

Fig 4 Comparación entre la conductividad hidráulica determinada en terreno y la estimada con la granulometría

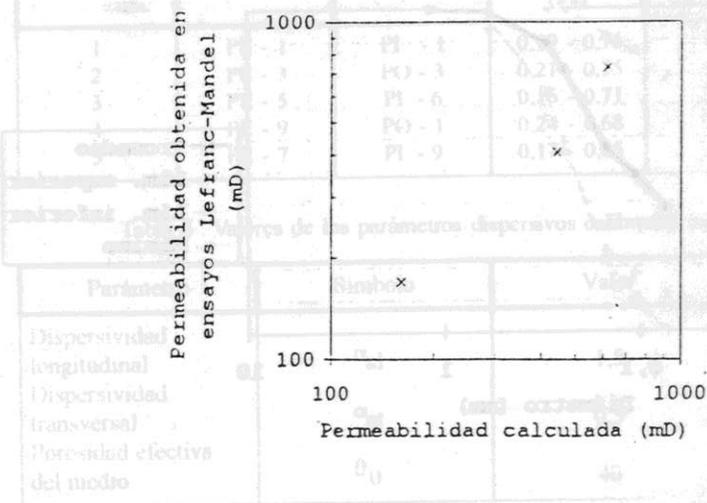
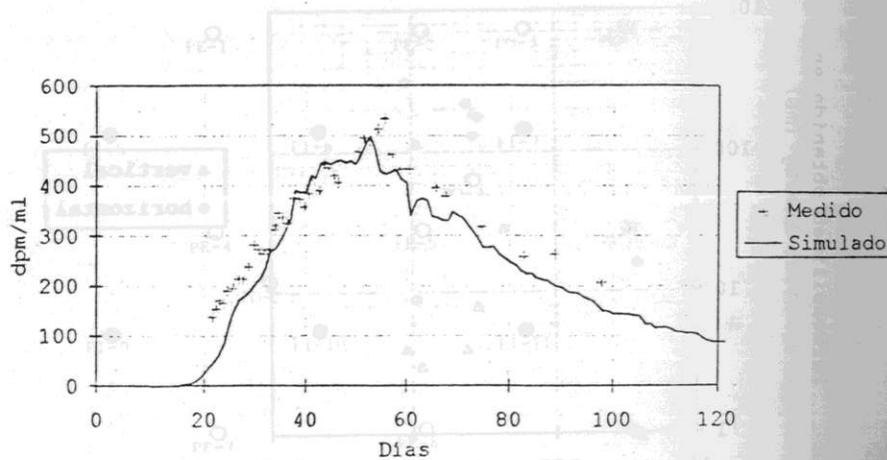


Fig 1 Planta de distribución de los pozos

Fig 5 Concentración de tritio en el pozo PO-4 durante la prueba de trazador



6.5.- LIXIVIACIÓN IN-SITU A ESCALA SEMI-INDUSTRIAL: RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SIMULACIÓN.

PABLO RENGIFO<sup>1</sup>  
 JOSÉ MUÑOZ<sup>2</sup>  
 ALVARO SUAZO<sup>3</sup>

RESUMEN

Se presentan los resultados obtenidos en una prueba de lixiviación in-situ realizada en un campo de relaves mediante una batería de 25 pozos de inyección y bombeo. Se calibra un modelo numérico que permite simular el proceso de extracción de cobre, obteniéndose resultados numéricos comparables a los experimentales. Finalmente, se simulan distintos escenarios de funcionamiento de la prueba para distintos valores de permeabilidad.

<sup>1</sup> Civil, Mag. Cs. Ing., Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile, Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile.  
<sup>2</sup> Civil, Dr. Ing., Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile, Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile.  
<sup>3</sup> Civil, Instructor, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Del Bío-Bío, Av. Collao 1202, Concepción.

## 1.- INTRODUCCIÓN

La lixiviación in-situ de relaves de mineral de cobre via pozos de inyección y extracción de soluciones es una tecnología que ha sido estudiada en los últimos años.

Se ha podido entender y modelar el fenómeno a escala de laboratorio en columnas (Montero et al. 1994) y en estanques (Muñoz et al. 1997(1)), obteniéndose modelos que permiten simular el proceso de extracción de cobre.

Las experiencias de lixiviación realizadas en laboratorio y los resultados de la modelación del fenómeno han permitido concluir que el proceso de lixiviación in-situ es muy dependiente de las propiedades físicas, hidráulicas y dispersivas del medio (relave) y particularmente de la conductividad hidráulica.

El material de relave está compuesto por capas no homogéneas de arena limosa (SM) y limos de baja plasticidad (ML), con humedades que varían entre un 18 y un 50%. Bajo los 28 metros existe un material de relave muy fino (99% bajo malla #200), que para los efectos prácticos se considera impermeable y que por consiguiente no es factible de lixiviar mediante la tecnología utilizada. Además, sobre los 28 metros se intercalan lentes de este mismo material. En estos relaves el cobre se presenta principalmente como calcopirita y covelina. Además, el contenido de cobre total o ley es de 0,25% aproximadamente, gran parte del cual es insoluble.

En este trabajo se señalan los avances logrados en la identificación y comprensión de los mecanismos que intervienen en el fenómeno estudiado, a escala de terreno. Se describe y analiza una experiencia de lixiviación realizada en el tranque Barahona N°2, la que consistió en lixiviar una porción de dicho tranque mediante una batería compuesta por 25 pozos, de los cuales 9 eran de extracción y 16 de inyección.

Además se simula el proceso de extracción utilizando un modelo numérico, obteniéndose resultados satisfactorios y promisorios. Para simular el proceso de extracción se utilizó los parámetros químicos, hidráulicos y dispersivos determinados en base a experiencias de laboratorio y de terreno.

## 2.- METODOLOGÍA Y EQUIPOS

La prueba de lixiviación a escala de terreno se realizó en una configuración de pozos formada por 9 mallas cuadráticas de 20 m de lado (ver figura 1). Cada malla está a su vez compuesta por un pozo de extracción central y por cuatro pozos de inyección, ubicados en los vértices del cuadrado. En total, el sistema de inyección está compuesto por 25 pozos, 16 de inyección (PI) y 9 de extracción (PE). Además se habilitaron 4 pozos de observación (PO) que permitieron monitorear el nivel de la napa y tomar muestras de la solución circulante.

La prueba consistió en inyectar, por los pozos de inyección, un determinado caudal de la solución lixivante con una determinada concentración de ácido y en extraer, por los pozos de extracción, la solución resultante de la lixiviación. El régimen de inyección y de extracción se definió de manera de mantener un equilibrio entre el flujo inyectado y el flujo extraído.

Previo al inicio de la prueba se realizó un precondicionamiento que consistió en inyectar por los pozos de extracción una solución acidulada. El objetivo de realizar el precondicionamiento fue acidificar el medio en las cercanías de los pozos de bombeo, de manera de favorecer el proceso de lixiviación y mantener un pH inicial suficientemente ácido para evitar la precipitación de hierro. El precondicionamiento tuvo una duración de 10 días. Se inyectó un flujo promedio de 0,5 l/s con una concentración de ácido de 120 gr/l.

La prueba de lixiviación propiamente tal se inició a los tres días de haber finalizado el periodo de precondicionamiento y tuvo una duración de 44 días. El caudal de extracción proyectado fue de 0,86 l/s. El inicio de la prueba se realizó en forma gradual, partiendo con un caudal pequeño

umentándolo en forma paulatina, de modo de no imponer velocidades muy altas en forma brusca. La rapidez de la solución lixivante fue de alrededor de 80 gr/l.

Se realizó un seguimiento periódico de las principales variables que gobiernan el proceso. El seguimiento realizado tuvo por objetivo, por una parte controlar el funcionamiento hidráulico del sistema y por otra, el funcionamiento metalúrgico.

El funcionamiento hidráulico de la prueba se controló midiendo el nivel de la napa en los pozos, el caudal inyectado en cada pozo de inyección y el caudal extraído en el pozo de bombeo. El control de niveles y flujos se realizó durante las 24 horas del día, con una frecuencia de una vez por día.

El comportamiento metalúrgico se controló midiendo la concentración de ácido de la solución inyectada y el pH y la concentración de cobre en la solución extraída en los pozos de bombeo y en la mezcla total resultante. La frecuencia de los muestreos y análisis químicos fue de 1 por día.

## RESULTADOS

### 1.- Resultados Hidráulicos

El funcionamiento hidráulico de la prueba no fue el esperado, obteniéndose caudales de extracción muy por debajo a los proyectados (0,1 a 0,15 l/s). Con el fin de intentar mejorar la capacidad de los pozos se modificó las condiciones de operación de la prueba, aumentando los caudales de inyección y disminuyendo los de extracción. La idea de esta acción fue inyectar un caudal superior al extraído, por un lapso de tiempo suficiente que permitiera peraltar el nivel de la napa en los pozos de inyección y en sus cercanías, de modo de disponer de un nivel de energía mayor. Una vez logrado esto, se fue aumentando el caudal de extracción en los pozos tratando de lograr que el sistema opere en una condición de equilibrio (tasa inyección igual a la de extracción). Los resultados de esta operación no entregaron una mejoría significativa en la capacidad de extracción de los pozos de bombeo, ya que sólo se logró un caudal de extracción del orden de 0,1 a 0,25 l/s por pozo, para un caudal de inyección correspondiente a una extracción del orden de 0,5 l/s en condiciones de equilibrio.

En la figura 2 se presenta el flujo total inyectado en los 16 pozos de inyección y el flujo total obtenido en los 9 pozos de extracción. Como se puede observar, los caudales extraídos son inferiores a los inyectados. En total se inyectó, durante 44 días, 13.838 m<sup>3</sup> de solución y se recuperó 6.456 m<sup>3</sup>, es decir, alrededor del 54% del flujo inyectado no se recuperó.

Cabe destacar que se logró operar los pozos en régimen de equilibrio, es decir recuperando un volumen igual al inyectado, para flujos del orden de 0,10 a 0,15 l/s.

### 2.- Resultados Metalúrgicos

En la figura 3 se muestra la concentración de cobre parcial y acumulada de la solución total operada. Se observa en dicha figura que la concentración acumulada alcanza un valor de 600 mg/l al inicio de la prueba, para luego subir rápidamente hasta los 1000 mg/l el día 5, valor que se mantiene en el rango hasta el día 20. Finalmente la concentración acumulada desciende lentamente hasta una valor de 800 mg/l el día 44. Con respecto a la concentración puntual que se obtiene en un pozo, el valor máximo se verifica el día 5 (1350 mg/l) y el mínimo a partir del día 30 (500 mg/l). El caudal obtenido a la salida de los pozos de extracción se mantuvo en el rango de 2,5 l/s.

En base a los valores de concentración de cobre y flujos medidos se estimó la extracción de cobre durante los 44 días de operación, la que alcanzó un valor de 5.160 kg. Considerando el área sujeta a lixiviación corresponde a un paralelepípedo de 3600 m<sup>2</sup> de base y 23 m de

altura, se estimó la recuperación de cobre en un valor de 1,7%. En la figura 4 se presenta la evolución de la extracción de cobre obtenida.

Finalmente en base a la información de ácido inyectado y a la de cobre recuperado se estimó el consumo específico de ácido, es decir, los kilos de ácido utilizados por kilo de cobre extraído, obteniéndose un valor de 197 kg de ácido por kg de Cu extraído.

#### 4.- SIMULACIÓN DE LA PRUEBA

##### 4.1.- Funcionamiento Hidráulico

Con el fin de interpretar el comportamiento hidráulico de la prueba, se modeló el flujo de la solución a través del relave usando un modelo matemático (Modflow), el cual resuelve las ecuaciones diferenciales que describen dicho flujo subterráneo.

El modelo está compuesto por 119 filas y 119 columnas de dimensiones variables entre 0,3 y 6 m y por tres estratos con permeabilidades diferentes. Un primer estrato de 8 m de espesor con una permeabilidad de 1000 mD ( $1,0 \cdot 10^{-3}$  cm/s), un segundo estrato de 7 m de espesor con una permeabilidad de 500 mD ( $0,5 \cdot 10^{-3}$  cm/s) y un tercer estrato de 13 m con una permeabilidad de 200 mD ( $0,2 \cdot 10^{-3}$  cm/s).

La elección de un medio de estas características se fundamenta, por un lado en los valores de permeabilidad obtenidos en los ensayos de terreno y laboratorio (Muñoz et al. 1997(2)), y por otro, en la calibración realizada en base a los valores de flujo y niveles medidos durante la realización de la prueba.

El modelo se validó posteriormente para otras condiciones hidráulicas de operación, verificándose que reproduce satisfactoriamente el comportamiento del sistema (niveles en pozos de inyección y de bombeo).

Los principales resultados obtenidos en esta simulación son los siguientes:

- El caudal máximo factible de extraer de cada pozo es del orden de 0,15 l/s para esta configuración y distancia entre los pozos.
- La velocidad de escurrimiento es muy baja, con valores variables entre los 0,02 m/día a 0,2 m/día, dependiendo de la posición y del estrato en que se calculen.
- Del total del caudal que se extrae en los pozos de extracción, el 10% viaja por el estrato superior, el 50% por el estrato intermedio y el 40% restante por el estrato inferior.
- Si se trata de aumentar la extracción inyectando un flujo superior al correspondiente a una extracción de 0,15 l/s por pozo, el excedente escurre por el estrato superior saliendo del sector de la prueba y no pudiéndose recuperar por los pozos de extracción.

##### 4.2.- Funcionamiento Metalúrgico

Con el objeto de interpretar cabalmente los resultados obtenidos en la prueba de lixiviación a escala de terreno y así poder predecir el comportamiento de la extracción de cobre mediante la lixiviación con ácido sulfúrico, se utilizó el modelo desarrollado por Muñoz et al. (1997(1)). Este modelo considera el fenómeno de transporte de ácido, la extracción de cobre, su incorporación a la solución y el transporte de la solución lixiviada. Permite considerar diversas condiciones de borde e incluir pozos de inyección y de bombeo.

Se consideraron las siguientes características en el modelo:

- Se consideró un medio compuesto por un material homogéneo de 18 metros de espesor con una permeabilidad global de 400 mD ( $0,4 \cdot 10^{-3}$  cm/s).
- Se consideró que la altura inicial de la napa es horizontal y está situada a 4,5 m de

profundidad de la superficie del suelo.

- Se utilizaron los mismos parámetros dispersivos y reactivos que se determinaron mediante ensayos y simulaciones en terreno y en laboratorio (Muñoz et al, 1997 (1) y (2)). En la tabla 1 se presentan dichos valores.

- El medio se discretizó utilizando una malla de 31 filas y 31 columnas compuesta por celdas cuadradas de 1,67 m de lado. Se simuló sólo la malla central del dominio, es decir se consideraron los pozos PI-6, PI-7, PI-10, PI-11 y PE-5.

Considerando que la operación de la prueba incluyó un preacondicionamiento del terreno previo a su inicio, fue necesario incluir dicho efecto en el modelo. El preacondicionamiento tiene inconveniente de realizarse en régimen impermanente, por lo que su modelación introduce un cierto error debido a que el modelo está desarrollado para ser utilizado en régimen permanente.

Para comparar los resultados obtenidos con el modelo y los resultados obtenidos en la prueba, se estimó un valor promedio de la concentración de cobre medida en 9 pozos de extracción durante el periodo de operación normal.

En la figura 5 se presenta una comparación entre los resultados obtenidos con el modelo y un valor promedio de los resultados observados en los pozos de extracción durante la prueba de operación.

#### PREDICCIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE COBRE A NIVEL INDUSTRIAL

Con el objeto de analizar la factibilidad y las proyecciones de la aplicación de la tecnología de lixiviación in situ vía pozos de inyección y de bombeo se aplicó el modelo para simular diferentes escenarios de extracción.

Para definir un escenario o medio representativo de una gran parte del tranque se analizó, se sintetizó y resumió la información sobre las características físicas, hidráulicas y dispersivas del tranque, las cuales permitieron definir tres tipos o clases de medios en el tranque factible de ser estudiados (medio, fino y grueso).

Se simuló estos tres escenarios para una extracción con una malla cuadrática similar a la utilizada en la realizada en el tranque. Para los sectores medio y fino se consideró una distancia entre los pozos de inyección de 20 m, en cambio para el sector grueso se consideró una distancia de 40 m.

Se consideró en los tres casos una acidez de la solución lixivante constante igual a 80 gr/l no se consideró preacondicionamiento. Se consideró además que la fracción lixiviable corresponde al 40% de la ley del mineral y que los parámetros dispersivos y reactivos son similares a los utilizados en la simulación.

En las figuras 6 y 7 se presentan los resultados de la concentración y de extracción de cobre en los tres escenarios.

#### CONCLUSIONES

Desde el punto de vista hidráulico, el funcionamiento de la prueba no fue el esperado. En efecto, los caudales de extracción en los pozos de bombeo fueron del orden de 0,1 a 0,15 l/s, siendo el caudal de extracción proyectado de 0,86 l/s por pozo. De igual forma, la respuesta metalúrgica relativa a la recuperación de cobre fue también muy por debajo de lo planificado.

La principal característica que presenta el relave, y que permite explicar el bajo rendimiento en los pozos, es la existencia de estratos horizontales de materiales de diferentes características físicas y/o granulares. Esto se traduce en la existencia de una variabilidad importante de la permeabilidad en un perfil vertical y por consiguiente se presentan zonas o estratos con mejores

condiciones para el paso de las soluciones lixiviantes través de ellos que otras.

La simulación del proceso de extracción de cobre realizada permitió verificar que el modelo reproduce satisfactoriamente las principales tendencias del proceso de extracción de cobre en el terreno. Esto permitió explicar que los resultados que se obtuvieron durante la ejecución de la prueba, en cuanto a la concentración de cobre, corresponde a lo que el medio efectivamente puede entregar y que la baja recuperación de cobre está relacionada con la baja permeabilidad del mismo.

Es muy importante resaltar el hecho de que esta simulación se realizó con parámetros estimados en forma independiente, ya sea en laboratorio como en terreno, lo que asegura el carácter predictivo del modelo y su utilidad para simular distintos escenarios y condiciones de explotación. En este sentido se puede señalar que el modelo es factible de mejorar si se calibran los parámetros reactivos del mismo, en base a los resultados de experiencias obtenidos en terreno.

La simulación realizada permite comparar los resultados de tres posibles escenarios de extracción de cobre en tres medios con permeabilidades distintas.

Los resultados obtenidos con las simulaciones permiten concluir que a medida que disminuye la permeabilidad del medio disminuye la recuperación de cobre debido fundamentalmente a que disminuye el flujo que es posible extraer de los pozos de bombeo.

En resumen se concluye que la aplicación de esta tecnología en un tranque de relaves, necesita previamente un adecuado conocimiento del medio, que permita conocer con certeza la estratigrafía del tranque, la permeabilidad de cada estrato y su espesor. Con esta información y la aplicación de modelos para predecir el funcionamiento hidráulico del sistema y para predecir la concentración de cobre factible de extraer, es posible evaluar económicamente la conveniencia de explotar el tranque mediante esta tecnología.

#### Agradecimientos

Esta investigación fue financiada parcialmente con el proyecto Fondecyt N° 1960471. Además se contó con la valiosa ayuda del Área Hidrometalúrgica de la División El Teniente de Codelco Chile.

#### REFERENCIAS

- MODFLOW. A modular three dimensional finite difference groundwater flow model. Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey (U.S.G.S.), 1978.
- MONTERO, J.P., MUÑOZ, J.F., ABELIUK, R. Y VAUCLIN, M. A solute transport model for the acid leaching of copper in soil columns. Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 58. 678-686, 1994.
- MUÑOZ, J.F., RENGIFO, P. Y VAUCLIN, M. Acid leaching of cooper in a saturated porous material: Parameter identification and experimental validation of a two dimensional transport model. Aprobado para su publicación, 1997.
- MUÑOZ, J.F., RENGIFO, P. Y SUAZO, A. Caracterización de un tranque de relaves: propiedades físicas, hidráulicas y dispersivas. XIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, 1997.

Tabla 1 Valores de los parámetros utilizados en la modelación.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Parámetros dispersivos			
Dispersividad longitudinal	$\alpha_{al}$	1,5	m
Dispersividad transversal	$\alpha_{at}$	0,5	m
Porosidad efectiva del medio	$\theta_0$	40	%
Parámetros químicos			
Coefficiente de absorción	$K_{kd}$	$8,67 \cdot 10^{-5}$	m <sup>3</sup> /Kg
Coefficiente de extracción	$K_{ke}$	$5,75 \cdot 10^{-3}$	s-1
Coefficiente de decaimiento	$H_{u1}$	$4,02 \cdot 10^{-5}$	s-1
Coefficiente de decaimiento	$H_{u2}$	$2,60 \cdot 10^{-5}$	s-1
Densidad de relave	$\rho_p$	1800	Kg/m <sup>3</sup>
Fracción lixiviable	$\lambda_n$	40	%

Tabla 2 Características de las simulaciones de extracción de cobre.

Sector	Permeabilidad (mD)	Espesor	Flujo Extrac.	Dist pozos
Fino	450	14	0,15	20
Medio	775	18	0,35	20
Grueso	1450	22	1	15

Fig. 1 Planta de distribución de los pozos construidos.

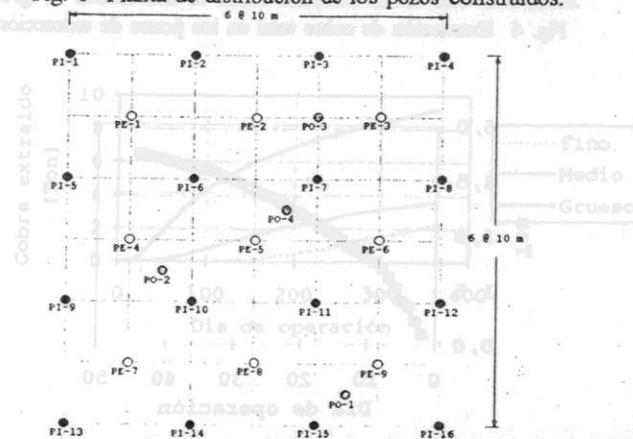


Fig. 2 Caudal total inyectado y extraído.

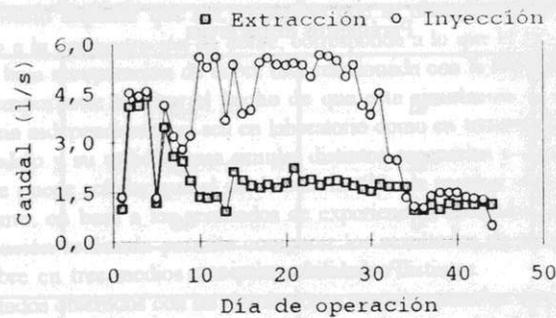


Fig. 3 Concentración de cobre total parcial y acumulada en los pozos de extracción.

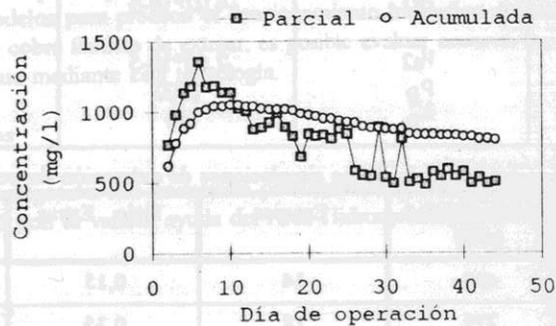


Fig. 4 Extracción de cobre total en los pozos de extracción.

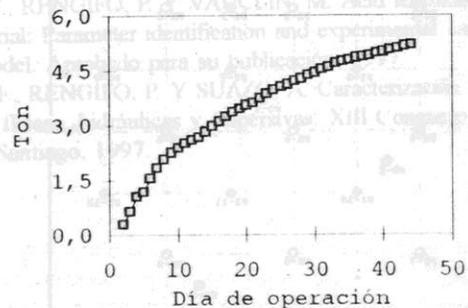


Fig. 5 Comparación entre valores modelados y experimentales de concentración de cobre en la prueba.

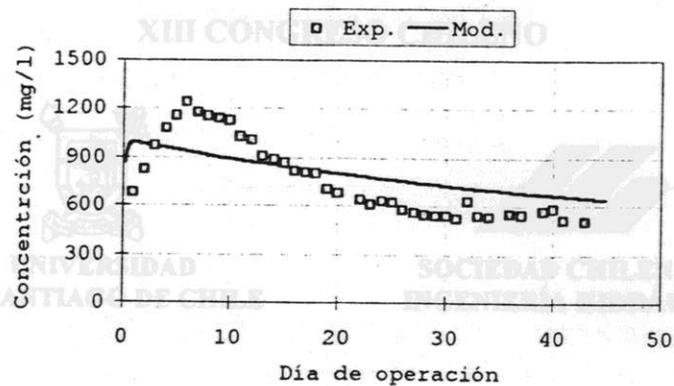


Fig. 6 Simulación de la concentración de cobre en los tres escenarios.

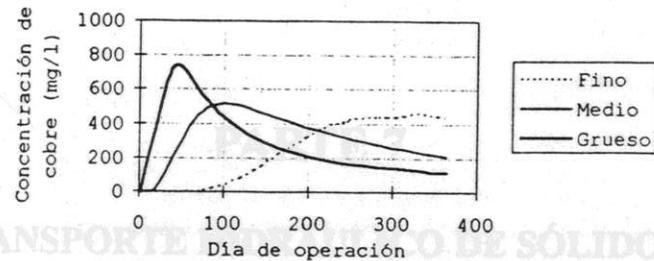


Fig. 7 Extracción de cobre simulada en los tres escenarios.

