

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
XI CONGRESO CHILENO

LIXIVIACION ACIDA DE RELAVES: II. EXPERIENCIAS
DE LIXIVIACION EN LABORATORIO

JOSE FRANCISCO MUÑOZ P.¹
PABLO RENGIFO O.²

RESUMEN

Se presentan los resultados de experiencias realizadas en laboratorio para determinar el comportamiento de las reacciones químicas que se producen, entre el ácido y el mineral de cobre, en un proceso de lixiviación ácida en relaves de cobre. Las reacciones químicas analizadas son la neutralización del ácido y la solubilización del cobre.

Se presentan también los resultados de experiencias de lixiviación realizadas en un estanque de laboratorio para dos tipos de flujo: uno unidireccional y otro entre cuatro pozos de inyección y uno central de bombeo.

¹ Ingeniero Civil, Dr. Ing. Profesor Adjunto, Depto. Ing. Hidráulica y Ambiental, Pontificia Univ. Católica de Chile.

² Egresado Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile.

1. INTRODUCCION

El fenómeno de lixiviación ácida de relaves consiste en hacer escurrir una solución ácida (agua más ácido sulfúrico) lo que provoca una disolución de las partículas de mineral de cobre que se encuentran presentes en estado sólido en los granos de relave produciendo sulfato de cobre. El sulfato de cobre a su vez se incorpora al flujo agregando un nuevo soluto a la solución. Se puede considerar entonces, que este proceso se puede modelar como el transporte de dos solutos que viajan en forma simultánea en la solución y que además interactúan entre si y con el medio (relave).

El flujo de la solución ácida a través del relave es afectado por reacciones químicas que se producen entre el ácido y los metales presentes en el mineral de relave, lo que ocasiona un consumo o decaimiento del ácido presente en la solución (neutralización) y una solubilización de los metales contenidos en los granos del relave, los que se incorporan a la solución.

En este trabajo se presentan los resultados de experiencias de laboratorio, realizadas para verificar las hipótesis planteadas en la formulación del modelo (Muñoz et al 1993), referente a la neutralización del ácido y a la solubilización del cobre. Además se presentan los resultados de experiencias de lixiviación en un estanque de laboratorio realizadas con el objeto de validar el modelo matemático propuesto.

2. ECUACIONES GENERALES DEL MODELO MATEMATICO

El modelo matemático propuesto para representar el fenómeno de la lixiviación ácida de cobre en relave (Muñoz et al 1993) está compuesto por las siguientes cuatro ecuaciones:

a) Flujo de la solución ácida en el relave:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \cdot h \cdot \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \cdot h \cdot \frac{\partial h}{\partial y}) = n_a \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + Q_{ext} \quad (1)$$

b) Transporte del ácido en la solución:

$$R_H \cdot \frac{\partial C_H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D_{xx} \cdot \frac{\partial C_H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (D_{xy} \cdot \frac{\partial C_H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_{yx} \cdot \frac{\partial C_H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_{yy} \cdot \frac{\partial C_H}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial x} (V_x \cdot C_H) - \frac{\partial}{\partial y} (V_y \cdot C_H) - \mu \cdot C_H \quad (2)$$

c) Transporte del cobre en la solución:

$$R_{Cu} \cdot \frac{\partial C_{Cu}}{\partial t} - \rho / n_e \cdot K_s \cdot C_H \cdot S_{Cu} = \frac{\partial}{\partial x} (D_{xx} \cdot \frac{\partial C_{Cu}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (D_{xy} \cdot \frac{\partial C_{Cu}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_{yx} \cdot \frac{\partial C_{Cu}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_{yy} \cdot \frac{\partial C_{Cu}}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial x} (V_x \cdot C_{Cu}) - \frac{\partial}{\partial y} (V_y \cdot C_{Cu}) \quad (3)$$

c) Transporte del cobre desde la fase sólida a la solución:

$$\frac{\partial S_{Cu}}{\partial t} = K_d \cdot \frac{\partial C_{Cu}}{\partial t} - K_s \cdot S_{Cu} \cdot C_H \quad (4)$$

donde:

- n_e = porosidad efectiva del relave [L³/L³]
- ρ = densidad del relave [M/L³]
- K_x, K_y = conductividad hidráulica del relave en la dirección x e y [L/T]
- D_{hd} = coeficiente de dispersión hidrodinámica del medio [L²/T]
- h = carga hidráulica [L]
- C_H = concentración de ácido en la solución [M/L³]
- C_{Cu} = concentración de cobre en la solución [M/L³]
- S_{Cu} = concentración de cobre en el relave o matriz sólida [M/M]

- μ = coeficiente de primer orden, que representa el decaimiento o consumo del ácido (neutralización) $[T^{-1}]$
- K_s = constante cinética de segundo orden, que incluye información a nivel microscópico respecto de la partícula de cobre y su reacción con el ácido (solubilización) $[L^3/MT]$
- K_d = constante de equilibrio $[L^3/M]$
- R_H = coeficiente de retardo para el transporte de ácido [adimensional]
- R_{Cu} = coeficiente de retardo para el transporte de cobre [adimensional]
- Q_{ext} = caudal agregado o retirado en forma externa por unidad de área $[L^3/L^2T]$

La neutralización del ácido, es decir, su consumo o decaimiento se considera proporcional a su concentración en la solución y de acción instantánea (reacción entre el ácido sulfúrico y los metales presentes en el mineral de relave). La expresión matemática que representa este decaimiento es:

$$q_c = -n_e \cdot \mu \cdot C_H \quad (5)$$

donde:

q_c = cambio de la concentración de ácido en la fase líquida por unidad de volumen de suelo y por unidad de tiempo $[M/L^3 T]$

La solubilización del cobre, es decir, su paso desde la fase sólida a la fase líquida por efecto de la reacción química con el ácido, se puede modelar mediante una cinética de segundo orden que representa la interacción que se produce entre el agente lixivante (H_2SO_4) y la partícula de mineral. La expresión matemática que representa este fenómeno es:

$$q_s = -K_s \cdot S_{Cu} \cdot C_H \quad (6)$$

donde :

q_s = cambio en la concentración de cobre en la fase sólida por unidad de masa de suelo y por unidad de tiempo $[M/MT]$

La remoción o adsorción del cobre desde la fase líquida a la fase sólida se modela mediante una relación del tipo isoterma de Freundlich de primer orden dada por :

$$S_r = K_d \cdot C_{Cu} \quad (7)$$

donde :

S_r = cantidad de metal por masa de suelo, removido desde la solución e incorporado a la fase sólida [M/M]

3. EXPERIENCIA EN RECIPIENTES PARA ESTUDIAR LA NEUTRALIZACION DEL ACIDO Y LA SOLUBILIZACION DE COBRE

Se realizaron experiencias de lixiviación en recipientes para verificar las hipótesis planteadas en el modelo con respecto a la neutralización del ácido y a la solubilización del cobre y también con el objeto de determinar los coeficientes K_s y μ .

Las experiencias consistieron en llenar recipientes (6 en total) con una porción de relave de peso conocido, a los cuales se les agregó una solución lixivante de volumen y acidez conocida. Posteriormente se agitaron por medio de un mezclador mecánico, tomándose muestras en distintos tiempos, con el fin de determinar la evolución de la acidez y de la concentración de cobre en la solución.

Dos experiencias similares fueron realizadas modificando la acidez inicial de la solución lixivante. El relave utilizado tenía una ley promedio de 0,19%. Se depositó en cada recipiente 150 gr. de relave de mineral de cobre y 300 ml. de solución, con una acidez inicial de 15,3 gr/l y 7,8 gr/l. para las experiencias N°1 y N°2 respectivamente.

La Figs. 1 y 2 presentan los resultados de la experiencia N^o1, para la extracción de cobre y consumo de ácido respectivamente. De igual forma las Figs. 3 y 4 presentan los resultados obtenidos en la experiencia N^o2.

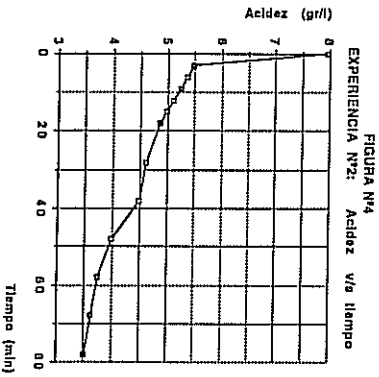
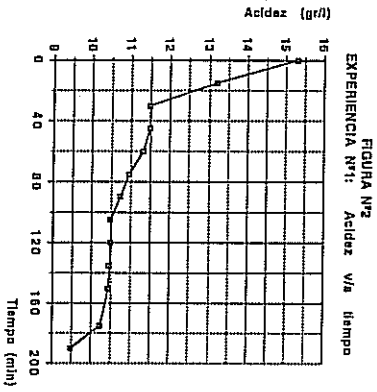
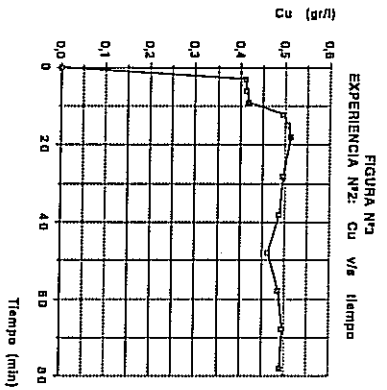
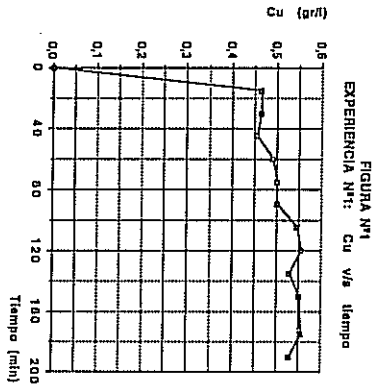
En las experiencias efectuadas se obtuvo una recuperación del 58% y 52% del cobre total, y un consumo de ácido de 40 y 30 gr. de ácido por kg. de relave para las experiencias N^o1 y N^o2 respectivamente. Los resultados obtenidos indican que prácticamente el 100% del cobre soluble se recuperó.

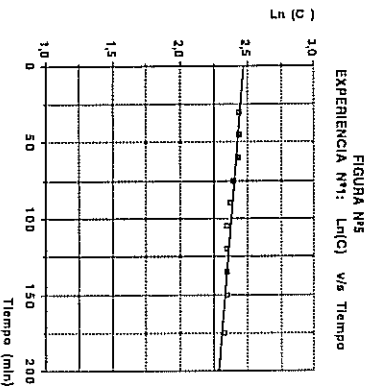
Se pudo observar que la acción (ataque) del ácido sobre el relave es bastante rápida, lo que concuerda con la hipótesis planteada. En efecto, en la experiencia N^o1 dentro de los primeros 15 minutos se extrajo la mayor cantidad de cobre (Fig. 1) y en la experiencia N^o2 dentro de los 5 primeros minutos (Fig 3). Esta diferencia en los tiempos de extracción puede explicarse por la diferencia en la velocidad de agitación empleada para ambas experiencias.

Para determinar el coeficiente de decaimiento μ , propuesto para modelar la neutralización del ácido (ec. 5) se realizó una regresión lineal entre el logaritmo de la concentración del ácido y el tiempo (Fig. 5 y 6), obteniéndose un valor de μ de 0,078 y 0,372 (horas⁻¹) para las experiencias N^o1 y N^o2 respectivamente. Montero y Muñoz (1991) obtuvieron para la misma constante un valor promedio de 0,476.

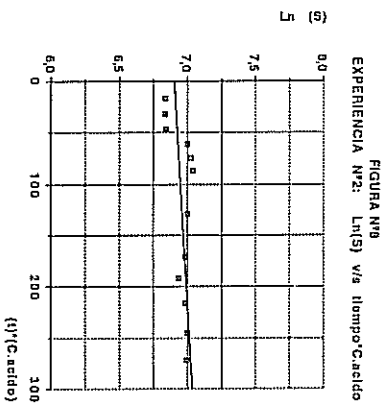
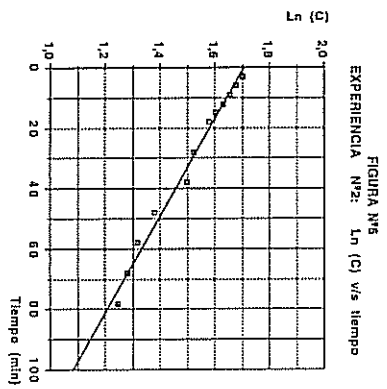
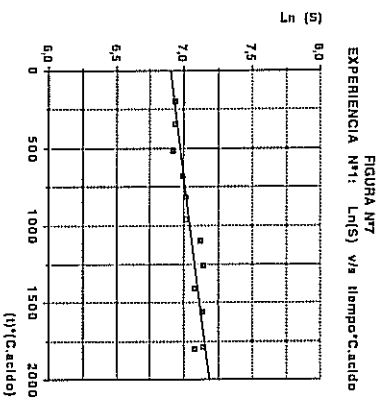
Para determinar la constante cinética K_s , propuesta para modelar la extracción de cobre (ec. 6), se realizó una regresión lineal entre el logaritmo de la concentración del soluto en su fase sólida y el producto de la concentración del ácido y el tiempo (Fig. 7 y 8), obteniéndose un valor de K_s de 8,2E-6 y 2,6E-5 litros de solución por mg. de ácido por hora, para las experiencias N^o1 y N^o2 respectivamente. Estos resultados son de orden de los obtenidos por Montero y Muñoz (1991), que obtuvieron un valor promedio para la misma constante de 1,9E-5.

Al observar los resultados de la experiencia N^o1 (Fig. 1 y 2) se puede verificar que el consumo de ácido continúa después de que se ha extraído el cobre, aunque en menor proporción, fenómeno que también se verifica en la experiencia N^o2 (Fig. 3 y 4).





56



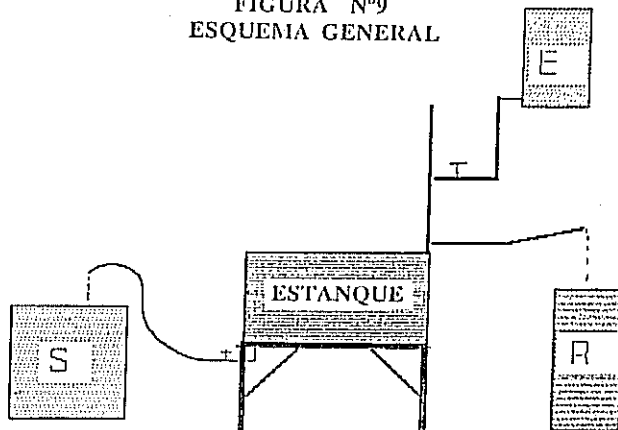
4. EXPERIENCIAS EN ESTANQUES PARA ESTUDIAR LA LIXIVIACION ACIDA EN RELAVES

4.1. Instalación experimental y operación

La instalación experimental utilizada consiste en dos estanques de forma de paralelepípedo de 0.5 m^3 (1 m. x 1 m. de base y 0.5 m. de alto) que fueron llenados con material de relave y en los cuales se instaló una configuración de pozos de inyección y de bombeo, de manera de producir distintos tipos de flujo.

La alimentación (estanque E) se realiza bajo una carga constante impuesta en los pozos de inyección que se logra por medio de un rebalse (estanque R). La Extracción se realiza mediante pozos de bombeo que se simulan manteniendo su nivel en la posición deseada, entregando su caudal al estanque S (Fig. 9).

FIGURA N°9
ESQUEMA GENERAL



El relave utilizado fué seleccionado de manera de conseguir un material homogéneo e isotrópico. El llenado de cada estanque se efectuó depositando el relave previamente licuado por capas y dejando la posibilidad de drenar inferiormente.

Los pozos de inyección y de bombeo se instalaron con tubos de PVC de 50 cm. de largo y de 20 mm. de diámetro, ranurados en los 30 cm. centrales, y envueltos en una malla plástica de 1mm. de abertura. Además cada pozo fué rodeado por un filtro de arena de 1 a 2 cm. de espesor diseñado en función de la granulometría mas fina del relave. Cada estanque fué equipado además con pozos de observación, de los cuales se puede obtener una muestra de 5 ml., y con piezómetros que indican la posición de la napa.

Se realizaron dos experiencias, cada una para una configuración geométrica de los pozos de inyección y de bombeo distinta, las que permitan producir dos tipos de flujo: (i) un flujo unidireccional (Exp.1) entre dos franjas paralelas de altura constante (Fig. 10), y (ii) un flujo convergente (Exp.2) desde cuatro pozos de inyección, ubicados en los vértices de un cuadrado, a un pozo de bombeo ubicado en el centro del cuadrado (Fig. 11).

FIGURA N°10: Exp.1
FLUJO UNIDIRECCIONAL

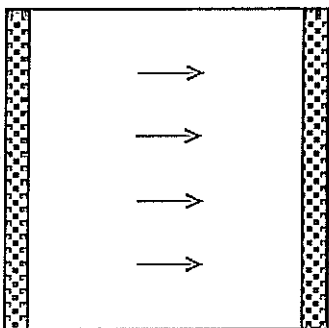
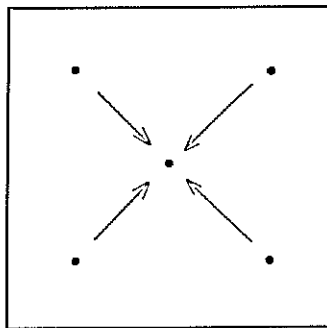


FIGURA N°11: Exp.2
FLUJO CONVERGENTE



Las características hidráulicas, metalúrgicas y las condiciones de operación de ambas experiencias se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1. Características de las experiencias de lixiviación en tranques

	Exp.1	Exp.2
Condición de flujo	unidireccional	convergente
Ley de cobre (%)	0,28	0,28
Peso específico (Ton/M ³)	1,80	1,80
Permeabilidad (cm/hora)	7,95	7,95
Volumen de releave (M ³)	0,40	0,50
Caudal (l/hora)	2,00	1,45
Acidez inicial (gr/l)	20 - 35	20 -35
Duración (días)	50	50
PH salida	0,5 - 1,0	0,5 - 1,0

4.2. Resultados obtenidos

En la Fig. 12 se presenta la evolución de la concentración de cobre a la salida de ambas experiencias. Se observa una clara diferencia entre ambas curvas. Se puede hacer los siguientes comentarios :

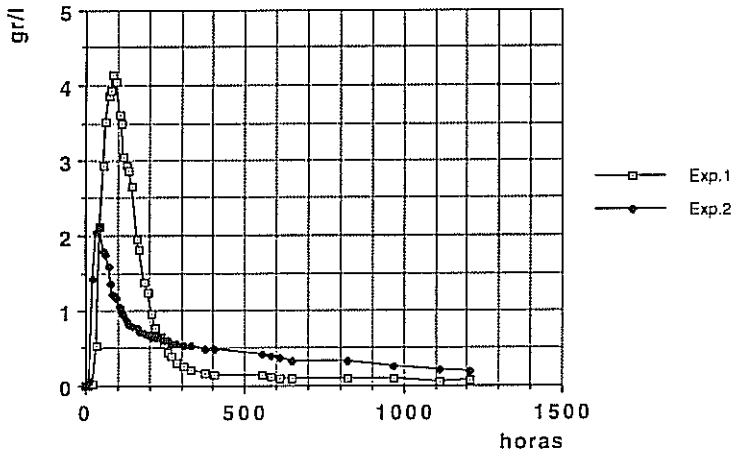
-En la experiencia con flujo unidireccional (Exp. 1) se presenta un máximo considerablemente mayor, cercano al doble del alcanzado en la experiencia con flujo convergente (Exp. 2).

-Por otro lado el tiempo en alcanzar el máximo es mayor en la experiencia 1 (86 horas) que en la experiencia 2 (46 horas).

-El descenso o cola de la curva es más pronunciada en la experiencia unidireccional que la experiencia convergente.

-La recuperación de cobre final obtenida en ambas experiencias, después de 50 días de operación es de 54% para la experiencia N^o1 y del 32% para la experiencia N^o 2, en relación al volumen total de relave depositado en cada estanque.

FIGURA N°12: EXPERIENCIAS DE LIXIVIACION
Concentración de Cobre v/s Tiempo



5. CONCLUSIONES

Las experiencias realizadas en recipientes permitieron verificar la cinética de segundo orden propuesta para modelar la extracción de cobre y la expresión utilizada para modelar la neutralización del ácido

Las experiencias de lixiviación realizadas en estanques entregan resultados satisfactorios desde el punto de vista de la recuperación de cobre y del funcionamiento hidráulico. Constituyen una valiosa información para verificar el modelo matemático que se está implementando para representar el fenómeno de la lixiviación ácida de relaves.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento otorgado por FONDECYT, en el marco del proyecto N° 839/92 y a Codelco Chile División El Teniente Proyecto Hidrometalúrgico.

REFERENCIAS

1. Muñoz J.F. ; Rengifo, P. y R. Carvajal. 1993. Lixiviación ácida de relaves I. Modelo matemático de transporte de dos solutos interactivos. XI Congreso Nacional de Ing. Hidráulica, Concepción, Chile.
2. Montero, J.P. y J.F. Muñoz. 1991. Modelo macroscópico de transporte de soluto para la lixiviación de minerales de cobre en columnas. X Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Valparaíso, Chile.

