la cual las fluctuaciones del transporte de partículas aparecen en

escalas de tiempo más largas, produciendo un transporte irregular, como se observa en los gráficos de transporte estandarizado.

Para realizar un análisis estadístico de este régimen crítico, proponemos una nueva perspectiva sobre la predicción del transporte de fondo, a partir de ecuaciones diferenciales estocásticas basadas en los datos proporcionados por el modelo Lagrangiano de alta resolución. Definiendo estos modelos simplificados, podemos realizar simulaciones de bajo costo que nos permiten calcular las propiedades del transporte en los casos dominados por fluctuaciones, obteniendo el promedio y momentos de orden superior del transporte de fondo a partir de estas ecuaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto Fondecyt 1191785 y Conicyt/Fondap 15110017.

REFERENCIAS

Escauriaza, C. and Sotiropoulos, F. (2011). Lagrangian model of bed-load transport in turbulent junction flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 666, 36–76.

González, C., Richter, D. H., Bolster, D., Bateman, S., Calantoni, J., and Escauriaza, C. (2017). Characterization of bedload intermittency near the threshold of motion using a Lagrangian sediment transport model. *Environmental Fluid Mechanics*, 17, 111–137.

Kristensen, N. R., Madsen, H., and Jørgensen, S. B. (2004). Parameter estimation in stochastic grey-box models. *Automatica*, 40(2), 225–237.