

Modelamiento de bloques de un yacimiento cuprífero para la selección de zonas de interés potencialmente explotables.

Karla Tituana-Baren, Juan Pindo-Macas.

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL

Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador
ktituana@espol.edu.ec, jpindo@espol.edu.ec

Resumen— Uno de los grandes retos en la minería consiste en estimar con gran precisión las reservas minerales de un depósito tanto en cantidad como en calidad. Por tanto, es necesario contar con el modelamiento del depósito y la simulación del diseño de explotación, ya sea a nivel superficial o subterráneo, antes de realizar las inversiones para las diferentes fases de desarrollo. Los objetivos corresponden a determinar zonas que contengan minerales cupríferos de alta ley y realizar la estimación y cubicación de las reservas geológicas del depósito que constituyen un paso indispensable para la toma de decisiones en cuanto a la explotación minera. A través del modelamiento geológico de leyes, factores geométricos y la discretización del depósito en bloques con una ley estimada, es posible seleccionar el método más adecuado para la extracción del mineral. La información de las muestras obtenidas en una campaña de muestreo permiten realizar un modelamiento de leyes, discretizar el depósito en bloques de determinados tamaños y mediante la técnica geoestadística estimar las leyes de cada elemento.

Palabras clave— recurso mineral; modelo geológico; yacimiento; minería; geoestadística.

Abstract— One of the biggest challenges in mining is to estimate, with sufficient accuracy the mineral resources in a deposit either in quantity and quality. To achieve this, it is necessary to count on a reliable deposit model and an exploitation design simulation, either at superficial or subterranean levels. This should be contemplated before making the investments on development phases. The goals are to determine areas that contain high grade distribution; and the estimation of geological reserves of the deposit in study, in order to make decisions about mining. Through grade orebody modeling, geometric factors and the discretization of deposit blocks with a grade estimated, it is possible to select the most suitable method for mineral extraction. The information from samples assisted on the delineation of orebody, discretize the deposit blocks of certain sizes, and estimate the grades of each item by geostatistical technique

Keywords – mineral resources; geological model; deposit; mining; geostatistics.

I. INTRODUCCION

En toda actividad minera, uno de los primeros pasos a realizar consiste en la cuantificación de los recursos minerales

y la estimación de los valores de concentración del mineral de interés (Howard L. Hartman, 2002) (Gongwen Wang, 2012).

En base a las estimaciones, las características del depósito y los factores geométricos, técnicos, operativos y económicos es posible determinar zonas cuyo contenido en el mineral de interés es considerable (Liang-feng ZHU, 2006).

El empleo de los modelos y las simulaciones mejoran la interpretación que se tiene del depósito para delimitar las zonas de interés minero y escoger el sistema de explotación más adecuado (Mory, 2004). Además permite la optimización de procesos respecto al tratamiento de la mena, al consumo energético y a la planificación de actividades mineras a corto, mediano y largo plazo (Kaufmann, 2008).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto fue dividido en tres fases (Fig. 1).

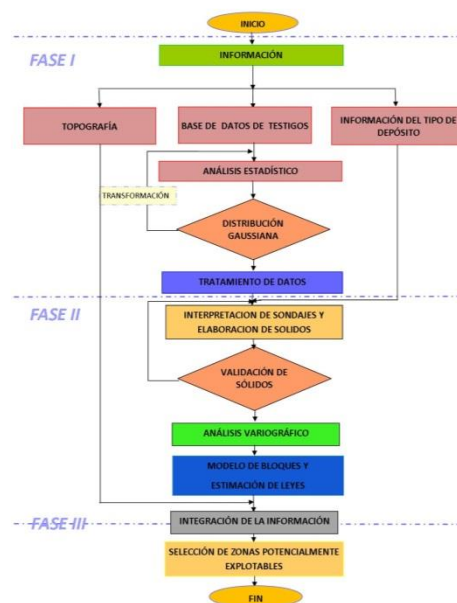


Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología utilizada

La primera fase comprende el análisis exploratorio y el tratamiento estadístico de los datos con la finalidad de obtener una distribución gaussiana y de esta manera continuar con los análisis necesarios para aplicar técnicas geoestadísticas.

La segunda fase corresponde a la composición de sondajes y la elaboración de varias secciones que permitan crear sólidos que representen las zonas con leyes bajas, medias y altas del yacimiento. Dichas secciones deben ser construidas considerando además la información del tipo de depósito que se estudia. (U.S. Geological Survey, 2014). Se realiza también un análisis variográfico de los datos, la construcción del modelo de bloques, la estimación de leyes mediante la técnica del kriging y la construcción de las curvas tonelaje vs ley para el depósito discretizado. A partir de la información generada es posible realizar un ajuste a los sólidos.

La tercera y última fase concierne la integración de la topografía de la zona, el modelo de leyes ajustado y el modelo de bloques, en un mismo entorno; mediante la observación y manipulación del software es posible seleccionar zonas que sean potencialmente explotables.

A. Estudio exploratorio de datos y creación de cuerpos sólidos

La información de los análisis químicos y geológicos de los sondajes realizados en la zona de estudio, son sometidos a un análisis estadístico a fin de determinar la distribución de sus datos y realizar las transformaciones necesarias para obtener una distribución normal en caso de ser diferente. Se aplicó una transformación logarítmica para obtener la distribución gaussiana. (Fig.2)

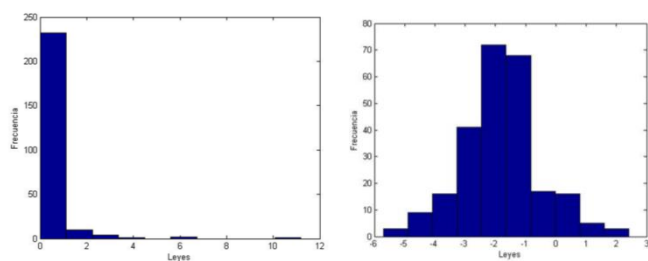


Fig. 2. Histograma de datos originales (izquierda) y transformados (derecha).

Los datos son compositados e interpretados a fin de construir secciones que permitan elaborar los sólidos que representen las zonas con mayor concentración en cobre (Cu), a fin de ser utilizados en la estimación de leyes.

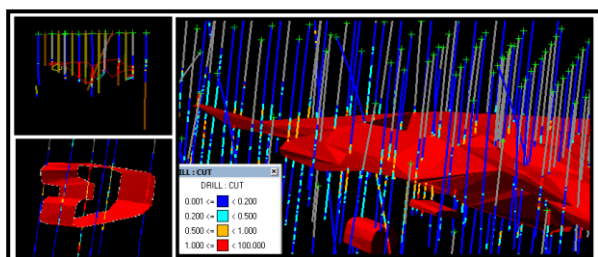


Fig. 3. Elaboración de sólidos que representan las leyes en Cu del depósito.

La Fig.3 muestra el proceso que debe seguirse al elaborar los sólidos que representan las diferentes leyes en el depósito.

B. Creación del modelo de bloques

El modelo de bloques del yacimiento se ha realizado a partir de los datos obtenidos de tres campañas de muestreo, en donde se perforaron alrededor de 90.000 metros. Se han realizado 255 sondajes con longitudes que oscilan entre los 100 y 772 metros de profundidad, en un área de estudio de 1200x1600 m (Fig. 4).

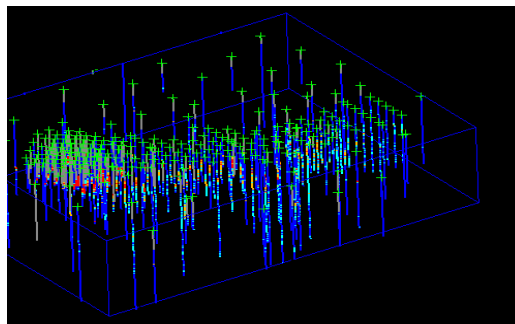


Fig. 4. Esquema mayor que contendrá al depósito discretizado.

Se ha considerado discretizar el depósito en bloques de 30x30x30 metros y subbloques de 6x6x6 metros con la finalidad de estimar variables de interés para cada elemento (Fig. 5).

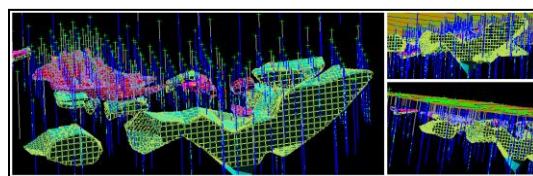


Fig. 5. Discretización del depósito representado por los sólidos.

Para determinar las dimensiones de los bloques se ha considerado los resultados obtenidos de un semivariograma, de modo que las muestras que se utilicen para la estimación tengan relación y sean influyentes para el elemento o bloque (Franco G., 2011). Otros parámetros de gran influencia corresponden al número de sondeos, distribución de muestras, número de muestras, estructura geológica, geometría del depósito, entre otras.

C. Estimación de leyes del mineral.

Para llevar a cabo la estimación de leyes se ha utilizado el método del kriging de bloques, para lo que fue necesario realizar un análisis variográfico que se basa en la construcción de un semivariograma experimental.

Un semivariograma experimental permite analizar el comportamiento de una variable regionalizada; en este caso se trata de la concentración o ley en Cu. Para su elaboración es necesario definir una distancia entre pares de muestras (h), la dirección que siguen dichas distancias y calcular la varianza

entre todos los pares de puntos. La expresión matemática de la semivarianza es la siguiente:

$$\gamma(h) = \frac{N_h}{2} * \sum (Z_x - Z_{x+h})^2; \quad (1)$$

Donde,
 $\gamma(h)$: Semivarianza
 N_h : Número total de pares de muestras separadas por una distancia h
 Z_x Valor de una muestra en la posición x

La Fig. 6 muestra la representación gráfica de las varianzas en función de h, en donde C es el valor de la meseta, Co es el efecto pepita y a es el alcance. La velocidad de incremento de $\gamma(h)$ con el lag es un reflejo de la velocidad a la cual la influencia de una muestra disminuye con la distancia y proporciona información adecuada respecto a la zona de influencia.

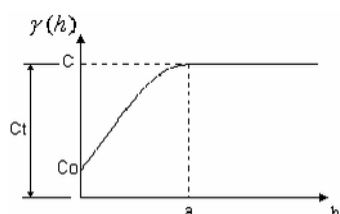


Fig. 6. Gráfico de un Semivariograma experimental.

El semivariograma experimental presentó un comportamiento parecido al del modelo esférico o de Matheron por lo que se le realizó el ajuste. La expresión matemática para este modelo corresponde a la ecuación 2 y 3.

$$\gamma(h) = C_0 + C(1.5 \left(\frac{h}{a}\right) - 0.5 \left(\frac{h}{a}\right)^3) \text{ para } h < a \quad (2)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \text{ para } h > a \quad (3)$$

Donde C_0+C es el valor de la meseta, a es el alcance o rango, C_0 es el efecto pepita y h es el valor correspondiente al Lag.

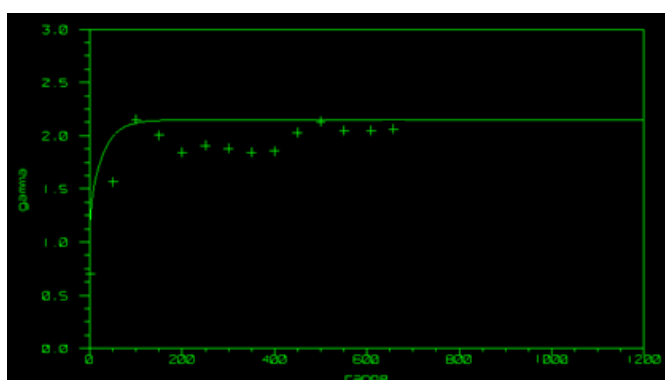


Fig. 7. Semivariograma ajustado al modelo teórico esférico.

Los parámetros de ajuste quedan definidos de la siguiente manera (Fig. 7):

Alcance (a): 100

Meseta (C): 2.2

Efecto pepita (C_0): 0.7

En base a los parámetros definidos en el apartado anterior, el número de muestras máximas y mínimas, el modelo de bloques, la anisotropía del depósito, los cuerpos sólidos, entre otros, se realiza la estimación de la variable ley mediante la técnica del krigage de bloques.

La técnica del krigage de bloques es utilizada para estimar el valor de una variable regionalizada en un bloque a partir de unos factores de ponderación. El proceso que implica utilizar dicha técnica lleva a la resolución de decenas o centenares de miles de ecuaciones, lo cual resulta inviable de no ser por el empleo de herramientas informáticas.

En la Fig. 8 se observa el depósito discretizado en bloques cuyos valores representan las distintas leyes que posee el depósito, siendo de color cian, mostaza y rojo los bloques con intervalos de concentración de Cu que van desde (0-0.5), (0.5-1) (1-100) %Cu.

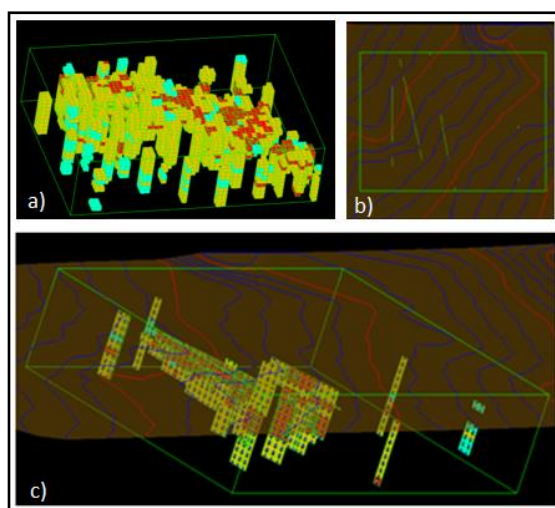


Fig. 8. Modelo de bloques con elementos de distintos colores que representan los valores de ley en Cu (a). Vista en Planta de las secciones realizadas (b). Cortes de las secciones que muestran los valores de ley y tonelaje para cada bloque (c).

D. Determinación del gráfico tonelaje - ley

Calculadas las leyes y junto a valores de densidad de la roca para cada bloque es posible determinar el tonelaje y la ley media de cada bloque para una ley de corte establecida.

El rango de ley de corte utilizado está entre cero y veinte (0-20%), dicha variable es dividida en intervalos de 0.2%. La fig.10 muestra las curvas de tonelaje vs ley media y ley de corte, en donde puede apreciarse que para una ley de corte de 2.5% Cu se tienen aproximadamente 29.9 Mt de mineral con una ley media de 3.2% Cu (Fig. 9).

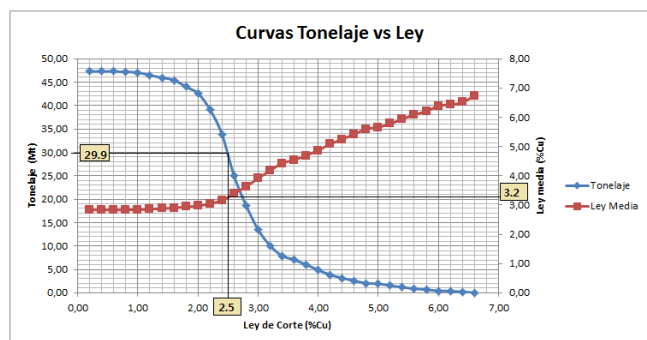


Fig. 9. Curvas de Tonelaje vs Ley del depósito.

El tonelaje de cada material definido como estéril, stock y mena de acuerdo a un rango específico de leyes se muestra en la Tabla I.

TABLE I. REPORTE DEL TONELAJE, LEY Y VOLUMEN DE MATERIALES CLASIFICADOS COMO ESTÉRIL, STOCK Y MENA EN BASE A SUS LEYES

MATERIAL	Volumen (Mm3)	Tonelaje (MT)	Rango de Leyes (%)
Estéril	10,74	26,87	0,0 - 0,5
Stock	6,97	17,42	0,5 - 2,5
Mena	12,64	31,60	2,5 - 100,0
TOTAL		75,89	

El depósito analizado tiene un tonelaje aproximado de 31Mt sobre la ley de corte establecida.

E. Selección de zonas potencialmente explotables

Mediante el modelamiento geológico de leyes, el reporte de los valores obtenidos en la estimación y cubicación de las reservas geológicas de Cu y la visualización de dichos resultados es posible determinar zonas cuya concentraciones en Cu son las más altas del depósito (Kaufmann, 2008) (Muñoz, 2013).

A partir de la información generada, la topografía de la zona y la información referente al tipo de depósito que se estudia es posible sugerir zonas de interés a las cuales pueda aplicarse un método de explotación minera, una vez evaluada la viabilidad y rentabilidad del proyecto minero (Bustillo Revuelta, 1997) (Boshkov, 1973).

Para el presente trabajo se tiene que la topografía de la zona de estudio es relativamente plana, existiendo cotas máximas y mínimas de 2345 y 2395 m.s.n.m. respectivamente, en un área de 1200 x 1600 m. El depósito es de tipo exótico con mineralización en gravas y se ha originado por migración lateral asociada a pórfidos cupríferos.

En cuanto a la geometría del depósito, se tiene que las zonas con mayor contenido de Cobre se encuentra en cuerpos estratificados con una potencia de aproximadamente 90 metros, que empieza a presentarse a una profundidad de 90 metros medidos desde la superficie (Fig. 10).

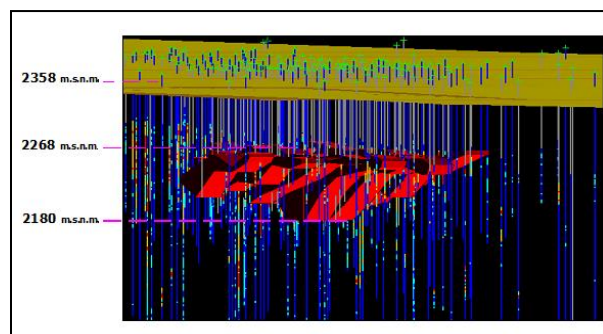


Fig. 10. Profundidad a la que se encuentra una parte del depósito cuyas leyes se encuentran por encima de la ley de corte.

El modelo de bloques indica que las reservas geológicas con mayor concentración en Cu están distribuidas a lo largo de una diagonal imaginaria con dirección S45E, ubicándose las leyes más altas en la parte superior izquierda.

La Fig. 11 muestra el modelo de bloques tridimensional (vista en planta), bajo una leyenda que indica el contenido de cobre de cada bloque, de esta manera se han definido tres clases de materiales, estéril, stock y mena cuyas leyes se encuentran en los rangos (0.00-0.5), (0.5-2.5) y (2.5 – 100) respectivamente.

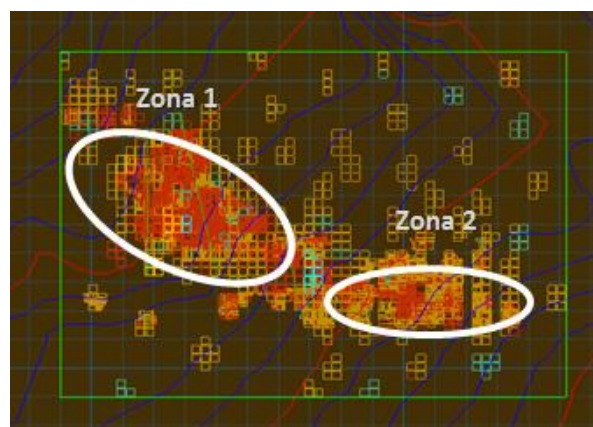


Fig. 11. Zonas de interés seleccionadas a partir del modelamiento de leyes, estimación y cubicación de reservas geológicas.

Para los materiales de estéril, stock y mena se han establecido los colores cian, anaranjado y rojo respectivamente. La mayor parte de los bloques con leyes superiores a la ley de corte se encuentran entre las cotas 2180 y 2268 metros.

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

El tipo de depósito que se encuentra en la zona de estudio es estratificado con mineralización en gravas rico en Cobre, con capas cuya inclinación varía entre 0, 10° e inclusive 13°. El depósito en general está localizado a profundidades entre los 90 y 200 metros aproximadamente.

El gráfico de tonelaje versus ley media y ley de corte, muestra que del total de tonelaje obtenido para la zona de estudio, alrededor del 42% corresponde al material que se ha denominado como mena, o material explotable. Sin embargo esta cifra solo corresponde a las reservas geológicas del lugar por lo que el porcentaje de material explotable tiende a disminuir al considerar el diseño de explotación, y realizando análisis de viabilidad y rentabilidad del proyecto.

De acuerdo al modelo de bloques obtenido, existen dos zonas en las que predominan las leyes altas; la primera se encuentra a profundidades que oscilan los 90 metros, mientras que el siguiente conjunto de bloques, que está ubicado más hacia el sur empieza a surgir a partir de los 180 metros de profundidad. Además leyes de 4.0 y 5.0% aparecen en bloques pertenecientes al primer grupo, mientras que las leyes del segundo grupo llegan hasta un 3.5%.

IV. CONCLUSIONES

1. El modelo geológico de leyes obtenido, muestra que las mayores concentraciones de Cobre se encuentran a profundidades entre 90 y 180 metros, al noroeste y sureste dentro de la zona de estudio.
2. El semivariograma omnidireccional con alcance de 100m., Co de 0.7, meseta (C) de 2.07 y anisotropía de 430 SE, permitió realizar la estimación mediante el método del krigeage, con lo que se elaboró un modelo de bloques, cuyo resultado corrobora el modelo geológico de leyes.
3. Para la ley de corte establecida de 2.5 %Cu se obtiene un tonelaje de 29.9 Mt con una ley media de 3.2%Cu, que es superior a la ley mínima de corte, por lo que se justifica la explotación del depósito.
4. Al integrar el modelo de bloques junto a la topografía de la zona y al modelo de leyes, se observó que el área con mayor potencial para ser explotada corresponde a la ubicada en la zona Noroeste del área de estudio, debido a su proximidad a la superficie y a tener las leyes más altas de todo el depósito (2.5 - 7.2%Cu).

REFERENCIAS

- U.S. Geological Survey. (2014). *Mineral Commodity Summaries 2014*. Washington: U.S. Geological Survey.
- Boshkov, S. (1973). Basic and parametric criteria in the selection, design and development of underground mining systems. *SME Mining Engineering Handbook*. New York: SME-AIME.
- Bustillo Revuelta, L. J. (1997). *Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras*. Madrid: Entorno Gráfico.
- Gongwen Wang, L. H. (2012). 3D geological modeling for mineral resource assessment of the Tongshan Cu deposit, Heilongjiang Province, China. *Geoscience Frontiers*, 483-491.
- Howard L. Hartman, J. M. (2002). *Introductory Mining Engineering*. New Jersey: John Wiley.
- Kaufmann, O. (2008). 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers & Geosciences*, 278-290.
- Liang-feng ZHU, Z. H. (2006). An Approach to Computer Modeling of Geological Faults in 3D and an Application. *Journal of China University of Mining and Technology*, 461-465.
- Mory, D. M. (2004.). *Uso de Tecnicas de modelado tridimensional y geoestadística en Cia Minera*. . Atacocha: Huancay Perú: V Congreso Nacional de Minería.
- Muñoz, M. J. (2013). El mercado del cobre a nivel mundial: evolución, riesgos, características y potencialidades futuras. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 248-261.
- S., G. F. (2011). Modelo de bloques para un yacimiento de sulfuros masivos utilizando el software minesight. *UNAL*