

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**SEDIMENTO FINO Y LAS INTERACCIONES TURBULENTAS DE
LECHOS PERMEABLES**

NATALIA BUSTAMANTE¹
JORGE FUENTES²
YARKO NIÑO³

RESUMEN

Este trabajo presenta un análisis de la variación de los valores y la densidad espectral de las velocidades verticales de una corriente aluvial en la cercanía de un lecho de gravas, contaminada con sedimentos finos. El objetivo de este trabajo es determinar cómo se ven modificadas las interacciones turbulentas en la cercanía de un lecho de gravas, en el cual sedimento fino se ha infiltrado. Se consideran datos de velocimetría con Particle Image Velocimetry (PIV) de tres instalaciones experimentales del laboratorio Francisco Javier Domínguez de la Universidad de Chile. El análisis considera un espacio entre dos partículas (un poro en este artículo) en un lecho de gravas y toma en cuenta tres puntos en el lecho, aguas arriba del poro, en el poro y aguas abajo del poro. Se reporta que el poro puede llegar a generar modificaciones en la velocidad vertical del flujo en torno al poro por la infiltración de sedimento fino. Cuando hay una eyección de sedimentos finos de baja densidad, la hipótesis de la turbulencia congelada de Taylor deja de ser válida. Se concluye que, cuando no existe una eyección de sedimentos en un lecho de grava contaminado con sedimento fino, tampoco hay modificaciones ni en la componente vertical de la velocidad, ni en la distribución de la densidad espectral.

¹ Estudiante de Doctorado en Fluidodinámica, Universidad de Chile, Santiago, Chile - email: nataliabustamante@ug.uchile.cl

² Ingeniero Civil hidráulico, Universidad de Chile - email: jorgebarreraster@gmail.com

³ Profesor Titular, División de Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Departamento de Ingeniería Civil, Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile - email: ynino@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los desastres naturales como los flujos de escombros, las erupciones volcánicas, las inundaciones o la actividad humana pueden introducir grandes cantidades de sedimentos finos en los lechos de grava, generando un alto impacto ambiental, ya que la presencia de sedimentos finos en el sustrato puede modificar la dinámica del flujo en la zona hiporreica. Las partículas finas modifican la permeabilidad y al depositarse dentro de los poros cambian la conductividad hidráulica del sustrato (Dermisis & Papanicolaou, 2014; Khademishamami & Nardin, 2020; Mcdowell-Boyer et al., 1986). Adicionalmente, el material fino que es depositado dentro de los espacios intersticiales en los lechos de grava puede reducir la rugosidad del grano (Iseya & Ikeda, 1987; Niño et al., 2018).

Posterior a que una partícula se deposite en el lecho, ésta puede reincorporarse nuevamente al transporte en suspensión. Investigadores como Bagnold (1966), López & García (2001), Niño et al. (2003), entre otros, determinaron umbrales para caracterizar la reincorporación de sedimentos y el transporte en suspensión. Mientras que, Robinson (1991), García et al. (1995), Niño & García (1996), entre otros, plantean que las partículas finas pueden reincorporarse al transporte en suspensión bajo la acción de estructuras coherentes que pueden contribuir al transporte vertical de momentum. Investigadores como Tamburrino (1997), Adrian (2007), Zhong et al. (2015), Zhong et al. (2016), entre otros, reportaron estructuras de pequeña escala, $l \sim H$, gran escala, $l \sim 3H$, y súper escala longitudinal, $l > 10H$, donde l es la escala longitudinal del vortice o de la estructura coherente, y H es la profundidad de la lámina de agua. Adicionalmente, se han analizado las estructuras turbulentas por medio de un análisis por cuadrantes, en un plano cartesiano, de las velocidades axial y vertical del flujo, donde en el cuadrante 1 están las interacciones denominadas *outward interaction*, en el cuadrante 2 están las denominadas *ejections*, en el cuadrante 3 están las *inward interaction* y en el cuadrante 4 están los *sweeps*. Por medio de este análisis se ha reportado que las interacciones turbulentas mas frecuentes son las del cuadrante 2 y 4, mientras que las interacciones turbulentas del cuadrante 1 y 3 son menos frecuentes. Además, las interacciones tipo *sweeps* son mas eficientes para la reincorporación de partículas finas desde el lecho (Niño & Musalem, 2000).

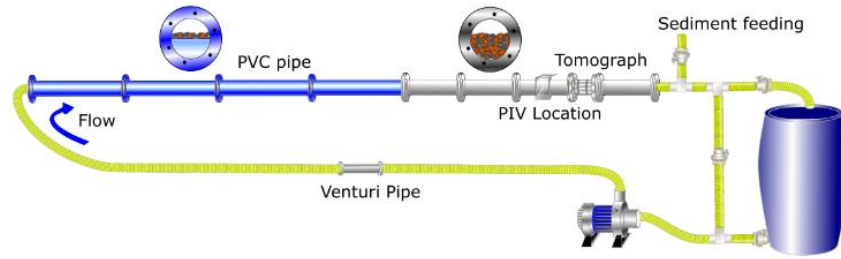
Sin embargo, Bustamante-Penagos & Niño (2020a) reportaron resultados experimentales de sedimento fino, del tipo pumicita, que se infiltra en un lecho de grava con flujo subsuperficial, donde hay eyecciones de sedimentos finos en el flujo superficial. Estas eyecciones son un afloramiento del flujo subsuperficial al flujo superficial que transporta sedimentos en la vertical de forma cuasi-permanente. Estas eyecciones modifican la presencia de interacciones turbulentas. Es decir, no predominan las interacciones tipo *ejections* y *sweeps*. La dinámica de estas eyecciones permitió cuestionarnos, bajo qué condiciones la contaminación de un lecho de gravas con partículas finas puede modificar los patrones de velocidad vertical, la hipótesis de la turbulencia congelada de Taylor y la distribución de la densidad espectral. Estas eyecciones motivaron el análisis tanto de las escalas de movimiento de los vórtices, como de un análisis espectral, por medio de la transformada Wavelet, para la velocidad en la cercanía del lechos de grava de velocidad contaminado con partículas finas. Para este análisis se consideraron los datos de velocimetría de Fuentes (2017) y Bustamante-Penagos & Niño (2020a, 2020b).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

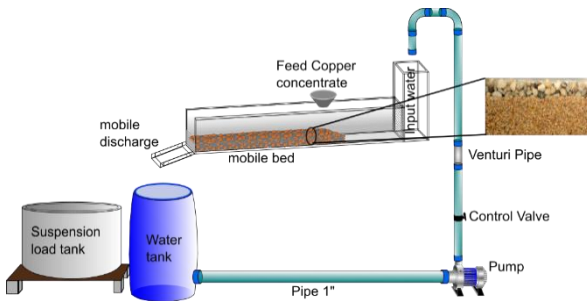
Los experimentos se llevaron a cabo en tres instalaciones experimentales diferentes, pero todas tenían un lecho de grava y un sedimento fino contaminante. La primera instalación fue la de Fuentes (2017). La instalación experimental consistió en un sistema cerrado de tuberías, de 0.1 m de diámetro y 10 m de longitud, 8 m de tubería PVC y 2 m de acrílico transparente. Al interior de la tubería de 8 m hay un lecho de grava fijo sobre una superficie acrílica a lo largo de la tubería, con el objetivo de evitar la depositación de sedimentos en este sector. Aguas abajo hay una tubería transparente, de 2 m de longitud. El lecho de grava en este sector es inmóvil pero no fijo y el espesor de la capa de grava es de 0.05 m. El diámetro característico de las gravas (D_{g50}) fue de 10 mm. Las partículas finas fueron partículas de vidrio y su diámetro medio (D_{f50}) fue de 0.12 mm (Figura 1a.). La segunda instalación fue el montaje de Bustamante-Penagos & Niño (2020a). La instalación experimental consistió en un canal de pendiente variable, con un ancho de 0.11 m y longitud de 3.0 m. La configuración del lecho tuvo dos capas de sedimentos; la capa subsuperficial, de 0.03 m de espesor, fue de arenas cuyo diámetro característico (D_{s50}) varió entre 0.2 y 3.35 mm; la capa superficial tuvo un espesor de 0.02 m, fueron gravas y su diámetro característico (D_{g50}) fue de 10 mm. Las partículas finas fueron concentrado de cobre con diámetro medio (D_{f50}) de 40 μm (Figura 1b). Finalmente, el montaje experimental de Bustamante-Penagos & Niño (2020b) fue un canal de 0.03 m de ancho, 0.58 m de longitud y la configuración del lecho tenía dos capas de sedimentos. La capa subsuperficial, de espesor 0.39 m, fue de arenas cuyo diámetro característico (D_{s50}) fue de 2.45 mm; la capa superficial, de 0.02 m de espesor, fueron gravas cuyo diámetro característico (D_{g50}) fue de 10 mm y las partículas finas fueron pumicita de diámetro medio (D_{f50}) de 0.12 mm (Figura 1c).

Fuentes (2017), Bustamante-Penagos & Niño (2020a) y Bustamante-Penagos & Niño (2020b) implementaron la técnica Particle Image Velocimetry (PIV) para la medición del campo de velocidad. Fuentes (2017), Bustamante-Penagos & Niño (2020a) consideraron partículas de 75 μm diámetro medio, con propiedades de fluorescencia ante la luz láser de longitud de onda de 532 nm. Bustamante-Penagos & Niño (2020b) utilizaron partículas de pumicita como trazadoras para la implementación del PIV. Se utilizó una cámara Photron FASTCAM Mini UX50, cuya frecuencia máxima de muestreo es de 2500 fps para la adquisición de las imágenes y el procesamiento de los datos se realizó con el software PIVLab.

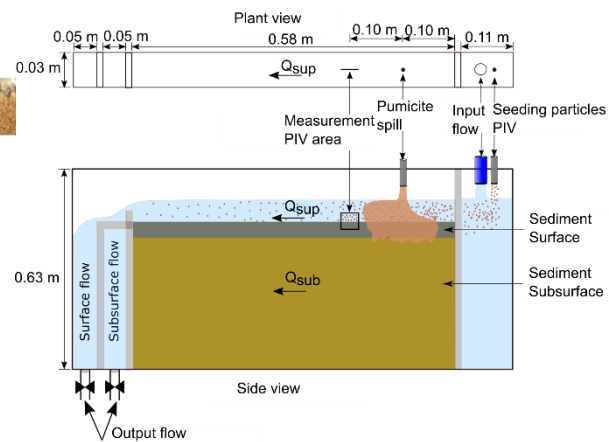
La Tabla 1 presenta los parámetros hidráulicos de los experimentos analizados, donde d_{f50} el diámetro medio de las partículas finas, Q es el caudal, U es la velocidad media del flujo, u_* es la velocidad friccional, que fue estimada como $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$, donde τ_0 es el esfuerzo de corte en el fondo, obtenido experimentalmente de los resultados con PIV, y ρ es la densidad del fluido.



a.) Sistema cerrado, con lecho de grava fijo en el tramo azul de la tubería y lecho de grava inmóvil en el tramo gris de la tubería. Esquema experimental considerado para investigar contaminación de lechos de grava con partículas de vidrio.



b.) Canal abierto con sistema recirculante de agua y con compuerta móvil para desviar el flujo superficial con sedimento en suspensión. Esquema experimental implementado para investigar contaminación de lechos de grava con concentrado de cobre.



c.) Canal abierto con sistema de medición independiente para el flujo superficial y subsuperficial. Esquema experimental implementado para investigar contaminación de lechos de grava con pumicita y concentrado de cobre.

Figura 1. - Esquemas experimentales implementados por: a.) Fuentes (2017), b.) Bustamante-Penagos & Niño (2020b), c.) Bustamante-Penagos & Niño (2020a).

Tabla 1.- Parámetros hidráulicos de los experimentos analizados.

Investigación	Partículas	d_{f50}	Q	U	u_*	H
		(mm)	(l/s)	m/s	m/s	m
Fuentes (2017)	Esferas de vidrio	0.12	1.4	0.38	0.044	0.050
Bustamante-Penagos & Niño (2020a)	Pumicita	0.12	0.09	0.052	0.0023	0.067
Bustamante-Penagos & Niño (2020b)	Concentrado de cobre	0.04	1.8	0.29	0.043	0.056

Para el análisis de las series temporales de velocidad en la cercanía de lecho de gravas, se implementó la metodología presentada por Bustamante-Penagos & Niño (2020a), en la cual se consideró un espacio entre dos partículas (un poro en este artículo) y se tomaron tres puntos de medición, aguas arriba del poro (P1), en el poro (P2) y aguas abajo del poro (P3) (Figura 2). Se analizaron velocidades verticales, y los espectros de frecuencia Wavelet de las velocidades verticales y axiales.

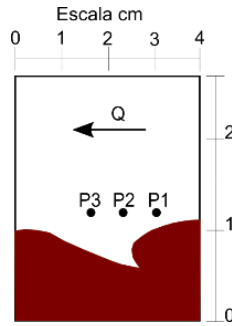
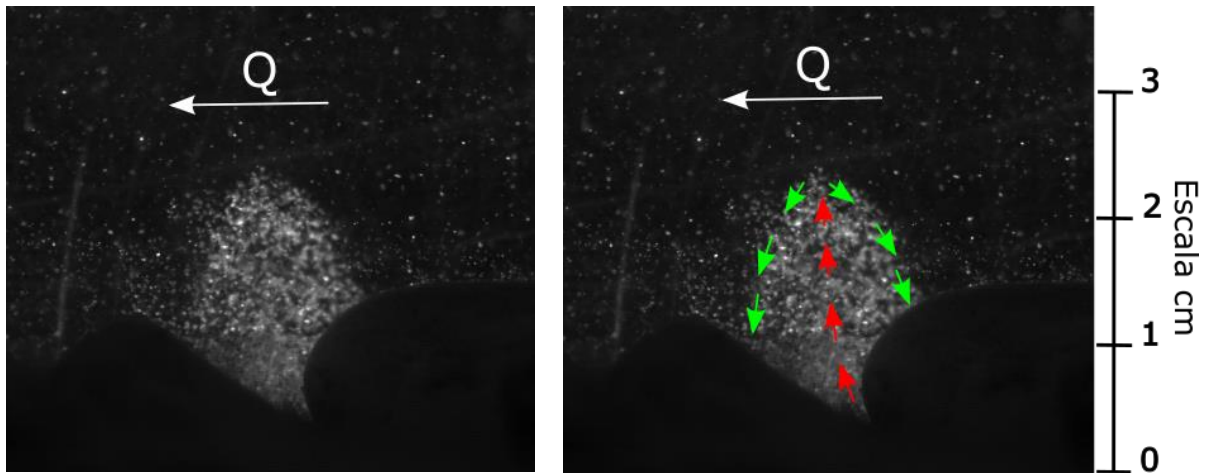


Figura 2.- Localización de los puntos donde se realizó el análisis temporal de las series de velocidad. P1 es aguas arriba del poro, P2 es en el poro y P3 es aguas abajo del poro. En café se muestra el lecho de gravas. Las gravas fueron de tamaño medio 10 mm.

La Figura 3 muestra el afloramiento del flujo subsuperficial y el transporte de partículas finas asociado a la eyección de sedimento reportada por Bustamante-Penagos & Niño (2020a). Las flechas rojas representa el flujo eyectado a través del poro y también el movimiento vertical de las partículas finas, eyectadas desde el lecho hacia la columna de agua. Mientras que, las flechas verdes representan el borde externo de la eyección de sedimento y también las zonas del movimiento vertical hacia abajo de las partículas finas eyectadas desde de lecho.



a.) Eyección de sedimentos.

b.) Trayectoria de las partículas finas eyectadas desde el lecho.

Figura 3.- Eyección de sedimento fino en un lecho de gravas reportada por Bustamante-Penagos & Niño (2020a).

2.1. Espectros de Frecuencia Wavelet

Los espectros de frecuencia Wavelet fueron considerados sobre los espectros de Frecuencia de Fourier, ya que la transformada Wavelet no requiere series estacionarias y además tiene la propiedad de localización (Perrier et al., 1995 and Bronshtein et al., 2007). Además, la

transformada de Wavelet es más robusta y genera poca propagación de errores asociado a algunas perturbaciones.

Para la transformada continua Wavelet de una señal $u(t)$ se define como:

$$W_a(a, t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[u(t') \frac{1}{\sqrt{a}} \psi * \left(\frac{t_0 - t'}{a} \right) \right] dt'$$

Donde $u(t)$ es serie o señal de velocidad, ψ es la función Wavelet, * denota la conjugada compleja, a y t_0 son la escala y posición, respectivamente. La función wavelet considerada en este trabajo fue la Morlet, la cual está definida como:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2}$$

Donde ω_0 es una frecuencia central de la Wavelet, para este caso $\omega_0 = 6$. Realizando un procedimiento análogo al análisis de Fourier para las correlaciones cruzadas se obtiene:

$$W_{uv}(a, t) = W_u(a, t)W_v^*(a, t)$$

Puede demostrarse que, el espectro de frecuencia esta dado por:

$$E_{uu}(f) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{uu}(f, t)|^2 dt$$

Donde $|W_{uu}(f, t)|^2$ es el espectro local Wavelet y C es la constante de normalización.

En este artículo no se presenta el análisis matemático de la transformada Wavelet, dado que está fuera objetivo del trabajo, sin embargo, autores como Torrence y Compo (1998), Bronshtein et al., (2007), Chen et al. (2019), presentan un análisis matemático detallado sobre la transformada Wavelet.

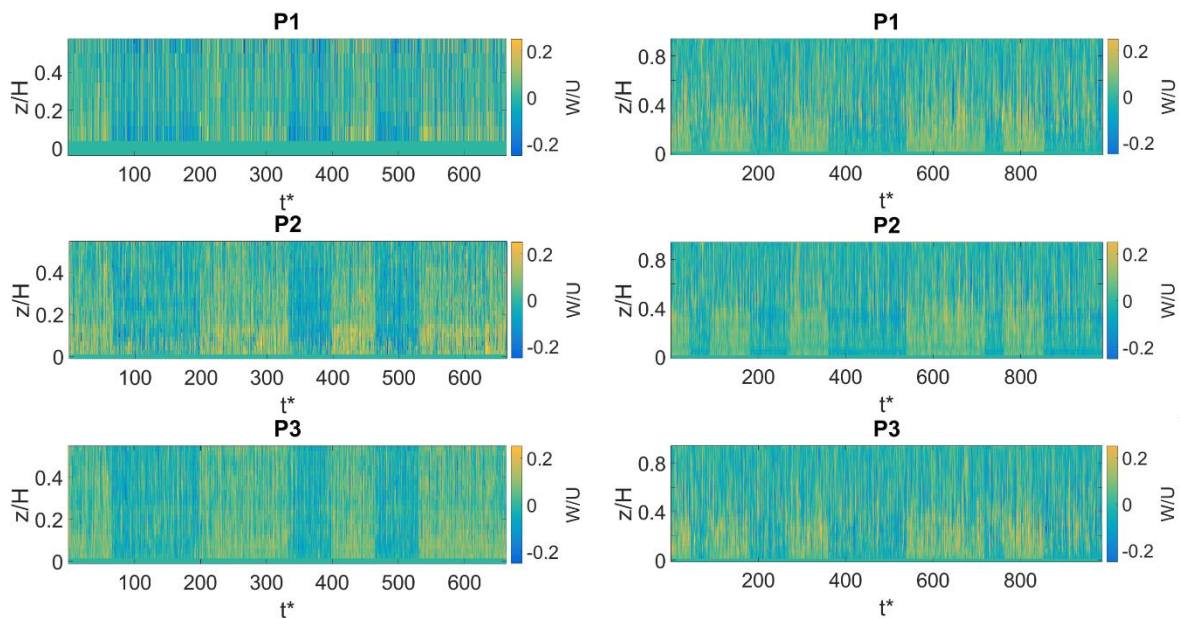
3. RESULTADOS

Velocidad vertical

La velocidad vertical adimensionalizada con la velocidad media del flujo en los puntos de medición P1, P2 y P3, son presentados en la Figura 4a-c para cada montaje experimental. El analisis presentado se realiza en función del tiempo adimensional t^* , donde $t^* = tU/H$, t es el tiempo, U es la velocidad media del flujo y H es la lámina de agua. La Figura 4a y la Figura 4b muestran que la variación de la velocidad del flujo en el tiempo adimensionalizado es igual en los tres puntos, con un pequeño desplazamiento temporal. Es decir, la hipótesis de teoría congelada de Taylor es válida. Mientras que, la Figura 4c muestra una variación de la velocidad vertical entre los puntos de medición P1, P2 y P3, es decir, la eyección de sedimentos hace que la hipótesis de la turbulencia congelada no sea válida. Adicionalmente, la Figura 4c muestra que en el poro es donde se presenta la mayor velocidad vertical hacia arriba, debido a la eyección de sedimento. Mientras que, aguas abajo del poro se presenta la mayor velocidad vertical hacia abajo, debido a que en esta zona se genera un sumidero para la depositación de las partículas eyectadas a través el poro.

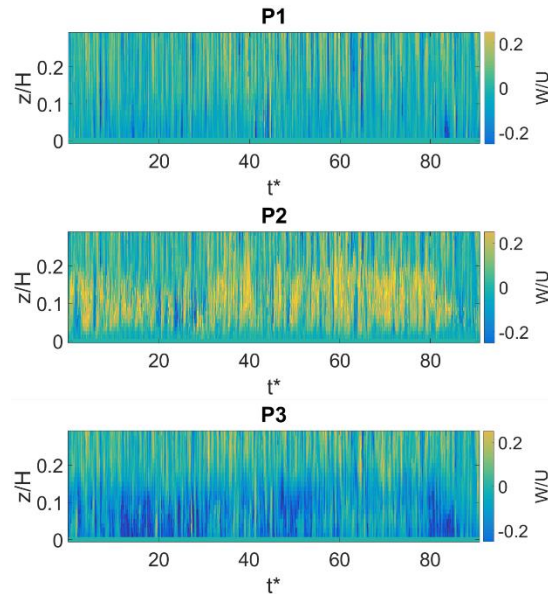
Es importante resaltar que Bustamante-Penagos & Niño (2020b) utilizaron partículas finas cohesivas y de alta densidad, concentrado de cobre, y la relación de exposición de los finos en el lecho de grava, e/D_g , fue aproximadamente 1, donde e es la diferencia entre la altura depositación del sedimento fino, H_s , y la altura de la capa de gravas, H_g , y D_g es el diámetro de la grava. Fuentes (2017) utilizó partículas de vidrio y $e/D_g \sim 0.5$. En ambos casos no se encontraron eyecciones de sedimentos y tampoco una variación de la velocidad vertical entre los puntos de muestreo (aguas arriba, en el poro y aguas abajo). Mientras que Bustamante-Penagos & Niño (2020a) consideraron partículas de pumicita. La relación $e/D_g \sim -0.1$. En este caso sí se reportaron eyecciones de sedimentos y además se evidenció un efecto de la eyección de sedimentos en el campo de velocidades. Por otra parte, hubo una reducción de la permeabilidad del lecho, sin embargo, hubo una entrada constante de flujo subsuperficial. Es decir, se redujo el tamaño de los conductos interiores de la grava por donde se transportaba inicialmente el flujo subsuperficial. Esto hace que aflore al flujo superficial y a su paso eyecta sedimento depositado dentro del lecho.

La pumicita es un material no monodisperso y de baja densidad, por lo cual se puede generar segregación de partículas y las más finas podrían formar sellos dentro del sustrato. Por lo tanto, el flujo subsuperficial puede desestabilizar las partículas de los sellos y las eyecta del lecho de gravas. Es decir, las eyecciones de sedimentos pueden representar los puntos donde hubo cortes internos del flujo subsuperficial longitudinal (Bustamante-Penagos y Niño, 2020a).



a) Velocidad vertical adimensionalizada con la velocidad media del flujo para el análisis de la hipótesis de congelada de Taylor para los datos experimentales Fuentes (2017).

b) Velocidad vertical adimensionalizada con la velocidad media del flujo para el análisis de la hipótesis de congelada de Taylor para los datos experimentales Bustamante-Penagos & Niño (2020b).



c) Velocidad vertical adimensionalizada con la velocidad media del flujo para el análisis de la hipótesis de congelada de Taylor para los datos experimentales de Bustamante-Penagos & Niño (2020a).

Figura 4.- Velocidad vertical adimensionalizada con U , w/U , para: (a) aguas arriba del poro (P1), (b) en el centro del poro (P2) y (c) aguas abajo del poro (P3).

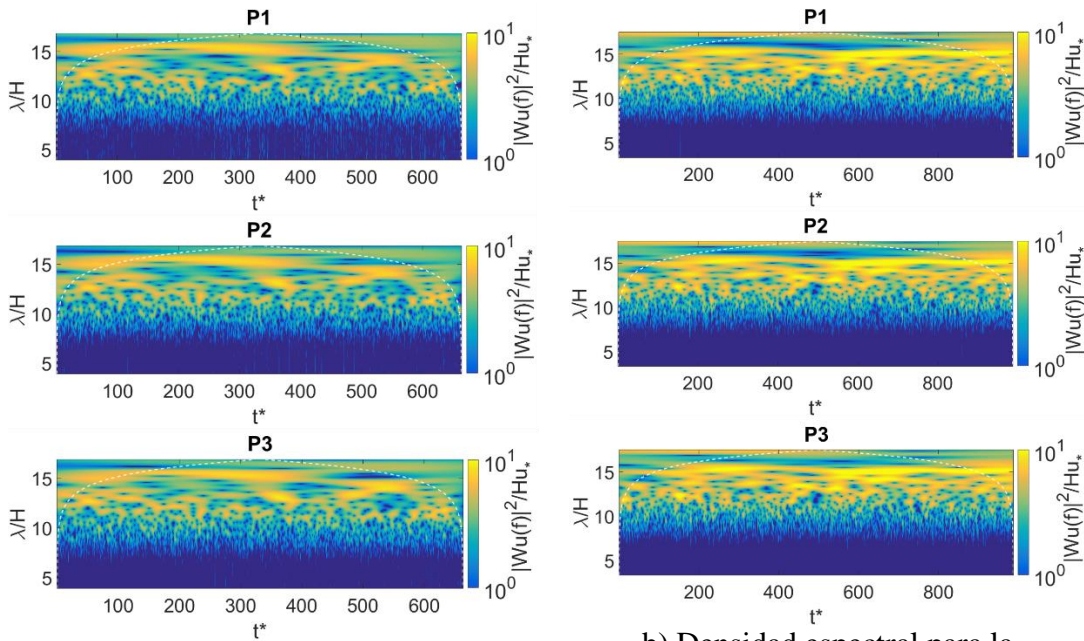
Espectro de Frecuencia Wavelet

Considerando que la eyección de sedimentos en el paper de Bustamante-Penagos & Niño (2020a) tiene una condición cuasi-permanente, se consideró la implementación del análisis de frecuencia Wavelet para las series temporales, u' y w' , para cada uno de los experimentos. Las Figura 5 y Figura 6 y presentan los espectros de potencia wavelet, $|W_u|^2$ y $|W_w|^2$ adimensionalizados por Hu_* , de las fluctuaciones de velocidad u' y w' , respectivamente. Donde las abscisas corresponden al tiempo dimensional, t^* , y las ordenadas corresponden a λ/H , con $\lambda = U/f$ como la longitud de onda y f la frecuencia, H la altura de la lámina de agua.

Los espectros wavelet muestran una mayor concentración del espectro de potencia en la componente longitudinal, en los casos donde no existe una eyección de sedimentos (Figura 5; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 6). Esto es esperable dado que la componente vertical de velocidad es mucho menor que la componente longitudinal. Por otra parte, la componente longitudinal de las fluctuaciones de velocidad, u' , permitió identificar estructuras de gran escala para los tres experimentos analizados. Para los datos de Fuentes (2017), se identificaron estructuras de gran escala, es decir, $\lambda > 10H$, y no se halló un efecto del poro en la densidad espectral. Las estructuras de $\lambda \sim 15H$ están presentes entre $54 < t^* < 400$. Mientras que, las estructuras de $\lambda \sim 13H$ concentran su densidad espectral en $t^* \sim 110$. Por otro lado, los datos de Bustamante-Penagos & Niño (2020b) muestran también las estructuras de gran escala $\lambda \geq 10H$ que concentran su densidad espectral durante todo el tiempo de medición y no se evidencia el efecto del poro en la concentración de la

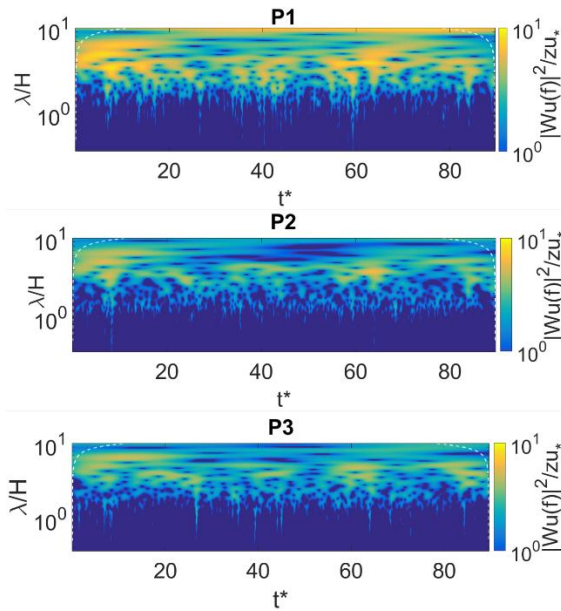
densidad espectral ni aguas abajo, ni aguas arriba del poro. Por el contrario, en el caso de la eyección de sedimento, Bustamante-Penagos & Niño (2020a) reportan que la mayor concentración de densidad espectral se presenta aguas arriba del poro y existe una disminución de las estructuras de gran escala longitudinal aguas abajo del poro.

Es importante resaltar que para los casos donde no está presente la eyección de sedimento, no existen mayores variaciones en la distribución de la densidad espectral, tanto para la componente longitudinal como para la componente vertical de velocidad. Además, la componente longitudinal de la velocidad es en la cual se da la mayor densidad espectral (Figura 5 y Figura 6).



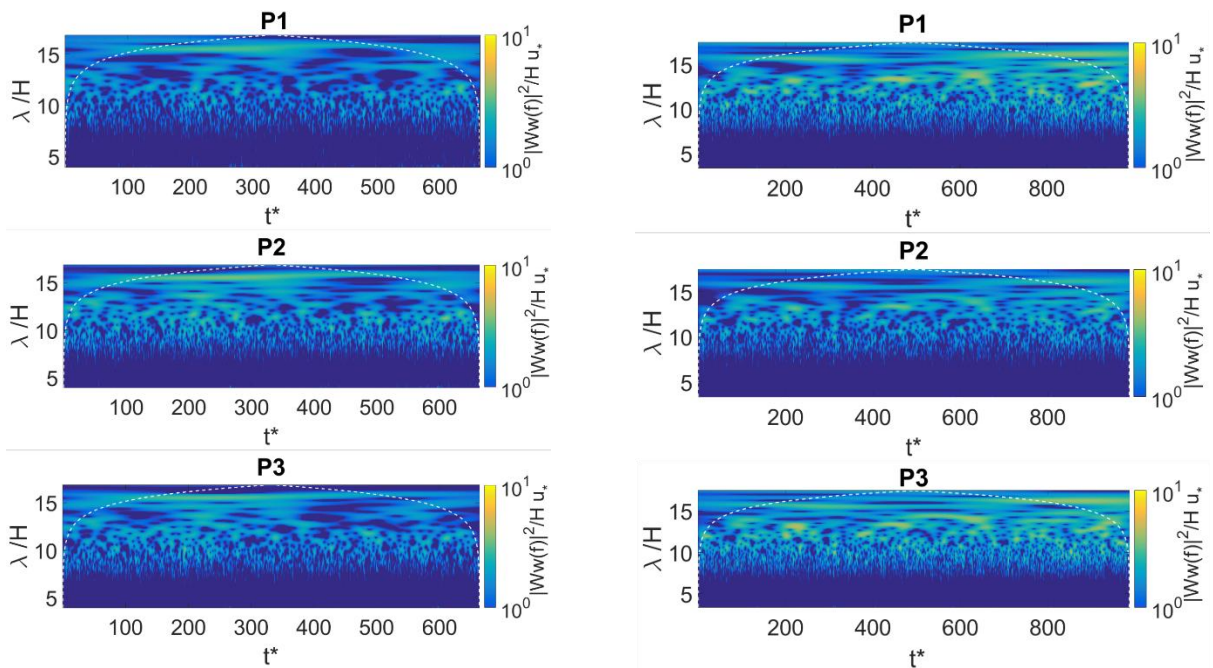
a) Densidad espectral para la fluctuación de velocidad en la componente longitudinal de los datos experimentales de Fuentes (2017).

b) Densidad espectral para la fluctuación de velocidad en la componente longitudinal de los datos experimentales de Bustamante-Penagos & Niño (2020b).



c) Densidad espectral para la fluctuación de velocidad en la componente longitudinal de los datos experimentales de Bustamante-Penagos & Niño (2020a).

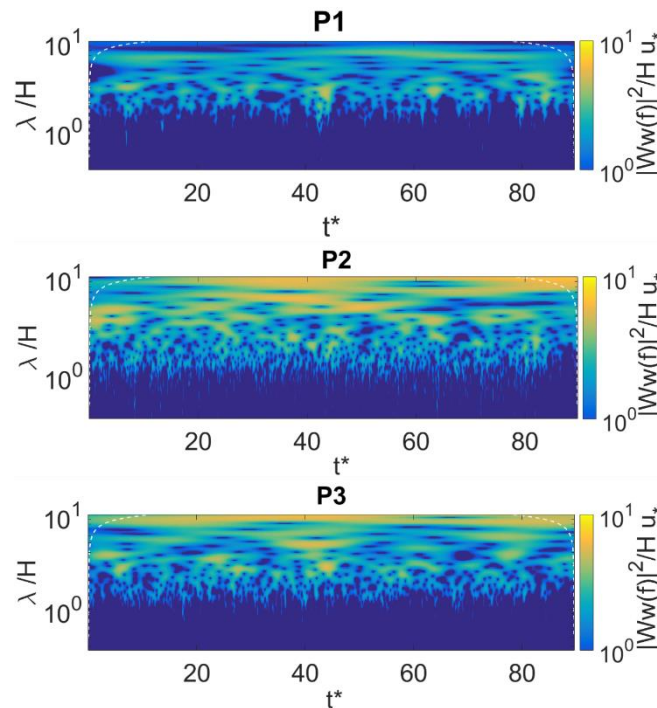
Figura 5. Espectro Wavelet para las fluctuaciones de velocidad en la componente longitudinal u' , (a) aguas arriba del poro (P1), (b) en el centro del poro (P1) y (c) aguas abajo del poro (P3).



a) Densidad espectral para la fluctuación de velocidad en la componente vertical de los datos experimentales de Fuentes (2017).

b) Densidad espectral para la fluctuación de velocidad en la componente vertical de los

datos experimentales de Bustamante-Penagos & Niño (2020b).



c) Densidad espectral para la fluctuación de velocidad en la componente vertical de los datos experimentales de Bustamante-Penagos & Niño (2020a).

Figura 6. Espectro Wavelet para las fluctuaciones de velocidad en la componente longitudinal w' , (a) aguas arriba del poro (P1), (b) en el centro del poro (P2) y (c) aguas abajo del poro (P3).

CONCLUSIONES

Esta investigación presenta un análisis sobre el efecto del poro en las velocidades verticales y la distribución de la densidad espectral en la cercanía del lecho de gravas. Se consideraron tres instalaciones experimentales con lechos de grava y con tres tipos de sedimentos finos: partículas de vidrio, concentrado de cobre y pumicita. En dos de las configuraciones analizadas (Fuentes, 2017, y Bustamante-Penagos & Niño, 2020b) no se evidenciaron eyecciones de sedimento fino y tampoco se identificó un efecto en la componente vertical de la velocidad y en los espectros de densidad espectral asociados al poro de la grava. Por el contrario, en el experimento de Bustamante-Penagos & Niño (2020a) se formó la eyección de sedimento, la cual generó un cambio en la componente vertical de la velocidad. La hipótesis de turbulencia congelada de Taylor dejó de ser válida bajo estas condiciones y también generó modificaciones en los espectros de densidad espectral aguas arriba del poro, en el poro y aguas abajo del poro.

La formación de la eyección de sedimento se debe a un cambio en la permeabilidad del lecho de gravas, el ingreso constante del flujo subsuperficial, una relación $e/D_g \sim -0.1$, un

sedimento fino de baja densidad y una velocidad media superficial baja. El afloramiento del flujo subsuperficial se genera por la obstrucción de los conductos internos en el lecho de grava. Es decir, al colmatarse los poros de la arena y la grava con pumicita, se limita la infiltración del flujo hacia estratos inferiores. Al estar colmatados aguas abajo los ductos internos de la grava se generan estas eyecciones de flujo, las cuales desestabilizan desde la parte inferior del lecho gravas a los sellos de pumicita que se formaron tras la depositación del sedimento fino.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento de la investigación al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, al proyecto Fondecyt 1140767 y a la beca de Doctorado Nacional ANID (CONICYT) N°21181620. Se agradece además Camilo Tapia Carrasco, Gustavo Aracena y Felipe Galáz por la colaboración en el trabajo experimental.

REFERENCIAS

- Adrian, R. J. (2007). Hairpin vortex organization in wall turbulence. *Physics of Fluids*, 19(4). <https://doi.org/10.1063/1.2717527>
- Bagnold, R. A. (1966). An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics. *USGS Professional Paper*, 42. <https://doi.org/10.1017/S0016756800049074>
- Bronshstein, I.N. Semendyayev, K. A., Musiol, G., & Muehlig, H. (2007). *Handbook of Mathematics* (5th ed.). Springer.
- Bustamante-Penagos, N., & Niño, Y. (2020a). Flow–Sediment Turbulent Ejections: Interaction between Surface and Subsurface Flow in Gravel-Bed Contaminated by Fine Sediment. *Water*, 12(6), 1589. <https://doi.org/10.3390/w12061589>
- Bustamante-Penagos, N., & Niño, Y. (2020b). Suspension and infiltration of copper concentrate in a gravel bed: a flume study to evaluate the fate of a potential spill in a Chilean river. *Environmental Earth Sciences*, 79(24), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09274-y>
- Chen, K., Zhang, Y., & Zhong, Q. (2019). Wavelet coherency structure in open channel flow. *Water (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/w11081664>
- Dermisis, D., & Papanicolaou, A. N. T. (2014). The effects of protruding rock boulders in regulating sediment intrusion within the hyporheic zone of mountain streams. *Journal of Mountain Science*, 11(6), 1466–1477. <https://doi.org/10.1007/s11629-014-3054-9>
- Fuentes, J. (2017). *Estudio Experimental del Transporte de Sedimento Mediante Tomógrafo en el Marco de la Evaluación de la Contaminación de Ríos por Sedimento Fino* (p. 108). Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- García, M., López, F., & Niño, Y. (1995). Characterization of near-bed coherent structures in turbulent open channel flow using synchronized high-speed video and hot-film measurements. *Experiments in Fluids*, 19(1), 16–28. <https://doi.org/10.1007/BF00192229>
- Iseya, F., & Ikeda, H. (1987). Pulsations in bedload transport rates induced by a longitudinal sediment sorting: A flume study using sand and gravel mixtures. *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*, 69(1), 15–27.

- <https://doi.org/10.2307/521363>
- Khademishamami, M., & Nardin, W. (2020). *Advances in Water Resources Experimental observations on fine sand winnowing from immobile gravel substrate*. 142. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103659>
- López, F., & García, M. H. (2001). Risk of Sediment Erosion and Suspension in Turbulent Flows. *J. Hydraul. Eng.*, 1(March), 231–235.
- Mcdowell-boyer, L. M., Hunt, J. R., & Sitar, N. (1986). Particle Transport Through Porous Media. *Water Resour. Res.*, 22(13), 1901–1921.
- Niño, Y., & García, M. H. (1996). Experiments on particle - turbulence interactions in the near - wall region of an open channel flow: implications for sediment transport. *Journal of Fluid Mechanics*, 326, 285–319. <https://doi.org/10.1017/S0022112096008324>
- Niño, Yarko, Licanqueo, W., Janampa, C., & Tamburrino, A. (2018). Front of unimpeded infiltrated sand moving as sediment transport through immobile coarse gravel. *Journal of Hydraulic Research*, 1686(0022–1686), 18. <https://doi.org/10.1080/00221686.2017.1402828>
- Niño, Yarko, Lopez, F., & Garcia, M. (2003). Threshold for particle entrainment into suspension. *Sedimentology*, 50(2), 247–263. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00551.x>
- Perrier, V., Philipovitch, T., & Basdevant, C. (1995). Wavelet spectra compared to Fourier spectra. *Journal of Mathematical Physics*, 36(3), 1506–1519. <https://doi.org/10.1063/1.531340>
- Robinson, S. (1991). Coherent Motions In The Turbulent Boundary Layer. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23(1), 601–639. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.23.1.601>
- Tamburrino, A. (1997). Visualization of flow structures in low reynolds turbulent open-channel flows. *Mechanics Research Communications*, 24(1), 33–40. [https://doi.org/10.1016/s0093-6413\(96\)00075-4](https://doi.org/10.1016/s0093-6413(96)00075-4)
- Torrence, C., & Compo, G. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1), 61–78.
- Zhong, Q., Chen, Q., Wang, H., Li, D., & Wang, X. (2016). Statistical analysis of turbulent super-streamwise vortices based on observations of streaky structures near the free surface in the smooth open channel flow. *Journal of the American Water Resources Association*, 5(3), 2–2. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1969.tb04897.x>
- Zhong, Q., Li, D., Chen, Q., & Wang, X. (2015). Coherent structures and their interactions in smooth open channel flows. *Environmental Fluid Mechanics*, 15(3), 653–672. <https://doi.org/10.1007/s10652-014-9390-z>

