



Modelación del flujo preferencial en pilas de lixiviación

Modelling of preferential flow in heap leaching

Delahaye, Carlos H.¹ ✉ - Berenguer, Tadeo - Onorato, Martín

Recibido: 31 de mayo de 2015 • Aceptado: 16 de noviembre de 2015

Resumen

El artículo analiza el desarrollo de flujo preferencial en pilas de lixiviación debido a la heterogeneidad del mineral apilado. La heterogeneidad del material se describe mediante campos de permeabilidades aleatorios que aumentan la conectividad de los poros, con una media constante y una función de covariancia que depende del vector distancia relativa entre dos puntos arbitrarios. Puesto que los datos relativos a la variabilidad del material a pequeña escala es muy limitada, se mantiene una estrecha relación con los datos macroscópicos promedio medidos (homogéneo). Una vez definido el modelo de suelo heterogéneo, se utiliza un código termo-hidro-mecánico acoplado de propósito general para realizar el análisis. El mineral está inicialmente en estado no saturado y se simula el riego de la pila a una tasa determinada. Las características geotécnicas del material son representativas del mineral de la pila de lixiviación de la Mina Gualcamayo (Jáchal, San Juan). Los resultados de los diferentes análisis se comparan con el fin de avanzar en la comprensión del flujo preferencial a través de pilas de lixiviación. Las implicancias de los resultados obtenidos desde el punto de vista de la operación de la pila son inmediatas. Por un lado muestran la necesidad de revisar los métodos actuales de transporte y vertido del mineral, los cuales favorecen la segregación de partículas, dando como resultado un flujo heterogéneo, que disminuye el rendimiento de la pila. Por otro lado, muestran la potencia del método de análisis utilizado y las posibilidades de su empleo en el diseño de ingeniería de pilas.

Palabras claves: pila lixiviación, heterogeneidad, vías preferenciales, flujo no saturado.

Abstract

The article analyzes the development of preferential flow in heap leaching due to the heterogeneity of stockpiled ore. The heterogeneity of the material is described by random permeability fields which increase the connectivity of the pores, with a constant mean and a covariance function that depends on the relative distance vector between two arbitrary points. Since data on the material variability at a small scale is very limited, a close relationship with the average macroscopic data measured (homogeneous) is maintained. Once the heterogeneous soil is defined, a general purpose code for thermo-hydro-mechanical analysis is subsequently used to perform the analyses. The ore is initially in unsaturated state and a rain rate on the top of the heap is applied. The geotechnical characteristics of the material are representative of the ore from the Mina

Gualcamayo heap leaching (Jáchal, San Juan). The implications of the results obtained from the point of view of the operation in heap leaching are immediate. On the one hand they show the need to review the current methods of transportation and disposal of mineral in heaps, which lead to the separation of particles, resulting in a heterogeneous flow,

1. Instituto de Investigaciones Mineras, Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, Av. Libertador 1109 – Oeste – 5400, San Juan, Argentina.

✉ delahaye@unsj.edu.ar

which reduces heap leaching performance. On the other hand, they show the power of the analysis method used and the possibilities of its application in the engineering design of heap leaching.

Keywords: heap leaching, heterogeneity, preferential paths, unsaturated flow.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se explora el efecto de la heterogeneidad del material sobre el desarrollo de flujo preferencial no saturado en el interior de una pila de lixiviación de minerales, utilizando un modelo numérico basado en el método de elementos finitos.

Trabajos de varios autores (Aylmore, 1993; Brun, 1989; Conciani et al., 1995) muestran que la heterogeneidad del suelo conduce al fenómeno de "fingering" cuando un frente de humectación avanza a través de un suelo no saturado, formando vías preferenciales de flujo a través de zonas de mayor permeabilidad dentro de la masa del suelo, que controlan el avance del frente de humectación provocado por el riego de la pila.

La observación de perfiles de resistividad eléctrica en secciones de una pila de lixiviación (Figura 1, Rodríguez et al., 2012) sugiere también una estructura heterogénea y flujo concentrado sobre caminos preferenciales. El problema es complejo ya que las características físicas de las distintas capas, el estado

de tensiones significativas, el grado de saturación y la tasa de riego influyen significativamente sobre las trayectorias de flujo.

Para definir el modelo de suelo heterogéneo se han generado campos de permeabilidades aleatorios, estacionarios y bidimensionales, aumentando la conectividad de los valores altos de permeabilidad, con una media constante y una función de covariancia que depende del vector distancia relativa entre dos puntos arbitrarios. La función de covarianza es definida por su varianza y rango. La función densidad de probabilidad del campo de permeabilidades corresponde a una distribución log-normal.

El dominio de análisis considerado corresponde a una región cuadrada de $2.5 \times 2.5 \text{ m}^2$ de la sección transversal de la pila de lixiviación analizada en Delahaye (2010) (Figura 2). La muestra fue dividida, en todos los casos, en 50×50 celdas cuadradas cada una de las cuales fue modelada por medio de un elemento finito con propiedades constantes. La zona ampliada muestra una realización de distribución de permeabilidades correspondiente a un campo aleatorio esférico con una distancia de correlación muy pequeña.

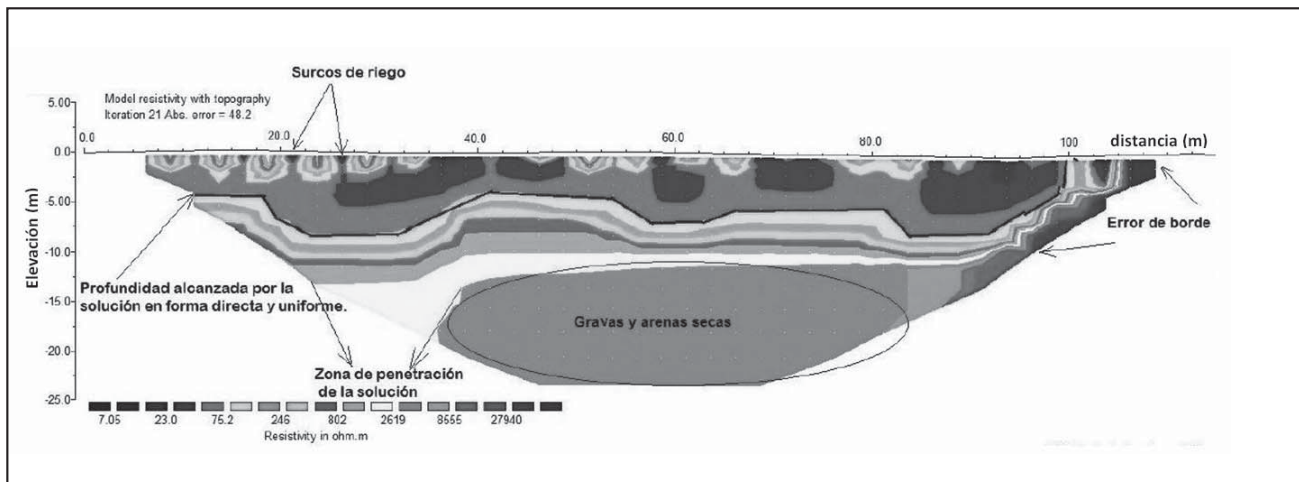


Figura 1: Distribución de resistividades eléctricas medidas sobre un perfil de la Pila de Lixiviación Sur de la Mina Gualcamayo, San Juan, Argentina.

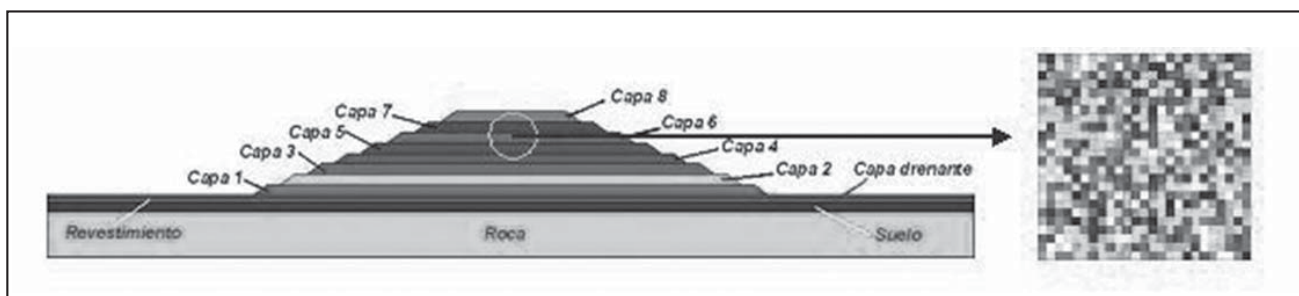


Figura 2. Sección transversal de la pila sobre plataforma. Región de análisis.

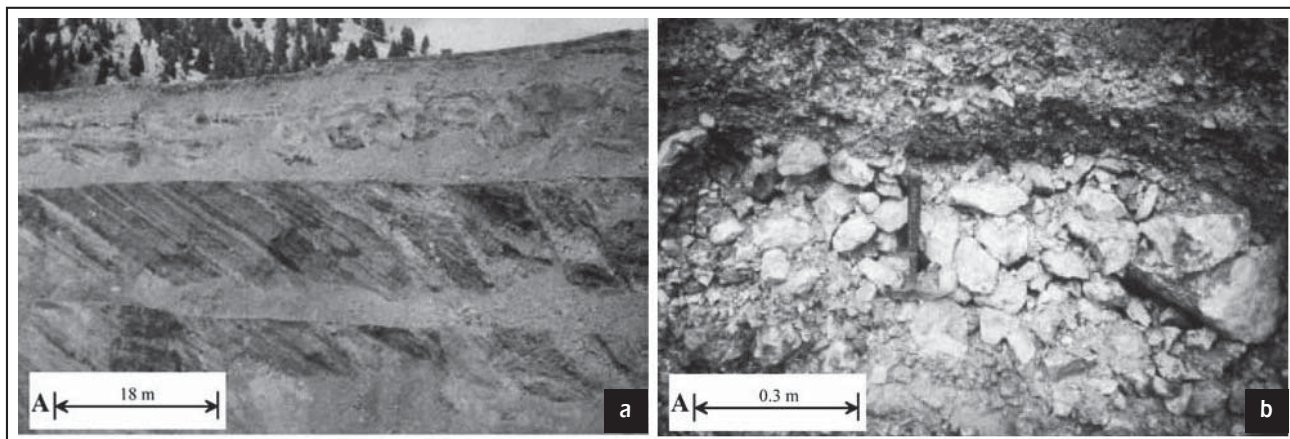


Figura 3. Segregación del material producido por el volcado y acomodamiento del mineral en la plataforma de lixiviación. Pila este de la mina "Golden Sunlight Mine", Montana, USA. a) Disposición del mineral en capas horizontales en un banco de la pila. b) Detalle de la estructura heterogénea del mineral apilado.

Una vez definido el modelo de suelo heterogéneo, se utiliza un código Termo-Hidro-Mecánico (THM) acoplado de propósito general para analizar el comportamiento hidromecánico de la región de análisis. El mineral está inicialmente en estado no saturado, con un grado de saturación inicial del 13% ($w_o=3.2\%$) y se simulan las condiciones de operación de la pila aplicando sobre el contorno superior de la región de análisis una tasa de riego de 12 l/h/m^2 , la cual se mantiene constante durante 45 días. Se ha considerado mineral con estructura homogénea (suelo base de permeabilidad media) y mineral con estructura heterogénea (campos aleatorios de permeabilidades esférico y anisótropo).

Los resultados obtenidos de los diferentes análisis se presentan en gráficos de distribución espacial y gráficos de evolución de las variables de flujo, con el fin de avanzar en la comprensión del desarrollo de flujo preferencial observado en pilas de lixiviación. El flujo preferencial es debido al proceso natural de compactación y segregación que se produce durante el volcado y acomodamiento del mineral sobre la plataforma de lixiviación. En la Figura 3a puede observarse, a escala de banco de pila, la textura del material con disposición del mineral en capas horizontales, y en la Figura 3b, en mayor detalle, la estructura heterogénea del material apilado (Azam *et al.*, 2007). La estructura heterogénea del mineral apilado disminuye el rendimiento de la operación de la pila, y en algunos casos, conduce a afloramientos de líquido por la superficie de los taludes, afectando las condiciones de estabilidad y aumentando las posibilidades de contaminación del medioambiente.

MARCO TEÓRICO

La predicción del comportamiento de una pila de lixiviación puede realizarse a partir del análisis de los aspectos hidromecánicos que inciden directamente sobre su rendimiento y las condiciones de seguridad. Debido a que el mineral se apila en estado no saturado, el uso de un modelo hidromecánico, basado en la mecánica de los medios no saturados, constituye una herramienta adecuada para este propósito, ya que permite conocer la evolución y disipación de las presiones de poros en el interior de la pila, las presiones sobre el revestimiento de la base, la posición del nivel freático y determinar las condiciones de flujo en las distintas fases de construcción, operación, cierre y abandono (O'Kane *et al.*, 1999; O'Kane, 2000).

En este trabajo se ha utilizado el Sistema de Cálculo *CODE-BRIGHT* (2000), basado en el método de los elementos finitos. *CODE-BRIGHT* es capaz de efectuar el análisis Termo-Hidro-Mecánico (THM) acoplado en dos y tres dimensiones de problemas reales de la ingeniería civil y de minas. Puede simular aspectos tales como: estructura y discontinuidad del terreno, comportamiento hidromecánico de suelos, rocas y discontinuidades, excavación y construcción, filtraciones, distintas opciones de refuerzo y otras. Este sistema de cálculo posee módulos de conexión del programa de elementos finitos al Sistema Gráfico Interactivo *GID* (2000) para el pre y post procesamiento de la información. El Sistema *GID* es una interfaz gráfica interactiva que permite la definición, preparación y visualización de toda la información resultante de la simulación numérica.

CODE_BRIGHT resuelve el problema del flujo de gas (aire) y líquido (agua) en un medio no-saturado que deforma a medida que se producen cambios en los esfuerzos totales y/o las presiones de gas y de líquido. Las variables independientes de la formulación son la presión de gas (P_g), la presión de líquido (P_l) y el vector desplazamiento (\mathbf{u}). Los flujos advectivos y difusivos se calculan a través de las leyes generales de Darcy y Fick respectivamente. La parte mecánica se formula en términos de dos campos de esfuerzos independientes: tensión neta, ($\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} - P_g \mathbf{m}$, $\boldsymbol{\sigma}$ = tensión total, \mathbf{m}^T = vector auxiliar [1,1,1,0,0,0]) y succión matricial ($s = P_g - P_l$). *CODE_BRIGHT* se describe en detalle en Olivella *et al.* (1994, 1996).

El programa resuelve simultáneamente el siguiente conjunto básico de ecuaciones:

Ecuación de balance de masa de gas (aire):

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_g n (1 - S_l + H S_l)] + \text{div} [\rho_g (\mathbf{v}_g + H \mathbf{v}_l)] = 0 \quad (1)$$

donde, ρ_g , S_l y n son la densidad del gas, el grado de saturación y la porosidad. \mathbf{v}_g y \mathbf{v}_l son los vectores velocidad macroscópica (ley de Darcy) del gas y del líquido. La ley de Henry se utiliza para encontrar la masa de gas disuelta en el líquido. Si H es la constante de Henry, el volumen de gas

disuelto en un volumen $n S_l$ de líquido es $H n S_l$ (medido a la presión de gas libre).

Ecuación de balance de masa de líquido (agua):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_l n S_l) + \text{div} (\rho_l \mathbf{v}_l) = 0 \quad (2)$$

donde ρ_l es la densidad del líquido. La ecuación (2) no considera la transferencia de humedad en forma de vapor. El transporte de humedad por vapor es significativo en los casos de gradientes de temperatura importantes o grado de saturación pequeños.

Ecuación de equilibrio mecánico:

$$\frac{\partial (\sigma_{ij} - \delta_{ij} P_g)}{\partial x_j} + \frac{\partial P_g}{\partial x_i} + b_i = 0 \quad ; \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (3)$$

donde b_i son las fuerzas de masa, P_g la presión de gas, σ_{ij} las tensiones totales, x_i el sistema de coordenadas y δ_{ij} la función de Kronecker. Note que en la ecuación (3) el equilibrio está formulado en términos de tensiones netas (exceso de la tensión total sobre la presión de gas). Cuando el terreno alcanza la saturación, $P_g = P_l$, la succión $s = P_g - P_l$ se anula y se recupera la clásica formulación en términos de tensiones efectivas.

Ecuaciones constitutiva: El líquido y el gas se mueven de acuerdo a la ley de Darcy:

$$\mathbf{v}_l = -(\mathbf{K}_l / \gamma_l) (\nabla P_l - \rho_l \mathbf{g}) \quad (\text{líquido}) \quad (4)$$

$$\mathbf{v}_g = -(\mathbf{K}_g / \gamma_g) (\nabla P_g - \rho_g \mathbf{g}) \quad (\text{gas}) \quad (5)$$

γ_l y γ_g son el peso específico del líquido y del gas. La densidad del líquido se calcula por, $\rho_l = \rho_{l0} \exp[\beta (P_l - P_{l0})]$, β = compresibilidad del líquido, ρ_{l0} y P_{l0} son la densidad y la presión de líquido a T_0 (temperatura de referencia).

El gas se comporta como un gas ideal: $\rho_g = M P_g / (R T)$, M = peso molecular del gas, R = constante de los gases, T = temperatura absoluta (ley del gas ideal).

$\mathbf{K}_l = \mathbf{K} k_{rl} (\rho_l \mathbf{g} / \mu_l)$ y $\mathbf{K}_g = \mathbf{K} k_{rg} (\rho_g \mathbf{g} / \mu_g)$ son el tensor permeabilidad al líquido y al gas.

El tensor permeabilidad intrínseca, \mathbf{K} , depende de la estructura porosa del terreno y está dada por:

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_0 \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \quad (\text{modelo de Kozeny}) \quad (6)$$

donde \mathbf{K}_0 es la permeabilidad intrínseca correspondiente a ϕ_0 (porosidad de referencia).

k_{rl} y k_{rg} son las permeabilidades relativas al líquido y al gas, las cuales controlan la variación de la permeabilidad en régimen no saturado. μ_l y μ_g son las viscosidades dinámicas del líquido y del gas. \mathbf{g} es la aceleración de la gravedad.

Para resolver las ecuaciones indicadas anteriormente es necesario definir las permeabilidades relativas al gas y al líquido como una función del grado de saturación (o de la succión) y la curva de retención del líquido, relación entre el grado de

saturación y la succión. Varias expresiones se han propuesto para expresar estas relaciones (Lloret et al., 1985; Alonso et al., 1987).

En general, las permeabilidades relativas al líquido y al gas (k_{rl} y k_{rg}) se hacen dependientes del grado de saturación efectivo, S_e , que se expresa por $S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} \leq 1$, donde

S_l es el grado de saturación, S_{rl} el grado de saturación residual y S_{ls} el grado de saturación máximo.

Las permeabilidades relativas al líquido y al gas se han calculado utilizando las siguientes ecuaciones:

$$k_{rl} = S_e^{1/2} \left(1 - (1 - S_e^{1/\lambda})^\lambda \right)^2 \quad (\text{líquido, van Genuchten, 1980}) \quad (7)$$

$$k_{rg} = A_g (1 - S_e)^{\beta_g} \quad (\text{gas, ley potencial generalizada}) \quad (8)$$

donde λ , A_g y β_g son parámetros del material.

Para la curva de retención de los materiales, que relaciona el grado de saturación con la succión, $s = P_g - P_l$, se ha adoptado el modelo de van Genuchten (1980):

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left[1 + \left(\frac{s}{P_o} \right)^{1-\lambda} \right]^{-\lambda} \quad (\text{modelo de van Genuchten, 1980}) \quad (9)$$

donde P_o y λ son parámetros del material. En los análisis llevados a cabo no se han tenido en cuenta los efectos de histéresis de la curva de retención.

La ecuación constitutiva mecánica toma la forma incremental:

$$d\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{D} d\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{h} ds \quad (10)$$

Los coeficientes de la matriz \mathbf{D} y \mathbf{h} se definen a través del modelo constitutivo mecánico.

Para la ley constitutiva elasto-plástica (Alonso et al., 1990; Gens, 1995), la deformación volumétrica se define por $\boldsymbol{\varepsilon}_v = \boldsymbol{\varepsilon}_x + \boldsymbol{\varepsilon}_y + \boldsymbol{\varepsilon}_z$.

La superficie de fluencia generalizada depende de las tensiones, $\boldsymbol{\sigma}'$, de la deformación volumétrica plástica $\boldsymbol{\varepsilon}_v^p$, y de la succión, s : $f = (\boldsymbol{\sigma}', \boldsymbol{\varepsilon}_v^p, s)$, que escrita en términos de invariantes resulta:

$$f = (p', J, \theta, \boldsymbol{\varepsilon}_v^p, s) \quad (11)$$

donde p' es la tensión media neta,

$$p' = (1/3) (\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z) = p - \max(P_g, P_l)$$

J^2 es el segundo invariante del tensor desviador de tensiones,

$$J^2 = (1/2) \text{traza} (\mathbf{s}^2) \quad ; \quad \theta \text{ es el ángulo de Lode,}$$

$$\theta = -\frac{1}{3} \sin^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{\det \mathbf{s}}{J^3} \right) \text{ y } \mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma}' - p' \mathbf{I} \text{ , } \mathbf{s} \text{ es el tensor}$$

desviador de tensiones, e I es el tensor identidad.

Por simplicidad, se ha adoptado como ley constitutiva saturada isotérmica de referencia una forma del modelo clásico Cam-Clay Modificado.

$$F = \frac{3J^2}{g_y^2} - L_y^2 (p' + p_s)(p_o - p') = 0 \quad (12)$$

donde g_y es una función del ángulo de Lode, M es un parámetro para la línea de estado crítico y $L_y = \frac{M}{g_y(\theta = -\pi/6)}$.

La asunción básica es que la presión de preconsolidación, p^o , depende de la succión y de la temperatura:

$$p_o = p^c \left(\frac{p_o^*(T)}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(o)-k_{i0}}{\lambda(s)-k_{i0}}} \quad (13)$$

donde $p_o^*(T) = p_o^* + 2(\alpha_1 \Delta T + \alpha_3 \Delta T |\Delta T|)$ y $\lambda(s) = \lambda(o)[(1-r) \exp(-\beta s) + r]$. p^c es la presión de referencia, p^o es la presión media de preconsolidación inicial para condiciones saturadas, $\lambda(o)$ es la pendiente de la curva índice de vacíos - tensión media en condiciones saturadas, k_{i0} es la pendiente elástica inicial de la curva volumen específico - tensión media para succión nula, α_1 y α_3 son parámetros para deformación plástica por temperatura, r y β son parámetros que definen la pendiente de la curva tensión neta media - volumen específico para la succión s .

Además, la resistencia a la tracción por succión es $p_s = k \exp(-\rho \Delta T) s$, donde k y ρ son parámetros.

En común con otros modelos de estado crítico, se asume que el endurecimiento depende únicamente de la deformación volumétrica plástica:

$$dp_o^* = \frac{1+e}{\lambda(o)-k_{i0}} p_o^*(T) d\varepsilon_v^p \quad (14)$$

y el potencial plástico:

$$G = \frac{3J^2}{g_p^2} - \alpha L_p^2 (p' + p_s)(p_o - p') \quad (15)$$

donde $L_p = \frac{M}{g_p(\theta = -\pi/6)}$. Para un modelo plástico asociado, se adopta $\alpha=1$.

En función del grado de compactación del material la descripción del comportamiento del material dentro de la superficie de fluencia es particularmente importante. La variación de la rigidez tensional con la succión y especialmente, la variación del potencial de hinchamiento del material con la tensión y la succión tienen que ser cuidadosamente tomados en cuenta.

El modelo elástico resultante es como sigue:

$$d\varepsilon_v^e = \frac{k_i(s)}{1+e} \frac{dp'}{p'} + \frac{k_s(p',s)}{1+e} \frac{ds}{s+0.1} + (\alpha_o + 2\alpha_2 \Delta T) dT \quad (16)$$

donde

$$k_i(s) = k_{i0} (1 + \alpha_i s), \quad k_s(p',s) = k_{s0} (1 + \alpha_{sp} \ln p'/p_{ref}) \exp(\alpha_{ss} s)$$

e es el índice de vacíos, α_0 , α_2 son parámetros para la deformación térmica elástica, α_i es parámetro para k_i , k_{i0} y k_{s0} son la pendiente elástica inicial de la curva volumen específico-tensión media neta y volumen específico-succión, para succión nula. α_{sp} y α_{ss} son parámetros para k_s y p_{ref} es una tensión media de referencia. Las deformaciones elásticas desviadoras se obtienen a partir de un coeficiente de Poisson, ν , constante.

SIMULACIÓN DE LA HETEROGENEIDAD DEL MINERAL DE LA PILA

En los análisis realizados se ha resuelto únicamente el flujo de líquido. La presión de gas se ha mantenido constante e igual a la presión atmosférica, lo que está de acuerdo con la baja humedad inicial del mineral de la pila que permite que el gas (aire) se mueva libremente en el interior de la pila a medida que avanza el frente de humectación. No se ha considerado el acoplamiento mecánico, lo que significa que la distribución de porosidades y permeabilidades se mantiene constante en el tiempo (comportamiento rígido).

Suelo homogéneo de referencia

Se ha seleccionado como conjunto de parámetros de referencia las propiedades geotécnicas básicas del mineral. La curva de retención para el caso homogéneo (suelo básico) se ha estimado a partir de ensayos de propiedades índices del mineral de la pila, utilizado en ensayos de recuperación en columnas de lixiviación (Fredlund and Xing, 1994; Fredlund, et al., 2002). La Figura 4 muestra la curva de retención para el caso homogéneo (suelo básico) correspondiente a la porosidad $\phi_0 = 0.38$, la cual representa la mejor aproximación a los datos de laboratorio.

La permeabilidad relativa al líquido se ha estimado con el modelo de van Genuchten (1980) (ecuación 7). La derivación del conjunto de parámetros de referencia se describe en detalle en Delahaye y Onorato (2013).

El riego se simula imponiendo un flujo de líquido constante de 12 l/ (hxm²) sobre el contorno superior de la región. Sobre el contorno inferior se impone las condiciones de una superficie de filtración (presión atmosférica y sólo flujo de salida permitido). Los contornos laterales de la zona de estudios se asumen impermeables. Las condiciones iniciales del mineral son el grado de saturación de líquido S_{l0} y la porosidad ϕ_0 correspondiente al inicio del riego (tiempo $t = 0$).

La Figura 5 muestra el problema de contorno resuelto que representa las condiciones de operación de la pila.

Se han resuelto cinco casos del problema de contorno planteado, los cuales se han indicado en la Tabla 1. El Caso 0 corresponde al mineral homogéneo tomado como referencia, los Casos 1 a 4 corresponden a mineral heterogéneo. En todos los casos se ha utilizado una geometría 2D, discretizada por elementos finitos cuya malla está compuesta por 2601 nodos y 2500 elementos cuadriláteros lineales a los efectos de que el problema sea tratable desde el punto de vista numérico.

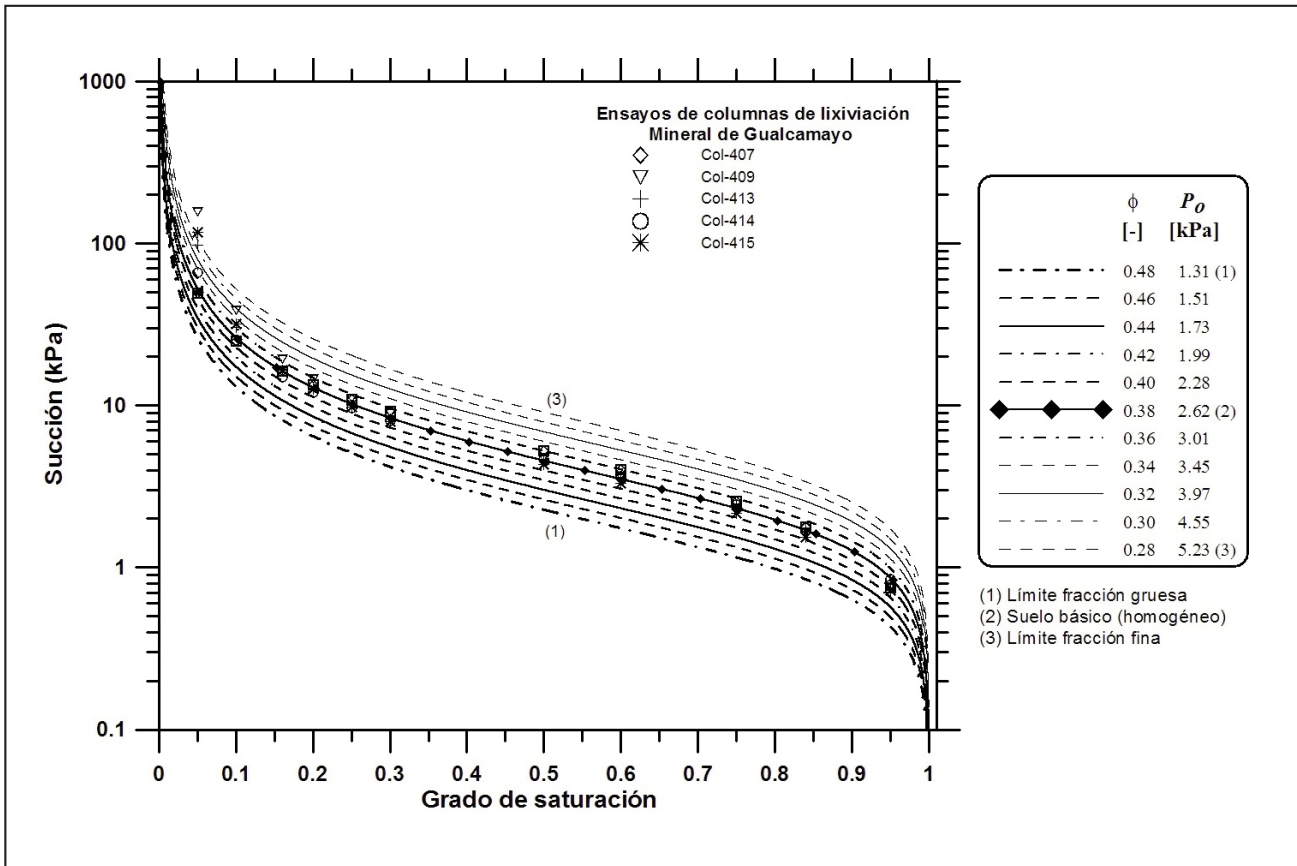


Figura 4. Curvas de retención de líquido para los casos homogéneo y heterogéneos.

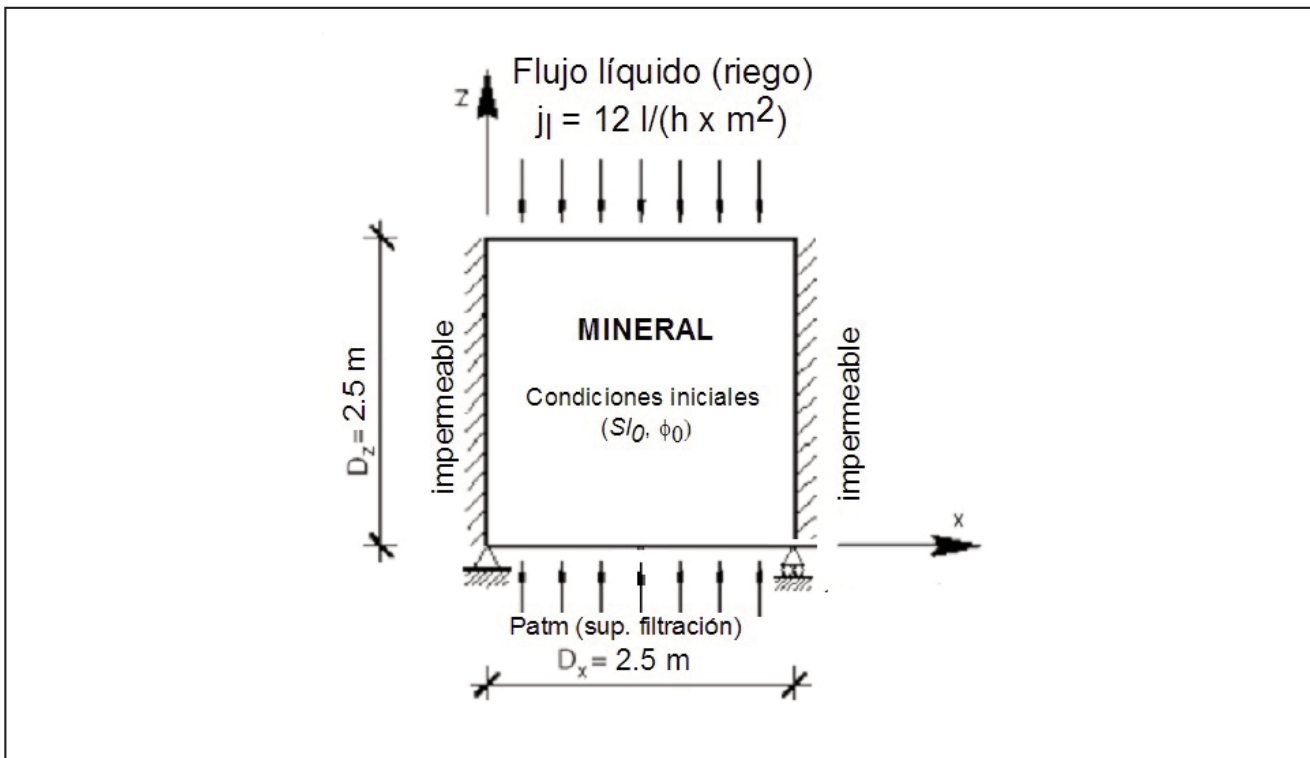


Figura 5. Definición del problema resuelto.

Tabla 1. Definición de casos.

Caso	Campo	Tipo	log K (media, Var)	Porosidad	Curva de retención	Permeabilidad relativa al líquido
0	0	Suelo básico, homogéneo	(-10.983, 0)	$\varphi = 0.38$	$P_o = 2.62 \text{ kPa}$ $\lambda = 0.5,$ $S_{rl} = 0, S_{ls} = 1$	$\lambda = 0.5,$ $S_{rl} = 0, S_{ls} = 1$ (ecuación 7)
1	1	heterogéneo	(-10.983, 2)	Asociada con K por ley cúbica (ecuación 6)	$P_o = P_o(\varphi)$ (ecuación 17) $\lambda = 0.5,$ $S_{rl} = 0, S_{ls} = 1$	
2	2					
3	3					
4	4					

$K = \text{permeabilidad intrínseca (m}^2\text{)} ; K \text{ media} = 1.04E-11 \text{ m}^2$

Suelo heterogéneo

De acuerdo con lo descrito en la introducción, el propósito del trabajo ha sido explorar el efecto de la heterogeneidad del material sobre el desarrollo de flujo preferencial en el interior de la pila.

La idea se ha representado en la Figura 6 (Delahaye y Alonso, 2002), la cual muestra la trayectoria en tres y dos dimensiones seguida por una partícula de líquido desde la zona superior (riego) hacia la zona inferior (salida) de la región de análisis. En este trabajo el problema se ha simplificado a dos dimensiones para todos los casos analizados.

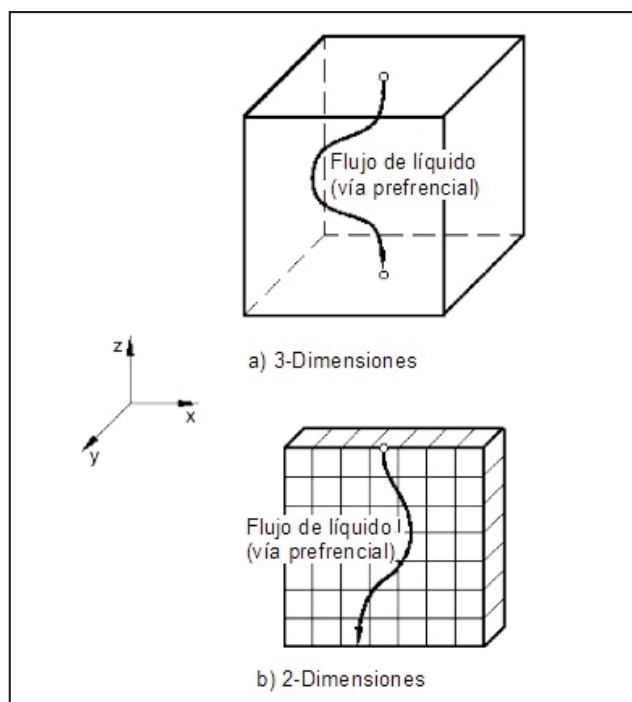


Figura 6. Flujo preferencial en un suelo heterogéneo. a) problema 3D; b) problema 2D.

Campos de permeabilidad aleatorios

Para representar la heterogeneidad del terreno se han generado campos de permeabilidades aleatorios, estacionarios y bidimensionales, aumentando la conectividad de los valores altos de permeabilidad, con una media constante y una función de covarianza que depende del vector distancia relativa entre dos puntos arbitrarios. La función de covarianza es definida por su varianza y rango, las cuales se han representado en la Figura 7 para un campo aleatorio unidimensional $Z(x)$. La función densidad de probabilidad del campo de permeabilidades $K(z,x)$ corresponde a una distribución log-normal.

La generación de los campos aleatorios de permeabilidades se ha realizado con el programa GCOSIM3D (Gómez-Hernández, J., 1991, 1993), considerando una dirección de flujo preferencial en la región de análisis. El caso típico de estructura heterogénea del material de pila, que conduce a una

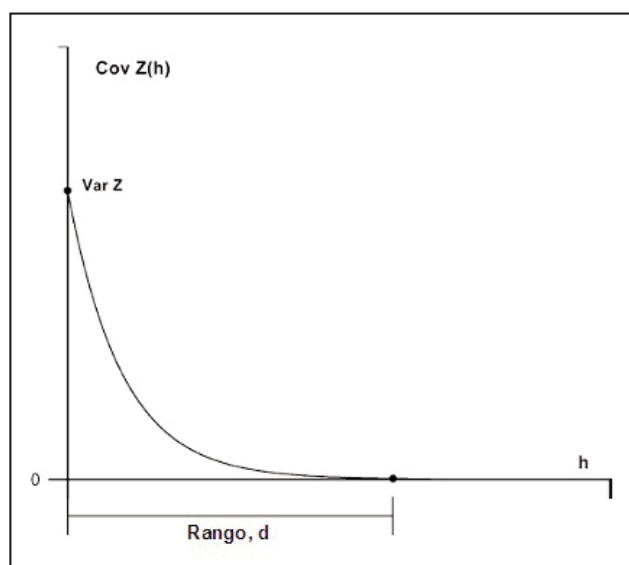


Figura 7. Función de covarianza.

anisotropía marcada en la permeabilidad, es el desarrollo de capas debido al proceso natural de compactación y segregación que se produce durante el volcado y acomodamiento del mineral sobre la plataforma de lixiviación. Se han considerado dos rangos de correlación: d_x (en dirección del eje x horizontal) y d_z (en dirección del eje z vertical). A medida que el rango de correlación aumenta la variabilidad espacial se reduce. Para una distancia de correlación nula se alcanza la máxima aleatoriedad (“ruido blanco”).

Las características de los campos de permeabilidades aleatorios utilizados en los análisis están relacionados al campo de permeabilidades aleatorio tomado como base, Campo 2, cuyas características se han indicado en la Tabla 2. Su valor medio corresponde a la permeabilidad intrínseca adoptada para el caso homogéneo de referencia de valor $K_0=1.04E-11$ m². La varianza

de $\log K_0$ (campo aleatorio normal dado que K tiene una distribución normal) es relativamente grande ($\text{Var}[\log K]=2$) e implica cambios importantes de permeabilidad a distancias cortas. La anisotropía se define por dos rangos diferentes a lo largo de las direcciones x y z: $d_x = 0.025$ m = $D_x/100$ y $d_z=1$ m = $10/25 D_z$, donde D_x y D_z son el ancho y alto de la región de análisis.

Se han considerado además otros 3 campos aleatorios: Campo 1, campo aleatorio esférico con distancia de correlación muy pequeña en ambas direcciones; Campo 3, campo aleatorio anisótropo cuyo rango en dirección z se ha incrementado un 50% respecto del Campo 2, y Campo 4, campo aleatorio anisótropo con rango en dirección x dos veces el rango en dirección z. Este último campo tiene por objeto representar el incremento de flujo horizontal en la pila provocado por el volcado y acomodamiento del mineral sobre la plataforma de lixiviación.

Tabla 2. Parámetros de los campos de permeabilidad aleatorios.

Campo	K media (m ²)	Varianza (log K)	Tipo de Campo	Rango d_x (m)	Rango d_z (m)
0	1.04E-11	--	Homogéneo	--	--
1	1.04E-11	2	Esférico	0.025	0.025
2	1.04E-11	2	Anisótropo	0.025	1
3	1.04E-11	2	Anisótropo	0.025	1.5
4	1.04E-11	2	Anisótropo	1	0.5

K = permeabilidad intrínseca

La región de análisis de 2.5 m x 2.5 m fue dividida en todos los casos en 50 x 50 celdas cuadradas de 0.05 m x 0.05m cada una. Cada celda fue modelada por medio de un elemento finito con propiedades constantes. La figura 8 muestra 4 realizaciones de distribución de permeabilidades para los 4 campos aleatorios definidos anteriormente. Puede observarse en dicha figura el efecto de las diferentes distancias de correlación utilizadas en cada caso.

Algunos estudios micrográficos muestran que un suelo puede exhibir cambio de propiedades importantes en distancias cortas. Esto puede observarse en la Figura 9, la cual representa la variación de la permeabilidad intrínseca de una muestra de suelo natural informado por *Conciani et al. (1995)*, derivado a partir de una distribución de densidades secas determinadas con tomografía computada (CT). La técnica utilizada en este caso da la información en celdas de 2 mm x 2 mm. La porosidad cambió en el rango de 0.31 a 0.49. Los cambios de porosidad solamente no dan suficiente información para derivar permeabilidad, la cual puede estar también controlada por cambios en la composición del suelo, mineralogía y microestructura. Sin embargo, estos resultados proveen una clave sobre la escala de la fluctuación presente en un suelo natural.

Análisis hidráulico. Casos definidos.

Casos 1, 2, 3 y 4 han sido definidos en Tabla 1. Dado que los cambios en permeabilidad están posiblemente asociados con cambios simultáneos de porosidad y de las propiedades de retención de líquido, se ha introducido un procedimiento aproximado para extender los campos de permeabilidad generados, a cambios de porosidad y características de retención de líquido.

La porosidad se re-calcula utilizando la relación de Kozeny (ecuación 6). La curva de retención de líquido se aproxima cambiando el valor de entrada de gas P_o (ecuación 9), de acuerdo con el cambio de porosidad, utilizando la siguiente ecuación:

$$P_o(\phi) = P_o(\phi_0) \exp(a(\phi_0 - \phi)) \quad (17)$$

donde a se determina a partir de las granulometrías límites fina y gruesa del mineral definidas en el intervalo $[\phi_0 - 0.10; \phi_0 + 0.10]$ (Figura 4). El resto de los parámetros de la curva de retención del suelo de referencia se mantienen sin cambios.

El Caso 1 representa la mayor variabilidad hidráulica. Cada celda es en sí misma un suelo distinto caracterizado por su propia porosidad, permeabilidad intrínseca y curva de retención de líquido. Sin embargo, la permeabilidad relativa al líquido se mantuvo sin cambios. Casos 2, 3 y 4 son versiones con mayor variabilidad en una dirección determinada, como se puede observar en la Tabla 1.

Se ha introducido una condición de consistencia con el objeto de preservar una conductividad hidráulica promedio común para todos los casos definidos. A medida que el mineral se hace más heterogéneo y el flujo preferencial más definido la conductividad hidráulica promedio aumenta. A los efectos de mantener la conductividad hidráulica promedio igual al valor original (Caso homogéneo, $K_0 = 1.04E-11$ m², para $\phi_0 = 0.38$), la permeabilidad intrínseca de referencia K_0 correspondiente a los campos heterogéneos Campos 1, 2, 3 y 4, fue reducida. Para ello se simuló un ensayo de permeabilidad en

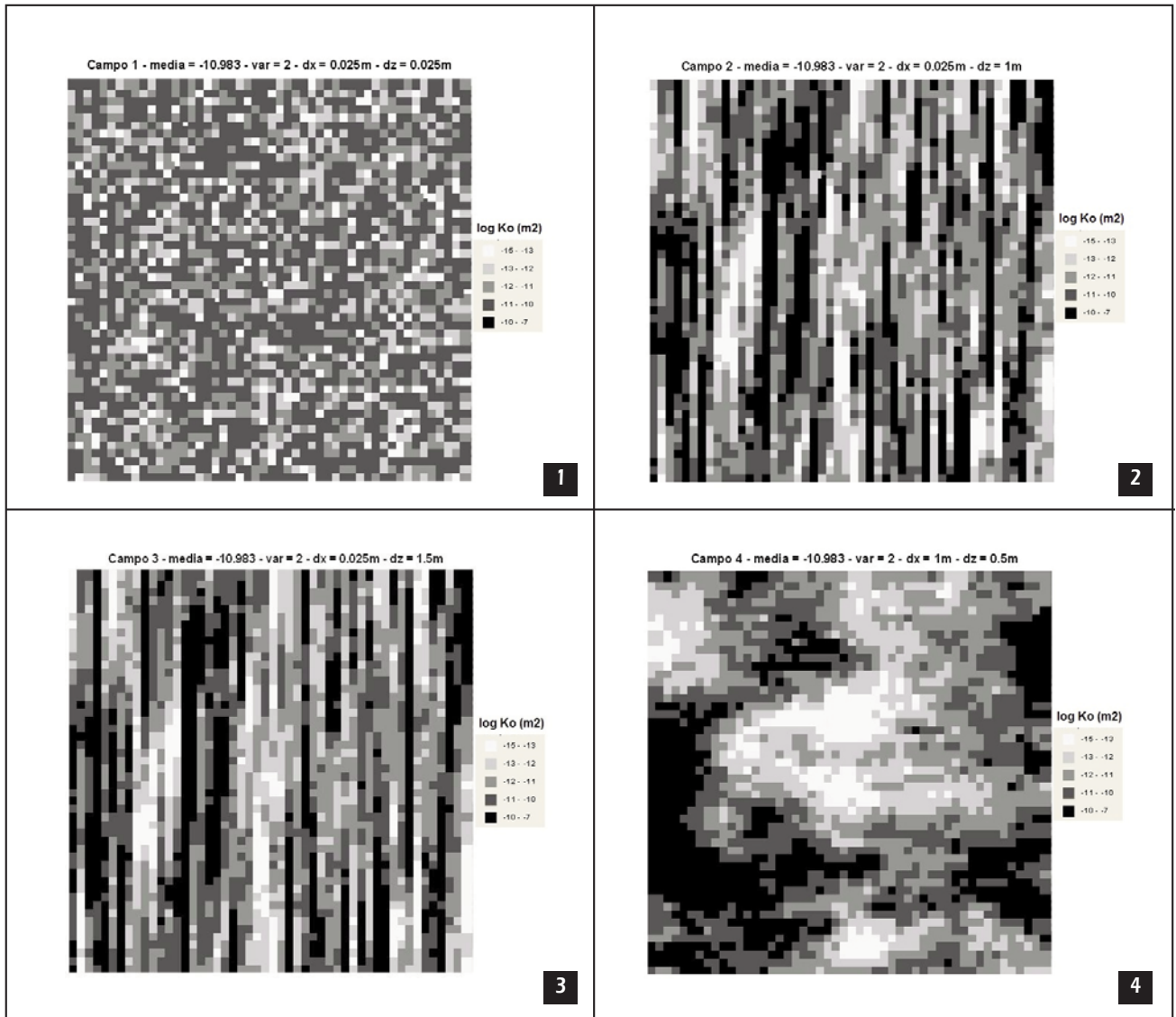


Figura 8. Realizaciones de 4 campos aleatorios de permeabilidades intrínsecas.

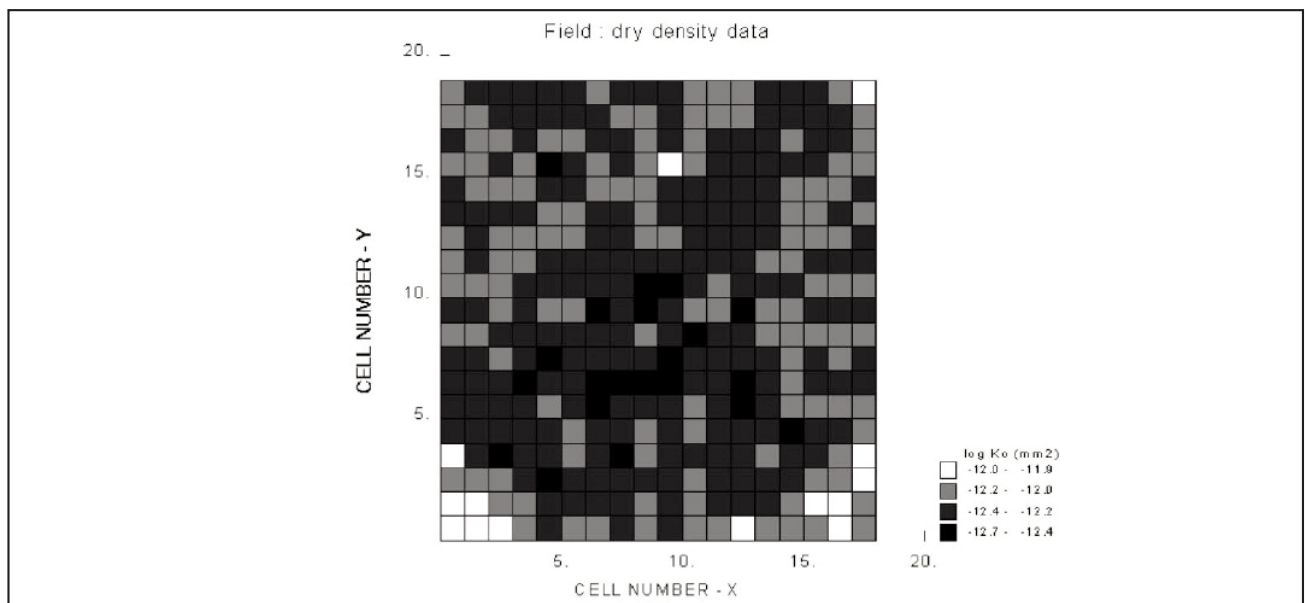


Figura 9. Campo de permeabilidades intrínsecas calculado a partir de datos de densidad seca informados por Conciani et al. (1995).

condiciones saturadas para todos los casos heterogéneos, considerando la región como la probeta de ensayo, modificando el K_0 (para $\phi_0 = 0.38$) hasta conseguir la coincidencia del flujo total a través de la muestra heterogénea con el flujo total correspondiente a la muestra homogénea de referencia. Las permeabilidades intrínsecas promedio obtenidas fueron:

Campo 1: $K_0 = 0.282E-11 \text{ m}^2$,

Campo 2: $K_0 = 0.385E-12 \text{ m}^2$,

Campo 3: $K_0 = 0.140E-12 \text{ m}^2$,

Campo 4: $K_0 = 0.468E-11 \text{ m}^2$

Resultados

El avance del frente de humectación en el interior de la masa de mineral, inicialmente en estado no saturado y con baja

humedad ($w_0 = 3.2\%$, $S_{l0} = 13\%$), producido por el riego con la solución lixivante, puede seguirse en la Figura 10, la cual muestra el grado de saturación calculado en tres instantes de tiempo después que comenzó el riego. La figura permite observar el desarrollo progresivo de flujo preferencial, el cual llega a saturar algunas celdas y deja sin humedecer a otras.

En condiciones de estado estacionario se establecen vías principales de flujo (flujo mayor) en algunas áreas, vías secundarias de flujo (flujo menor) en otras, permaneciendo áreas que no son alcanzadas por el flujo, o en todo caso áreas que apenas llegan a humedecerse. Esto puede observarse en las Figuras 11 y 12, las cuales muestran contornos de velocidad de flujo y vectores de velocidad de flujo en estado estacionario para los cuatro campos heterogéneos.

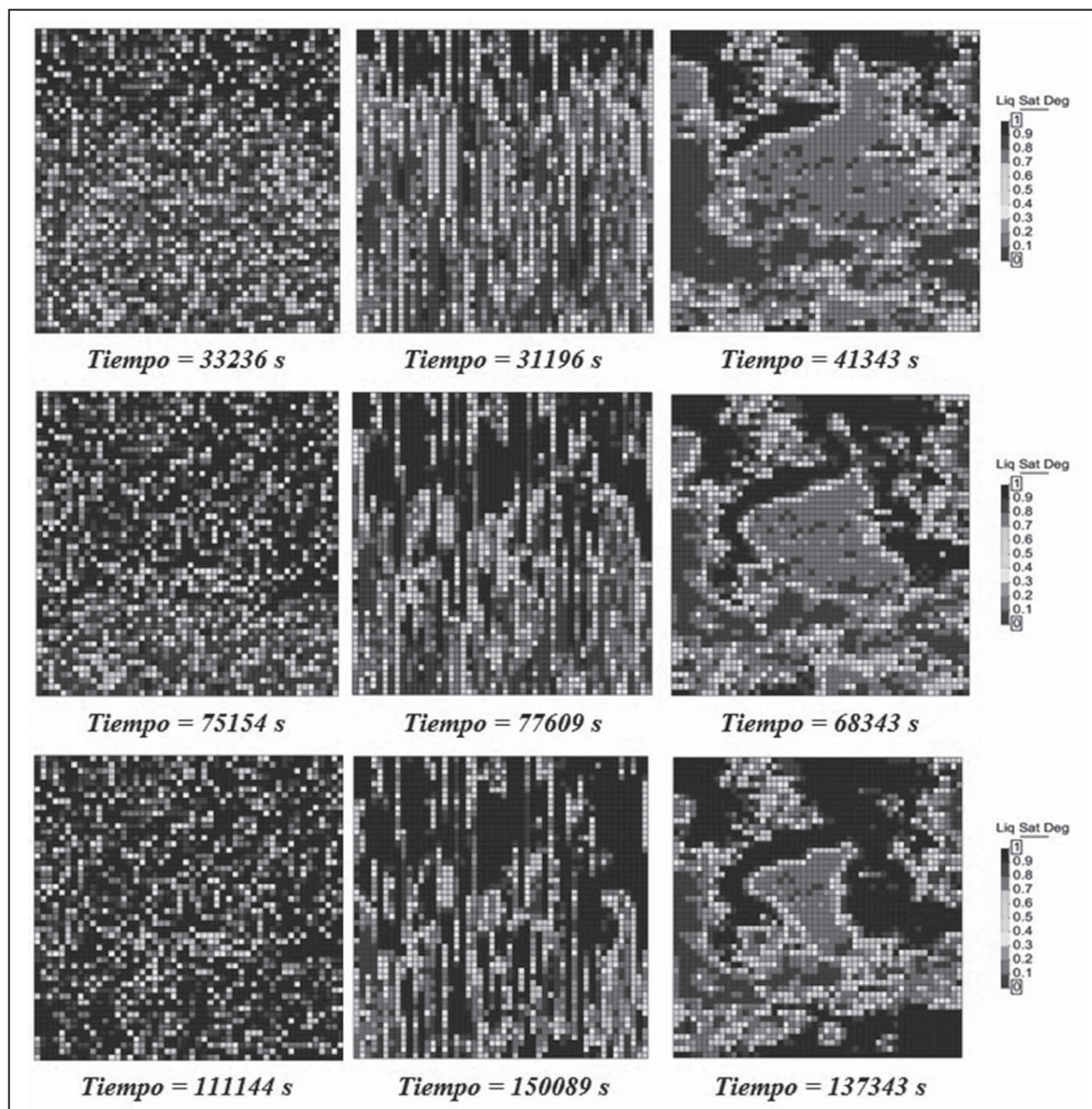


Figura 10. Campos heterogéneos: Campo 1 (izquierda), Campo 2 (centro) y Campo 4 (derecha). Formación de vías preferenciales de flujo. Grado de saturación para tres instantes de tiempo.

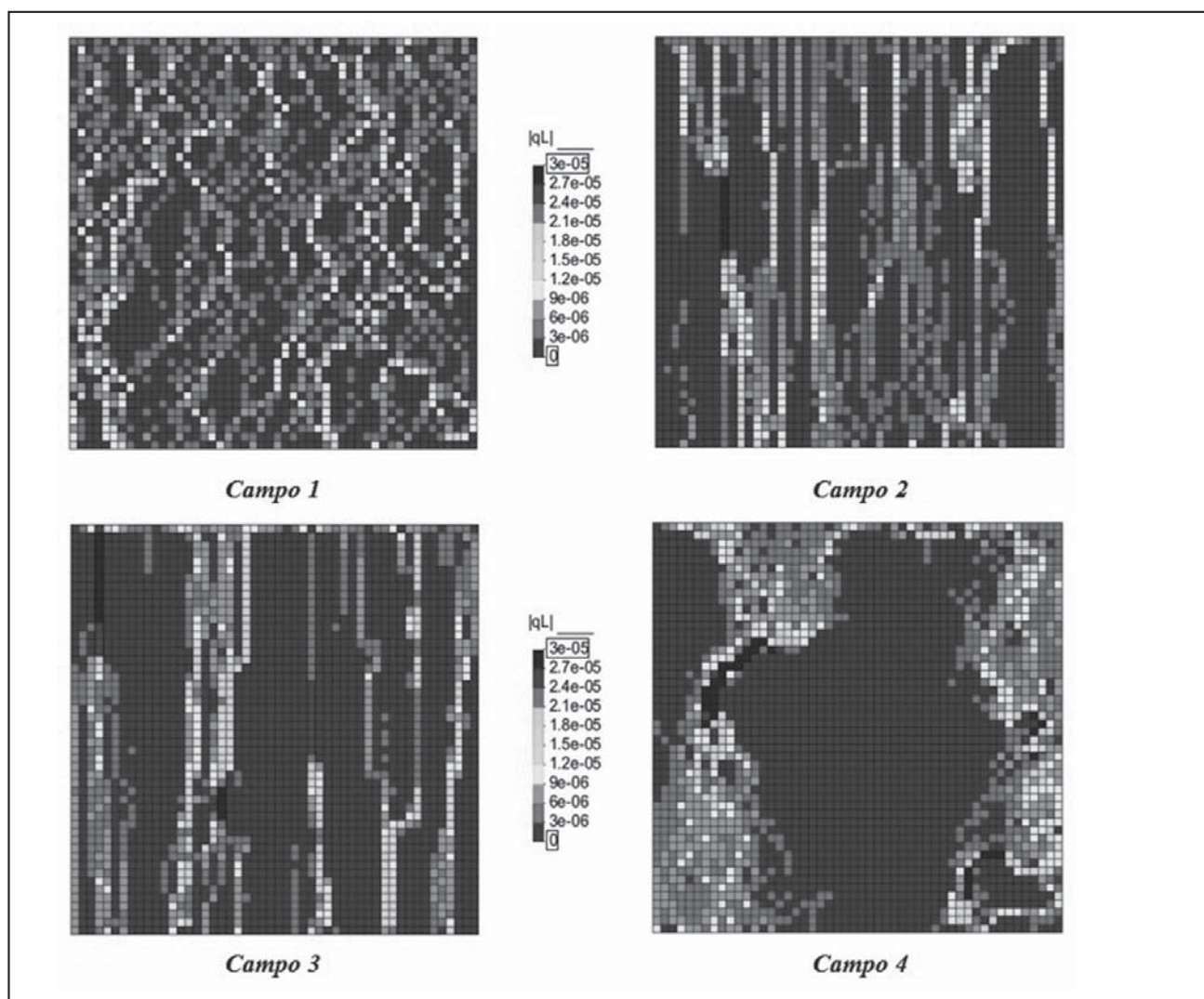


Figura 11. Campos heterogéneos 1, 2, 3 y 4. Formación de vías preferenciales de flujo. Contornos de velocidad de flujo de líquido en estado estacionario.

Las Figuras 13a y 13b muestran la evolución del flujo de solución en algunos nodos de salida para el Caso 1-Campo 1 y Caso 2-Campo 2, respectivamente. Puede observarse que algunos nodos contribuyen significativamente en correspondencia con las vías principales de flujo, otros contribuyen en menor medida (vías secundarias) y hay nodos con flujo escaso o nulo.

En la Figura 14 se muestra la tasa de flujo total de salida, que converge gradualmente hacia la tasa de flujo total de entrada (tasa de riego = $12 \text{ l/h m}^2 = 0.333\text{E-}02 \text{ kg/s m}^2$), para los 5 casos indicados en la Tabla 1. Puede observarse que la introducción de una variación espacial aleatoria de las propiedades hidráulicas resulta en una reducción del tiempo de ruptura (tiempo comprendido desde el inicio del riego hasta la salida de flujo por la superficie de filtración inferior) y en general, en una historia diferente (transitorio) de la tasa de flujo de líquido, con respecto al caso homogéneo de referencia (Caso 0). Ello es consecuencia de la formación de vías preferenciales de flujo.

Los resultados presentados corresponden a una simple realización de los campos aleatorios definidos. El próximo paso debería ser la introducción de los efectos 3D y la ejecución de

una simulación Monte Carlo con el objeto de derivar la estadística de los aspectos significativos del problema.

Discusión

En este trabajo se ha explorado el efecto de la variabilidad del mineral depositado en la pila de lixiviación sobre las condiciones de flujo de líquido en su interior. La descripción precisa de la heterogeneidad del mineral se ha visto obstaculizada por la carencia de datos reales, por lo que se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad. El análisis es obviamente incompleto dado que la cantidad de variables significativas que podrían controlar el proceso es excesivamente grande. Además, el análisis completo desde un punto de vista probabilístico requeriría de un gran esfuerzo computacional.

El énfasis del trabajo ha sido demostrar los efectos de la heterogeneidad del mineral. No se han hecho intentos específicos por reproducir ensayos de recuperación en columnas. Sin embargo, se han derivado propiedades promedio del mineral en base al conocimiento del mineral de la pila de lixiviación de la Mina Gualcamayo. Mayores incertidumbres permanecen en la cuantificación de la variabilidad.

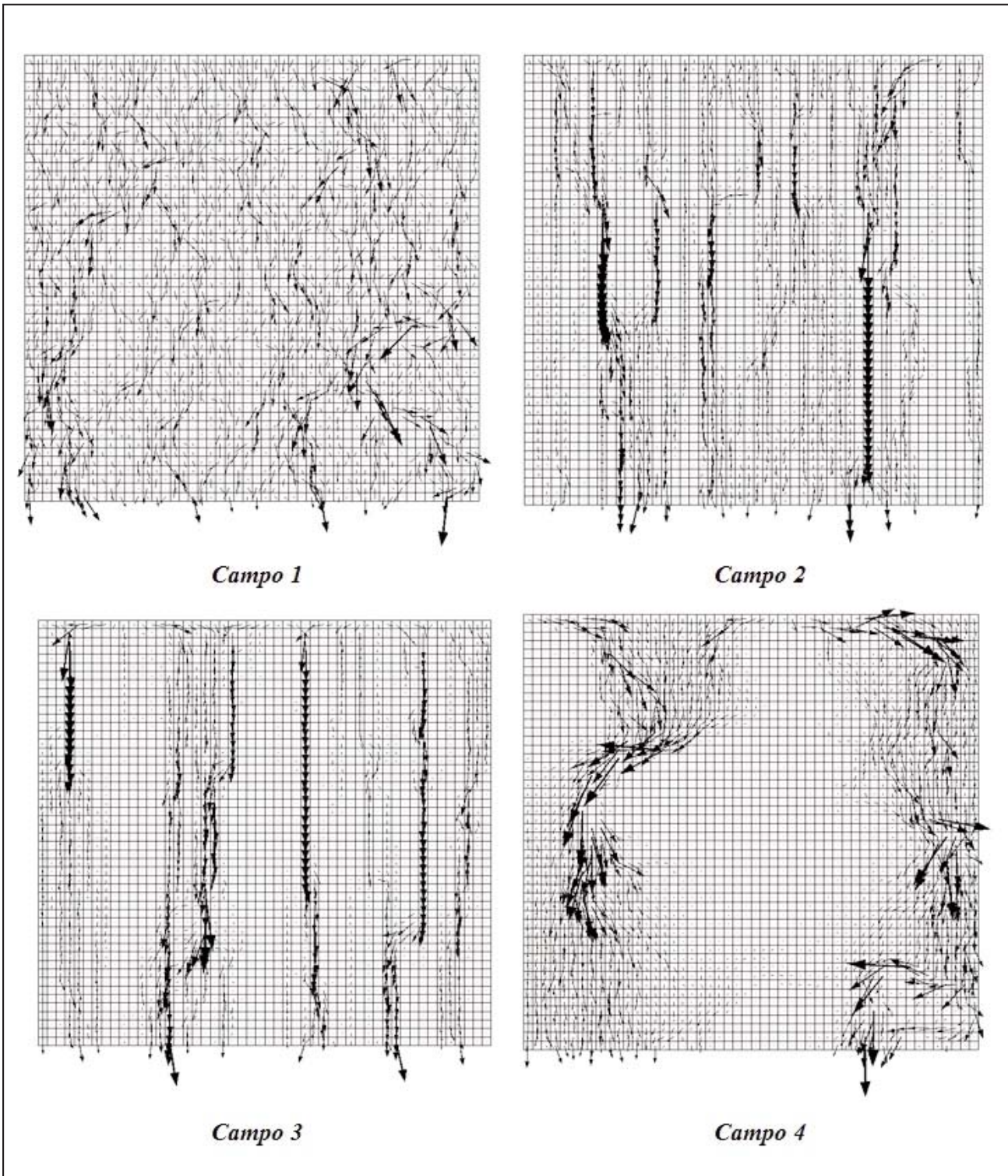


Figura 12. Campos heterogéneos 1, 2, 3 y 4. Formación de vías preferenciales de Flujo. Vectores de velocidad de flujo de líquido en estado estacionario.

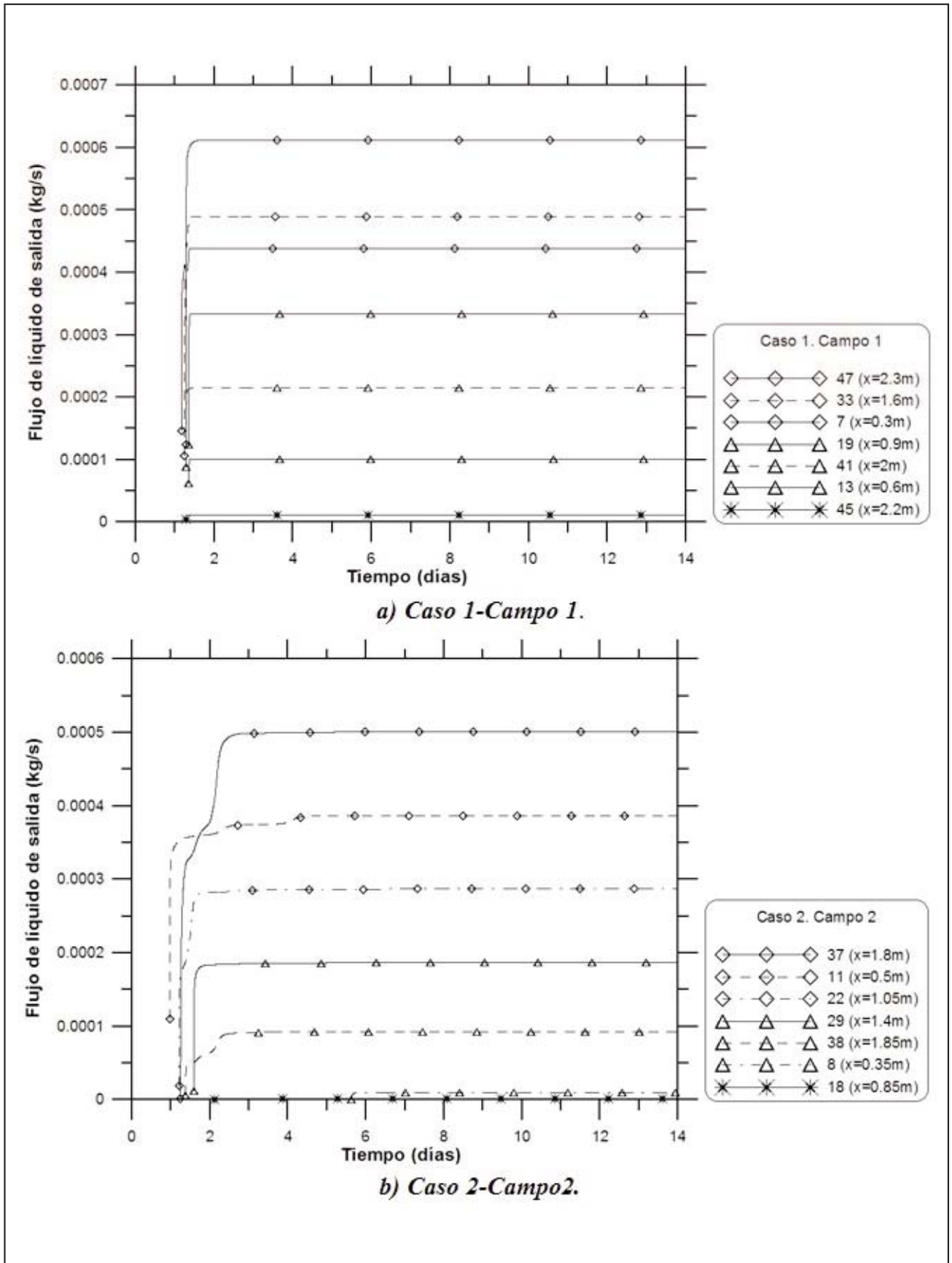


Figura 13. Evolución del flujo de líquido en algunos nodos de salida.

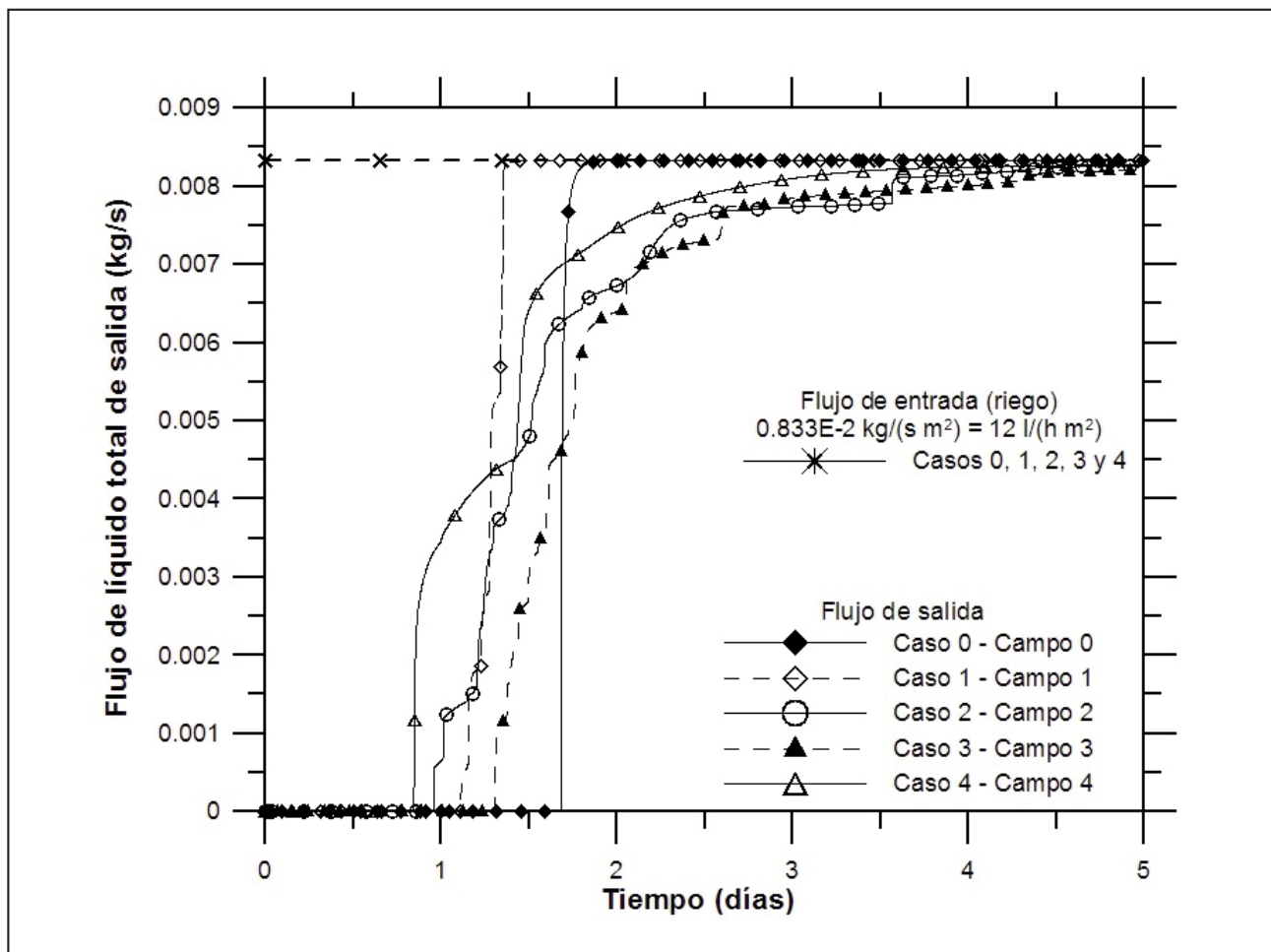


Figura 14. Evolución del flujo de líquido total.

CONCLUSIONES

El análisis realizado ha demostrado un número de aspectos interesantes que conducen a una mejor comprensión del flujo preferencial a través de pilas de lixiviación:

Las fluctuaciones de la estructura espacial de las propiedades hidráulicas del suelo controla las vías de circulación del líquido, la magnitud de los flujos y el tiempo de ruptura.

La consecuencia de la formación de vías preferenciales de flujo es una reducción del tiempo de ruptura y en general, una historia diferente (transitorio) de la tasa de flujo de líquido con respecto al caso homogéneo de referencia.

En condiciones de estado estacionario se establecen vías principales de flujo (flujo mayor) en algunas áreas de la pila, vías secundarias de flujo (flujo menor) en otras, permanecien-

do áreas que no son alcanzadas por el flujo, o en todo caso áreas que apenas llegan a humedecerse.

Desde el punto de vista de operación de la pila las implicancias de los resultados obtenidos son inmediatas. Por un lado establecen la necesidad de revisar los métodos actuales de transporte y vertido del mineral, los cuales favorecen la segregación de partículas, dando como resultado un flujo heterogéneo, que disminuye el rendimiento de la pila. Por otro lado, muestran la potencia del método de análisis utilizado y las posibilidades de su empleo en el diseño de ingeniería de pilas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Investigaciones Mineras, al Departamento de Ingeniería de Minas y al CICITCA de San Juan, el apoyo recibido para la realización de este trabajo.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ALONSO, E., GENS, A. y D.W. HIGH. 1987.
 Special problem soils.
General report. Proc. 9th Europ. Conf. Soil Mech. Fdn. Engng., Dublin, 3, 1087-1146.
- ALONSO, E., GENS A. y A. JOSA. 1990.
 A constitutive model for partially saturated soils.
Geotechnique, 40, 3, 405-430.

- AYLMORE, L.A.G., 1993.
Use of computer assisted tomography in studying water movement around plant roots.
Advances in Agronomy, 49, 1–53.
- AZAM, S., WILSON, G.W., HERASYMUIK G., NICHOL C., AND BARBOUR, S. 2007.
Hydrogeological behaviour of an unsaturated waste rock pile: a case study at the Golden Sunlight Mine, Montana, USA.
Bull Eng Geol Environ, 66:259–268, DOI 10.1007/s10064-006-0077-7, Springer.
- BRUN, P., 1989.
Cinétique d'infiltration au sein d'une conche d'argile compacté.
Etude expérimentale et numérique. These, ENS Mines de Paris.
- CODE-BRIGHT, 2000.
User's Guide Manual. Departamento de Ingeniería del Terreno, E.T.S.
Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- CONCIANI, W., SOARES, M.M. Y CRESTANA, S. 1995.
Geotechnical use of mini tomography. UNSAT'95.
In: Alonso, E.E., Delage, P. (Eds.), Proc. First Int. Conf. On Unsat. Soils. Unsaturated Soils, Vol. 2, Balkema.
- DELAHAYE, C.H. Y E.E. ALONSO. 2002.
Soil heterogeneity and preferential paths for gas migration.
Engineering Geology, 64, 251–271.
- DELAHAYE, C.H. 2010.
Modelación Hidromecánica de pilas de lixiviación de minerales.
Revista de Geología Aplicada a y al Ambiente, 24, 91-107.
- DELAHAYE, C. Y ONORATO, M. (2013).
Caracterización geotécnica e hidrometalúrgica del mineral de la Mina de Gualcamayo.
Informe Técnico Interno. Instituto de Investigaciones Mineras. FI-UNSJ, 48 pp.
- FREDLUND, M.D., WARD WILSON, G. AND FREDLUND, D. 2002.
Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve.
Canadian Geotechnical Journal, Vol. 39: 1103-1117, NRC.
- FREDLUND, D.G. AND XING, A. 1994.
Equations for the soil-water characteristic curve.
Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31: 521-532, NRC.
- GENS, A., 1995.
Constitutive laws. Modern issues in non-saturated soils.
A. Gens, P. Jouanna, B.A. Schrefler Eds. Springer Verlag. Wien. 129-158.
- GID, 2000.
User's Guide Manual.
CIMNE - Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, España.
- GOMEZ-HERNÁNDEZ, J. (1991).
A stochastic approach to the simulation of block conductivity values conditioned upon data measured at a smaller support.
Ph. D. Thesis. Stanford University, CA. Michigan.
- GOMEZ-HERNÁNDEZ, J. AND JOURNEL, A.G. (1993).
Joint sequential simulation of Multigaussian fields.
En Troia '92. Vol. 1, 85-94, Almicar Soares Ed., Kluwer Academic Publishers.
- LLORET, A. Y E. ALONSO. 1985.
State surface for partially saturated soils.
XI Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng., 3, 557-562.
- O'KANE, M; S.L. BARBOUR Y M.D. HAUG. 1999.
A Framework for Improving the Ability to Understand and Predict the Performance of Heap Leach Piles.
Copper 99-Cobre 99, Volume I. S.K. Young, D.B. Dreisinger, R.P. Hackl, and D.G. Dixon, (editors), pág. 409-419.
- O'KANE CONSULTANT INC. 2000.
Demostration of the Application of Unsaturated Zone Hydrology for Heap Leach Optimization.
Industrial Research Assistance Program and O'Kane Consultants Inc.
- OLIVELLA, S., CARRERA, J., GENS, A. Y E. ALONSO. 1994.
Nonisothermal multiphase flow of brine and gas through saline media.
Transport in porous media, 15, 271-293.
- OLIVELLA, S., GENS, A., CARRERA, J Y ALONSO E., 1996.
Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media.
Engineering Computations. 13, 87-112.

RODRÍGUEZ, A. Y MAZUELOS, O., 2012.

Geofísica geotécnica a partir de tomografías eléctricas para la Pila de Lixiviación Sur.
Empresa Minera Yamana Gold Mina Gualcamayo. Informe Técnico - Estudios Geofísicos GEOM. San Juan, Argentina.

VAN GENUCHTEN, M.T. 1980.

A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.
Soil Sci.Soc.Am.J., 44 (5), 892-898.