

Distribución espacial de la conductividad hidráulica en una pila de lixiviación de minerales

Spatial distribution of hydraulic conductivity in a mineral heap leach

Delahaye Carlos H.¹
Berenguer Tadeo A.¹
Bilbao Alejandra M.¹
Gatica Graciela¹

¹Instituto de Investigaciones Mineras, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, Av. Libertador San Martín 1109 oeste, San Juan, Argentina.

236 delahaye@unsj.edu.ar



RESUMEN

La conductividad hidráulica es una de las propiedades que más influye en el flujo de líquido a través de un medio poroso. En el caso de una pila de lixiviación de minerales, esta propiedad resulta de gran relevancia para determinar la existencia de vías preferenciales de drenaje de la solución lixiviante en el interior de la pila. En este trabajo se aplican técnicas geoestadísticas para determinar la distribución espacial de la conductividad hidráulica en una pila de lixiviación de minerales. El estudio se lleva a cabo con la información puntual proporcionada por perfiles geofísicos realizados en la pila de lixiviación del Proyecto Minero Gualcamayo, ubicado en el departamento Jáchal de la provincia de San Juan. La variable proporcionada por el estudio es la resistividad eléctrica. El análisis estadístico y geoestadístico de esta propiedad permite estimar valores de resistividad eléctrica en unidades volumétricas, así como la varianza del error que da una idea de la precisión y el grado de incertidumbre en la estimación, a partir del análisis y caracterización de los datos. Se obtiene así un modelo matemático de distribución de resistividades a partir del cual se derivan contenidos de humedad, porosidades, grado de saturación y conductividades hidráulicas en el interior de la pila. Los resultados de la modelación permiten identificar sectores de la pila de lixiviación bajo distintas condiciones de riego del mineral, los cuales conducen al desarrollo de flujos de líquido heterogéneos condicionando el rendimiento en la extracción del mineral.

Palabras Clave: lixiviación, pila, permeabilidad, resistividad eléctrica, geoestadística.

ABSTRACT

Hydraulic conductivity is one of the properties that most influences the liquid flow through a porous medium. In the case of a mineral heap, this property is of great relevance to determine the existence of preferential drainage paths of the leaching solution inside the heap. In this work, geostatistical techniques are applied to determine the

spatial distribution of hydraulic conductivity in a mineral leaching heap. The study is carried out with the specific information provided by geophysical profiles carried out in the mineral leaching heap of the Gualcamayo Mining Project, located in the Jáchal department of the San Juan province. The variable provided by the study is electrical resistivity. The statistical and geostatistical analysis of this property allows to estimate values of electrical resistivity in volumetric units, as well as the variance of the error that gives an idea of the precision and the degree of uncertainty in the estimation, from the analysis and characterization of the data. A mathematical model of resistivity distribution is obtained from which moisture contents, porosities, degree of saturation and hydraulic conductivities are estimated inside the heap. The results of the modeling allow to identify areas of the heap under different conditions of mineral irrigation, which lead to the development of heterogeneous liquid flows conditioning the performance in the mineral extraction.

Keywords: leaching, heap, permeability, electric resistivity, geostatistics.

INTRODUCCIÓN

En el proceso de lixiviación en pilas, la mena en bruto proveniente de la mina, o bien fragmentada mediante trituración (y eventualmente molienda), es conducida al área de lixiviación y ubicada en capas, formando grandes pilas, las cuales son regadas superficialmente con soluciones químicas para extraer los minerales valiosos [1].

Durante el apilamiento del mineral es inevitable el desarrollo de capas y regiones en su interior con zonas de material de estructura distinta. Ello es debido al proceso natural de segregación que se produce durante el volcado y acomodamiento del mineral sobre la plataforma de lixiviación. El proceso de aglomeración del mineral reduce significativamente la segregación pero no la evita. Por lo tanto, la conductividad hidráulica del material de la pila resulta en general heterogénea, provocando que el flujo de la solución lixiviante en su interior no sea uniforme y se lleve a cabo a través de vías preferenciales de circula-

ción, dejando áreas de la pila sin lixiviar, lo cual disminuye el rendimiento de la operación, 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. La observación de perfiles de resistividad eléctrica en secciones de una pila de lixiviación sugiere también una estructura heterogénea y flujo concentrado sobre caminos preferenciales [2].

En este trabajo se aplican técnicas geoestadísticas para determinar la distribución espacial de la conductividad hidráulica en una pila de lixiviación de minerales. El estudio se realiza con la información puntual proporcionada por perfiles geofísicos realizados en la pila de lixiviación Norte de la Mina Gualcamayo [3]. La variable proporcionada por el estudio es la resistividad eléctrica. El análisis estadístico y geoestadístico de esta propiedad física permite estimar valores de resistividad eléctrica en unidades volumétricas, así como la varianza del error que da una idea de la precisión, y el grado de incertidumbre en la estimación a partir del análisis y caracterización de los datos. Se obtiene así un modelo matemático de distribución de resistividades específicas a partir del cual se derivan contenidos de humedad, porosidades, grado de saturación y conductividades hidráulicas en el interior de la pila. Los resultados de la modelación permiten zonificar, con un alto grado de seguridad, sectores de la pila de lixiviación bajo distintas condiciones de riego de la solución lixiviante, los cuales conducen al desarrollo de flujos de líquido heterogéneos condicionando el rendimiento de la pila.

ESTIMACIÓN GEOESTADÍSTICA DE RESISTIVIDADES EN EL PERFIL PE5

Los estudios geofísicos realizados en la Pila de Lixiviación Norte abarcaron la totalidad del área de almacenamiento. Se realizaron 7 perfiles de tomografía geoeléctrica y 7 perfiles sísmicos MASW (Análisis Multicanal de Ondas Superficiales) [3]. La Figura 1 muestra la ubicación de los perfiles, la cota nivel y el estado del riego de las celdas.

En este trabajo se ha utilizado la información puntual correspon-

diente al perfil geofísico PE5. La variable proporcionada para el estudio es la resistividad eléctrica. La base de datos del perfil PE5 contiene 448 valores de resistividad, los cuales se distribuyen cada 6 m en horizontal y en 14 capas en profundidad, abarcando una longitud total aproximada de 180 m en superficie y extendiéndose hasta una profundidad de 52 m aproximadamente, siguiendo el perfil de forma trapezoidal invertido típico del ensayo geofísico.

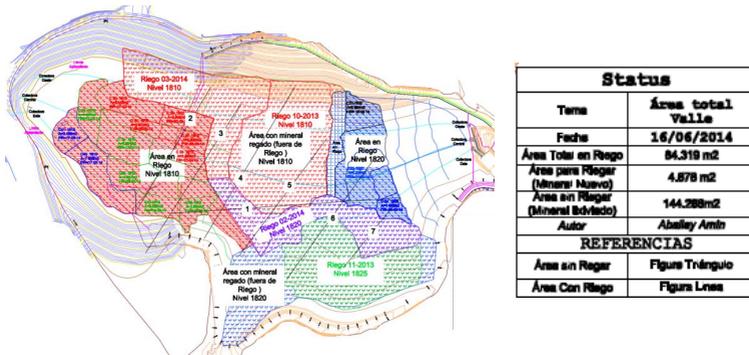


Figura 1. Perfiles geofísicos y MASW. Pila de lixiviación Norte [3].

Análisis exploratorio de datos

En la Figura 2 se muestran los valores de resistividad eléctrica medidos en el perfil PE5. El mapa da una primera idea de la distribución de resistividades en la zona de estudio. Se pueden distinguir sectores con valores de resistividad altos correspondiente a sectores con poco riego y valores bajos correspondiente a sectores con mayor riego. Del análisis del histograma y diagrama de frecuencias acumuladas de los datos de resistividad se puede inferir que valores de resistividad entre 0 y 50 Ohm.m representan el 40% de la población, entre 50 y 100 Ohm.m el 48%, y que el resto ocupa un rango más amplio, entre 100 y 250 Ohm.m.

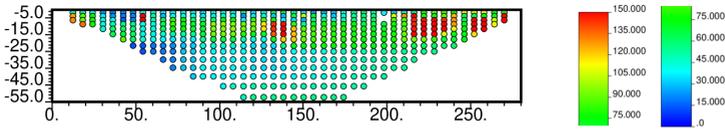


Figura 2. Mapa de ubicación de los datos de resistividad eléctrica medidos en el perfil PE5.

Análisis estructural

Con los datos del perfil PE5 se construyeron semivariogramas experimentales omnidireccional, en dirección horizontal y vertical, observando su comportamiento y la tendencia que muestran. Luego se realizó el ajuste utilizando un modelo teórico de semivariograma tipo esférico omnidireccional y en dirección horizontal y vertical. La Figura 3 muestra los semivariogramas experimentales y los modelo teóricos de ajuste seleccionados para cada caso. El estudio variográfico indica la existencia de una anisotropía geométrica dado que los variogramas presentan aproximadamente la misma meseta (varianza) pero rango distinto. El rango en dirección horizontal resulta mayor que en dirección vertical, indicando una mayor continuidad espacial en horizontal que en vertical, lo que da idea de una estructura heterogénea del material, con una disposición en capas horizontales. El efecto pepita en la dirección horizontal indica una discontinuidad del variograma en el origen. Corresponde a un fenómeno puramente aleatorio, sin correlación entre los datos y puede deberse a errores de medición o a la escala de la misma (la distancia entre electrodos en el ensayo geofísico fue de 6 m). También podría indicar que parte de la estructura espacial se concentra a distancias inferiores a las observadas.

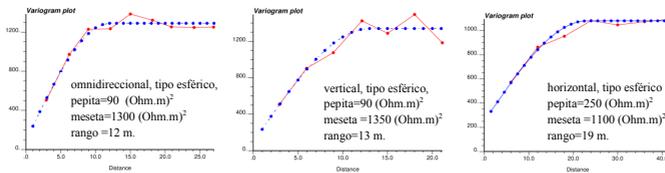


Figura 3. Variograma omnidireccional, vertical y horizontal.

Estimación Kriging

En este trabajo se ha utilizado el método de Kriging ordinario. Este método de estimación se aplicó a la información de los datos de resistividades medidas en el perfil PE5, considerando los parámetros de variabilidad proporcionados por el estudio variográfico (alcances, variabilidades mínima y máxima). De esta forma se obtuvieron valores estimados de resistividad eléctrica en celdas de 2 m x 2 m abarcando toda el área de datos del perfil mencionado. En la Figura 4 se muestra el perfil de resistividades estimadas.

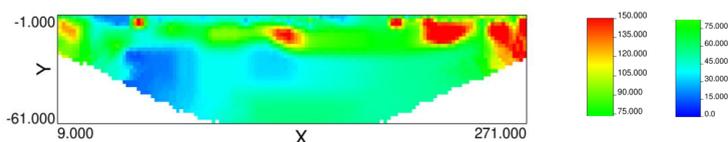


Figura 4. Perfil de resistividades estimadas en celdas de 2 m x 2 m.

En el estudio geofísico realizado en la Pila Norte, Rodríguez y Mazuélos [3] indican que el mineral apilado posee una litología arenosa uniforme en su mayor parte, con una resistividad en estado seco comprendida entre los 100 y 400 Ohm.m. El perfil PE5 representado en la Figura 4 muestra una estructura heterogénea en capas de igual resistividad eléctrica. El riego con la solución lixiviante produce cambios de humedad en el interior de la pila, lo que a su vez provoca cambios en los valores de resistividad del mineral bajo riego.

ESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN EL PERFIL PE5

A partir del modelo de distribución de resistividades eléctricas se ha procedido a estimar la distribución espacial de conductividades hidráulicas en el perfil PE5 de la pila. En este trabajo la estimación de la distribución espacial de conductividades hidráulicas en el medio poroso se ha basado en las leyes de Archie [4], [5] y en los conceptos generales de la mecánica de los suelos no saturados [6], [7], [8].

Caracterización geotécnica del mineral de la pila

Los parámetros de referencia adoptados corresponden a muestras de mineral provenientes de celdas seleccionadas de la pila de lixiviación. Estas muestras fueron utilizadas en los ensayos en columnas de lixiviación realizados en el laboratorio del Instituto de Investigaciones Mineras de la UNSJ. Las propiedades hidráulicas no saturadas se han estimado a partir de ensayos de propiedades índices del mineral utilizado en ensayos en columnas de lixiviación realizados en el laboratorio de la Mina Gualcamayo. Las curvas de retención y de permeabilidad relativa al líquido se han estimado mediante la utilización del modelo de van Genuchten, a partir de la curva granulométrica completa del mineral. La derivación del conjunto completo de parámetros del mineral utilizados en la modelación se describe en detalle en Delahaye y Onorato [9].

Análisis de resultados

Los resultados para el contenido volumétrico de líquido ($\theta_w = \phi S_w$), porosidad (ϕ), grado de saturación (S_w) y permeabilidad saturada ($K_{ws} * 10^3$) se muestran en la Figura 5, respectivamente. Puede observarse que los contenidos de humedad θ_w mayores se corresponden con valores menores de resistividades R_t estimadas con Kriging (Figura 4). La distribución de porosidades muestra que valores mayores de ϕ se corresponden con valores mayores de resistividades R_t estimadas con Kriging. La distribución del grado de saturación S_w muestra correspondencia entre valores mayores de S_w con valores mayores del contenido volumétrico de agua θ_w y a su vez con que valores menores de resistividades R_t estimadas con Kriging. Finalmente, la distribución de la permeabilidad saturada K_{ws} en el perfil PE5 muestra correspondencia directa entre valores K_{ws} con valores de porosidad ϕ y de resistividad R_t , así como correspondencia inversa entre valores de K_{ws} con valores de bajos de θ_w y S_w .

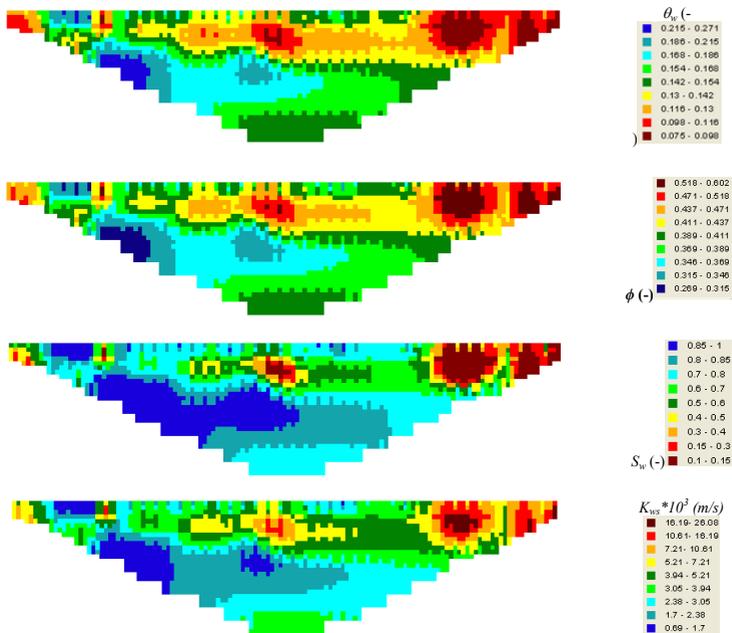


Figura 5. Distribución del contenido volumétrico de líquido, porosidad, grado de saturación y conductividad hidráulica saturada en el perfil PE5.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran sectores con diferentes condiciones de riego en la pila con un grado de seguridad muy alto. Los mapas resultantes dan una idea de la distribución de los valores del contenido volumétrico de líquido, porosidad, grado de saturación y de la conductividad hidráulica en la zona de estudio. La obtención de la distribución de conductividades hidráulicas en el perfil PE5, derivada a partir del modelo de resistividades obtenido aplicando el método geoestático, las leyes de Archie y conceptos de la mecánica de los suelos no saturados, conduce a una mejor comprensión cuando se analiza el flujo de líquido a través de vías preferenciales en el interior de la pila de Gualcamayo. Extendiendo el estudio a los otros perfiles geofísicos es posible abarcar todo el volumen de la pila. Así se pueden distinguir

sectores con valores de resistividad altos correspondiente a sectores con poco o riego nulo, y sectores con valores de resistividad bajos correspondiente a sectores con mayor riego. Los sectores de la pila bajo diferentes condiciones de riego del mineral pueden conducir al desarrollo de flujos de líquido heterogéneos condicionando el rendimiento en la extracción del metal precioso. Las fluctuaciones de la estructura espacial de la permeabilidad del mineral controla las vías de circulación del líquido y la magnitud de los flujos.

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 estudio del rendimiento de la operación en pilas de lixiviación.

REFERENCIAS

1. R.S. Thiel y M.E. Smith. “State of the practice review of heap leach pad design issues”. Proc. GRI-18. Las Vegas, Nevada, USA. 22, 555-568. 2003.
 2. C.H. Delahaye, T.A. Berenguer, G. Gatica, M.A. Bilbao. “Efecto de la permeabilidad del mineral sobre las condiciones de flujo no saturado en pilas de lixiviación”. Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. XXIII CAMSIG, Santa Fe, Argentina. 504-521. 2016.
 3. A. Rodríguez y O. Mazuelos. “Geofísica Geotécnica a partir de tomografías eléctricas y MASW para la Pila de lixiviación Norte. Mina Gualcamayo, San Juan, Argentina”. Informe Técnico - GEOAR - GEOM. 2015.
 4. G.E. Archie. “The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics”. Petroleum Technology, 1442, 8–13. 1942.
- M.A. Khalil y F. A. Monterio Santos. “Influence of Degree of Saturation in the Electric Resistivity–Hydraulic Conductivity Relationship. [Developments. Hydraulic Conductivity](#)”

[Research](#). ISBN 978-953-307-470-2, www.intechopen.com. 2009.

5. D. G. Fredlund y Dr. H. Rahardjo. "Soil Mechanics for Unsaturated Soils". John Wiley & Sons, Inc. 1993.
6. G. Torres Hernández. "Estimating the Soil-Water Characteristic Curve Using Grain Size Analysis and Plasticity Index". Thesis. Arizona State University. 2011.
7. D.G. Fredlund y A. Xing. "Equations for the soil-water characteristic curve". Canadian Geotechnical Journal, 31: 521-532, NRC. 1994.
8. C.H. Delahaye y M. Onorato. "Caracterización geotécnica e hidrometalúrgica del mineral de la Mina de Gualcamayo". Informe Técnico Interno. Instituto de Investigaciones Mineras. FI-UNSJ. 48. 2013.