

Estimación de los recursos de cobalto del yacimiento hierro Mantua, Pinar del Río

Estimation of the cobalt resources of the hierro mantua ore, Pinar del Río



<http://opn.to/a/B0jMW>

Yasenia Del Llano Castellanos ^{1*}, José Quintín Cuador-Gil ², Abdiel Díaz Carmona ¹

RESUMEN: El objetivo de este trabajo es presentar una metodología para estimar los recursos de cobalto del yacimiento Hierro Mantua a partir del método geoestadístico multivariado Cokriging utilizando como variable secundaria los contenidos de azufre. Inicialmente se contaba con una base de datos geológicos que fue 100 % validada, arrojando resultados que permitieron aceptarla con un nivel de confiabilidad alto. Con estos datos se pasó a la construcción del modelo geológico del yacimiento, el cual muestra cómo la envoltura mineralizada fue afectada por un sistema de fallas transversales que cortan el cuerpo mineral en forma de bloques. Con el objetivo de comprender el comportamiento estadístico de estas variables se procedió a realizar el análisis exploratorio de datos, que permitió demostrar la no normalidad de estos, por lo que fue necesario transformarlos de forma tal que cumplieran con este principio. Se escogió la transformación multigaussiana debido a que la logarítmica (más usada en estos casos) tampoco dio los resultados necesarios. Para la aplicación de esta metodología se comprobó que las variables presentaron un coeficiente de correlación aceptado (superior a 0.6). El proceso de análisis estructural fue desarrollado con el objetivo de conocer las direcciones de máxima y mínima variabilidad de la mineralización obteniéndose un modelo que representa fielmente las características de variabilidad del yacimiento. Los semivariogramas experimentales muestran en las direcciones N y E, la mayor y menor variación de la mineralización respectivamente. La estimación de los recursos se realizó mediante el interpolador Cokriging en el software libre geoestadístico SGeMS 3.0 con un modelo de bloques de 12*15*3 m. Los recursos de cobalto están en el orden de las 12,3 Mt @ 99.6 ppm Co, donde todos se encuentran en la categoría de inferidos.

Palabras clave: estimación, recursos, cobalto, Cokriging.

ABSTRACT: The objective of this work is to present a methodology to estimate the cobalt resources in the Hierro Mantua location starting from the geostatistics multivariate method Cokriging using as secondary variable the contents of sulfur. Initially, there was a geological database that was 100 % validated, yielding results that allowed it to be accepted with a high level of reliability. With this data, the construction of the geological model of the deposit was made, which shows how the mineralized envelope was affected by a system of transversal faults that cut the mineral body into blocks. With the objective of understanding the statistical behavior of these variables you proceeded to carry out the exploratory analysis of data that allowed to demonstrate the non normality of these, for what was necessary to transform them in such way that fulfilled this principle. The multigaussian transformation was chosen because the logarithmic one (more used in these cases) neither gave the necessary results. For the application of this methodology was proven that the variables presented an accepted correlation coefficient (up at 0.6). The process of structural analysis was developed with the objective of knowing the maxim addresses and minimum variability of the mineralization being obtained a model that represents the characteristics of variability of the location faithfully. The experimental semivariograms show, in the N and E directions, the highest and lowest variation of the mineralization respectively. The estimate of the resources was carried out by means of the interpolator Cokriging in the geostatistics software SGeMS 3.0 with a model of blocks of 12*15*3 m. The cobalt resources are in the order of the 12,3 Mt @ 99.6 ppm Co, where all are in the category of having inferred.

Key words: estimate, cobalt, resources, Cokriging.

Recibido: 14/05/2018

Aprobado en su forma original: 09/09/2019

¹Empresa Geominera Pinar del Río, Minas de Matahambre, Pinar del Río, Cuba

²Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río, Cuba

*Autor para correspondencia: Yasenia Del Llano Castellanos. E-mail: ydelc94@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Los métodos y técnicas para el cálculo de recursos minerales han variado según el hombre ha adquirido mayor conocimiento empírico del problema y según ha alcanzado mayor desarrollo científico-técnico. Estos métodos de cálculo pueden ser divididos en dos variantes diferentes, métodos clásicos y métodos modernos. En Cuba el uso de algunas de estas técnicas de estimación ha estado limitado a la incursión empírica de especialistas, tomando auge en las empresas geomineras y en las instituciones relacionadas con las Ciencias de la Tierra en general ([Cuador, 2002](#)).

El yacimiento Hierro Mantua ha sido objeto de estudio por varias compañías mineras foráneas realizándose diferentes estimaciones de recursos arrojando resultados similares tanto por métodos clásicos como por métodos modernos. Estas estimaciones se han realizado principalmente para el cobre y no se ha tenido en cuenta otros elementos de interés como es el cobalto que a pesar de conocer su existencia formando parte de la estructura cristalina de la piritita sustituyendo isomórficamente al hierro, no se había considerado de importancia económica debido a las pobres recuperaciones metalúrgicas a las que fueron sometidas las muestras por las diferentes compañías interesadas. Es decir que en el yacimiento Hierro Mantua los recursos de cobalto hasta la actualidad han sido poco estudiados por lo que se requiere de la estimación y evaluación de los mismos. Por lo cual el objetivo del presente trabajo es estimar los recursos de cobalto del yacimiento Hierro Mantua mediante la aplicación de técnicas estadística y geoestadística.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de esta investigación se utilizó la información del yacimiento Hierro Mantua, para la cual se aplicaron diferentes etapas descritas a continuación.

Regularización de la información

Se realiza un análisis de los datos verificando la longitud mínima, máxima y promedio y si se encuentran diferencias se procede a regularizar los intervalos de muestras (compósitos) de forma

tal que el soporte no interfiera en el análisis estadístico y geoestadístico introduciendo una variabilidad adicional que no está relacionada a la variable estudiada.

Análisis exploratorio de datos

Se calcula la estadística básica descriptiva, la cual brinda un conjunto de métodos, técnicas y procedimientos que permiten ordenar, tabular y analizar conjuntos de observaciones, además junto a la estadística inferencial permite cuantificar la probabilidad de cometer error al extrapolar los resultados obtenidos de una serie de muestras al conjunto de la población y ayuda a determinar homogeneidad en la información, buscar valores extremos o poblaciones mixtas que puedan influir negativamente en el procesamiento posterior.

Análisis estructural

Su objetivo es determinar las características estructurales de la variable en estudio utilizando el semivariograma experimental ([Armstrong & Carignan, 1997](#); [Armstrong, 1998](#)). Este análisis se complementa con la información geológica. Esta etapa incluye los siguientes pasos:

1. El cálculo de los semivariogramas experimentales directos y cruzado.
 - Cálculo del semivariograma pozo abajo.
 - Cálculo de semivariogramas direccionales.
 - Análisis de anisotropía
2. El ajuste de modelos teóricos conocidos.
 - Ajuste de modelos teóricos a los semivariogramas.

En esta etapa debe obtenerse uno o varios modelos de semivariogramas con los respectivos valores de meseta y alcance ([ecuación 1](#)):

$$\gamma(hx, hy, hz) = Co + \sum_{i=1}^n Ci * Modelo(ax, ay, az) \quad (1)$$

Donde:

Co -es el efecto pepita,

Ci -es la meseta,

Modelo -es el o los modelos teóricos (ax, ay, az) utilizados en el ajuste del semivariograma con los alcances en las tres direcciones posibles y

n -es el número de estructuras utilizadas en el ajuste.

- Ajuste del Modelo de Corregionalización Lineal.

La manera más aceptada en la actualidad para realizar un análisis estructural multivariado es mediante un Modelo de Corregionalización Lineal (Goovaerts, 1997 en: [Díaz & Casar, 2004](#)), el cual está dado por la [ecuación 2](#):

$$\frac{\gamma}{\gamma_k}(h) = \sum_{k=0}^S \frac{V_k}{V_k} \gamma_k(h) \quad (2)$$

Donde:

$V_1, \dots, V_k$ -son matrices de corregionalización y $\gamma_1(h), \dots, \gamma_k(h)$ -son modelos simples de variogramas válidos.

Una condición suficiente para que el Modelo de Corregionalización Lineal sea válido consiste en que todas las matrices de corregionalización V_k sean positivas semidefinidas ([Díaz, 2002](#)). En todos los casos se debe chequear si el MLC es respetado. Si para todas las estructuras los determinantes son mayores que cero y las diagonales principales son positivas, entonces el MLC es verificado ([Cuador, 2003](#)).

Validación de los modelos de semivariogramas ajustados

El método convencional de validación del semivariograma cruzado $\gamma_{ij}(h)$ en el caso de dos variables consiste en estimar por Cokriging los valores de $Z_i(x)$ y $Z_j(x)$ en los puntos muestrales usando el procedimiento para este fin de validación cruzada ([Díaz, 2002](#)). El método anterior no es óptimo, ya que la validación de $\gamma_{ij}(h)$ debe ligarse con la validación de los semivariogramas $\gamma_{ii}(h)$, $\gamma_{jj}(h)$, es decir, se debería validar primero por separado $\gamma_{ii}(h)$, $\gamma_{jj}(h)$ y luego $\gamma_{ij}(h)$ de manera conjunta.

Construcción del modelo geológico 3D

Para la construcción del modelo geológico se tuvo en cuenta en primer lugar la disposición y modelo genético del yacimiento en cuestión, así como las características estructurales de las rocas encajantes. Para la construcción del modelo de bloque geológico se subdivide todo el espacio tridimensional en bloques o celdas de forma tal que conserven las características minerales, litológicas y físico-mecánicas del área. Los atributos sobre los cuales son determinados estos bloques se basan en la intersección con el modelo

geológico propuesto y las leyes minerales a través de la estimación por los métodos de interpolación que se usen.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Regularización de la información

Inicialmente se realizó una exploración a las muestras en la tabla Assays para comprobar si el soporte de los datos es homogéneo corroborando que las muestras no tienen igual soporte (longitud), por lo que fue necesario estandarizarlos de forma tal que dicho soporte no interfiriera en el análisis estadístico y geoestadístico. En este caso se calcularon compósitos de 1.0 m de longitud, los cuales fueron calculados dentro de la envoltura mineral modelada.

Análisis exploratorio de los datos

Uno de los primeros cálculos que se realizaron fue el coeficiente de correlación (ρ) de las variables primaria y secundaria en estudio (Co y S) respectivamente, el cual es de 0.65, que indica el buen grado de relación entre estas dos variables, condición suficiente para continuar con el estudio y procesar los datos para ver su comportamiento.

Se realizaron los gráficos de histograma y la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov demostrando el comportamiento lognormal de las variables azufre y cobalto pues el valor del estadístico K-S=0.129 y K-S=0.141 respectivamente es mayor que el valor $p < 0.01$, para un intervalo de confianza escogido de 0.05 ([Figura 1](#) y [2](#)), por lo que no pueden ser aplicados los métodos geoestadísticos ([Isaaks & Srivastava, 1989](#); [Clark & William, 2001](#)).

Debido a este comportamiento fue necesario realizarles un proceso de transformación logarítmica a las variables, las cuales mostraron un comportamiento gráfico que no se acerca al de una distribución normal por lo que se procedió a realizar una transformación Multigaussiana a las variables con ayuda de la Gslib 90. Después de realizar la transformación Multigaussiana se volvió a comprobar el coeficiente de correlación de las variables MGS y MGCo para ver si dicha transformación no había afectado su correlación. El nuevo (ρ) es de 0.71 demostrando una mayor relación de estas variables, hecho que favorece el

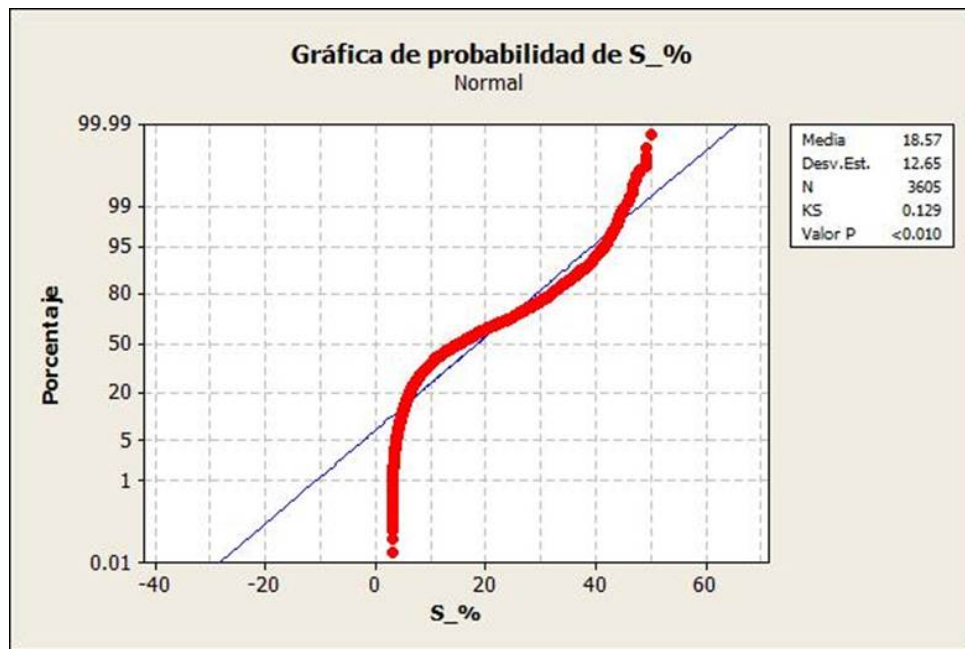


Figura 1. Gráfica de probabilidad de S_%.

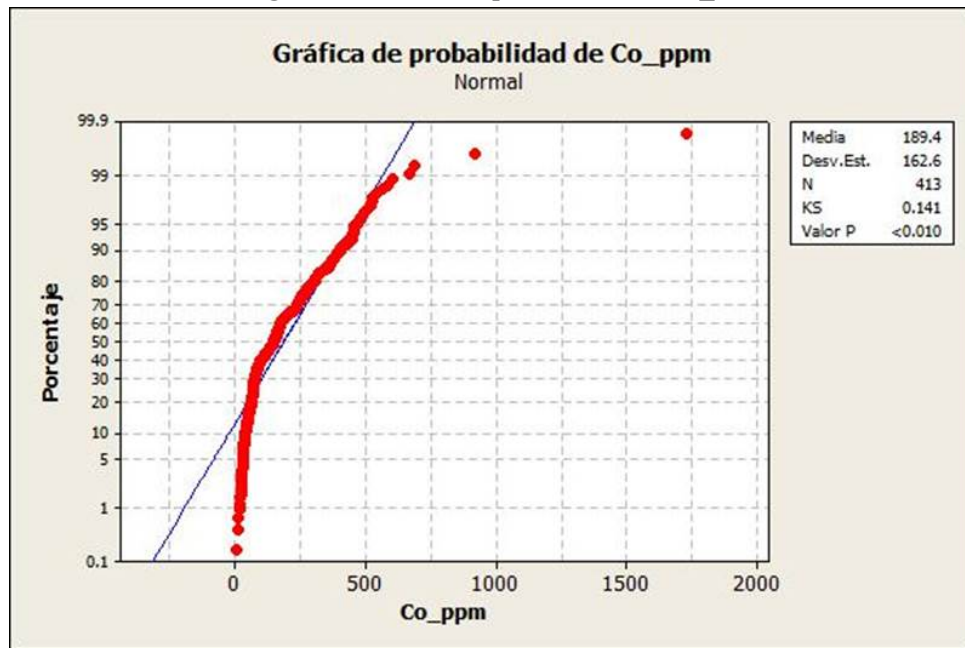


Figura 2. Gráfica de probabilidad de Co_ppm.

estudio que se está realizando. La transformación Multigaussiana ajusta los datos a una distribución estrictamente normal, con valores de media, moda y mediana iguales (Figura 3 y 4).

Como se observa en las Figuras 3 y 4, una vez transformada las variables se obtienen valores de media, mediana y moda idénticos (0.0), con una distribución en forma de campana de Gauss en ambos histogramas. Al realizar la prueba de Kolmogorov-Smirnov los resultados del estadístico K-S son de 0.000 y 0.001 respectivamente, menor que el valor $p > 0.150$

para un intervalo de confianza escogido de 0.05, lo que demuestra el comportamiento normal de las variables en estudio. Una vez demostrado que los datos son estacionarios y presentan una distribución normal, pueden ser aplicados los métodos geoestadísticos (Isaaks & Srivastava, 1989; Clark & William, 2001).

Análisis estructural

Cálculo de semivariogramas experimentales directos y cruzados

Como se planteó anteriormente para el cálculo del semivariograma cruzado se calculan

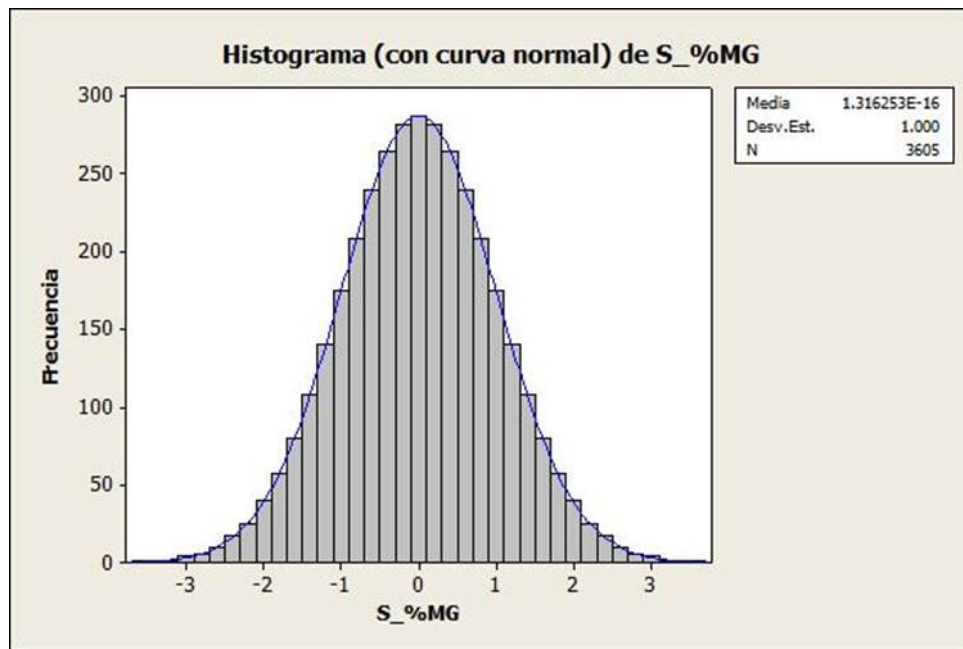


Figura 3. Histograma del S_% con transformación Multigaussiana.

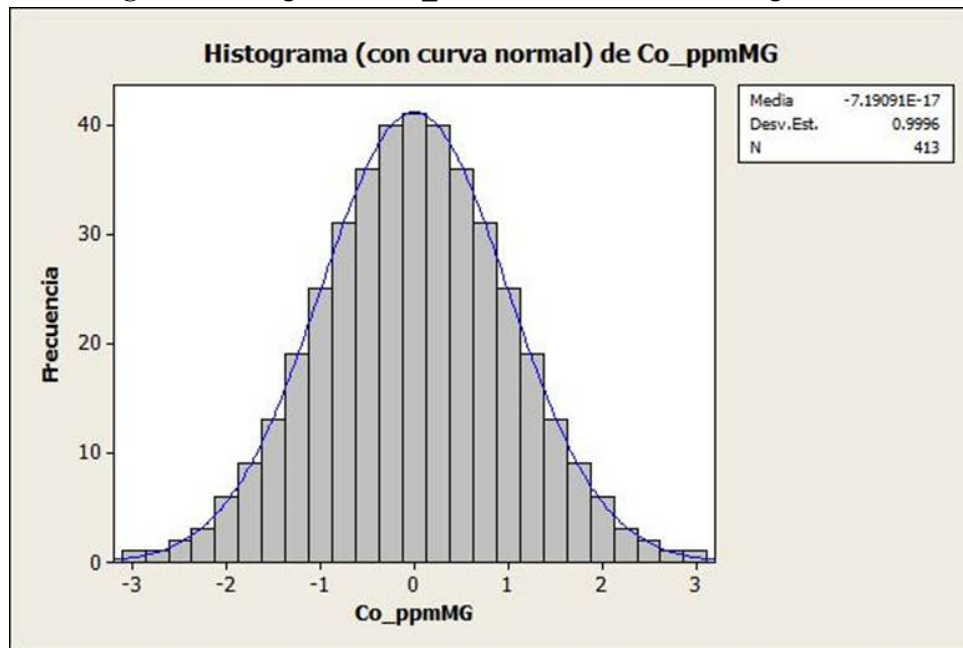


Figura 4. Histograma del Co_ppm con transformación Multigaussiana.

primeramente los semivariogramas simples. Los valores del semivariograma Pozo Abajo muestran la mayor continuidad de los datos, es decir, la menor variación de los mismos debido a que en esta dirección es donde se encuentra la mayor cantidad de datos, los cuales están a una distancia de 1 m aproximadamente. También se construyeron semivariogramas por el buzamiento y por el rumbo tanto para el Co_ppm como para el S_%.

Posterior al cálculo de los semivariogramas directos se calcula el semivariograma cruzado en

las tres direcciones propiamente dichas. En las Figuras 5, 6 y 7 se observan los semivariogramas en las direcciones Pozo Abajo, por el Buzamiento y por el Rumbo respectivamente, donde se muestra que todas las estructuras presentes en los semivariogramas cruzados están presentes en los variogramas directos. También se observa que en las direcciones N y E se obtienen la mayor y menor continuidad respectivamente, es decir, la menor y mayor variación del parámetro estudiado a través del espacio como se obtuvo

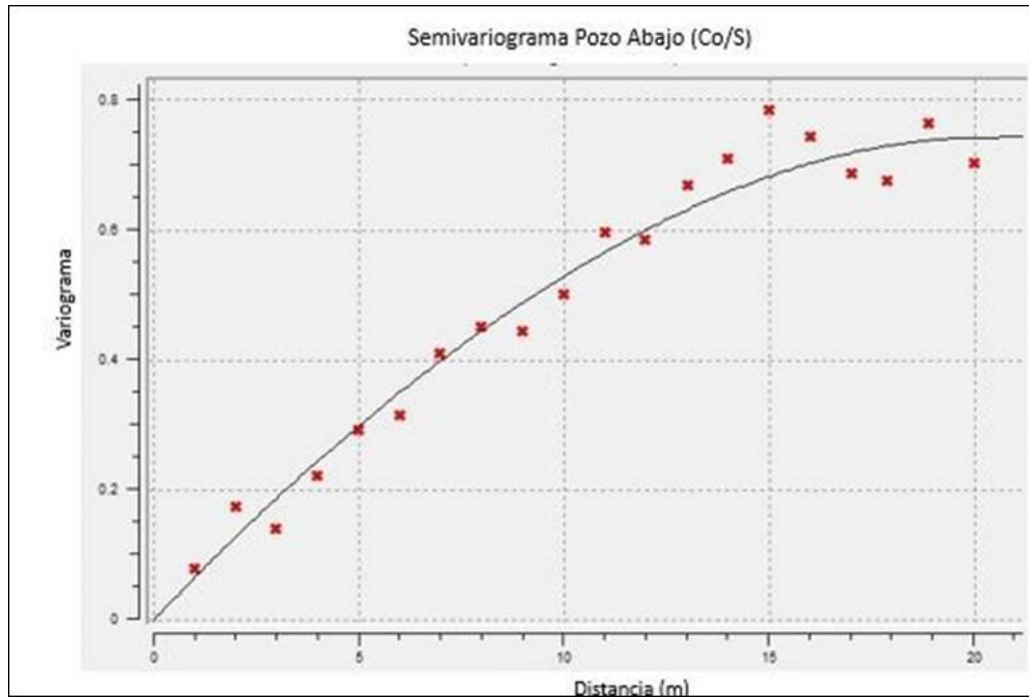


Figura 5. Semivariograma cruzado Pozo Abajo para Co/S, experimentales (cruces) y modelados (líneas).

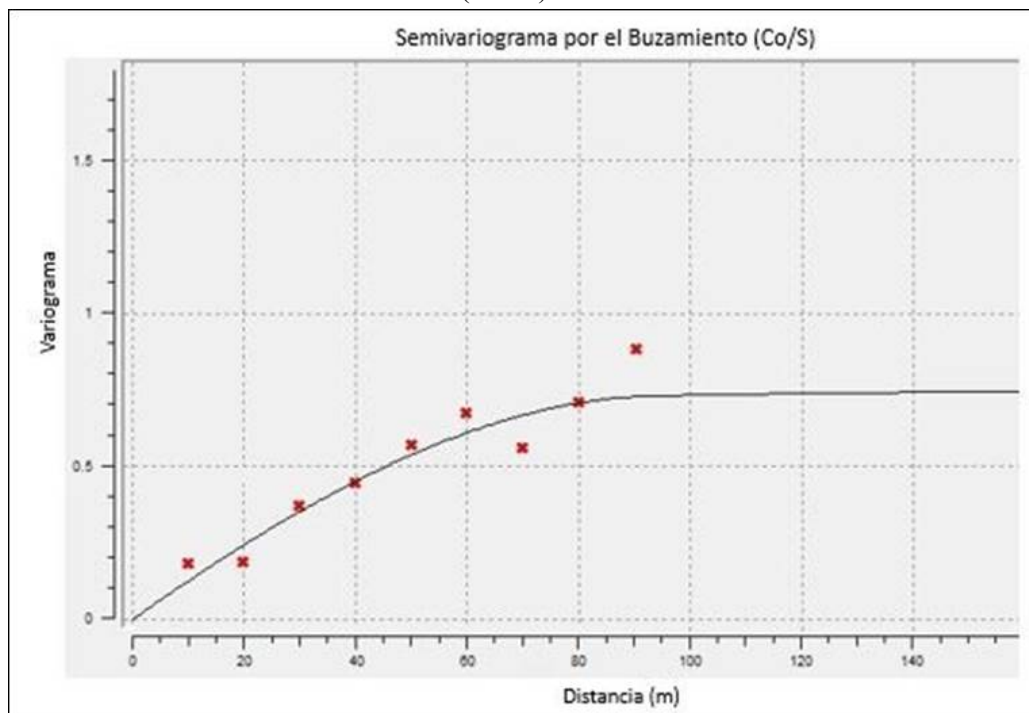


Figura 6. Semivariograma cruzado por el Buzamiento para el Co/S, experimentales (cruces) y modelados (líneas).

anteriormente en el cálculo de los semivariogramas directos.

La dirección de máxima continuidad coincide con la dirección del Rumbo, lo que indica que el comportamiento del parámetro bajo estudio está muy ligado a la ubicación espacial del yacimiento.

Ajuste de modelos teóricos

Para ajustar el semivariograma cruzado del Co/S se deben ajustar un total de 2 semivariogramas simples ya que se está trabajando con dos variables. Los modelos obtenidos para las variables Co y S se observan en las [ecuaciones 3](#) y [4](#) respectivamente:

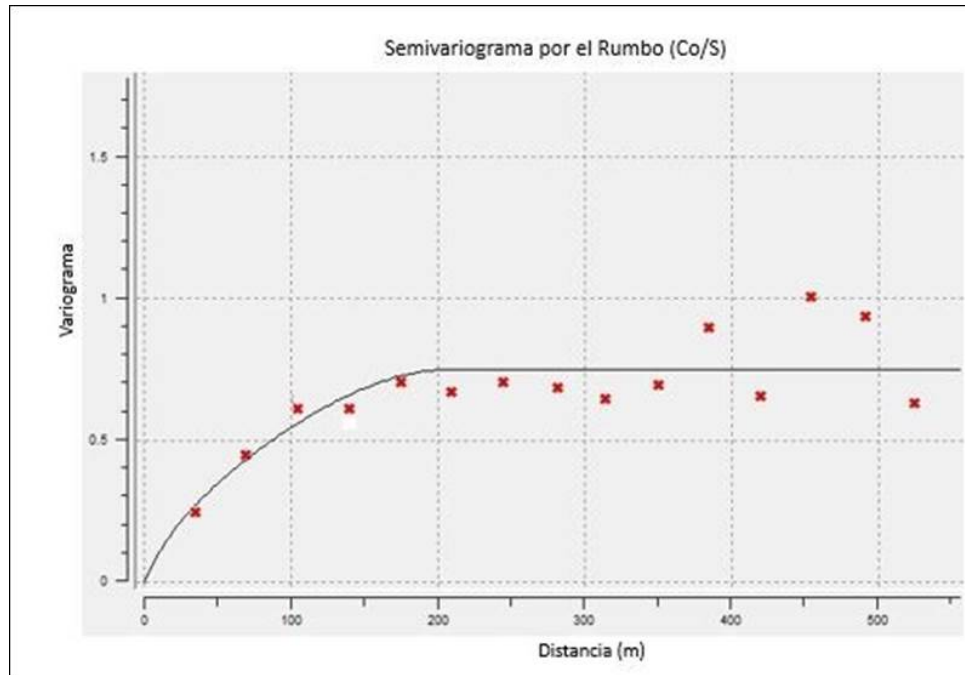


Figura 7. Semivariograma cruzado por el Rumbo para Co/S, experimentales (cruces) y modelados (líneas).

$$\gamma_{Co}(h) = 0.80Sph(215,105,14) + 0.45Exp(74,40,20) \quad (3)$$

$$\gamma_S(h) = 0.70Sph(190,160,18) + 0.40Exp(36,14,2.7) \quad (4)$$

Para el semivariograma cruzado (Co/S) se obtuvieron los siguientes modelos que se observan en la [ecuación 5](#):

$$\gamma_{Co/S}(h) = 0.60Sph(210,90,18) + 0.15Exp(60,35,20) \quad (5)$$

Donde:

Sph -Modelo esférico

Exp -Modelo exponencial

Ajuste del Modelo de Correogionalización Lineal

El MCL resultante de MGCo y MGS se presenta en la [ecuación 6](#).

Luego se procede al cálculo de las determinantes de la matriz para comprobar si el modelo es válido como se observa en las [ecuaciones 7 y 8](#).

Como para todas las estructuras los determinantes son mayores que cero y las diagonales principales son positivas, el MLC es verificado.

$$\begin{bmatrix} \gamma_{Co}(h) & \gamma_{CoS}(h) \\ \gamma_{CoS}(h) & \gamma_S(h) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.80 & 0.60 \\ 0.60 & 0.70 \end{bmatrix} Sph + \begin{bmatrix} 0.45 & 0.15 \\ 0.15 & 0.40 \end{bmatrix} Exp \quad (6)$$

1ra estructura (Esférica):

$$Det = \begin{vmatrix} 0.80 & 0.60 \\ 0.60 & 0.70 \end{vmatrix} = (0.80 * 0.70) - (0.60 * 0.60) = 0.56 - 0.36 = 0.2 \quad (7)$$

2da estructura (Exponencial):

$$Det = \begin{vmatrix} 0.45 & 0.15 \\ 0.15 & 0.40 \end{vmatrix} = (0.45 * 0.40) - (0.15 * 0.15) = 0.18 - 0.0225 = 0.1575 \quad (8)$$

Validación de los modelos de semivariogramas ajustados

Para la validación del semivariograma cruzado $\gamma_{Co/S}(h)$ en el caso de dos variables se deben validar primeramente por separado los semivariogramas individuales ($\gamma_{Co}(h)$; $\gamma_S(h)$) y luego $\gamma_{Co/S}(h)$ de manera conjunta como ya se había mencionado anteriormente. Para este fin se usó el procedimiento de validación cruzada. Una vez validado los modelos ajustados MGCo (%) y MGS (%) se procede a la validación del semivariograma cruzado ([Figura 8](#)).

Este gráfico de dispersión ilustra la veracidad del ajuste realizado al semivariograma cruzado, que se puede comprobar mediante la inspección visual en dicho gráfico, en el cual se muestra una concentración de valores alrededor de la línea de 45° que indica una buena correlación y poca dispersión.

Construcción del modelo geológico 3D

Para la construcción de los cuerpos minerales y las diferentes zonas de falla se usó la información proveniente de las secciones geológicas permitiendo contornear los cuerpos minerales y los detalles estructurales. Desde el punto de vista estructural la envoltura mineralizada modelada fue afectada por un sistema de fallas transversales que cortan el cuerpo mineral en forma de bloques (Figura 9) y expone de él diferentes horizontes de

la mineralización en un mismo corte erosivo. Las fallas se ubican entre 180 m y 220 m entre sí, lo que explica los diferentes alcances obtenidos en el análisis de los semivariogramas, demostrando que las muestras a una distancia superior a la que se encuentran las fallas son prácticamente independientes.

Para la construcción del modelo de bloques se tuvo en cuenta los estudios recientes realizados en el yacimiento Hierro Mantua por Díaz (2017)

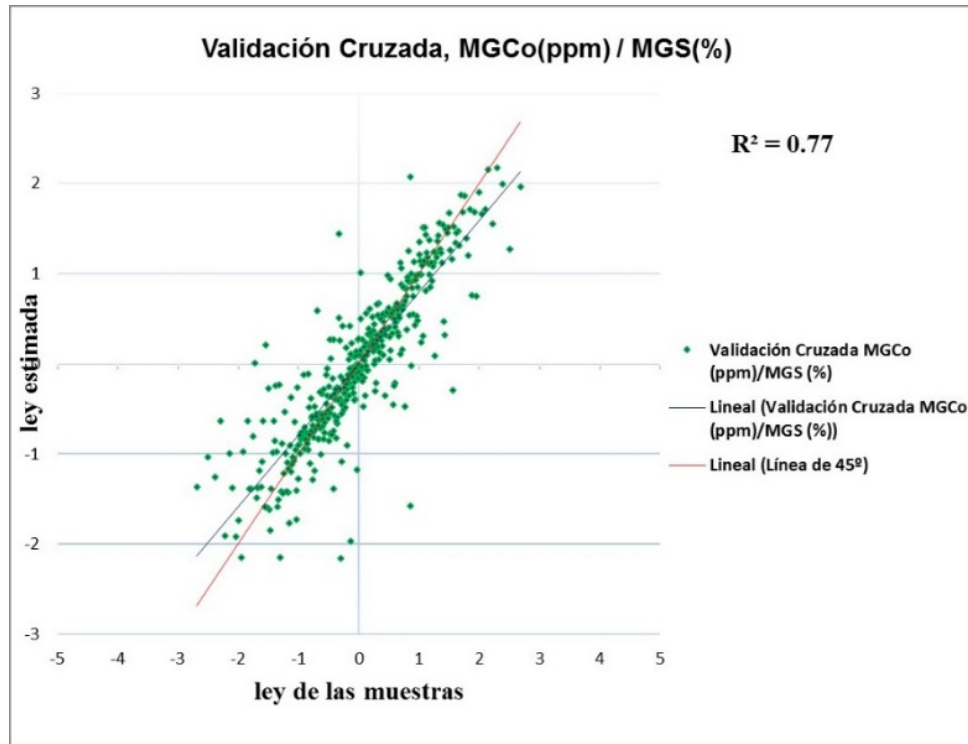


Figura 8. Gráfico de dispersión, MGCo (ppm) / MGS (%). Valor estimado Vs valor real.

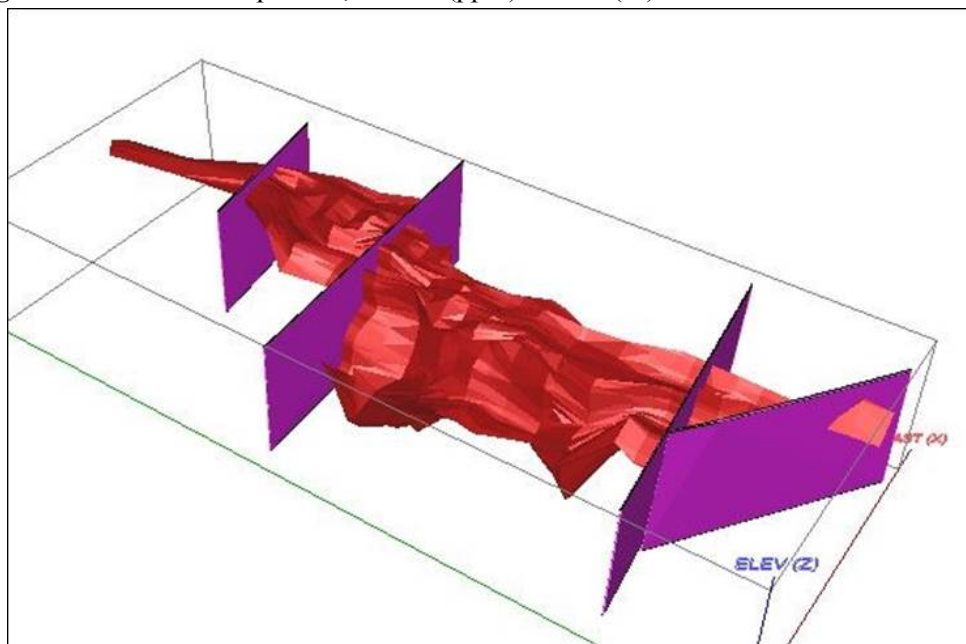


Figura 9. Cuerpo mineral (rojo) cortado por los diferentes planos de falla (morado).

donde quedó demostrado que la USM más adecuada es (12 x 15 x 3).

Estimación

Después de obtenidos los modelos que representan la continuidad espacial de las variables estudiadas, se procede a la estimación del cobalto por el procedimiento Cokriging de bloques donde se tiene en cuenta el modelo estructural obtenido para el MGCo en la variografía. Para la estimación del modelo de leyes se utilizó las herramientas que proporciona el Software libre Geoestadístico SGeMS 3.0, que tiene en cuenta la elipse de búsqueda para ambas variables, el método de interpolación y la discretización del modelo de bloques entre otras.

Estimación de recursos

Los recursos de cobalto estimados en el Yacimiento Hierro Mantua están en el orden de 12,3 Mt @ 99.6 ppm Co. La [Figura 10](#) muestra la zona que fue estimada en el yacimiento representada en el modelo de bloques, donde se observa que la mayor parte de los recursos de cobalto están entre 0-100 ppm y 100-300 ppm respectivamente.

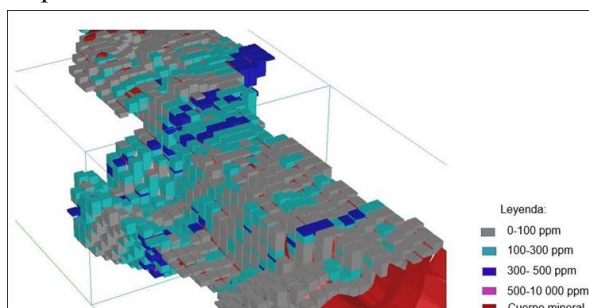


Figura 10. Representación de la estimación de los recursos de cobalto en el modelo de bloque.

Clasificación de recursos

Los recursos de cobalto en el yacimiento Hierro Mantua se clasifican en recursos inferidos de manera general, dado que las estimaciones de tonelaje y ley están afectadas en exactitud y precisión, debido a que el muestreo en el caso de esta variable es limitado y la información es reducida. Además, en este caso se aplicó el método Cokriging, donde se estimó los recursos de cobalto, el cual se encuentra insuficientemente muestreado, a partir de la información del propio cobalto y del azufre, del cual se tiene mayor conocimiento y se encuentra correlacionado con ella, siendo el azufre una variable con mayor

muestreo e información con respecto al cobalto, pero no la más muestreada ni estudiada en el yacimiento.

CONCLUSIONES

La no normalidad de los contenidos originales de S y Co en el yacimiento Hierro Mantua está dada por las complejidades geológicas en la región del yacimiento, la cual fue probada por la estadística descriptiva e inferencial.

El modelo geológico muestra cómo la envoltura mineralizada fue afectada por un sistema de fallas transversales que cortan el cuerpo mineral en forma de bloques.

Los modelos ajustados fueron validados por la validación cruzada dando un coeficiente de correlación de 0.88, demostrando que el ajuste obtenido es válido para la estimación.

Los recursos del yacimiento Hierro Mantua fueron estimados por el método de Cokriging con un modelo de bloques de 12*15*3 m. Estos están en el orden de las 12,3 Mt @ 99.6 ppm Co encontrándose en la categoría de inferidos.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, M.A. 2007. Estimación de Recursos Mineros. Santiago de Chile: Universidad de Chile, 125p.
- Armstrong, M. 1998. Basic Linear Geostatistics, Springer-Verlag Berlín Heidelberg New York, Berlín, 163p.
- Armstrong, M. & Carignan, J. 1997. Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier. Fontainebleau: École des Mines de Paris, 112p.
- Clark, I. & William, V. H. 2001. Practical Geostatistics 2000 (2nd ed.), Ecosse North America Llc., Ohio USA, 312p.
- Cuador, J.Q. 2002. Estudios de estimación y simulación geoestadística para la caracterización de parámetros geólogo-industriales en el yacimiento laterítico de Punta Gorda. Tesis de Doctorado. Pinar del Río: Departamento de Geología. Universidad de Pinar del Río, 98p.
- Cuador, J.Q. 2003. Análisis Espacial Multivariado, Cokriging. Presentación de Curso de Postgrado, Universidad de Pinar del Río.

- Cuador, J.Q., Quintero, A., Estévez, E. & Ramírez, R. 1997. Elementos de Geoestadística. Universidad de Pinar del Río.
- Díaz, A. 2017. Influencia del tamaño y la forma de la unidad de selección minera en la estimación de recursos bajo condiciones de alta complejidad geológica “Yacimiento Hierro Mantua”. Tesis de Maestría. Departamento de Geología. Universidad de Pinar del Río, 83.
- Díaz, M. A. (2002). Geoestadística Aplicada. UNAM, Instituto de Geofísica.
- Díaz, M. A. & Casar, R. 2004. Geoestadística Aplicada. Geoestadística Multivariada. México.
- Grant, C. & Hosford, P. 2005. Zareba PLC and Copper Resources PLC Mantua Copper Project (Independent Technical Report No. PR319010.001 51p.
- Isaaks, E. H. & Srivastava, R. M. (1989). Applied Geostatistics. Oxford University Press Inc., New York, 435p.
- Russell, N., Moreira, J., & Sánchez, R. 2000. Volcanogenic massive sulphide deposits of Cuba. VMS Deposits of Latin America, (2): 241-258.
- Thornley, D. 2014. Dertimación de recursos en el yacimiento laterítico de corteza de intemperismo La Delta, Moa, Provincia de Holguín. Pinar del Río: Departamento de Geología. Universidad de Pinar del Río,

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)