

# PERCOLACIÓN DEL CONCENTRADO DE COBRE EN UN MEDIO POROSO

N. Bustamante<sup>1</sup> y Y. Niño<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Estudiante de Doctorado en Fluidodinámica, Universidad de Chile, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile, PH (56) 945114011;

<sup>2</sup> Profesor titular, División de Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Departamento de Ingeniería Civil, Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile, PH (562) 29784400;

E-mail: nataliabustamante@ug.uchile.cl, ynino@ing.uchile.cl

## Resumen

La principal actividad económica de Chile es la exportación de materias primas provenientes del sector minero. Como lo menciona Frêne et al. (2014) en el informe *Agua en Chile: diagnósticos territoriales y propuestas para enfrentar la crisis hídrica*, las principales actividades dentro del sector minero son: la extracción, refinación y venta de cobre. Gran parte de los yacimientos están localizados en las zonas norte y centro del país. El transporte de los productos mineros se realiza mediante tuberías, las cuales tienen grandes longitudes y cruzan cauces aluviales y dada la geomorfología de las zonas centro y norte del país, predominan los ríos de gravas (Niño, 2002), generando así un alto riesgo ambiental en ríos de gravas, dado que el sustrato en lechos de grava puede convertirse en zonas de almacenamiento de materiales contaminantes y/o tóxicos. Por lo tanto los peces, invertebrados, microorganismos y plantas están expuestos a dicha contaminación (Thoms, 1987).

El vertimiento de productos mineros a cuerpos de agua tiene un efecto aún mayor que simples deslizamientos o aluviones, dado que contaminantes, como metales pesados, pueden residir en el suelo por miles de años como fuente secundaria de contaminación (Byrne et al., 2015), por lo tanto los efectos no sólo se dan en el corto plazo. Sin embargo, la problemática de derrames mineros en corrientes aluviales no es propia de Chile. Accidentes como: falla en la presa de relaves de la mina Mount Polley, en British Columbia, Canadá, vertió 25 Mm<sup>3</sup> de material sobre la cuenca del río Quesnel (Byrne et al., 2015), rotura de tranque de relave de la mina Harmony Golden, vertió 2.5 Mton de material en zonas aledañas a Merriespruit, Sudafrica (Van Niekerk & Viljoen 2005), falla en el dique Fundão en Brasil derramó 43 Mm<sup>3</sup> y restos de este material llegaron hasta el océano Atlántico (do Carmo et al., 2017), rotura de tubería sobre el río Blanco en el sector de Saladillo, Los Andes, Chile, vertió 50 m<sup>3</sup> de concentrado de cobre afectando la captación de agua potable El Sauce ubicada en Los Andes (prensa 2016), han generado grandes daños ambientales asociadas a este tipo de accidentes, tanto en ríos, cuerpos de agua lénticos y el océano.

Sin embargo, en la literatura no hay investigaciones que involucren al concentrado de cobre como material contaminante, por lo tanto la temática más representativa es el fenómeno de percolación que ha sido estudiado desde dos enfoques, lecho fijo y lecho móvil. Einstein en 1968, fue el primero en estudiar experimentalmente el depósito de material fino en lechos de gravas inmóviles y observó que el material fino, sílice en polvo, llenó los poros de las gravas de abajo hacia arriba. Este tipo de percolación se le denominada percolación estática o percolación espontánea (Dudill, et al. 2016).

Beschta y Jackson, (1979) estudiaron la infiltración de finos en un lecho de gravas estable. Al igual que Einstein (1968), encontraron que los finos (arenas) llenaban los poros entre las gravas por gravedad. Reportaron la formación de *capas puente o sello*, las cuales tenían una profundidad entre 2.5 a 5  $d_{90\text{fino}}$ . Encontraron una pequeña dependencia entre la profundidad de dichas estructuras y el número de Froude. Sin embargo, Carling (1984) corrobora que la dependencia es pequeña entre los parámetros del flujo y la profundidad de percolación. Diplas & Parker (1985) observaron como el material fino llenaba los poros intersticiales de las gravas, controlando así el proceso de

percolación. Iseya & Ikeda (1987) hallaron disminuciones en la rugosidad del grano asociados al depósito con material fino en los espacios intersticiales formados por el material grueso. Lisle (1989) realizó investigaciones en tres corrientes aluviales, encontrando que la infiltración de finos decrece con el incremento de la carga de fondo. Sugiere que los sedimentos finos se depositan en los primeros centímetros del sustrato, formando un sello que controla la percolación de finos.

Investigadores como Gibson et al. (2009), Dudill et al. (2016), entre otros, han encontrado relaciones adimensionales que permiten caracterizar las profundidades de percolación en función de diámetros del sedimentos.

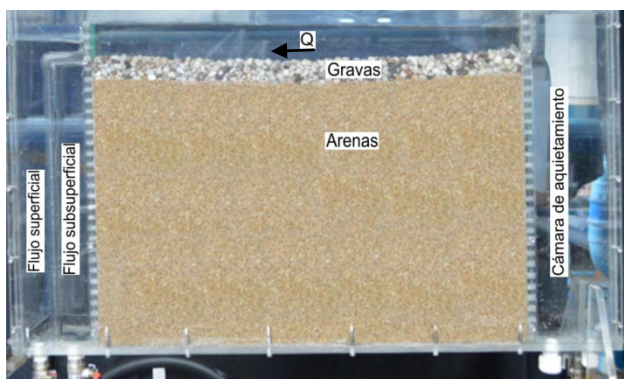
Esto motivó el estudio experimental de la dinámica del concentrado de cobre y relaves en ríos de gravas. Esta investigación hace parte del estudio, *Dinámica del concentrado de cobre en lechos de gravas*. La primera parte se realizó en un canal abierto de 3.0 m de longitud, 0.11 m de ancho, pendiente variable y caudales entre 0.68 l/s a 4.40 l/s (Bustamante et al., 2017). La instalación experimental fue pequeña, para evitar la descarga del concentrado de cobre al sistema de alcantarillado. La configuración del lecho constó de dos capas, con arena y gravas. La capa superficial es de grava cuyo diámetro medio es de 10 mm y la capa subsuperficial es de material más fino, cuyo diámetro medio varía entre 0.2 y 3.35 mm, en distintas experiencias, y densidad de 2.65 gr/cm<sup>3</sup> para ambos materiales. La altura del lecho fue de 0.05 m, 0.02 m de gravas y 0.03 m de arenas, por lo tanto la máxima percolación entre las arenas que podíamos hallar era de 0.03 m, razón por la cual se planteó otro estudio experimental que es el que presentamos en este artículo.

Los objetivos son, por una parte, identificar la dinámica de percolación del concentrado de cobre en lechos granulares en función de la tasa de suministro de concentrado de cobre, la profundidad y la granulometría de las gravas. La Figura 1 muestra el montaje experimental utilizado en esta investigación. Éste consiste en una caja de 0.58 m de longitud, 0.03 m de ancho, pendiente variable y caudales entre 0.0113 l/s a 0.037 l/s. La instalación permite evaluar percolaciones de hasta 0.3 m y medir de forma independiente el flujo subsuperficial y el flujo superficial.

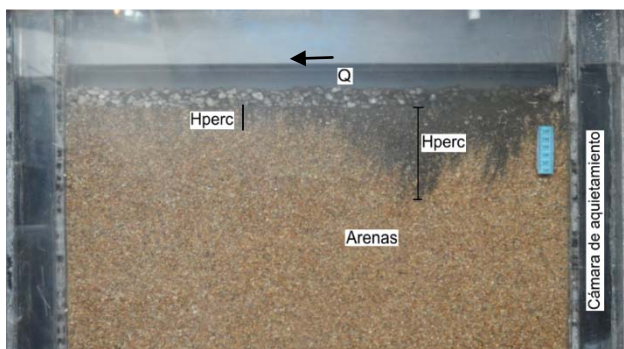
La instrumentación del montaje experimental consta de dos cámaras: una Nikon D3200 y una cámara Fastcam Mini UX50 para el análisis de percolación. Se configuró un lecho de dos capas, arena y gravas (ver Figura 1). La capa superficial es de grava cuyo diámetro medio es de 10 mm y la capa subsuperficial es de material más fino, cuyo diámetro medio varía entre 0.2 y 3.35 mm en distintas experiencias y densidad de 2.65 gr/cm<sup>3</sup> para arenas y gravas. El concentrado de cobre tiene un diámetro característico ( $D_{50}$ ) de 40  $\mu\text{m}$  y una densidad de 4.2 gr/cm<sup>3</sup>.

El vertimiento del concentrado de cobre se hace mediante un embudo. Se vierten 70 gr de concentrado de cobre, con una concentración del 70 % en peso, con el objetivo de evitar su encapsulamiento y considerando la condición más desfavorable. La Figura 2 muestra el estado final de la percolación del concentrado de cobre entre las arenas, en un escenario donde domina el flujo superficial. Mientras en la Figura 3 se presenta un incremento de la percolación asociado a un incremento de la velocidad del flujo subsuperficial. Este perfil de percolación

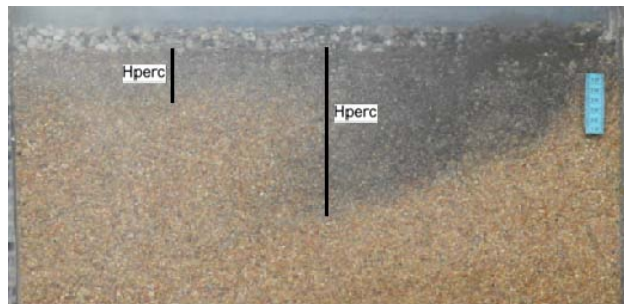
muestra la tendencia de la dirección de las líneas de flujo subsuperficial.



**Figura 1.-** Montaje experimental y configuración del lecho utilizado para la medición de percolaciones mayores a 0.03 m, flujo subsuperficial y flujo superficial.

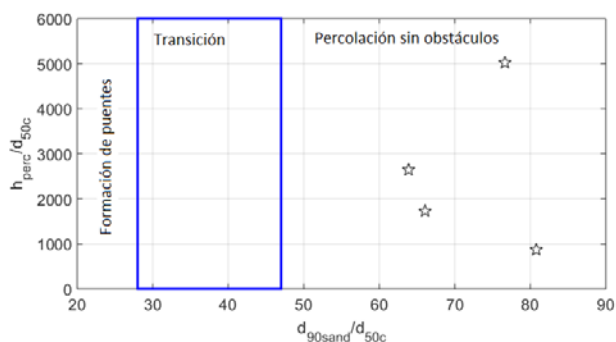


**Figura 2.-** Perfil de percolación final del concentrado de cobre entre arenas, sin flujo subsuperficial.



**Figura 3.-** Perfil de percolación final del concentrado de cobre entre arenas, con flujo subsuperficial.

Se ha evaluado los umbrales de la caracterización del fenómeno de percolación máxima del concentrado de cobre entre las arenas propuestos en la primera parte de la investigación (Bustamante et al., 2017). La Figura 4 muestra la caracterización de la percolación mediante la relación  $H_{perc}/d_{50c}$  vs  $d_{90\text{ arena}}/d_{50c}$ , para la cual, formación de puentes si:  $d_{90\text{ arena}}/d_{50c} < 28$  y percolación sin obstáculos si:  $d_{90\text{ arena}}/d_{50c} > 47$ . El recuadro azul es una zona de transición (Bustamante et al., 2017). Esta gráfica muestra que los umbrales propuestos caracterizan adecuadamente la percolación sin obstáculos. Sin embargo, en próximos experimentos se evaluará la percolación del concentrado de cobre en granulometrías más finas, con el objetivo de validar el umbral para la formación de puentes.



**Figura 4.-** Perfil de percolación final del concentrado de cobre entre arenas, con flujo subsuperficial.

## Referencias bibliográficas

- Beschta, R., & Jackson, W. (1979). The Intrusion of Fine Sediments into a Stable Gravel Bed. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 36, 204–210.
- Bustamante, N., Tapia, C., & Niño, Y. (2017). Estudio Experimental de Derrame de Concentrado de Cobre en Lechos de Gravas. In *XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica* (p. 14).
- Byrne, P., Hudson-edwards, K., Macklin, M., Brewer, P., & Bird, G. (2015). The long-term environmental impacts of the Mount Polley mine tailings spill, British Columbia, Canada. *Geophysical Research Abstracts*, 17(1), 6241.
- Carling, P. A. (1984). Deposition of Fine and Coarse Sand in an Open-Work Gravel Bed. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 41(2), 263–270. <https://doi.org/10.1139/f84-030>
- Diplas, P., & Parker, G. (1985). *Pollution of Gravel Spawning Grounds due to Fine Sediment*. <https://doi.org/EPA/R-808683-01-1>
- do Carmo, F. F., Kamino, L. H. Y., Junior, R. T., de Campos, I. C., do Carmo, F. F., Silvino, G., ... Pinto, C. E. F. (2017). Fundão tailings dam failures: The environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>
- Dudill, A., Frey, P., & Church, M. (2016). Infiltration of fine sediment into a coarse mobile bed: phenomenological study. *Earth Surf. Process. Landforms*, 42(December 2016), 1171–1185. <https://doi.org/10.1002/esp.4080>
- Frêne, C., Ojeda, G., Santibañez, J., Donoso, C., Sanzana, J., Molina, C., ... Núñez-Ávila, M. (2014). *Agua en Chile: Diagnósticos territoriales y propuestas para enfrentar la crisis hídrica*.
- 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., & 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>
- Lisle, E. (1989). Correction to ‘Sediment Transport and Resulting Deposition in Spawning Gravels, North Coastal California’ by Thomas E. Lisle. *Water Resources Research*, 25(10), 1303–1319.
- Niño, Y. (2002). Simple Model for Downstream Variation of Median Sediment Size in Chilean Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(October), 934–941. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:10\(934\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:10(934))
- Thoms, M. C. (1987). Channel sedimentation within the urbanized river Tame, U.K. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1(3), 229–246. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450010304>
- Van Niekerk, H. J., & Viljoen, M. J. (2005). Causes and consequences of the Merriespruit and other tailings-dam failures. *Land Degradation and Development*, 16(2), 201–212. <https://doi.org/10.1002/ldr.681>