

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE FONDO EN UN FLUJO TURBULENTO  
ALTAMENTE HETEROGÉNEO**

**MAGDALENA BARROS.<sup>1</sup>**  
**CRISTIÁN ESCAURIAZA.<sup>2</sup>**

**RESUMEN**

El transporte de sedimentos de fondo en flujos rugosos y heterogéneos está fuertemente influenciado por la variabilidad espacial de la turbulencia cercana al lecho, inducida por macro-rugosidades. Sin embargo, el transporte de fondo suele estimarse a partir del esfuerzo de corte global en flujos uniformes, sin considerar las variaciones espaciales y temporales del flujo ni del transporte. Este trabajo busca comprender en mayor profundidad los mecanismos que gobiernan el transporte de fondo en flujos rugosos con macro-rugosidades, y evaluar el impacto de la variabilidad espaciotemporal del flujo sobre las predicciones de transporte. Para ello, se realizaron simulaciones de alta resolución (LES) del flujo turbulento sobre un arreglo de bolones dispuestos sobre un lecho rugoso. De manera acoplada, se resolvieron las trayectorias e interacciones de partículas de sedimento móviles bajo condiciones de transporte bajo y moderado. Los resultados revelan la coexistencia de dos regiones bien diferenciadas en el lecho: una zona entre los bolones, caracterizada por alta turbulencia y un transporte de sedimentos elevado y continuo; y otra en la estela de los bolones, con bajos niveles de velocidad y esfuerzo de corte, donde el transporte es altamente intermitente. Esta dinámica genera una distribución de sedimentos en el lecho altamente heterogénea, con mayores concentraciones en las estelas que en las zonas de alto transporte. Además, se evalúa la incertidumbre asociada al uso de un valor constante para la condición umbral de movimiento de los sedimentos basada en el parámetro de Shields. Se observa que este parámetro presenta grandes fluctuaciones temporales, lo que puede introducir errores significativos en la estimación del transporte de fondo. En conjunto, este estudio aporta información valiosa sobre los procesos que controlan el transporte de fondo en flujos altamente heterogéneos, y remarca la importancia de considerar la variabilidad espaciotemporal del flujo en su modelación y predicción.

---

<sup>1</sup> Estudiante de Doctorado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile - email: mbarros1@uc.cl

<sup>2</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile – email: cescauri@uc.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

El transporte de sedimentos de fondo corresponde al conjunto colectivo de granos que se transportan en contacto con el lecho rodando, deslizándose o saltando. El movimiento de los sedimentos y su rol en la evolución morfológica de sistemas fluviales es fundamental para el manejo de recursos hídricos, la seguridad pública, evolución del paisaje, protección de ecosistemas y sustentabilidad ambiental. En la naturaleza los ríos suelen corresponder a sistemas altamente turbulentos que involucran un amplio rango de escalas espaciales y temporales y están gobernados por procesos no lineales que dan origen a patrones organizados del flujo. Todos estos factores influyen significativamente en el movimiento de los sedimentos. De esta forma, el transporte de fondo es el resultado de procesos que involucran un amplio rango de escalas espaciales y temporales, desde la escala de los granos de sedimento hasta la escala del tramo de río en la que normalmente se estima el transporte (Escauriaza et al., 2023).

Aun en condiciones de flujo uniforme, el transporte de fondo presenta una fuerte variabilidad debido a intensas fluctuaciones turbulentas y estructuras coherentes que se forman cerca del lecho (González et al., 2017). En flujos más complejos, como lechos rugosos con macro-rugosidades, el flujo se vuelve altamente heterogéneo (no uniforme), y el movimiento de sedimentos también se ve afectado por variaciones espaciales en la turbulencia cercana al lecho, inducidas por las macro-rugosidades (Papanicolaou et al., 2012). Estos elementos son comunes en ríos de alta montaña, lo cuales presentan lechos de grava con arreglos periódicos de bolones que suelen permanecer inmóviles y solo se transportan en grandes crecidas (Montgomery and Buffington, 1997; Monsalve et al., 2017).

Estudios previos han investigado el flujo turbulento en presencia de bolones aislados (Hajimirzaie et al., 2014; Dey et al., 2011) y de arreglos de bolones (Papanicolaou et al., 2012; Monsalve et al., 2017; Barros et al., 2025), caracterizando tanto la estructura del flujo instantáneo como sus estadísticas turbulentas. Estos elementos generan una alta variabilidad espacial del flujo cercano al lecho y producen una fracción considerable del esfuerzo de arrastre que no contribuye al movimiento de sedimentos (Barros et al., 2025). Si bien estos estudios han permitido avanzar en la comprensión del comportamiento del flujo en medios altamente heterogéneos, los mecanismos que controlan el transporte de fondo en estos sistemas complejos aún no se comprenden completamente.

La alta variabilidad espacial del flujo generada por las macro-rugosidades produce también marcadas diferencias en las tasas de transporte de sedimentos. Yager et al. (2012) observó grandes variaciones en el transporte de fondo en un río de alta montaña, atribuyéndolas principalmente a la heterogeneidad del flujo, más que a la distribución granulométrica de los sedimentos. De manera similar, Papanicolaou et al. (2018) demostró que en flujos con bolones pueden desarrollarse patrones de transporte completamente distintos según las condiciones del flujo local y de la superficie libre, identificando zonas diferenciadas de erosión y deposición. Sin embargo, la variabilidad espacial del flujo rara vez se incorpora en las formulaciones del transporte de fondo ni tampoco se aíslan los efectos de la turbulencia inducida por macro-rugosidades de otros factores, como la morfología del lecho, el

suministro de sedimentos o su distribución granulométrica para analizar su influencia en el transporte.

El transporte de sedimentos de fondo suele estimarse a partir de un esfuerzo de corte global, derivado de la suposición de flujo uniforme, utilizando generalmente la altura y la pendiente del cauce. Esta aproximación omite las variaciones espaciales y temporales tanto del flujo como del transporte de sedimentos. Además, las expresiones utilizadas corresponden a formulaciones semi-empíricas desarrolladas para condiciones simplificadas, generalmente sin la presencia de macro-rugosidades y bajo configuraciones de flujo uniforme. Como resultado, la aplicación de estas ecuaciones en entornos fluviales altamente heterogéneos puede conducir a errores significativos en la estimación del transporte de fondo (Rickenmann, 2001). En este contexto, se vuelve fundamental incorporar la variabilidad espacial y temporal del flujo en las predicciones del transporte de fondo.

Este trabajo tiene como objetivo profundizar en la comprensión de los mecanismos que controlan el transporte de fondo en flujos turbulentos altamente heterogéneos, así como caracterizar las variaciones espaciales y temporales que influyen en su predicción. Para ello, se llevaron a cabo simulaciones de grandes vórtices (large-eddy simulations, LES) sobre un lecho rugoso fijo con un arreglo de bolones, acopladas con un método de elementos discretos (discrete element method, DEM) que permite resolver las trayectorias e interacciones de granos móviles de sedimento. Estas simulaciones de alta resolución, que capturan tanto la dinámica de la turbulencia como el transporte a la escala de los granos, permiten una caracterización detallada del transporte de fondo en entornos con alta heterogeneidad espacial.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 Simulaciones numéricas**

Se representan los lechos gruesos de grava con macro-rugosidades comúnmente encontradas en ríos de alta montaña utilizando una geometría simplificada correspondiente a esferas. El dominio computacional utilizado corresponde a un arreglo periódico de bolones colocados sobre un lecho rugoso compuesto de 540 elementos semiesféricos. La configuración está basada en los experimentos de Papanicolaou et al. (2012) donde se consideró una porción del extenso arreglo de bolones aplicando condiciones de borde periódicas en la dirección longitudinal y transversal. La figura 1 muestra el dominio computacional donde se puede ver un bolón en el centro y un cuarto de bolón en cada esquina colocados sobre el lecho rugoso.

Al igual que en los experimentos, tanto los bolones como las semiesferas que componen el lecho rugoso están inmóviles y tienen diámetros de  $D = 0.55\text{cm}$  y  $D = 0.183\text{cm}$  respectivamente. Las condiciones dinámicas del experimento fueron replicadas manteniendo el número de Reynolds, el número de Froude, la separación de los bolones que minimiza la interacción de las estelas y la razón de sumergencia (razón entre la profundidad del flujo y el diámetro de los bolones) que minimiza la influencia de la superficie libre. Estos parámetros

se presentan en la tabla 1. El número de Reynolds corresponde a un flujo altamente turbulento lo cual es característico de ríos de alta montaña.

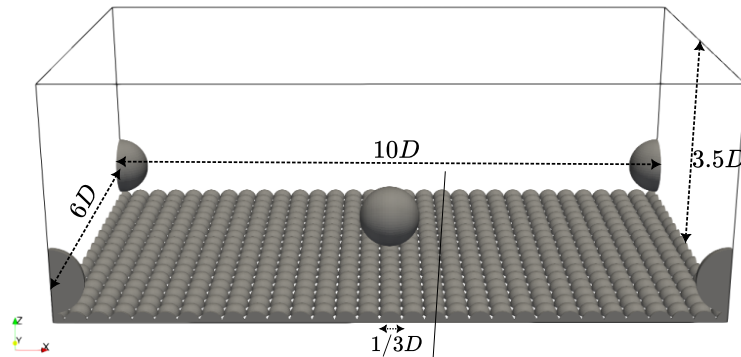


Figura 1: Dominio computacional donde se aprecia un bolón esférico al centro y un cuarto de bolón en cada esquina. Los bolones están colocados sobre un lecho rugoso compuesto por 540 semiesferas. Las dimensiones del dominio se muestran respecto al diámetro de los bolones.

Acoplado al flujo se incluyeron 29.304 partículas de sedimento de diámetro  $d = 0.33$  cm que fueron inicialmente distribuidas aleatoriamente. Dos condiciones de movimiento definidas por el número de Shields fueron simuladas cambiando la densidad:  $\tau_* = 0.135$  ( $\rho_p = 2650 \text{ kg/m}^3$ ) y  $\tau_* = 0.064$  ( $\rho_p = 4500 \text{ kg/m}^3$ ) como se muestra en la tabla 1. Esto permitió estudiar una condición cercana al umbral de movimiento  $\tau_*/\tau_{*c} = 1.3$  y una condición de movilidad moderada  $\tau_*/\tau_{*c} = 2.7$ .

Tabla 1. Parámetros de las simulaciones

Número de Reynolds flujo	$Re_h = U_b h / \nu$	150.500
Número de Reynolds bolón	$Re_D = U_b D / \nu$	42.900
Número de Froude	$Fr = U_b / \sqrt{gh}$	0.56
Número de Reynolds sedimento	$Re_p = u_* d / \nu$	281
Espaciamiento diagonal bolones	$\Delta d_i / D$	11.67
Razón de sumergencia	$h / D$	3.5
Número de Shields	$\theta = \rho u_*^2 / (\rho_p - \rho) g d_s$	0.135, 0.064

## 2.1 Métodos numéricos

El flujo turbulento sobre el arreglo de bolones y el lecho rugoso es resuelto por medio de simulaciones de grandes vórtices (LES) el cual es un método numérico en el que se resuelven directamente las escalas del flujo o remolinos de mayor tamaño (mayores al tamaño de la grilla) y se incorpora el efecto de las escalas más pequeñas por medio de un modelo de sub-grilla. De esta forma se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes tridimensionales, filtradas y para un flujo incompresible que vienen dadas por:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i + F_{coup} \quad (2)$$

Donde  $u_i$  son las componentes filtradas de la velocidad,  $P = \frac{p}{\rho} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{ij}$  con  $p$  la presión filtrada y  $\rho$  la densidad del fluido,  $\tau_{ij}$  son las componentes del tensor de esfuerzos de sub-grilla (SGS).  $f_i = (f_x, 0, 0)$  es la fuerza requerida para mantener un caudal constante al utilizar bordes periódicos y  $F_{coup}$  es la fuerza ejercida por las partículas de sedimento sobre el fluido por unidad de volumen y dividida por la densidad. El tensor de sub-grilla (SGS) se define como  $\tau_{ij} = -2\nu_t S_{ij}$ , donde  $S_{ij} = 1/2(\partial u_i/\partial x_j + \partial u_j/\partial x_i)$  es el tensor de tasa de deformación del flujo. La viscosidad turbulenta se calcula con el modelo dinámico aplicando un promedio local para la constante, debido a la heterogeneidad del flujo en todas las direcciones (Germano et al., 1991; Lilly, 1992), y se calcula como  $\nu_t = C_s \Delta^2 |S|$ , con  $|S| = \sqrt{2S_{kl} S_{kl}}$

Los bolones y semiesferas del lecho rugoso son representadas por medio del método de bordes inmersos (IBM por su sigla en inglés) propuesto por Gilmanov et al. (2003). De esta forma se impone la condición de no deslizamiento en las superficies inmersas de los elementos esféricos y se utiliza un modelo de pared robusto para mantener la precisión de las simulaciones a altos números de Reynolds. Este modelo corresponde al propuesto por Cabot & Moin (2000) y Wang & Moin (2002) y consiste en resolver una ecuación de capa límite simplificada en los nodos inmersos (ver Barros et al. (2025)).

La trayectoria de las partículas móviles de sedimentos es integrada en el tiempo de acuerdo con la segunda ley de Newton que describe el balance de fuerzas de cada partícula. Este viene dado por:

$$\begin{aligned} \rho_p V_p \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = & (\rho_p - \rho) V_p g + \frac{1}{2} \rho_f C_D A |\mathbf{u} - \mathbf{v}_p| (\mathbf{u} - \mathbf{v}_p) + \rho V_p (-\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}) \\ & + \rho C_m V_p \left( \frac{D\mathbf{u}}{Dt} - \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} \right) + F_c \end{aligned} \quad (3)$$

Donde  $\mathbf{u}$  y  $\mathbf{v}_p$  corresponden a los vectores de velocidad del flujo y los sedimentos respectivamente y  $V_p$  y  $A$  son el volumen y área de las partículas. Las fuerzas en el lado derecho corresponden a la gravedad, empuje, arrastre, esfuerzos del fluido, masa agregada y colisiones entre partículas y con el lecho.  $C_D$  es el coeficiente de arrastre el cual es estimado con la expresión propuesta por Cliff y Gauvin (1971). Para las colisiones se consideró un modelo de contacto granular de Hertz-Mindlin (González et al., 2017), en el cual la interacción entre los granos se modela mediante un sistema resorte-amortiguador en las direcciones normal y tangencial a su línea de centros. Se utilizó un código propio para resolver el flujo turbulento, el cual fue acoplado al software de acceso libre LIGGGHTS para la dinámica de las partículas (Kloss et al., 2012; Barros & Escauriaza, 2024)

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Flujo instantáneo

El arreglo de bolones y su interacción con el lecho rugoso generan complejos patrones tridimensionales del flujo turbulento. La Figura 2 muestra la vorticidad instantánea en dos planos horizontales, uno a la mitad de la altura de los bolones y otro justo sobre el lecho rugoso, así como en un plano vertical ubicado en el centro del canal. En estas visualizaciones se distingue claramente una capa de corte con alta vorticidad que se forma a partir de la separación del flujo en la cresta de los bolones, junto con las estructuras coherentes generadas en la estela, asociadas a regiones de recirculación. La compleja interacción entre el flujo aguas abajo de los bolones y el lecho rugoso también se manifiesta en el plano inferior, donde se observan las estructuras formadas en las crestas de las semiesferas y su interacción con las estelas producidas por los bolones.

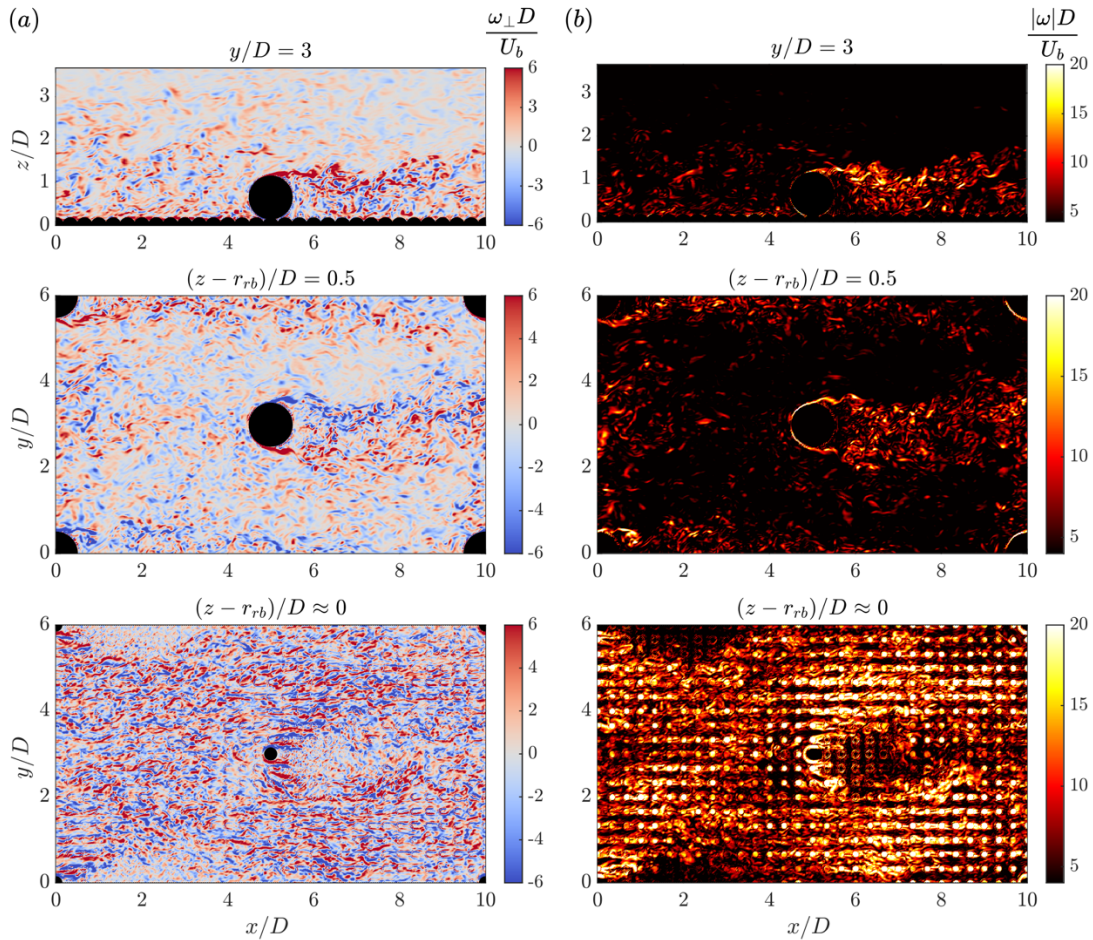


Figura 2: (a) Vorticidad adimensional perpendicular al plano y (b) magnitud de vorticidad, ambas instantáneas. Los planos de arriba hacia abajo corresponden a la mitad del canal, a la mitad de la altura de los bolones y a exactamente sobre el lecho rugoso. La vorticidad se adimensionaliza utilizando el diámetro de los bolones y la velocidad promedio en la sección transversal.

### 3.2 Variabilidad espacial del flujo, de la distribución de sedimentos y del transporte

El arreglo de bolones y el lecho rugoso inducen patrones coherentes del flujo a gran escala, como se observa en la figura 2. Estas estructuras modifican significativamente la distribución espacial de la velocidad media y del esfuerzo de corte cercano al lecho, influyendo de manera fundamental en el transporte de sedimentos de fondo. La figura 3 muestra, la velocidad media y esfuerzo de corte turbulento cerca del lecho, junto con partículas localizadas en esa misma elevación para un instante de tiempo. En esta figura, las partículas negras corresponden a aquellas en movimiento, mientras que las blancas indican partículas en reposo.

Se identifica una región de alta velocidad y elevado esfuerzo de corte turbulento entre los bolones, en dirección transversal, donde las partículas se mantienen activamente en movimiento, favoreciendo un transporte continuo. En contraste, en las zonas de las estelas ubicadas aguas abajo de los bolones, tanto la velocidad como el esfuerzo de corte disminuyen significativamente, lo que impide que las partículas superen el umbral de inicio de movimiento. Como consecuencia, el transporte en estas regiones se vuelve altamente intermitente.

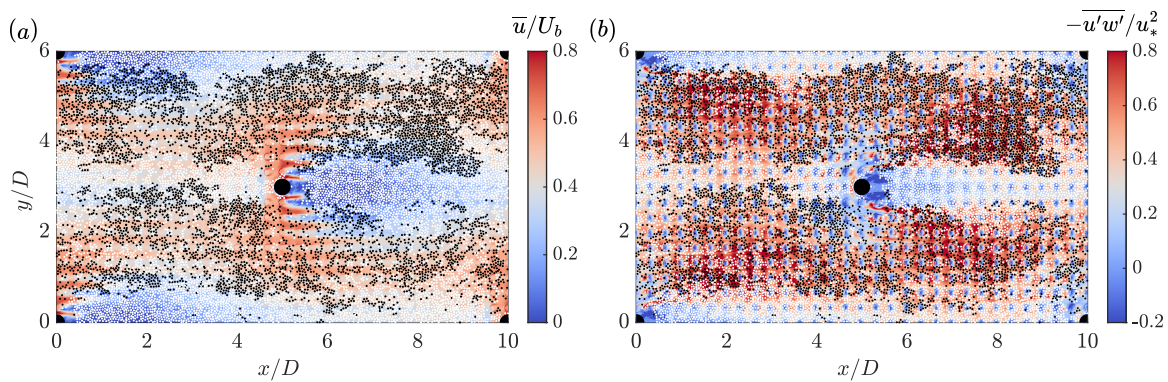


Figura 3: (a) Velocidad y (b) esfuerzo de corte turbulento cerca del lecho. Sobre ambas imágenes se muestra las partículas instantáneamente localizadas en esa elevación para  $\tau_* = 0.135$ . Partículas en negro están en movimiento (velocidad mayor a cero) y partículas en blanco permanecen quietas.

Las marcadas diferencias en la distribución espacial de las estadísticas del flujo turbulento cerca del lecho generan una etapa inicial no estacionaria, caracterizada por una intensa erosión en las zonas de alta velocidad y esfuerzo de corte, y una deposición continua en las estelas de los bolones, donde la turbulencia es reducida. Como resultado de esta etapa, aun cuando se comienza con una distribución homogénea de sedimentos, el lecho alcanza un estado de equilibrio con una distribución altamente heterogénea, como se observa en la figura 4 para la condición de movilidad moderada. Este patrón no se presenta en la condición de baja movilidad, en la que la distribución de sedimentos permanece homogénea, similar a la inicial, debido a la alta intermitencia del transporte.

La alta variabilidad espacial del flujo también da lugar a diferencias significativas en la distribución del transporte de fondo promediado en el tiempo, como se muestra en la figura 5. Se observa que la zona ubicada entre los bolones, en dirección transversal, donde predominan altas velocidades y esfuerzos de corte, presenta un transporte elevado, ya que el flujo en esta región suele superar el umbral de inicio de movimiento de los sedimentos. En

contraste, en las estelas de los bolones, donde tanto la velocidad como el esfuerzo turbulento son muy bajos, el transporte resulta prácticamente despreciable, especialmente en la condición de baja movilidad. Esto se debe a que el flujo en estas zonas permanece por debajo del umbral necesario para movilizar las partículas.

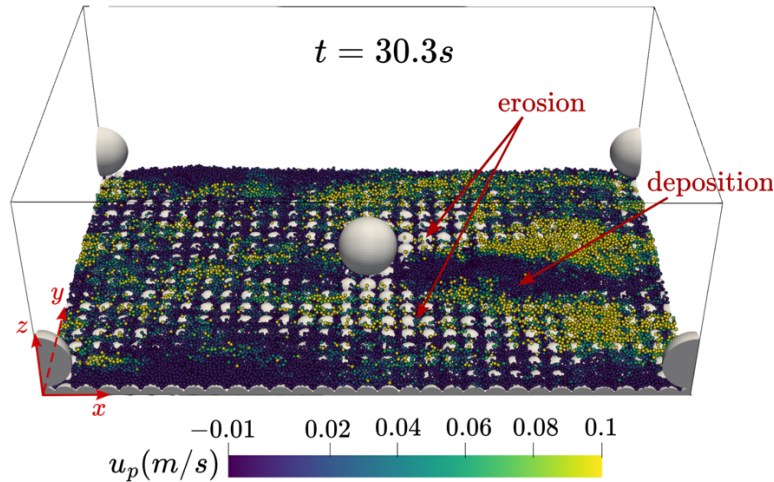


Figura 4: Distribución espacial de sedimentos en el lecho una vez que se alcanza la condición de equilibrio para el caso de movilidad moderado ( $\tau_* = 0.135$ ).

Un aspecto relevante de este resultado es que no toda la superficie del lecho contribuye al transporte de sedimentos. Por el contrario, coexisten simultáneamente regiones donde el transporte ocurre de forma continua y otras donde es prácticamente inexistente. Así, incluso cuando el esfuerzo de corte global supera el umbral de inicio de movimiento, pueden persistir zonas localizadas sin transporte. De manera inversa, aunque el esfuerzo de corte global esté por debajo del umbral, puede haber regiones donde el transporte sí ocurra. Este comportamiento espacialmente heterogéneo rara vez se considera en las ecuaciones tradicionales para estimar el transporte de fondo, lo que puede conducir a errores significativos en su predicción.

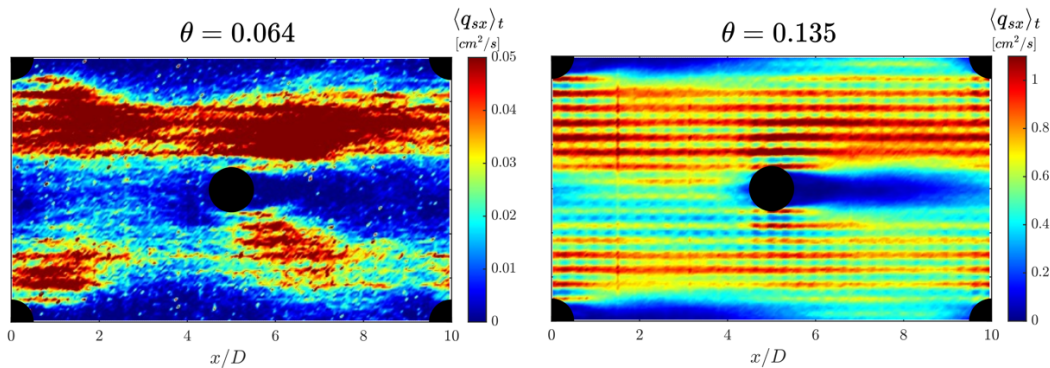


Figura 5: Distribución espacial del transporte de fondo promedio en el tiempo para  $\tau_* = 0.064$  (izquierda) y  $\tau_* = 0.135$  (derecha). El transporte se obtiene contando partículas que atraviesan secciones verticales.

### 3.3 Condición umbral de movimiento en flujos heterogéneos

Como se mostró en las subsecciones anteriores, la variabilidad espacial inducida por los bolones y el lecho rugoso genera una marcada heterogeneidad en el transporte de sedimentos de fondo, con regiones donde el transporte es continuo y otras donde es altamente intermitente. Bajo condiciones de baja y moderada movilidad, como las consideradas en este estudio, estas variaciones espaciales pueden afectar de manera significativa la estimación de la condición umbral de inicio de movimiento que se utiliza en las ecuaciones de transporte.

Con el objetivo de analizar la incertidumbre asociada al uso de una condición de inicio de movimiento constante en flujos turbulentos altamente heterogéneos, se emplea la ecuación de transporte propuesta por Wong & Parker (2006). Esta formulación corresponde a una corrección de la ecuación original de Meyer-Peter & Müller (1948), obtenida a partir de un reanálisis de los datos experimentales originales. La ecuación está dada por:

$$q_* = 4 (\tau_* - \tau_{*c})^{1.5} \quad (4)$$

y relaciona el transporte adimensional  $q_*$  con el esfuerzo de corte adimensional  $\tau_*$ , también conocido como número de Shields. En esta formulación,  $\tau_{*c}$  representa el umbral crítico de movimiento, cuyo valor se extrae típicamente del diagrama de Shields. El objetivo de este análisis es evaluar la validez de utilizar un valor constante de  $\tau_{*c}$  en flujos rugosos altamente heterogéneos. Para ello, dado que se conoce el esfuerzo de corte adimensional  $\tau_*$  y el transporte  $q_*$  en todo el dominio en cada instante de tiempo, se despeja  $\tau_{*c}$  a partir de la ecuación 3, lo que permite obtener su evolución temporal. Las series temporales del transporte  $q_*$ , número de Shields  $\tau_*$  y el parámetro de umbral de movimiento  $\tau_{*c}$  se muestran en la figura 4.

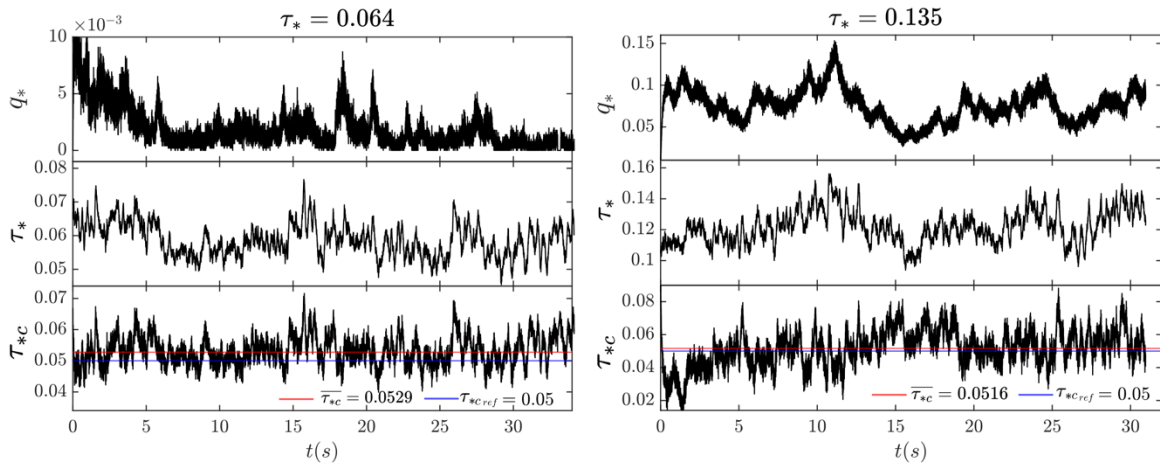


Figure 6: De arriba hacia abajo: transporte adimensional  $q_*$ , número de Shields  $\tau_*$  y el parámetro de umbral de movimiento  $\tau_{*c}$ . El promedio temporal de  $\tau_{*c}$  y el valor de referencia extraído de la curva de Shields se muestran en la figura. La condición de bajo movimiento ( $\tau_* = 0.064$ ) se muestra a la izquierda y la de alta movilidad ( $\tau_* = 0.135$ ) a la derecha.

La figura muestra que el promedio temporal del parámetro crítico de Shields para ambas condiciones de movilidad es muy similar al valor de referencia extraído de la curva de Shields

$\tau_{*cref} = 0.05$ . En particular, se observa  $\overline{\tau_{*c}} = 0.0529$  para  $\tau_* = 0.064$  y  $\overline{\tau_{*c}} = 0.0516$  para  $\tau_* = 0.135$ . Sin embargo, a pesar de esta similitud en el valor promedio, el valor instantáneo  $\tau_{*c}$  presenta una variabilidad considerable, oscilando entre 0.04 y 0.07 para  $\tau_* = 0.064$  y entre 0.02 y 0.08 para  $\tau_* = 0.135$ .

Esta amplia dispersión sugiere que el uso de un valor crítico constante para estimar el transporte de sedimentos de fondo instantáneo puede inducir errores significativos. Esto se debe, en parte, a la naturaleza no lineal de las ecuaciones de transporte, donde pequeñas variaciones en el valor umbral del esfuerzo de corte pueden generar grandes diferencias en la cantidad de sedimento transportado. En consecuencia, se evidencia que las formulaciones ajustadas a condiciones simplificadas, que no consideran la presencia de macro-rugosidades ni la variabilidad espacial y temporal del flujo y del transporte, presentan una alta incertidumbre cuando se aplican a flujos altamente heterogéneos.

#### 4. CONCLUSIONES

Las simulaciones de alta resolución basadas en LES, acopladas con el seguimiento de múltiples trayectorias de sedimentos mediante el método DEM, permiten capturar las escalas espaciales y temporales más relevantes del flujo para el transporte de fondo, así como resolver la interacción entre la turbulencia y el movimiento de los granos de sedimento. Este tipo de simulaciones permite una comprensión profunda de los mecanismos fundamentales que gobiernan el transporte a escala de los granos y permite evaluar si los efectos de pequeña escala persisten a escalas mayores, lo que indicaría la necesidad de incorporar estos efectos en los modelos de transporte de fondo.

Los resultados muestran que el flujo turbulento generado por el arreglo de bolones sobre un lecho rugoso produce estructuras coherentes instantáneas y altera significativamente la distribución espacial de velocidades y esfuerzos de corte. Como consecuencia, la distribución de los sedimentos sobre el lecho es altamente heterogénea, con zonas de alta concentración y bajo transporte (entre bolones) y regiones de alta concentración y transporte intermitente en las estelas. Esto implica que no toda la superficie del lecho participa activamente en el transporte, sino que este ocurre de forma localizada y en algunas regiones de manera intermitente. Por otro lado, estos procesos de pequeña escala introducen una variabilidad significativa en el flujo y el transporte que no es considerada en las estimaciones convencionales ni en la definición del umbral de movimiento. Por lo tanto, asumir un valor constante para este parámetro puede llevar a errores sustanciales al estimar el transporte instantáneo en flujos altamente heterogéneos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto ONR-Global N62909-23-1-2004. Se agradecen los recursos computacionales provistos por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02). Los estudios de posgrado de M.B. fueron financiados por CONICYT-PFCHA/Doctorado Nacional/2020-21200308.

## REFERENCIAS

Barros, M., & Escauriaza, C. (2024). Lagrangian and Eulerian perspectives of turbulent transport mechanisms in a lateral cavity. *Journal of Fluid Mechanics*, 984, A1.

Barros, M., Vinkovic, I., & Escauriaza, C. (2025). Momentum and energy dynamics across scales in the flow over a rough bed with an array of boulders. *Journal of Fluid Mechanics*, 1014, A21.

Cabot, W., & Moin, P. (2000). Approximate wall boundary conditions in the large-eddy simulation of high Reynolds number flow. *Flow, Turbulence and Combustion*, 63(1), 269-291.

Clift, R., & Gauvin, W. H. (1971). Motion of entrained particles in gas streams. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 49(4), 439-448.

Dey, S., Sarkar, S., Bose, S. K., Tait, S., & Castro-Orgaz, O. (2011). Wall-wake flows downstream of a sphere placed on a plane rough wall. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(10), 1173-1189.

Escauriaza, C., González, C., Williams, M. E., & Brevis, W. (2023). Models of bed-load transport across scales: turbulence signature from grain motion to sediment flux. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(3), 1039-1052.

Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., & Cabot, W. H. (1991). A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Physics of fluids a: Fluid dynamics*, 3(7), 1760-1765.

Gilmanov, A., Sotiropoulos, F., & Balaras, E. (2003). A general reconstruction algorithm for simulating flows with complex 3D immersed boundaries on Cartesian grids. *Journal of Computational Physics*, 191(2), 660-669.

González, C., Richter, D. H., Bolster, D., Bateman, S., Calantoni, J., & Escauriaza, C. (2017). Characterization of bedload intermittency near the threshold of motion using a Lagrangian sediment transport model. *Environmental Fluid Mechanics*, 17(1), 111-137.

Hajimirzaie, S. M., Tsakiris, A. G., Buchholz, J. H., & Papanicolaou, A. N. (2014). Flow characteristics around a wall-mounted spherical obstacle in a thin boundary layer. *Experiments in fluids*, 55(6), 1762.

- Kloss, C., Goniva, C., Hager, A., Amberger, S., & Pirker, S. (2012). Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 12(2-3), 140-152.
- Lilly, D. K. (1992). A proposed modification of the Germano subgrid-scale eddy viscosity model. *Phys. Fluids A*, 4(3), 633-635.
- Montgomery, D. R., & Buffington, J. M. (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109(5), 596-611.
- Monsalve, A., Yager, E. M., & Schmeeckle, M. W. (2017). Effects of bed forms and large protruding grains on near-bed flow hydraulics in low relative submergence conditions. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122(10), 1845-1866.
- Papanicolaou, A. N., Kramer, C. M., Tsakiris, A. G., Stoesser, T., Bomminayuni, S., & Chen, Z. (2012). Effects of a fully submerged boulder within a boulder array on the mean and turbulent flow fields: Implications to bedload transport. *Acta Geophysica*, 60(6), 1502-1546.
- Papanicolaou, A. N., Tsakiris, A. G., Wyssmann, M. A., & Kramer, C. M. (2018). Boulder array effects on bedload pulses and depositional patches. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(11), 2925-2953.
- Rickenmann, D. (2001). Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. *Water resources research*, 37(12), 3295-3305.
- Wang, M., & Moin, P. (2002). Dynamic wall modeling for large-eddy simulation of complex turbulent flows. *Physics of Fluids*, 14(7), 2043-2051.
- Yager, E. M., Dietrich, W. E., Kirchner, J. W., & McArdeell, B. W. (2012). Patch dynamics and stability in steep, rough streams. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F2).