

Dinámica del concentrado de cobre en lechos de gravas

N. Bustamante^a, C. Tapia^b y Y. Niño^c

^aEstudiante de Doctorado en Fluidodinámica, Universidad de Chile, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile, PH (56) 945114011; email: nataliabustamante@ug.uchile.cl, ^bEstudiante Ingeniería Civil, División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile, PH (56) 974144002; email: camilotapia@ug.uchile.cl y ^cProfesor titular, División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Civil, Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile, PH (562) 29784400; email: ynino@ing.uchile.cl

Línea temática A | Dinámica fluvial de embalses, estuarios y humedales

RESUMEN

El presente trabajo muestra avances del estudio experimental de derrame de concentrado de cobre en lechos de grava. Los objetivos de esta investigación son identificar la dinámica del concentrado de cobre en lechos granulares y cuantificar las cargas del transporte de fondo y suspensión del concentrado de cobre, en función del caudal, la tasa de suministro de concentrado de cobre, la profundidad de percolación y la granulometría de los sedimentos de fondo. Se implementa la técnica de velocimetría por imágenes PIV, medición de cargas de transporte y curvas granulométricas del concentrado de cobre. Se presentan relaciones entre diámetro medio adimensionalizado del concentrado de cobre, profundidad de percolación adimensional y la relación de aspecto b/h , pudiendo observar que existe una tendencia decreciente entre la profundidad de percolación adimensional y el diámetro medio del concentrado de cobre adimensionalizado. Se presentan cargas de fondo y suspensión del concentrado de cobre para cinco experimentos.

Palabras clave | Percolación; Transporte en Suspensión; Concentrado de Cobre, PIV.

INTRODUCCIÓN

La principal actividad económica en Chile es la minería, en particular, la extracción, refinación y venta de cobre. Los concentrados son el primer producto comercial en la línea de producción de cobre. Proviene de las celdas de flotación y son el resultado de la trituración, chancado y molienda de los minerales sulfurados de minas subterráneas. Producto de la flotación y sus repastos, de estos minerales pulverizados se obtiene el concentrado y un residuo que constituyen los relaves. Los relaves están conformados por una mezcla de agua con los minerales que no se concentraron en el proceso de flotación y que constituyen el material a eliminar luego de la obtención del concentrado de cobre. El transporte de los productos mineros, concentrados y relaves, se realiza mediante tuberías o canales que pueden cruzar cauces aluviales, generando así un alto riesgo ambiental. Cuando existe rompimiento de estas tuberías o canales se generan derrames de productos mineros en corrientes aluviales, afectando la calidad del agua y los sistemas bióticos que lo componen.

En la última década, en Chile se han reportado varios casos de ríos contaminados por concentrados de cobre y relaves, debido a fallas en los ductos o canales, e.g. río Choapa (en 2009), río Blanco (Moreno, 2016). Falla en tranque de relave sobre los ríos Colca - Perú (Rpp, 2016), el río Agrio en 1998– España (Martínez, 2003), Canadá (2014), entre otros. Los impactos ambientales y de salud humana suelen surgir debido al prolongado tiempo de residencia de metales pesados en sedimentos de ríos y suelos aluviales y su naturaleza bioacumulativa en plantas y animales (Macklin, 1992).

Esto motivó al estudio experimental de la dinámica de derrames de concentrado de cobre en lechos de gravas. Los objetivos de este estudio experimental son por una parte, identificar la dinámica del concentrado de cobre en lechos granulares, y por otra, cuantificar las cargas del transporte de fondo y en suspensión del concentrado de cobre, en función del caudal, la tasa de suministro de concentrado de cobre, la profundidad y la granulometría de los sedimentos de fondo.

Einstein (1968) investigó sobre el depósito de material fino en lechos de gravas y observó que las arenas llenan los poros de las gravas de abajo hacia arriba. Beschta & Jackson (1979), Iseya & Ikeda (1987) y Diplas & Parker (1992) plantean la

formación capas puentes las cuales controlan la profundidad de percolación del material fino entre las gravas. Gibson et al. (2009), sugiere que la relación de percolación de arenas en gravas, está entre 2 a 5 veces el D_{90} de la grava. Vale la pena resaltar que estas investigaciones se han realizado con grava y arena como materiales gruesos y finos, respectivamente. Sin embargo, no se reporta en la literatura experimentos de este tipo con arena y concentrado por lo cual esta investigación resulta ser completamente novedosa.

MATERIAL Y MÉTODOS

Instalación experimental

La instalación consta de: un canal recirculante de 3.0 m de longitud, 0.11 m de ancho, con pendiente variable (Figura 1), caudales entre 0.68 l/s y 4.4 l/s y un cono de acrílico, como sistema de vertimiento del concentrado de cobre, simulando una falla en una tubería (Figura 2). Aguas abajo del canal se tiene una descarga móvil y un tanque para la descarga del concentrado en suspensión, cuando se vierte el concentrado de cobre en el canal, para evitar recirculación de concentrado de cobre (Figura 1). En ese momento otro estanque sirve de reserva de agua para poder seguir operando. Una vez que el concentrado en suspensión deja el canal, se vuelve la descarga móvil al tanque de recirculación y se corta la alimentación del otro estanque.

La instrumentación del canal consta de: un tubo Venturi para medición de caudal, dos cámaras: una Nikon D3200 (4272 x 2848) y una Canon 1100 (1280 x 720 pixeles), para el análisis de transporte del concentrado de cobre, tanto en el punto de vertimiento como aguas abajo de éste, y una cámara Fastcam Mini UX50 para el análisis PIV de las velocidades del flujo. El análisis granulométrico del concentrado de cobre se realiza en el Laboratorio de Sedimentología de la Universidad de Chile con el equipo Malvern Mastersizer 2000.

La configuración del experimento es pequeña con el fin de evitar el vertimiento de concentrado de cobre al sistema de alcantarillado. La Figura 1 muestra el esquema del modelo experimental.

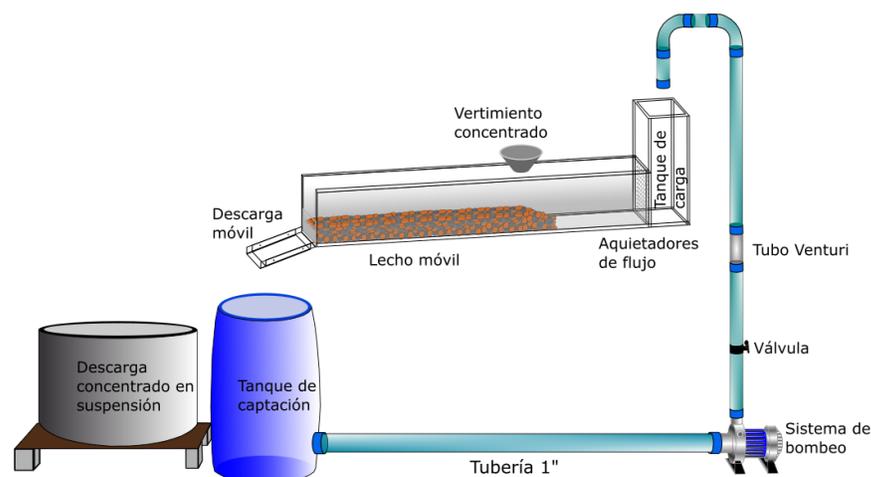


Figura 1| Esquema del montaje experimental utilizado en el estudio.

Configuración del lecho

Se configuró un lecho de dos capas, con arena y gravas (ver Figura 2). La capa superficial, de 20 mm, es grava, cuyo diámetro medio es de $D_g = 10$ mm, y la capa subsuperficial, de 30 mm, es de material más fino, arena o grava fina, cuyo diámetro medio varía entre 0.2 y 3.35 mm, en distintas experiencias. La densidad es de 2.65 gr/cm^3 para ambos materiales. El concentrado de cobre tiene un diámetro característico (D_{50}) de $d_c = 40 \mu\text{m}$ y una densidad de 4.2 gr/cm^3 .



Figura 2 | Inicio del vertimiento de concentrado en un lecho con una configuración de dos capas, la capa superficial es de gravas y la subsuperficial de arenas.

El concentrado se vierte con concentraciones en peso sólido entre el 70%, para evitar su encapsulamiento, mediante un cono de acrílico, a caudal constante, durante 7 s, aproximadamente. Esta forma de vertimiento se hace para simular un rompimiento de tubería. Al verterse el concentrado se genera, inicialmente, el transporte en suspensión y al saturarse la columna de agua con concentrado de cobre, se genera percolación y transporte de concentrado de cobre entre los poros del material granular (ver Figura 3).

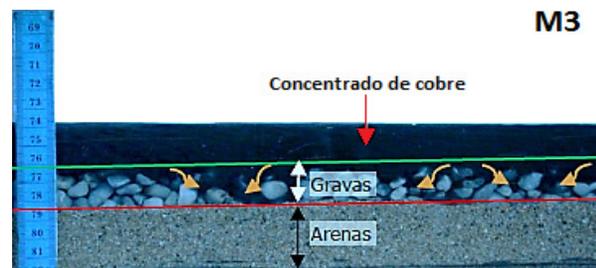


Figura 3 | Percolación del concentrado de cobre entre las gravas.

La Tabla 1 presenta las configuraciones del lecho y los parámetros hidráulicos del flujo para cada experimento y la Figura 4 muestra las curvas granulométricas del material granular. Donde Q es el caudal, h es la altura de la lámina de agua, A es el área mojada, V es la velocidad del flujo, R_h es el radio hidráulico, S es la pendiente del canal, u_* es la velocidad de fricción y Fr el número de Froude.

Tabla 1 | Configuraciones experimentales

	Tipo arena	$D_{50_{arena}}$ (mm)	$D_{90_{arena}}$ (mm)	Q		h (m)	A (m ²)	V (m/s)	R_h (m)	S	u_* (m/s)	Fr
				(m ³ /s)	[l/s]							
Experimento 1	8	0.70	0.80	0.00061	0.61	0.025	0.0028	0.222	0.017	0.047	0.089	0.45
Experimento 2	8	0.70	0.80	0.00061	0.61	0.026	0.0028	0.215	0.018	0.047	0.090	0.43
Experimento 3	7	1.0	1.09	0.00061	0.61	0.025	0.0028	0.222	0.017	0.047	0.089	0.45
Experimento 4	6	1.07	1.11	0.00195	1.95	0.025	0.0028	0.709	0.017	0.047	0.089	1.43
Experimento 5	5	1.10	1.23	0.00195	1.95	0.040	0.0044	0.443	0.023	0.047	0.103	0.71
Experimento 6	7	1.00	1.09	0.00182	1.82	0.052	0.0057	0.321	0.027	0.007	0.043	0.45
Experimento 7	6	1.07	1.11	0.00182	1.82	0.052	0.0057	0.321	0.027	0.007	0.043	0.45
Experimento 8	7	1.00	1.09	0.00245	2.45	0.060	0.0066	0.372	0.029	0.007	0.044	0.48

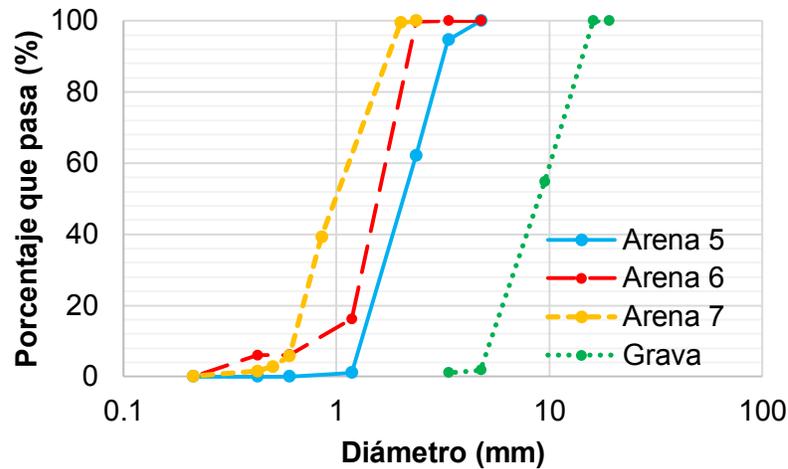


Figura 4| Curvas granulométricas de las gravas y arenas utilizadas en la configuración lecho del canal.

Percolación

Mediante el procesamiento de imágenes se estima la profundidad y velocidad de percolación, con base en el estado inicial y su evolución en el tiempo. Esta evolución se mide en un punto lo suficientemente alejado del punto de vertimiento, garantizando así que se haya desarrollado la mezcla del concentrado de cobre vertido en el flujo. La adquisición de datos se realiza con la cámara Nikon D3200 y posteriormente los videos son analizados mediante fotogramas. De esta forma se puede medir la evolución temporal y espacial del concentrado en la zona de medición

Campo de Velocidades

Dada la configuración geométrica del experimento no es posible utilizar técnicas de velocimetría similares al Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), por lo tanto se eligió el método velocimetría por imágenes: Particle Imagen Velocimetry (PIV). Cabe mencionar que existen tres tipos de velocimetría por imágenes como lo son: Particle Tracking Velocimetry (PTV), Particle Imagen Velocimetry (PIV) y Laser Speckle Velocimetry (LSV). La diferencia está asociada a la densidad de partículas disponibles en las imágenes, siendo menor para el PTV, media para PIV y alta para LSV (Raffel et al. 1998).

La implementación de esta técnica requiere partículas finas, cuya densidad sea similar a la del agua y que tengan propiedades de fluorescencia con la luz del láser, de lo contrario no son buenas trazadoras. Las partículas utilizadas fueron elaboradas en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Chile, siguiendo la adaptación realizada por Fuentes (2017) al trabajo de Pedochi et al. (2008). En este trabajo las partículas son elaboradas con rodamina B y resina poliéster (utilizada para plástico convencional).

La adquisición de imágenes se realiza con una cámara Fastcam Mini UX50 con frecuencia de muestreo hasta de 2000 fps. La frecuencia de muestreo fue de 1000 fps, durante 1.5 minutos y en tres planos paralelos: en el punto medio ($y/b=1/2$), a $y/b=1/4$ y a $y/b=1/8$. La Figura 5 muestra la configuración del montaje PIV y la ubicación de los tres planos medidos. Al ser un canal rectangular con sedimento uniformemente distribuido se asume la simetría del campo de velocidades en la dirección transversal.

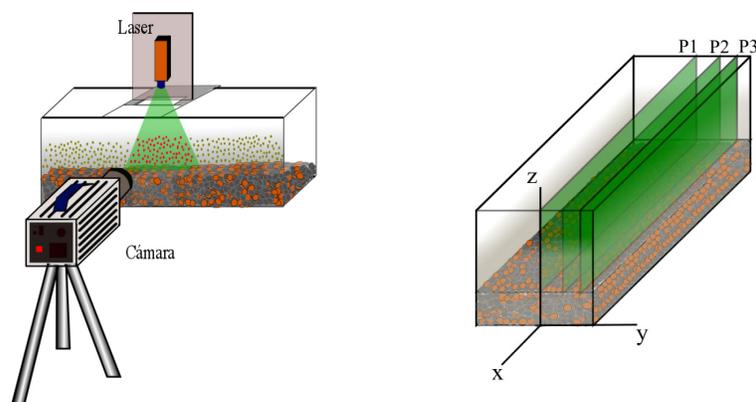


Figura 5 | Esquema de Medición de Velocidad por PIV y localización de los planos de medición.

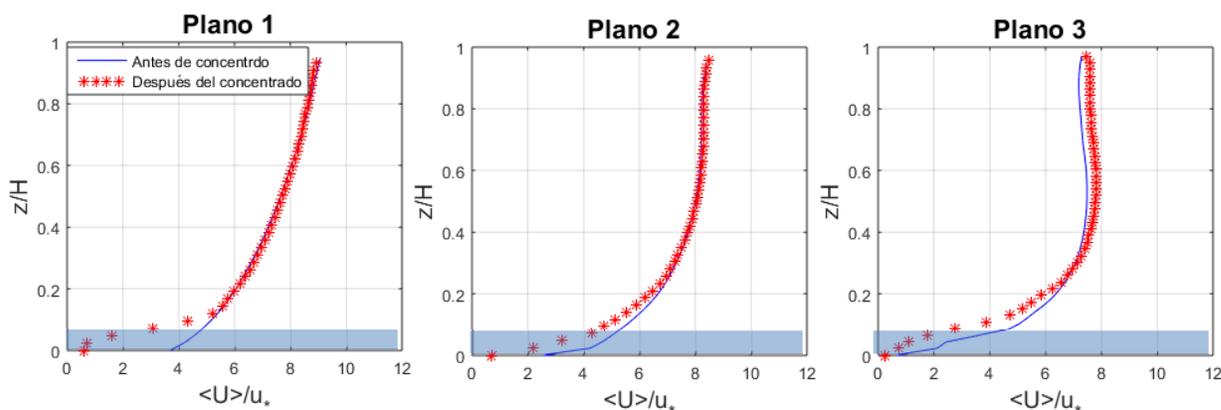
El escurrimiento es sobre un lecho macro-rugoso permeable, de $h/D_g = 2.5-6.0$. El largo de la imagen es de $Lx = 25.88 \text{ mm}$ ($Lx/D_g = 4.3-10.35$), de modo que al promediar por niveles en la vertical, hay un doble promedio, en el tiempo y en el área transversal, justo para un lecho macro-rugoso permeable. El tamaño del pixel es de $6.81 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$

Se realizó velocimetría en los tres planos mencionados anteriormente, antes y después del vertimiento del concentrado de cobre, con el objetivo de identificar posibles variaciones del campo de velocidad y esfuerzos de Reynolds asociados a la presencia de material fino en el lecho de gravas.

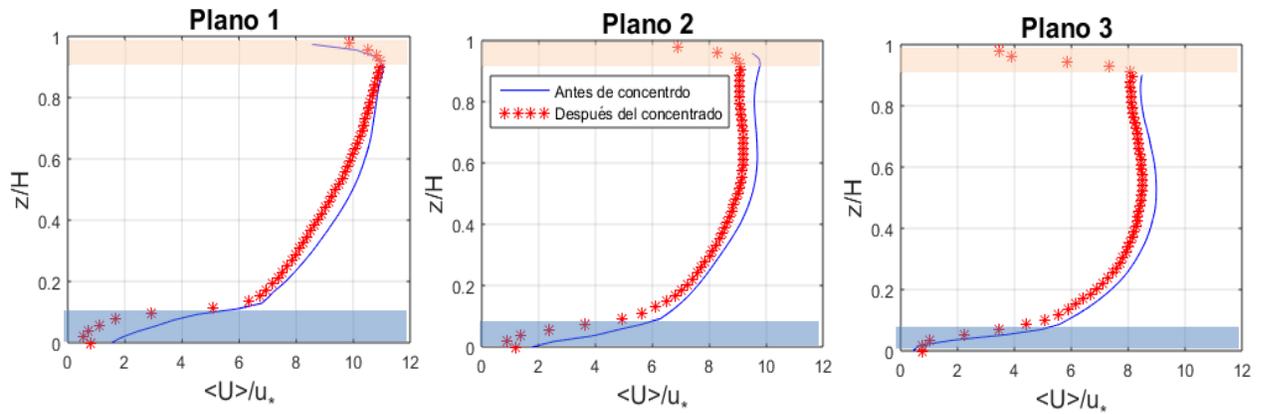
EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Dado que la razón de ancho, b , y altura, b/h , para estos experimentos es 1.8-4.4, para las razones más bajas el escurrimiento tendría la máxima velocidad bajo la superficie libre y es posible que la sección tenga velocidades secundarias. La velocidad media, $\langle U \rangle(z)$ (o doble promedio), aparece graficada para el Experimento 7 y 8, hecha adimensional usando u_* , en la Figura 6. En esta figura los rectángulos grises y naranjas representan la zona de gravas y la zona de efecto de la superficie libre, respectivamente, las cuales no serán consideradas. En los Experimentos 7 y 8 se ve que la velocidad no es uniforme en los perfiles, pero en el Experimento 8 esto es más marcado. Las razones b/h son 2.1 para el Experimento 7 y 1.8 para el Experimento 8, lo cual parece ser que no hay tanto problema con velocidades secundarias para éstas y las otras razones de aspecto, es decir, el resto de los experimentos.

Al realizar la velocimetría antes y después del vertimiento del concentrado de cobre en el canal, se encontraron variaciones en el Experimento 7, la cuales podrían estar asociadas al efecto del lecho, porque hay concentrado de cobre entre las gravas que pueden que se hagan menos permeables (ver Figura 6.a). En el Experimento 8 se observan variaciones en los tres planos muestreados, haciendo parecer que la resistencia al escurrimiento tiende a incrementarse por el mismo motivo (ver Figura 6.b).



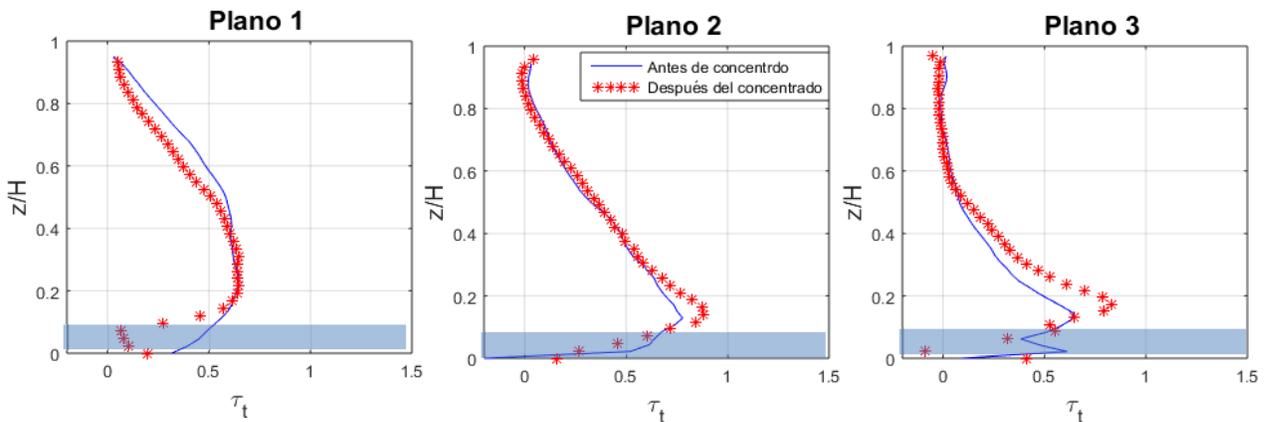
a. Experimento 7



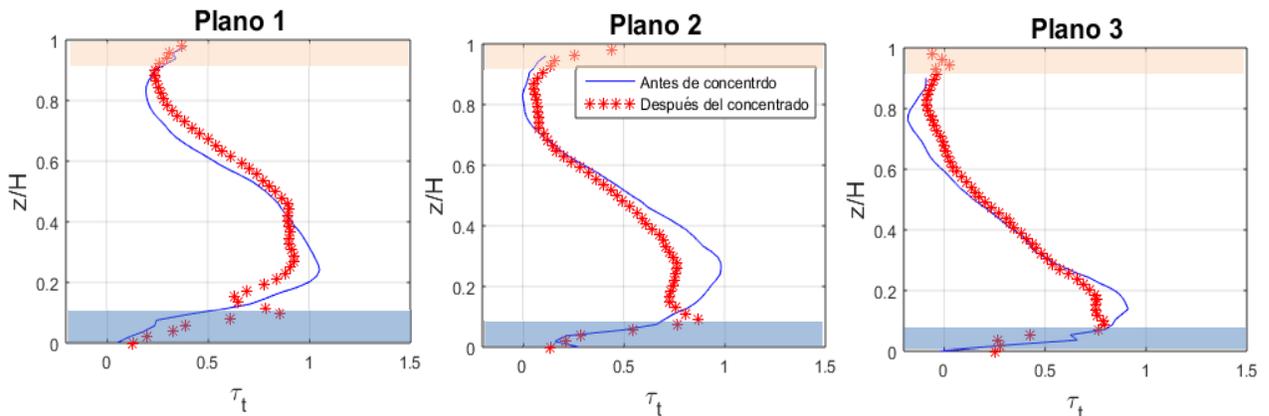
b. Experimento 8

Figura 6 | Perfiles de velocidad.

Los esfuerzos de corte turbulentos ($\tau_t = -\rho \langle u'w' \rangle$, donde $\langle u'w' \rangle$ es la correlación cruzada de las fluctuaciones de velocidad en x y z , y ρ es la densidad de fluido), también se analizaron antes y después del vertimiento de concentrado de cobre (ver Figura 6). Se observa que para el Experimento 7 los esfuerzos de corte turbulento antes y después del vertimiento son más o menos iguales, pero en la zona menor a $z/h = 0.2$ el esfuerzo de corte tiende a subir primero y a decaer hacia el lecho con respecto a los perfiles antes de derramar el concentrado de cobre, en los tres planos. En el Experimento 8 los perfiles del esfuerzo de corte en los tres planos tienden a bajar con respecto al perfil antes de derramar el concentrado de cobre, lo cual, al igual que lo concluido para los perfiles de velocidad adimensional, la resistencia al escurrimiento tiende a incrementarse al derramarse concentrado de cobre porque la capa de gravas podría volverse menos permeable.



a. Experimento 7



b. Experimento 8

Figura 7 | Esfuerzos de corte turbulentos.

Inicialmente el transporte del concentrado de cobre es en suspensión, sin embargo, debido a su alto peso específico, se genera el proceso de sedimentación, induciendo así al transporte de fondo del concentrado en la grava (primera capa) y la percolación de él en el sedimento fino (arena o grava fina, segunda capa). Al evaluar la percolación del concentrado de cobre de los videos, se obtienen los perfiles de percolación a una frecuencia de 1/30 s. Los perfiles muestran un avance de percolación no uniforme a lo largo del canal en el sedimento fino. El movimiento dominante observado del concentrado de cobre entre las arenas es vertical.

En la Figura 8 se muestra el perfil de percolación en un tramo del canal, hallado mediante el procesamiento de imágenes.

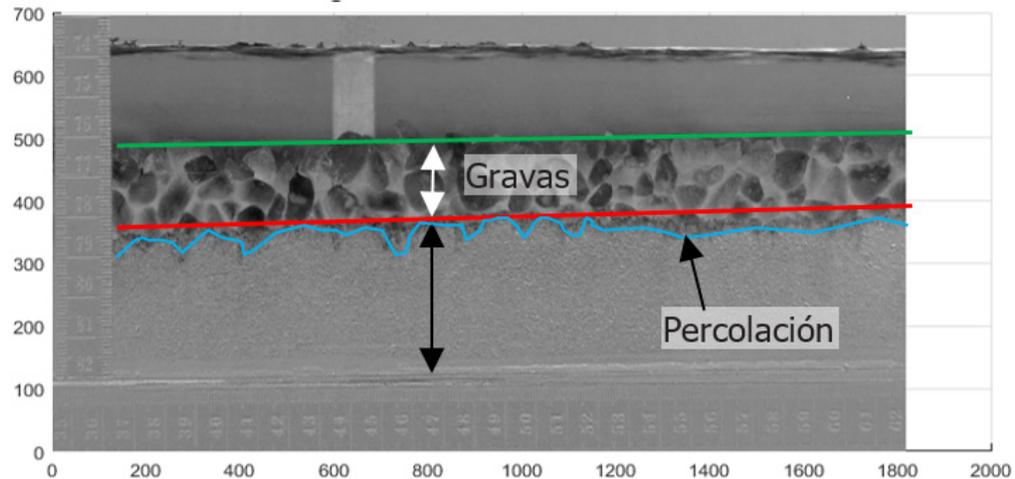


Figura 8 | Percolación del concentrado de cobre entre arenas. La imagen procesada es la imagen final menos la imagen inicial.

La Figura 9 presenta de percolación en el experimento 7, para cinco instantes de tiempo después de que el concentrado de cobre entra a la sección de muestreo. Cabe mencionar que en este experimento la percolación fue sin obstáculos, es decir, el espacio intersticial entre las arenas (de tamaño $D50_{\text{arena}}=1.07$ mm) es mucho mayor al tamaño del concentrado de cobre y por esta razón hubo percolación hasta el fondo del canal. Sin embargo, dadas las características del montaje experimental no es posible aumentar el tamaño de la capa de arenas para poder cuantificar el valor real de dicha percolación.

La Figura 10 también presenta la percolación para cinco instantes de tiempo después de que el concentrado de cobre entra a la sección de muestreo en el experimento 8. Se resalta en un ovalo morado la evolución temporal de un bulbo de percolación con su respectivo zoom. Este zoom resalta que el concentrado de cobre entre las arenas puede moverse hacia aguas arriba y tiene una dinámica completamente distinta al transporte de arenas y gravas. En este experimento la percolación no llegó hasta el fondo a pesar de que la arena (de tamaño $D50_{\text{arena}} = 1.0$ mm) era de más o menos el mismo tamaño.

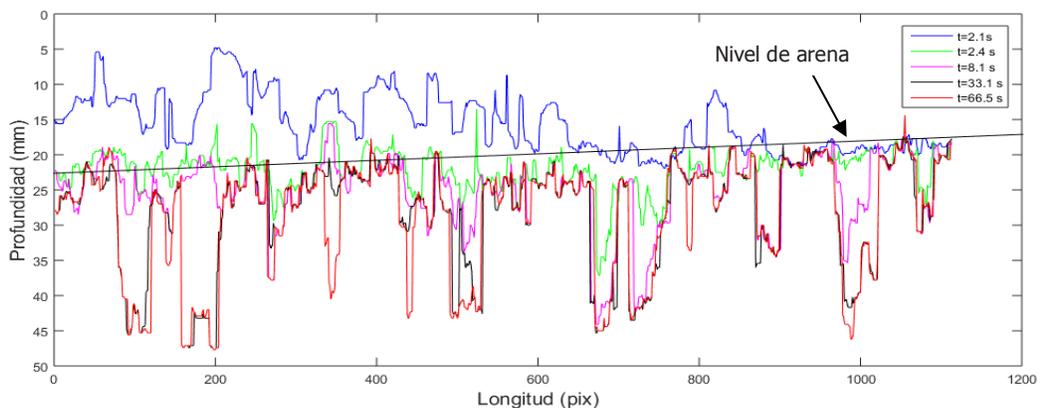


Figura 9 | Perfiles de percolación experimento 7 para distintos tiempos desde que entra el concentrado de cobre a la sección de muestreo.

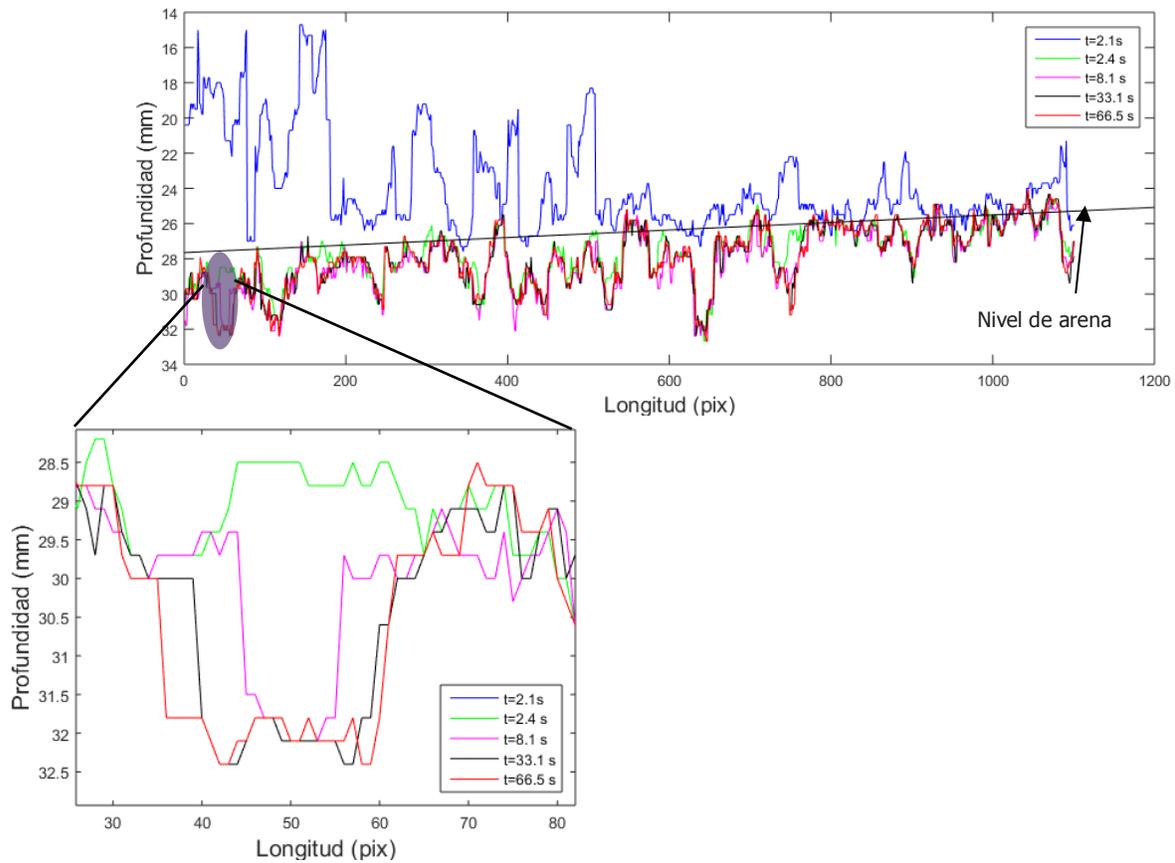


Figura 10| Perfiles de percolación experimento 8 para distintos tiempos desde que entra el concentrado de cobre a la sección de muestreo.

En cada experimento se midieron profundidades máximas de percolación y transporte tanto en suspensión como de fondo, con sus respectivas curvas granulométricas, donde d_{50} es el diámetro medio del concentrado, W_{perc} es el peso del concentrado de cobre percolado, W_{susp} es el peso del concentrado de cobre en suspensión y H_{perc} es la profundidad de percolación del concentrado de cobre (ver Tabla 2).

Cabe resaltar que los experimentos 1, 2 y 3 sólo se tuvieron en cuenta para entender la dinámica del fenómeno y realizar modificaciones al sistema, para mejorar la calidad de la adquisición de datos. En estos experimentos preliminares se encontró que la concentración de concentrado de cobre en la columna de agua es variable en el espacio y tiempo, es decir, es creciente desde su vertimiento hasta el inicio de la percolación y luego decrece, dado que la reincorporación del concentrado de cobre es baja. También se ha podido observar que sólo hay resuspensión del concentrado de cobre cuando se genera socavación en el lecho. Nótese que los experimentos 6 y 8 tienen el mismo tipo de arena (arena 7), distintos caudales (Tabla 1) y profundidades de percolación similares. Además, vale la pena resaltar que esta arena tiene una mayor proporción de granos menores a 1.0 mm, es decir, entre la arena 7 y la arena 6 la mejor gradada es la 6 y por esto las percolaciones con este tipo de arena son menores.

Tabla 2 | Resultados

	Fondo		Suspensión		H_{perc} [mm]
	d_{50} [μm]	W_{perc} [gr]	d_{50c} [μm]	W_{susp} [gr]	
Experimento 4	42.6	739.1	22.3	1898.8	14.6
Experimento 5	43.8	810.91	17.5	1866.5	30.0
Experimento 6	61.8	1748.1	14.5	1053.6	5.7
Experimento 7	-	1611.0	12.9	1213.1	30.0
Experimento 8	62.3	1174.7	16.0	1556.6	5.4

Al analizar la relación de los diámetros medios del concentrado de cobre y las arenas ($d_{50c}/d_{50arenas}$) con la relación ancho–profundidad (b/h), se observa que para $b/h > 2.5$ la relación entre los diámetros medios de los sedimentos tiende a ser constante (Figura 11), sin embargo, las profundidades de percolación no son constantes.

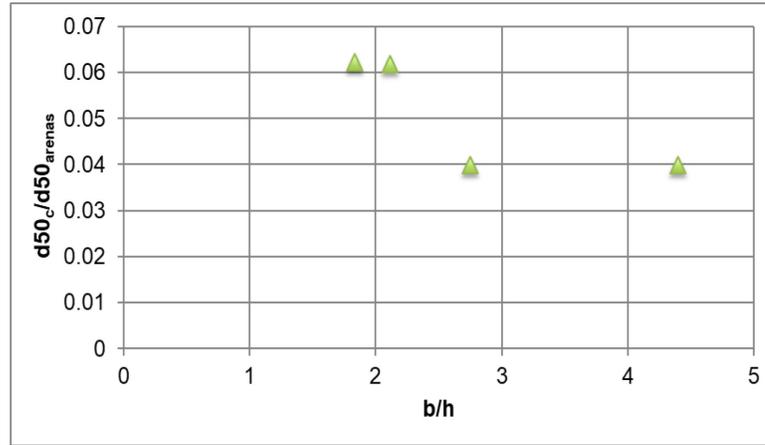


Figura 11 | Diámetro medio del concentrado de cobre adimensional, $d_{50c}/d_{90arena}$, en función de la relación de aspecto, b/h .

En la Figura 13 se gráfica la profundidad de percolación media adimensional, $H_{perc}/D_{90arena}$, como función del diámetro de concentrado de cobre adimensionalizado por $D_{90arena}$, $d_s/D_{90arena}$. Se ve que $H_{perc}/D_{90arena}$ tiende a decrecer a medida que $d_s/D_{90arena}$ aumenta.

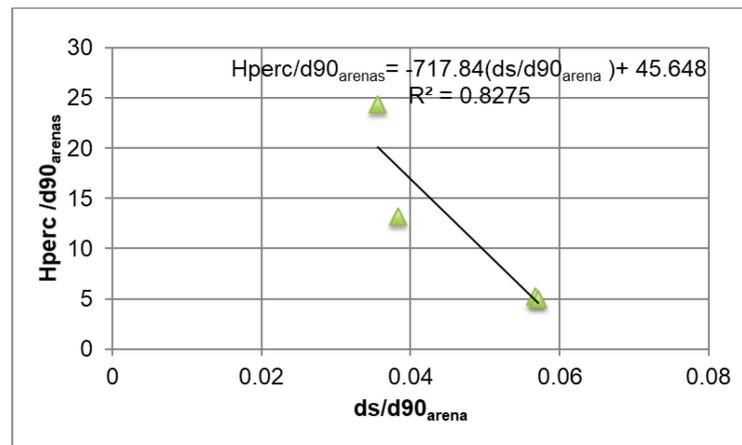


Figura 13 | Profundidad de percolación adimensional, $H_{perc}/D_{90arena}$, como función del diámetro de concentrado de cobre adimensionalizado, $d_s/D_{90arena}$.

La medición del depósito de concentrado de cobre se realizó en siete tramos, esto con el fin de poder evaluar la variabilidad del depósito de concentrado a lo largo del canal. La Figura 14 muestra el peso de concentrado de cobre por unidad de área en función del tramo. El recuadro verde en la Figura 14 muestra la zona de vertimiento y se observa que después de un accidente minero también hay afectación hacia aguas arriba de la zona de derrame. Adicionalmente se ha observado que, a mayor caudal líquido, el depósito de concentrado a lo largo del canal es uniforme. Sin embargo, debe verificarse el escenario de mayor caudal y tamaño de arena 6, esto para poder verificar o refutar esta hipótesis.

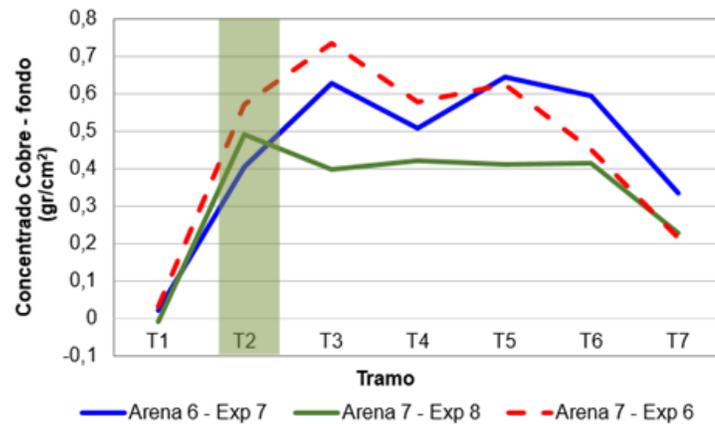


Figura 14| Distribución del peso por unidad de área de concentrado de cobre a lo largo del canal.

La Figura 15 presenta las curvas granulométricas del concentrado de cobre de fondo y en suspensión, mostrando que el rango de diámetros es el mismo, pero el tamaño medio del concentrado de cobre que va en suspensión es menor. Por otro lado, se podría pensar que después de un derrame de concentrado de cobre existe una longitud finita para la cual el contaminante se deposita.

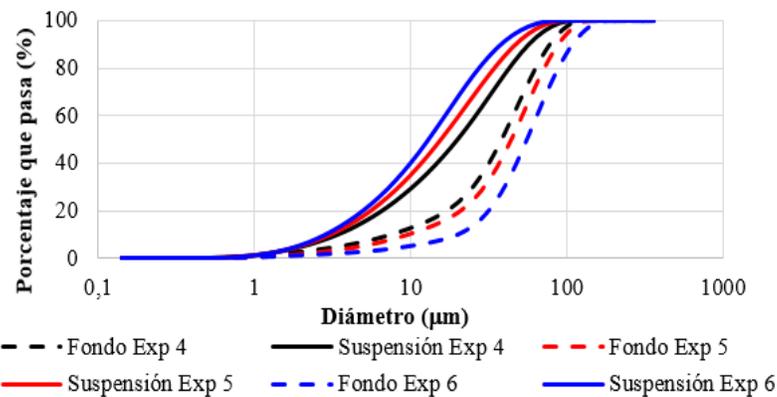


Figura 15| Curvas granulométricas Concentrado de Cobre.

CONCLUSIONES

A la fecha se ha logrado identificar parte la dinámica del concentrado de cobre cuando se rompe una tubería y hay derrame en corrientes aluviales, cuando se rompe una tubería y se derrama en corrientes aluviales, en particular en ríos de grava. Inicialmente el transporte del concentrado de cobre es en suspensión, sin embargo, debido a su alto peso específico, se genera el proceso de sedimentación, induciendo así al transporte de fondo del concentrado en la grava y la percolación entre arenas. El movimiento del concentrado de cobre entre gravas es sin obstáculos como lo menciona Gibson et al. (2009). El movimiento de concentrado de cobre entre arenas se da en forma de bulbos y domina la velocidad vertical sobre la longitudinal. Para granulometrías mal gradadas mayor es la percolación del concentrado de cobre, llegando a un estado de percolación sin obstáculos. Y cuando el tamaño del material granular es pequeño pueden generarse las capas puentes para restringir la libre percolación del concentrado de cobre. La percolación adimensional $H_{perc}/D90_{arena}$ tiende a decrecer a medida que $d_s/D90_{arena}$ aumenta, con una tendencia lineal. Las gravas tienden a proteger al concentrado de cobre; solo cuando hay socavación en el lecho hay resuspensión de éste.

se observó que el depósito de concentrado de cobre, en peso por unidad de área, a lo largo del canal es más o menos uniforme. Los experimentos realizados hasta el momento indican que para caudales mayores a 1.95 l/s el mayor transporte es en

suspensión, mientras que para caudales menores domina el transporte de fondo. Para caudales mayores a 1.95 l/s, más del 55% del concentrado de cobre viaja en suspensión y el 45 % se percola y para caudales menores, más de 55% se percola, aproximadamente.

Esta investigación aún está en curso y se continúa evaluando velocimetría, por medio de Particle Image Velocimetry (PIV), antes y después del vertimiento de concentrado, para analizar y caracterizar las estructuras turbulentas del flujo. Se harán experimentos en un canal con mayores dimensiones, para evaluar si existe en un punto en cual el concentrado de cobre se deposite en el lecho. Adicionalmente se realizarán experimentos para estudiar la dinámica del movimiento del concentrado de cobre entre las arenas con flujos subsuperficiales.

Además, se están estimando velocidades de percolación mediante procesamiento de imágenes y en próximos experimentos se evaluarán el efecto de granulometrías extendidas en el rango de gravas y arenas, en la dinámica del transporte concentrado de cobre.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen al departamento de ingeniería civil de la Universidad de Chile y al Proyecto Fondecyt 1140767.

REFERENCIAS

- Beschta, R. L & Jackson W. L. 1979. The Intrusion of Fine Sediments into a Stable Gravel Bed, *J. Fish. Res. Board can* (36), 204–210.
- Diplas, P. and Parker, G. 1992. Deposition and removal of fines in gravel-bed streams. In: *Dynamics of Gravel-Bed Rivers*. (Eds P. Billi, R.D. Hey, C.R. Thorne and P. Tacconi), pp. 313–329. John Wiley & Sons Ltd, New York.
- Einstein, H.A. 1968. Deposition of suspended particles in a gravel bed. *J. Hydraul. Eng* 94, 1197–1205.
- 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*. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Gibson, S., Abraham, D., Heath, R., & Schoellhamer, D. 2009. Vertical gradational variability of fines deposited in a gravel framework. *Sedimentology* 56(3), 661–676. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2008.00991.x>.
- Iseya, F. and Ikeda, H. 2014. Pulsations in bedload transport induced by a longitudinal sediment sorting; a flume study using sand and gravel mixture. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography* 69(1), 15–27.
- Macklin, M.G., 1992. Metal contaminated soils and sediment: a geographical perspective. In: Newson, M.D. (Ed.), *Managing the Human Impact on the Natural Environment: Patterns and Processes*. Belhaven Press, London, pp. 174–195.
- Martínez, Z. 2003. Guías prácticas para situaciones específicas: manejo de riesgos y preparación para respuestas a emergencias mineras. CEPAL, Recursos Naturales e Infraestructura, (57), 37-40.
- Moreno, G. 25 de febrero de 2016. Rotura de tubería en faena de Codelco genera derrame de mineral en río de los Andes. El Mercurio. www.emol.com.
- Pedocchi, F., Martin, J., & García, M. 2008. Inexpensive fluorescent particles for large-scale experiments using particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* 45, 183-186.
- Raffel M, Willert C, Wereley S & Kompenhans J. 1998. *Particle Image Velocimetry A Practical Guide*. Springer. Berlin Heidelberg New York.
- Rpp (30 de marzo de 2016). Derrame de relaves mineros contaminan afluentes del río Colca. www.rpp.pe.