



Estimación y Control de Leyes de Producción Mediante Técnicas Geoestadísticas en un Yacimiento de Caliza de la Formación San Eduardo

Guillermo Iván Flores Caamaño ⁽¹⁾, Ing. Juan Carlos Pindo Macas ⁽²⁾
Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra ^(1,2)
Escuela Superior Politécnica del Litoral ^(1,2)
Km. 30,5 Vía Perimetral, 09-01-5863, Guayaquil-Ecuador ^(1,2)
gflores@espol.edu.ec ⁽¹⁾, jpindo@espol.edu.ec ⁽²⁾

Resumen

Este trabajo de investigación busca lograr una adecuada estimación y control de leyes de producción, mediante el uso de técnicas geoestadísticas, para lo cual se busca determinar un procedimiento confiable para la toma y preparación de las muestras de detritos de perforación generadas en la cantera; así como un correcto método de interpolación para la asignación de la ley de una voladura. La zona de estudio se encuentra ubicada en el área minera CENACA al Noroeste de la ciudad de Guayaquil, sobre el talud meridional de la cadena montañosa que es parte de la Cordillera Chongón-Colonche. Para el desarrollo de la investigación, primero se determinó y cuantificó el error de muestreo dentro del procedimiento actual de toma y preparación de muestras, para luego fijando el máximo error de muestreo en base a los requerimientos de producción, establecer un procedimiento adecuado; luego se determinó el mejor interpolador para la estimación del porcentaje de SiO_2 y SO_3 de una voladura, teniendo como medidas de precisión: el promedio absoluto del error (PAE) y el promedio del cuadrado del error (PCE), y como medida de efectividad, el estimado de efectividad de predicción (E).

Palabras Claves: Técnicas geoestadísticas, métodos de interpolación, error de muestreo.

Abstract

This work aims seeks to achieve a suitable estimation and production control laws, using geostatistical technologies, to determine a reliable procedure of taking and preparation of detrituses of perforation generated in the quarry; as a correct interpolation method for the assignment of the law of a blast. The study area is located in the mining area CENACA to the Northwest of the city of Guayaquil; on the southern slope of the mountain chain Chongón-Colonche (is part of the Chongón-Colonche mountain range). For the development of research, we determined and quantified the mistake of sampling inside the current procedure of capture and preparation of sample, then setting the maximum sampling error based on production requirements, establish an appropriate procedure, then determined the best interpolation to estimate the percentage of SiO_2 and SO_3 a blast, using, the Mean Absolute Error (MAE) and the Mean Square Error (MSE) as precision measurements, also as a goodness of fit measurement, the prediction (E).

Key words: Geostatistical, interpolation method, mistake of sampling.

1. Introducción

Si bien todas las fases involucradas en los procesos de evaluación de un yacimiento tienen su importancia, el muestreo, por ser la primera y la que va a condicionar en gran parte, la viabilidad económica de la explotación, presenta una serie de características que la confieren un carácter crítico. Como bien hace constar Vallée (1992) "... si las muestras no son representativas del yacimiento, el resto de la evaluación carece de interés". Se debe asegurar que factores como la cantidad de muestra a tomar, su disposición, la reducción de la cantidad de muestra original, etc., aseguren la citada representatividad [1].

2. Justificación

Casi todas las decisiones que se hacen respecto de un Proyecto Minero, desde la explotación hasta el cierre de la mina, están basadas en valores obtenidos del material muestreado.

En una mina a cielo abierto, la ley de un pozo de voladura es fundamental para la planificación de corto plazo: este valor decide, de una u otra manera, el destino de los materiales (planta, stock o botadero) [2].

Es de gran importancia el contar con un correcto procedimiento de toma y preparación de muestras de caliza puesto que el contar con datos certeros que sean representativos del origen, ayudará a establecer un real control de la calidad del material que es muestreado, para posteriormente determinar un correcto método de estimación de la ley media de una voladura, pues no necesariamente se trata de la media aritmética de un conjunto de datos.

3. Identificación del problema

En todo proceso de asignación se necesita un conocimiento de las diferentes temáticas de muestreo para posteriormente hacer uso de las herramientas geoestadísticas, pues esta última puede ser aplicada de diferentes maneras y en diferentes problemas.

El personal encargado del sistema de muestreo en el yacimiento objeto de estudio, no dispone de un procedimiento de toma y preparación de muestras de caliza, el cual permita obtener muestras representativas para el posterior análisis de los diferentes parámetros que inciden en la fabricación

de cemento; la falta de este procedimiento afecta a la asignación de la ley media para los parámetros SiO_2 y SO_3 , provocando pérdidas económicas en el proceso posterior a la trituración.

4. Elaboración de Hipótesis

Para el presente proyecto se utilizará una hipótesis general que se traduce en la siguiente:

- El mejoramiento de los procedimientos de toma y preparación de muestras y la determinación del óptimo interpolador para la asignación de la ley de una voladura, inciden en la correcta estimación y control de leyes de producción.

5. Ubicación del área de estudio

El área de estudio se localiza al Noroeste de la ciudad de Guayaquil y está ubicada sobre el talud meridional de la cadena montañosa que es parte de la Cordillera Chongón-Colonche en el km 18 de la vía Guayaquil-Salinas.

El área se encuentra comprendida entre los meridianos $80^{\circ}15'$ y $80^{\circ}0'$ de Longitud Oeste y entre los paralelos $2^{\circ}10'$ y $2^{\circ}20'$ de Latitud Sur, abarcando una superficie aproximada de 2450 Has. Está integrada por la Hoja Topográfica 3487-II Chongón, editada por el Instituto Geográfico Militar.

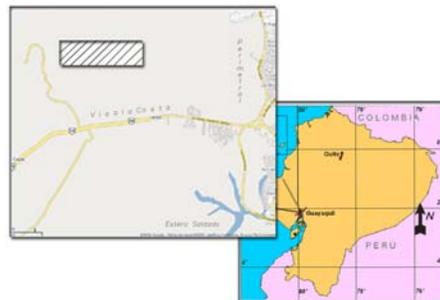


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio

6. Objetivos

Objetivo General

- Lograr la estimación y control del contenido de SiO_2 y SO_3 en dos bloques de un yacimiento de caliza de la formación San

Eduardo mediante el uso técnicas geostatísticas.

Objetivos Específicos

- Implementación de un procedimiento para la toma y preparación de muestra de caliza el cual sea acorde con los requerimientos de producción.
- Determinar el mejor método de interpolación para la estimación de la ley de SiO₂ y SO₃ de una voladura.
- Cuantificar el error fundamental de muestreo, por medio de la fórmula de Pierre Gy que relaciona el tamaño de partícula de un material con el tamaño de la muestra a tomar para una unidad a evaluar.

7. Metodología de la investigación

Para el análisis comparativo de ambos procedimientos se llevó a cabo por medio del esquema que se encuentra a continuación:

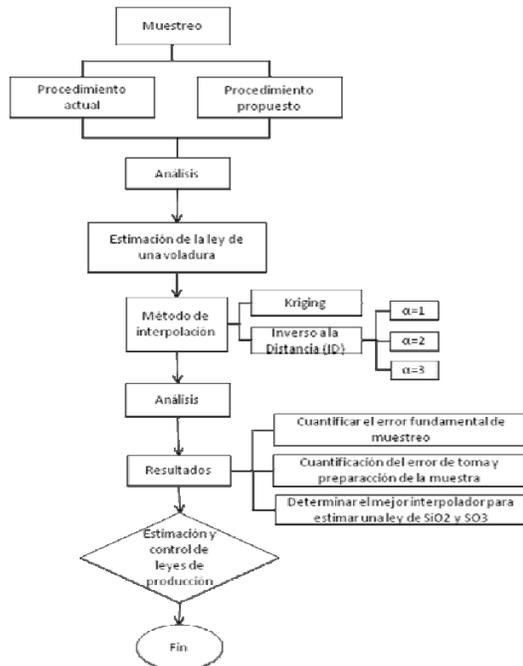


Figura 2: Metodología de investigación

La muestra es cuarteada y dividida en dos partes iguales con el objetivo de analizar cada muestra bajo un diferente procedimiento.

La principal diferencia entre ambos procedimientos es la inclusión del proceso de homogeneización

previa la reducción del tamaño de la muestra. La homogeneización se realiza tanto en la cantera como en el laboratorio.

Una vez obtenidos los resultados en el laboratorio, se procedió a graficar los diferentes diagramas de isopleyas tanto para las variables SiO₂ y SO₃ con los métodos de interpolación Kriging y el Inverso a la Distancia (ID) con los parámetros $\alpha=1$, $\alpha=2$ y $\alpha=3$; para la determinación del mejor interpolador se tomaron dos medidas de precisión que son: El Promedio Absoluto del Error (PAE) y el Promedio del Cuadrado del Error (PCE) y, como medida de efectividad, el estimado de Efectividad de predicción (E).

8. Error fundamental de muestreo

Por medio del análisis con el uso de la fórmula de Pierre Gy se determinó el error fundamental de muestreo obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 1: Error fundamental de muestreo

| Factor | Silice | Azufre |
|--|---------|---------|
| Varianza ($\sigma^2(FE)$) | 0,00061 | 0,00502 |
| Error relativo ($\delta(FE)$) | 2,46% | 7,08% |
| Error respecto a la media ($\delta95$) | 4,82% | 13,89% |
| Rango de variación con respecto a la guía (\pm) [*] | 0,394 | 0,034 |
| Error total de muestreo ($\delta^2(ET)$) | 0,0012 | 0,01 |

^{*}guías durante el estudio: SiO₂=8% y SO₃=0,24%

9. Asignación de la ley de una voladura

Para el presente estudio se consideraron cinco voladuras denominadas: C2E-72-14, C4E-26-18, C2E-48-07, C2E-60-05 y C2E-96-04, puesto que dentro de estas voladuras se registra más de una unidad estratigráfica. Esta característica hace a las voladuras heterogéneas.

Tabla 2: Parámetros de los diferentes variogramas para las variables SiO₂ y SO₃

| | SiO ₂ | SO ₃ |
|-----------------------------------|------------------|-----------------|
| Modelo de ajuste | Gauss | Gauss |
| Efecto pepita (Co: nugget) | 9,43 | 0,02 |
| Meseta (Co+C: sill) | 32,48 | 0,15 |
| Rango | 12,83 | 17,56 |
| Proporción C/(Co+C) | 0,71 | 0,86 |
| Coefficiente de determinación: R2 | 1 | 0,99 |
| Suma residual de los cuadrados | 7,4E-3 | 2,2E-6 |



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



Tabla 3: Resultados de las interpolaciones y validación cruzada con los métodos de Kriging e Inverso a la distancia

| | SiO ₂ | SO ₃ |
|---|------------------|-----------------|
| Promedio observado | 9,35 | 0,53 |
| Desviación estándar | 4,68 | 0,28 |
| Promedio estimado (Kriging) | | |
| Desviación estándar del promedio estimado | 3,4 | 0,26 |
| Validación cruzada | | |
| Coefficiente de la regresión | 0,83 | 0,89 |
| Error estándar | 0,43 | 0,18 |
| R2 | 0,17 | 0,55 |
| Intercepto | 1,36 | 0,05 |
| Predicción del error estándar | 4,27 | 0,19 |
| Promedio estimado (ID α=1) | | |
| Desviación estándar del promedio estimado | 2,09 | 0,16 |
| Validación cruzada | | |
| Coefficiente de la regresión | 1,49 | 1,73 |
| Error estándar | 0,63 | 0,35 |
| R2 | 0,23 | 0,57 |
| Intercepto | -5,1 | -0,42 |
| Predicción del error estándar | 4,11 | 0,18 |
| Promedio estimado (ID α=2) | | |
| Desviación estándar del promedio estimado | 3,21 | 0,25 |
| Validación cruzada | | |
| Coefficiente de la regresión | 1,03 | 1,22 |
| Error estándar | 0,4 | 0,22 |
| R2 | 0,26 | 0,61 |
| Intercepto | -0,49 | -0,13 |
| Predicción del error estándar | 4,03 | 0,17 |
| Promedio estimado (ID α=3) | | |
| Desviación estándar del promedio estimado | 3,76 | 0,25 |
| Validación cruzada | | |
| Coefficiente de la regresión | 0,83 | 1,02 |
| Error estándar | 0,33 | 0,19 |
| R2 | 0,29 | 0,61 |
| intercepto | 1,49 | -0,02 |
| Predicción del error estándar | 4,06 | 0,17 |

En la tabla 3 se resume el resultado de las interpolaciones utilizando el método de Kriging y el ID. Para el caso del ID, se puede observar que al aumentar el exponente que da peso a los valores

cercanos (α), para el caso de la sílice, el promedio de las estimaciones disminuye y para el azufre aumenta; mientras que tanto para la sílice como para el azufre, el coeficiente de regresión y el error estándar disminuyen.

Tabla 4: Resultados de los análisis de PAE, PCE y E para las interpolaciones efectuadas por los métodos Kriging y el Inverso a la Distancia (ID).

| | SiO ₂ | SO ₃ |
|-----------------|------------------|-----------------|
| Kriging | | |
| PAE | 0,14 | 0,115 |
| PCE | 0,03 | 0,029 |
| E | 88,1% | 61,3% |
| ID (α=1) | | |
| PAE | 0,11 | 0,059 |
| PCE | 0,02 | 0,005 |
| E | 93,0% | 93,1% |
| ID (α=2) | | |
| PAE | 0,01 | 0,002 |
| PCE | 1,2E-4 | 1,9E-5 |
| E | 100% | 100% |
| ID (α=3) | | |
| PAE | 3,0E-3 | 0 |
| PCE | 1,4E-5 | 0 |
| E | 100% | 100% |

Siempre que el coeficiente de determinación (R^2) aumenta, la predicción del error disminuye, teniendo un claro comportamiento inversamente proporcional.

Al comparar los resultados obtenidos por medio del Kriging con los del ID, para el caso de la sílice, las predicciones del coeficiente de regresión son menores en el Kriging, para el coeficiente de determinación (R^2) y el promedio la mayoría son menores en el Kriging, caso contrario para la predicción del error estándar la mayoría; mientras que para el caso del azufre, las predicciones del coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de regresión son menores en el Kriging, contrario al estándar donde son mayores.

La tabla 4 muestra los estadísticos calculados para determinar cuál interpolador es más preciso y con menos errores. El método ID con $\alpha=3$ es más preciso (valores más bajos de PAE y PCE) y eficiente (valores más altos de E) para las interpolaciones de SiO₂ y SO₃.

Las figuras 3, 4, 5 y 6 muestran los mapas generados por ambos interpoladores para la variable SO_3 . El Kriging vuelve a crear un mapa con áreas de transición menos abruptas que las del ID. Sin embargo, las áreas de mayor y de menor concentración son muy similares. Para el caso del método ID, a medida que aumenta el exponente alfa, se acentúan los valores extremos, esto se ve reflejado en el aumento de la zonas de color roja y celeste.

Como se observó anteriormente, los coeficientes de determinación de las validaciones cruzadas, y los valores de PAE, PCE y E son mejores para el método ID que el Kriging en este caso particular.

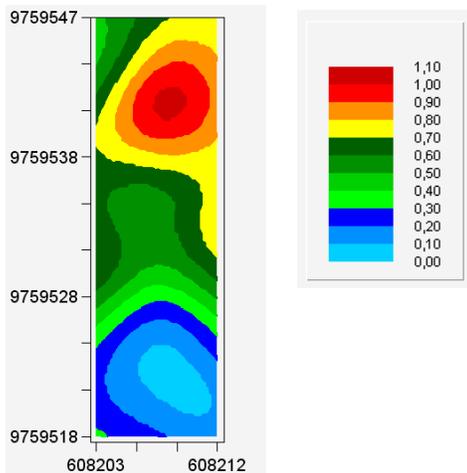


Figura 3: Diagrama obtenido mediante el interpolador Kriging para la variable azufre

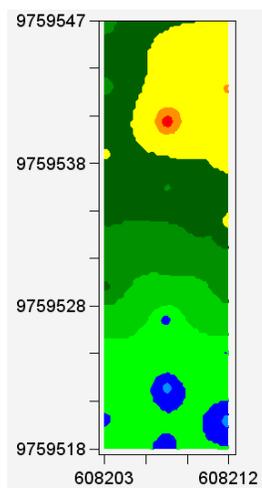


Figura 4: Diagrama obtenido mediante el interpolador ID $\alpha=1$ para la variable azufre

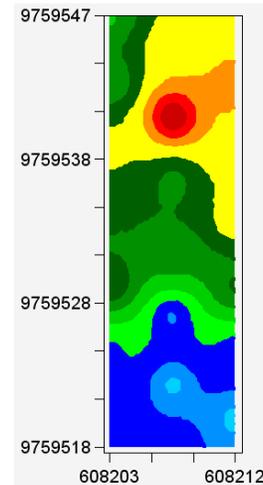


Figura 5: Diagrama obtenido mediante el interpolador ID $\alpha=2$ para la variable azufre

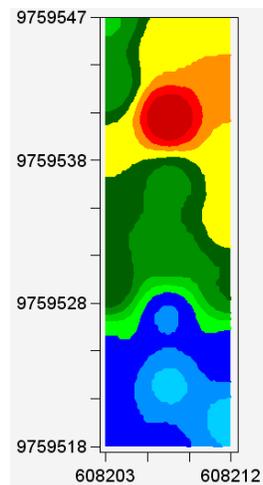


Figura 6: Diagrama obtenido mediante el interpolador ID $\alpha=3$ para la variable azufre

Las figuras 7, 8, 9 y 10 muestran los mapas generados por ambos interpoladores para la variable SiO_2 , en las cuales se puede apreciar que al igual que en el SO_3 a medida que aumenta el exponente α las concentraciones más altas van aumentando, así como las más bajas, mostrando la tendencia de que a valores bajos de α tiende a buscar la gráfica al promedio.

Tanto para la variable SiO_2 y SO_3 el método de interpolación Inverso a la Distancia con $\alpha=3$, mostro mejores resultados.

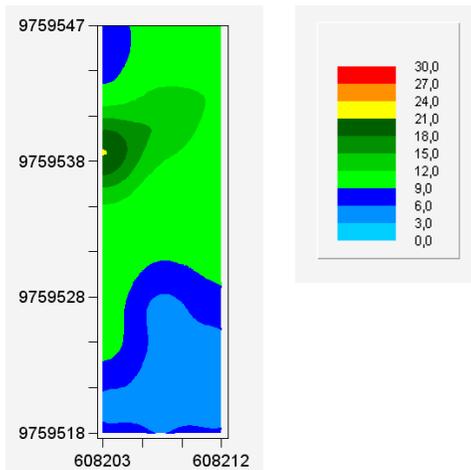


Figura 7: Diagrama obtenido mediante el interpolador Kriging para la variable sílice

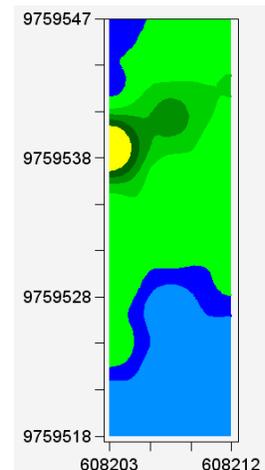


Figura 10: Diagrama obtenido mediante el interpolador ID $\alpha=3$ para la variable sílice

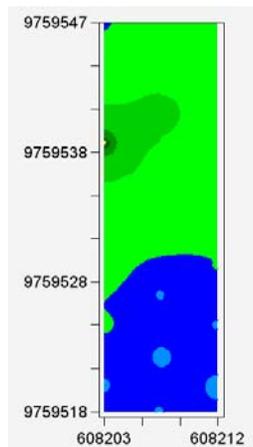


Figura 8: Diagrama obtenido mediante el interpolador ID $\alpha=1$ para la variable sílice

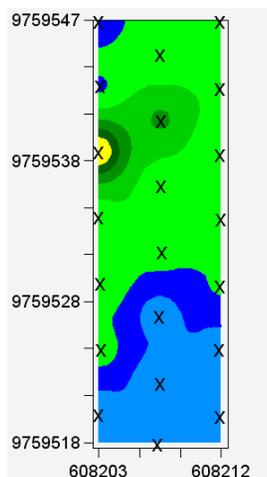


Figura 9: Diagrama obtenido mediante el interpolador ID $\alpha=2$ para la variable sílice

10. Conclusiones y Recomendaciones

10.1. Conclusiones

- Dentro de los detritos generados durante la perforación se encontró que la sílice tiene una mayor concentración en los gruesos (tamaño de partícula mayor al d_{25} =malla 8) que en los finos (d_{75} =malla 50); mientras que en el azufre la concentración en los finos será mayor o igual que la de los gruesos.
- El error de muestreo para el procedimiento actual es del 26,31% y 21,32% para la sílice y el azufre respectivamente; mientras que con el procedimiento propuesto es del 13,3% y 11,46%. El tratamiento propuesto reduce el error actual de muestreo en casi un 50%.
- El error fundamental de muestreo calculado por medio de la fórmula de Pierre Gy determino un error total de muestreo de 0,0012 y 0,01 para la sílice y el azufre respectivamente, lo que se traduce en un error con respecto a la media con un 95% de confianza de 4,82% para la sílice y de 13,89% para el azufre, valores muy por encima de los requeridos para el proceso, producto del alto tamaño de partícula (5,4 mm) con el que actualmente se trabaja.



- El mejor interpolador para la asignación de la ley de una voladura para los parámetros SiO_2 y SO_3 es el Inverso a la distancia (ID) con un $\alpha=3$, el cual mostró ser el más preciso por tener valores más bajos del Promedio Absoluto del Error (PAE) y el Promedio del Cuadrado del Error (PCE) y eficiente por tener valores más altos de Efectividad de estimación (E).

10.2 Recomendaciones

- Debido a la comprobada segregación que sufre la muestra durante su tratamiento en la cantera y posterior transporte hacia el laboratorio, genera la necesidad de homogeneizar la muestra previa su reducción de tamaño, tanto en la cantera como en el laboratorio.
- Dentro del proceso de toma y preparación de muestras se recomienda:
 - Tomar la muestra por medio del uso de una bandeja radial, la cual teóricamente ha demostrado tomar muestras representativas del total de detritos generados; luego, reducir el tamaño de la muestra por medio de divisores rotatorios para los cual no es necesario la previa homogeneización del material. Se podría lograr una reducción en el tiempo de toma de muestra así como el número de persona requeridas para el proceso.
 - En el laboratorio, incluir una etapa de trituración y cuarteo previa a la pulverización con el objetivo de reducir el error fundamental de muestreo. Se podría reducir el error en un 30%.

[3] Franco, Ricardo., “Geología de la Concesión CENACA, cantón Guayaquil, Provincia del Guayas, Ecuador”, Guayaquil, Ecuador, 2009.

[4] Sagredo, Luis., “Estimación y control de leyes de producción Cemento Polpaico S.A.” Santiago, Chile, 1994.

[5] Villatoro, Mario, Henríquez, Carlos y Sancho, Freddy., “Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo”, Agronomía Costarricense 32(1): 95-105.

[6] Grijalva, Carlos, “Modelización geoestadística de una Yacimiento de Oro-Plata del Distrito Minero La Joya (Oruro-Bolivia) y Análisis de una aplicación en el Ecuador”, Guayaquil, Ecuador, 2004.

11. Bibliografía

- [1] Bustillo, Manuel y López, Carlos. “Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras”, Madrid, España, Entorno S.L., 1997.
- [2] Tapia, Jaime., “Preparación mecánica de minerales”, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile.