

# Diseño de sistemas de aireación forzada de pilas de lixiviación considerando las conductividades hidráulica y gaseosa del mineral

Roberto León &, M<sup>a</sup> Eugenia Anabalón  
ARCADIS, Santiago, Región Metropolitana, Chile



## RESUMEN

El diseño de sistemas de aireación forzada de pilas de lixiviación requiere el dimensionamiento de sopladores y de una red de tuberías para permitir la inyección de aire a la tasa que requiere el proceso metalúrgico. Para asegurar la efectividad de la aireación es necesario verificar que la tasa de caudal de diseño pueda fluir a través del mineral sometido a lixiviación.

Se propone un método para determinar el flujo de aire a través del mineral, a partir de las especificaciones del sistema de aireación y las características del mineral. Este procedimiento se basa en el análisis del flujo gaseoso en un medio poroso parcialmente saturado, que requiere el conocimiento de las propiedades hidrodinámicas y neumáticas del mineral de la pila. Se presenta un ejemplo de cálculo real, basado en propiedades determinadas experimentalmente.

## 1 INTRODUCCIÓN

La utilización de sistemas de aireación forzada es una práctica común para la lixiviación de minerales sulfurados de cobre en pilas.

Estos sistemas contemplan una red de tuberías, ubicada sobre la base del pad, que distribuye la inyección de aire mediante una serie de emisores puntuales que generan un flujo de aire desde abajo hacia arriba. La presión neumática se genera mediante sopladores conectados a esta red de cañerías.

Se propone una metodología para incorporar el flujo gaseoso en el diseño de los sistemas de aireación forzada de las pilas de lixiviación, que requiere el conocimiento de las propiedades hidrodinámicas y neumáticas del mineral.

## 2 CONDICIONES DE FLUJO PARCIALMENTE SATURADO EN UNA PILA DE LIXIVIACIÓN

Tanto la conductividad hidráulica como la conductividad gaseosa de los materiales granulares varía en función de su grado de saturación líquida. Mientras la conductividad hidráulica aumenta con la saturación líquida, lo contrario ocurre con la conductividad gaseosa.

Para el caso del diseño de sistemas de aireación en pilas de lixiviación, se requiere conocer la curva de conductividad hidráulica y la curva de conductividad neumática. La curva de conductividad hidráulica permite estimar la saturación líquida de la pila cuando es lixiviada a una tasa de riego dada. En forma complementaria, la curva de conductividad neumática permite conocer la conductividad respecto al aire asociada al grado de saturación líquida de la pila.

En la Figura 1 se esquematiza un perfil idealizado de saturación líquida de una pila de lixiviación constituida por materiales de propiedades homogéneas, irrigada superficialmente y en condición de régimen permanente.

En este perfil se define 3 zonas:

- Zona saturada bajo el nivel freático basal, cuya altura queda determinada por el funcionamiento del sistema de drenaje
- Zona parcialmente saturada, con humedad y conductividad hidráulica constantes. La conductividad hidráulica en este sector es equivalente a la tasa de riego y el nivel de saturación depende de este valor.
- Zona de transición, de saturación variable, que se ubica entre las dos zonas descritas anteriormente.

Normalmente, dadas las características de los materiales gruesos y/o aglomerados que conforman las pilas de lixiviación, la zona de transición resulta despreciable y es válido, para efectos prácticos, asumir que el nivel de saturación líquida de la pila es constante sobre el nivel freático.

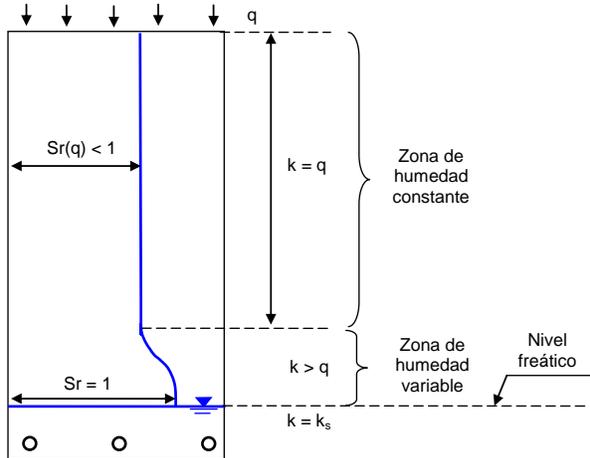


Figura 1 Esquema idealizado de perfil de saturación de una pila de lixiviación irrigada superficialmente, en condición de régimen permanente.  $q$  = tasa de riego.  $S_r$  = saturación.  $k_s$  = conductividad hidráulica saturada.  $k$  = conductividad hidráulica.

### 3 PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS Y NEUMÁTICAS DEL MINERAL

Las propiedades hidrodinámicas y neumáticas de los minerales dependen fundamentalmente de los siguientes factores:

- Granulometría y contenido de arcillas
- Estructura
- Compacidad

Para el proceso de lixiviación en pilas, es común que los minerales sean aglomerados, otorgándoles una estructura muy porosa y compresible. En esta condición, el material mejora su capacidad de percolación líquida y gaseosa, pero también sus propiedades varían en mayor magnitud debido a la densificación y degradación de los glómeros, por efecto de la carga vertical y el riego. En consecuencia, resulta fundamental que los ensayos para determinar la conductividad hidráulica y la conductividad gaseosa cumplan con los siguientes requisitos:

- Las pruebas deben ejecutarse sobre muestras con granulometrías representativas
- Las muestras ensayadas deben aglomerarse de acuerdo a las especificaciones del proceso industrial
- Durante el ensayo, las muestras deben someterse a una carga vertical equivalente a la altura de la pila de lixiviación multiplicada por el peso unitario promedio del mineral

En la Figura 2 y la Figura 3 se presentan curvas de variación de la conductividad hidráulica y de la conductividad neumática de varias muestras de mineral de cobre chancado y aglomerado, en función de su saturación líquida. Estas curvas fueron determinadas experimentalmente mediante ensayos en columnas sometidas a flujo líquido y gaseoso (procedimiento desarrollado por ARCADIS).

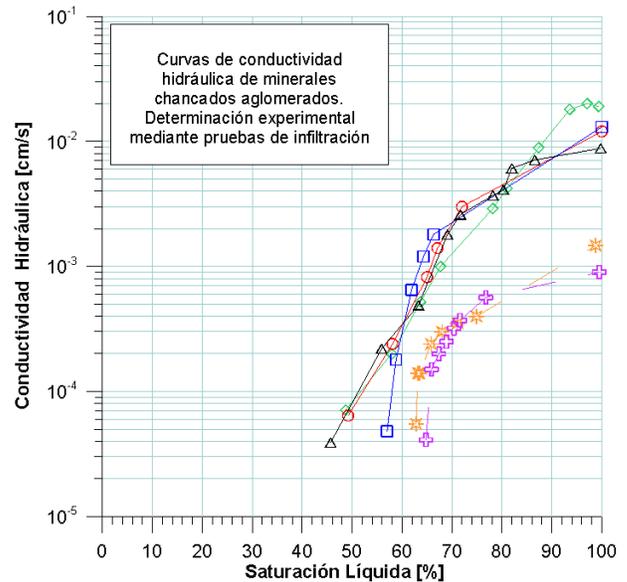


Figura 2 Curvas de variación de la conductividad hidráulica en función de la saturación líquida. Determinación experimental para minerales de cobre chancados y aglomerados.

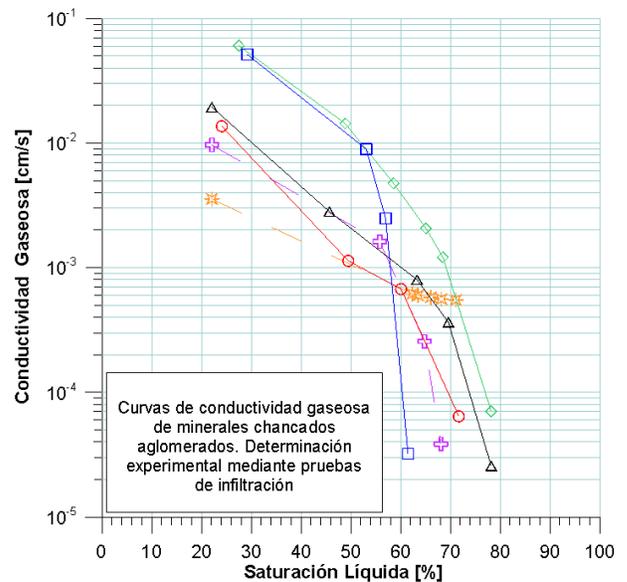


Figura 3 Curvas de variación de la conductividad gaseosa (aire) en función de la saturación líquida. Determinación experimental para minerales de cobre chancados.

#### 4 DISEÑO DEL SISTEMA DE AIREACIÓN FORZADA EN UNA PILA DE LIXIVIACIÓN

##### 4.1 Metodología propuesta

Para el diseño del sistema de aireación forzada de una pila de lixiviación, se debe definir los siguientes parámetros:

- Área de la pila de lixiviación:  $A_p$
- Altura de la pila de lixiviación:  $H$
- Tasa de riego:  $q$
- Caudal de aireación de diseño de la pila:  $Q_a$
- Elevación del sistema de aireación:  $h$
- Presión neumática en los emisores:  $P_a$
- Separación entre tuberías de aireación:  $s$
- Espaciamiento entre emisores de aire:  $e$

Debe conocerse la altura de la pila de lixiviación para definir la geometría del modelo para el análisis de flujo de aire. Este parámetro también es un requerimiento para la estimación de las propiedades del mineral, dado que determina su densificación y degradación de su estructura (obtenidas experimentalmente).

El área y la altura de la pila, la tasa de riego y el caudal de aireación son datos. Estos parámetros están determinados por las características del proceso industrial y requerimientos metalúrgicos.

La elevación del sistema de aireación debe escogerse de modo que se ubique sobre el nivel freático basal, que está determinado según el diseño del sistema de drenaje de la pila.

La presión neumática en los emisores queda definida en función del caudal de diseño de aireación, y las características y cantidad de sopladores.

A continuación se indican las etapas del procedimiento de diseño:

1. Determinación de las propiedades hidrodinámicas y neumáticas del mineral, para las características granulométricas, condiciones de aglomeración y altura de pila considerados.
2. Determinación de la saturación líquida y de la conductividad gaseosa en la pila, en función de las propiedades del mineral y la tasa de riego aplicada.
3. Elaboración de un modelo axisimétrico para el análisis de flujo vertical de aire en la pila. El emisor se considera como un punto de

inyección puntual en la base del eje de simetría del modelo, cuya condición de borde impuesta es la presión neumática de diseño. En la superficie de la pila se impone presión nula.

La altura del modelo corresponde a la altura de la pila menos la elevación del sistema de aireación ( $H-h$ ).

El radio del modelo ( $r$ ) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$r = \sqrt{\frac{s \cdot e}{\pi}}$$

4. Ejecución de una serie de análisis de flujo imponiendo el caudal de diseño en el emisor y variando la conductividad gaseosa del mineral, para determinar la correspondiente variación de la presión de aire en el emisor. En consecuencia, se determina una relación entre la conductividad gaseosa del mineral y la presión de aire requerida en el emisor, para alcanzar el flujo de aire de diseño.

Si la presión de aire requerida en el emisor es igual o inferior a la considerada inicialmente, se verifica el adecuado funcionamiento del sistema. En caso contrario, debe incrementarse la presión de aire de diseño en los emisores (en la medida que sea factible técnicamente según las capacidades de los sopladores) y/o reducir el espaciamiento de los emisores y repetir los pasos 3 y 4 con un modelo axisimétrico de menor radio.

En caso que el mineral presente una conductividad gaseosa reducida, puede requerirse presiones de diseño muy elevadas y/o espaciamientos muy reducidos. En tal situación, debe evaluarse modificaciones al proceso que permitan mejorar la conductividad gaseosa del mineral.

##### 4.2 Ejemplo de aplicación : Verificación del sistema de aireación de una pila de lixiviación existente

A continuación se describe un ejemplo de verificación del diseño de un sistema de aireación forzada en una pila de lixiviación. Los parámetros para el diseño se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 Parámetros para verificación de sistema de aireación real

$A_p$	115500 m <sup>2</sup>
$H$	10 m
$q$	10 l/h-m <sup>2</sup> = 2,77 x 10 <sup>-4</sup> cm/s
$Q_a$	8894 m <sup>3</sup> /h
$h$	1,3 m
$P_a$	6 kPa
$s$	6 m
$e$	6 m

En base a estas propiedades, se elabora el modelo axisimétrico que se presenta en la Figura 4.

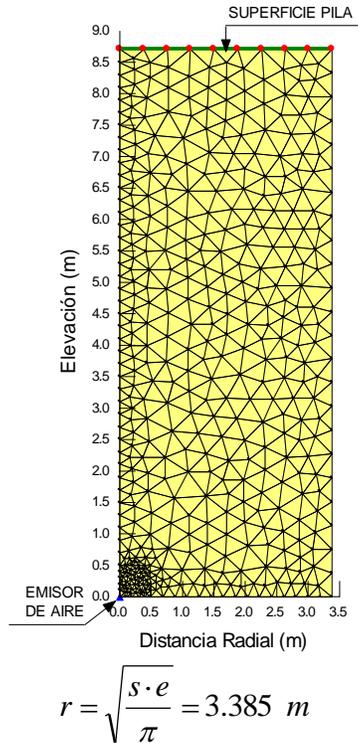


Figura 4 Modelo axisimétrico de elementos finitos para analizar el flujo gaseoso en la pila de lixiviación, elaborado con el programa SEEP. Se imponen como condiciones de borde presión de aire de diseño en el emisor y presión de aire nula en la superficie de la pila.

El caudal de diseño que se impone al emisor ( $q_a$ ) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$q_a = \frac{Q_a}{A_p} \cdot s \cdot e = 2,77 \text{ m}^3/\text{h}$$

Imponiendo el caudal de diseño del emisor para distintos valores de conductividad hidráulica gaseosa, se obtiene la relación con la presión de aire del emisor, que se grafica en la Figura 5. Se concluye que para alcanzar el caudal de diseño aplicando presión neumática de diseño, se requiere que la conductividad gaseosa en la pila sea igual o superior a  $k_a = 10^{-3} \text{ cm/s}$ .

En la Figura 6 se presenta el resultado de la modelación obtenido al considerar una conductividad relativa al aire de  $k_a = 10^{-3} \text{ cm/s}$ . Se observa que la presión de aire generada en el punto de emisión es 6 kPa.

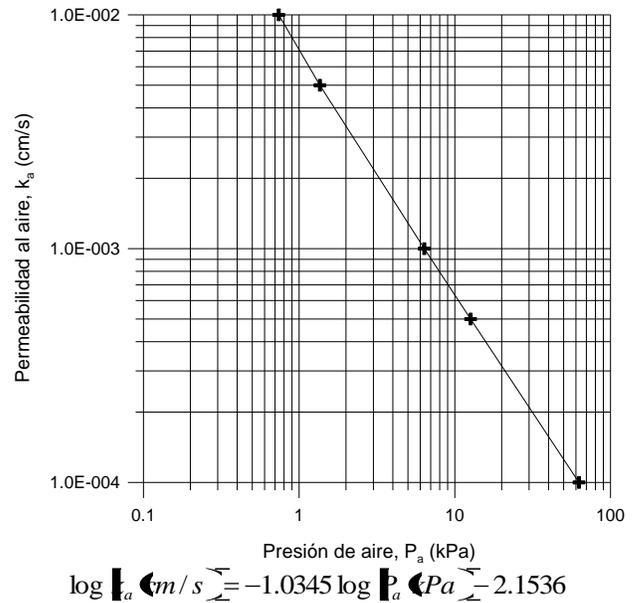


Figura 5 Presión de aire requerida en el emisor en función de la conductividad gaseosa del mineral, para lograr el flujo de diseño. ( $H-h = 8,7 \text{ m}$ .  $r = 3,385 \text{ m}$ )

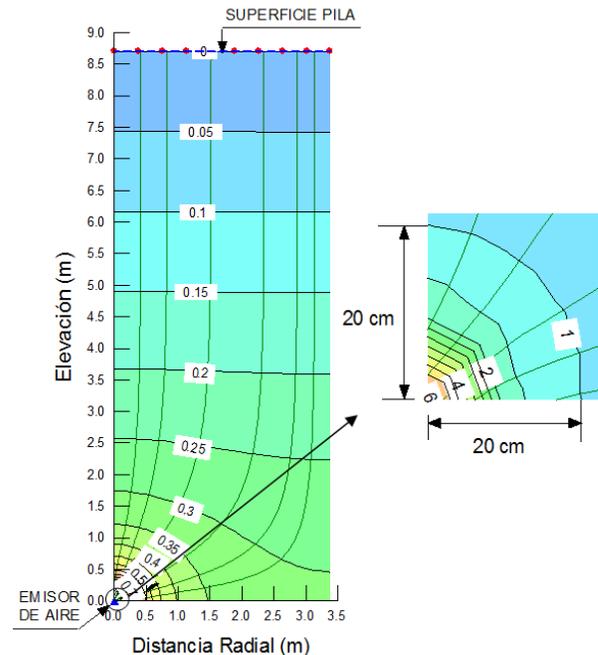


Figura 6 Líneas de flujo y variación de la presión de aire (en kPa), determinadas para el caudal de diseño y una conductividad gaseosa de  $k_a = 10^{-3} \text{ cm/s}$ . La presión neumática requerida en el emisor para lograr esta condición es  $P_a = 6 \text{ kPa}$ .

Finalmente, conociendo la tasa de riego y las propiedades del mineral, se verifica si se alcanza la conductividad respecto al aire requerida para el correcto funcionamiento del sistema de aireación. En la Figura 7 y en la

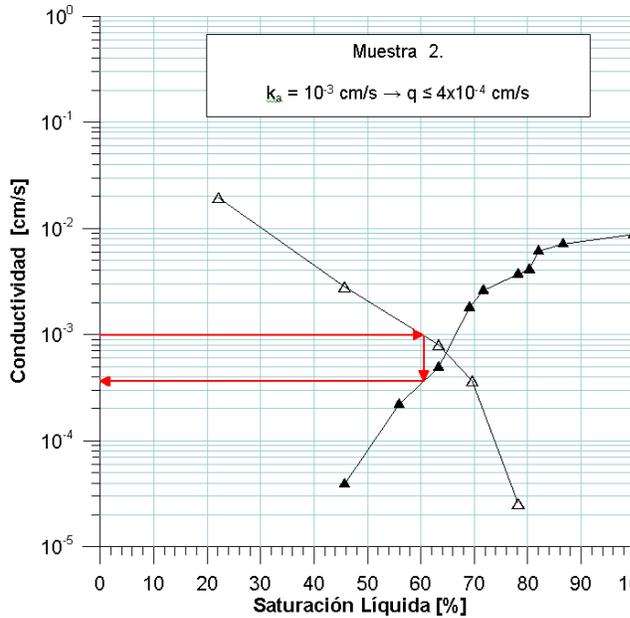


Figura 8 se presentan curvas de conductividad hidráulica y gaseosa de distintas muestras de mineral.

En el caso de la Muestra 1 (Figura 7), para superar la conductividad gaseosa requerida, la saturación líquida debe ser inferior a  $S_r = 52\%$ . Esta condición se asocia a tasas de riego inferiores a  $q = 3,7 \text{ l/h-m}^2$  ( $10^{-4} \text{ cm/s}$ ). Dado que la tasa de irrigación de las pilas es  $q = 10 \text{ l/h-m}^2$ , la conductividad gaseosa es insuficiente para generar el caudal de aire de diseño.

Figura 8), para superar la conductividad gaseosa requerida, la saturación líquida debe ser inferior a  $S_r = 60\%$ . Esta condición se alcanza con tasas de riego de hasta  $q = 15 \text{ l/h-m}^2$  ( $4 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ). Dado que la tasa de irrigación de las pilas es  $q = 10 \text{ l/h-m}^2$ , la conductividad gaseosa permite generar el caudal de aire de diseño.

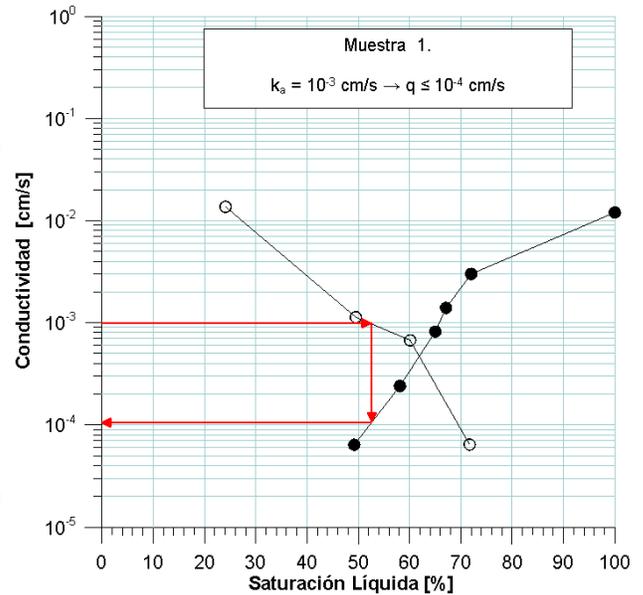
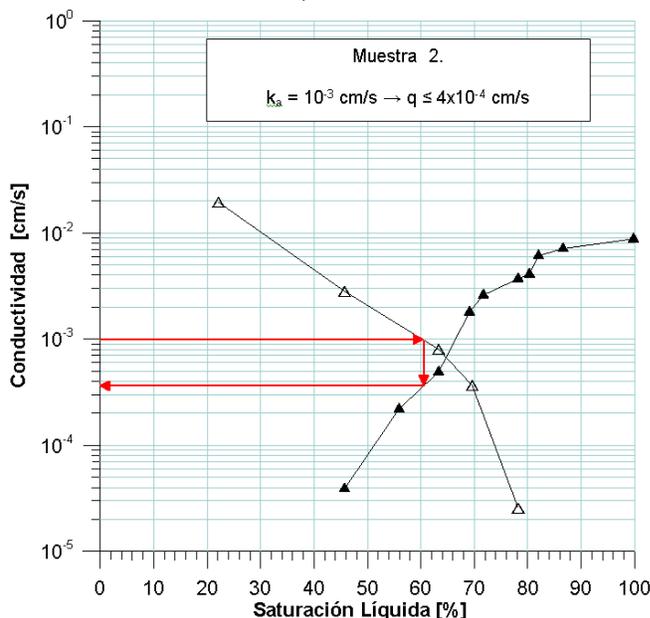


Figura 7 Curvas de conductividad hidráulica y gaseosa de Muestra 1 de mineral chancado aglomerado. Determinación experimental en laboratorio, bajo sobrecarga equivalente a 10 m de altura de material. La conductividad gaseosa de  $k_a = 10^{-3} \text{ cm/s}$  se asocia a tasas de riego inferiores a  $q = 10^{-4} \text{ cm/s}$ .

En el caso de la Muestra 2 (



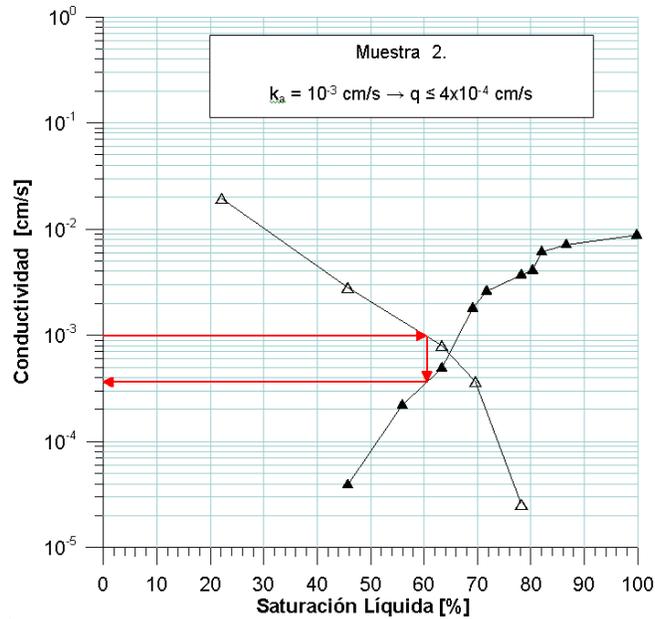


Figura 8 Curvas de conductividad hidráulica y gaseosa de Muestra 2 de mineral chancado y aglomerado. Determinación experimental en laboratorio, bajo sobrecarga equivalente a 10 m de altura de material. La conductividad gaseosa de  $k_a = 10^{-3} \text{ cm/s}$  se asocia a tasas de riego inferiores a  $q = 4 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ .

## CONCLUSIONES

Se propone un método para el diseño de los sistemas de aireación de pilas de lixiviación, que se basa en las especificaciones del sistema de cañerías y sopladores, y la variación de la conductividad hidráulica y gaseosa del mineral.

Las propiedades del mineral deben determinarse experimentalmente a través de ensayos de infiltración líquida y gaseosa, en condición parcialmente saturada y bajo una carga asociada a la altura de pila.

El ejemplo de cálculo presentado permite entender el procedimiento propuesto e identificar cómo inciden y se relacionan las distintas variables del proceso, las propiedades del mineral y las especificaciones de diseño del sistema de aireación.

## REFERENCIAS

Lu, N. & Likos, W. (2004). "Unsaturated Soil Mechanics".

Fredlund, D. & Rahardjo, H. (1993). "Soil Mechanics for Unsaturated Soils".

Krahn, J. (2004). "Seepage Modeling with SEEP/W".

ARCADIS Chile (2008). Estudios de caracterización de minerales.